

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS MÉDICAS

**EFFECTOS NOCIVOS EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN CONSTANTE
A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN RADIACIÓN IONIZANTE A
NIVEL MUNDIAL**

MONOGRAFÍA

Presentada a la Honorable Junta Directiva de la Facultad de Ciencias Médicas de la
Universidad de San Carlos de Guatemala

Diana Esmeralda Yumán Contreras

Sara Lucía Alvarado Aldana

Médico y Cirujano

Guatemala, septiembre de 2022



El infrascrito Decano y la Coordinadora de la Coordinación de Trabajos de Graduación –COTRAG–, de la **Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala**, hacen constar que las estudiantes:

1. DIANA ESMERALDA YUMÁN CONTRERAS 201600086 3049835780116
2. SARA LUCÍA ALVARADO ALDANA 201600170 3005782370101

Cumplieron con los requisitos solicitados por esta Facultad, previo a optar al título de Médico y Cirujano en el grado de licenciatura, habiendo presentado el trabajo de graduación, en modalidad de monografía titulada:

**EFFECTOS NOCIVOS EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN
CONSTANTE A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN
RADIACIÓN IONIZANTE A NIVEL MUNDIAL**

Trabajo asesorado por Dr. Rodolfo Galdámez Orellana y revisado por Dr. Juan de Dios Martínez Velásquez, quienes avalan y firman conformes. Por lo anterior, se emite, firma y sella la presente:

ORDEN DE IMPRESIÓN

En la Ciudad de Guatemala, el cinco de octubre del año dos mil veintidós



Dra. Magda Francisca Velásquez Tohom
Coordinadora



**Dr. Jorge Fernando Orellana Oliva. PhD
Decano**

La infrascrita Coordinadora de la COTRAG de la **Facultad de Ciencias Médicas, de la Universidad de San Carlos de Guatemala**, HACE CONSTAR que las estudiantes:

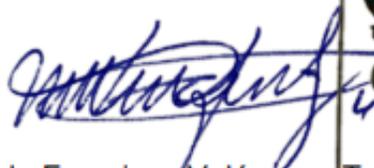
1. DIANA ESMERALDA YUMÁN CONTRERAS 201600086 3049835780116
2. SARA LUCÍA ALVARADO ALDANA 201600170 3005782370101

Presentaron el trabajo de graduación en modalidad de monografía, titulada:

**EFFECTOS NOCIVOS EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN
CONSTANTE A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN
RADIACIÓN IONIZANTE A NIVEL MUNDIAL**

El cuál ha sido revisado y aprobado por la **Dra. Bremily Kenelma Chinchilla Menéndez**, profesora de la COTRAG y, al establecer que cumple con los requisitos solicitados, se les **AUTORIZA** continuar con los trámites correspondientes para someterse al Examen General Público. Dado en la Ciudad de Guatemala, el cinco de octubre del año dos mil veintidós.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Magda Francisca Velásquez Tohom
Coordinadora



USAC
TRICENTENARIA
CENTRO UNIVERSITARIO METROPOLITANO -CUG-

**COORDINACIÓN DE TRABAJOS
DE GRADUACIÓN
-COTRAG-**

Guatemala, 5 de octubre del 2022

Doctora
Magda Francisca Velásquez Tohom
Coordinadora de la COTRAG
Presente

Le informo que nosotras:

1. DIANA ESMERALDA YUMÁN CONTRERAS
2. SARA LUCÍA ALVARADO ALDANA

Presentamos el trabajo de graduación titulado:

**EFFECTOS NOCIVOS EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN
CONSTANTE A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN
RADIACIÓN IONIZANTE A NIVEL MUNDIAL**

Del cual el asesor y el revisor se responsabilizan de la metodología, confiabilidad y validez de los datos, así como de los resultados obtenidos y de la pertinencia de las conclusiones y recomendaciones propuestas.

FIRMAS Y SELLOS PROFESIONALES

Asesor:
Dr. Rodolfo Galdámez Orellana

Revisor:
Dr. Juan de Dios Martínez Velásquez
Registro de personal: 20000408

Dr. Rodolfo Galdámez Orellana
Médico y Cirujano
Colegiado No. 4898

DR. JUAN DE DIOS MARTÍNEZ V.
MÉDICO Y CIRUJANO
COL. 7933 FISIATRIA



**FACULTAD DE
CIENCIAS MÉDICAS**
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

De la responsabilidad del trabajo de graduación:

Los autores son los únicos responsables de la originalidad, validez científica, de los conceptos y de las opiniones expresados en el contenido del trabajo de graduación. Su aprobación en manera alguna implica responsabilidad para la Coordinación de Trabajos de Graduación, la Facultad de Ciencias Médicas y la Universidad de San Carlos de Guatemala. Si se llegara a determinar y comprobar que se incurrió en el delito de plagio u otro tipo de fraude, el trabajo de graduación será anulado y el autor o autores deberá o deberán someterse a las medidas legales y disciplinarias correspondientes, tanto de la Facultad de Ciencias Médicas, de La Universidad de San Carlos de Guatemala y, de las otras instancias competentes, que así lo requieran.

DEDICATORIA

A Dios

Por permitirnos cumplir este logro tan maravilloso, por ser nuestra fortaleza durante todo este camino, darnos la sabiduría para enfrentarnos ante las adversidades.

A nuestros padres

Por todo el apoyo incondicional que han brindado desde el primer día que decidimos emprender este camino, ayudarnos a levantarnos ante situaciones difíciles y creer en nosotras sin importar nada.

A nuestros hermanos

Por su cariño, apoyo y tener siempre las palabras correctas en el momento preciso.

A nuestros familiares

Por su confianza y por sus consejos que influenciaron de manera positiva en nuestra carrera.

A nuestros revisores y asesor

Por el tiempo dedicado y la disponibilidad en asesor y revisar con detalle esta investigación, por sus enseñanzas, por guiarnos y ayudarnos en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por estar presente no solo en esta etapa de nuestras vidas, sino en todo momento ofreciéndonos lo mejor y buscando lo mejor para nuestra persona.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

Por habernos abierto las puertas y ser parte del gremio de profesionales egresados de esta casa de estudios.

A la Facultad de Ciencias Medicas

Por la oportunidad de adquirir y expandir nuestros conocimientos, así como a cada uno de los docentes que fueron parte de nuestra formación profesional.

A nuestros padres

Por ser los principales promotores de nuestros sueños, por desear y anhelar siempre lo mejor para nuestras vidas.

A nuestros compañeros

Por el compañerismo, la amistad y el apoyo moral durante la carrera.

A todos

Los que de alguna manera fueron parte importante para llegar a cumplir este sueño.

ÍNDICE

Prólogo	
Introducción	i
Objetivos	iii
Método y Técnicas	v
Capítulo 1. Radiación ionizante y su evolución en los estudios de imagen	1
Capítulo 2. Efectos nocivos a corto plazo en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante	12
Capítulo 3. Efectos nocivos a largo plazo en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante	23
Capítulo 4. Importancia de la radioprotección	34
Capítulo 5. Análisis	49
Conclusiones	57
Recomendaciones	59
Referencias bibliográficas	61
Apéndices	73
Siglaro	77

PRÓLOGO

En la elaboración de la presente investigación titulada “Efectos nocivos en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante a nivel mundial”, elaborada por las estudiantes Diana Yumán y Sara Alvarado, que cursan el último año de la Licenciatura de Médico y Cirujano de la Universidad de San Carlos de Guatemala; a quienes, al observar la falta de conocimiento al solicitar estudios de imagen que emiten radiación ionizante, les surge el interés por ampliar y dar a conocer los efectos nocivos de esta en la población expuesta.

El fin de esta monografía es proporcionar la base teórica de la implementación de la radiación ionizante en estudios de imagen y sus efectos adversos. Actualmente, estos estudios son utilizados con gran frecuencia de manera no controlada por médicos de diferentes especialidades, quienes no toman en cuenta los efectos nocivos, tanto a corto como a largo plazo. Con la intención de ser una guía de ayuda para toda persona que se desarrolla día a día, en el área de radiología.

Para alcanzar los objetivos de esta investigación se desarrollaron una serie de capítulos que abarcan desde la historia, la evolución, la implementación de la radiación ionizante, los efectos a corto y a largo plazo y, por último, pero no menos importante, se hace mención sobre la importancia de la radioprotección. Durante el desarrollo de esta monografía se irá comprendiendo la relevancia de cada uno de estos subtemas que fueron desarrollado y el sustento teórico que se tiene.

Esta investigación buscar interferir positivamente en el lector, para que se tenga un mejor uso de los estudios de imagen que emiten radiación ionizante, ya que, si bien son de ayuda diagnóstica, estos al igual que, los tratamientos médicos poseen efectos secundarios que pueden causar daños irreversibles en la vida de toda persona expuesta. Se espera ser de ayuda y motivación para futuras generaciones que deseen profundizar más en el tema. En conclusión, compartir el desarrollo de esta investigación, me hizo recordar la gran importancia, de no dejar a un lado la parte humana y recordar siempre que como profesional, se debe realizar todo en aras de obtener siempre beneficios para la salud y garantizar la calidad de vida.

Dr. Rodolfo Galdámez

INTRODUCCIÓN

La radiación es la emisión, difusión y transferencia de energía de algún elemento a otro, en modo de ondas o partículas del campo electromagnético. Las fuentes de radiación se clasifican principalmente en: no ionizante e ionizante; siendo esta última, la emitida durante los estudios de imagen en el campo de la medicina, la cual se define por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como radiaciones que desprenden ondas electromagnéticas que transportan tanta energía como luz, que son capaces de romper los enlaces entre las moléculas.¹ La utilización médica de las radiaciones ionizantes, y principalmente el uso de procedimientos de radiodiagnóstico e intervencionismo han representado la fuente primordial de radiación artificial hacia la población a nivel mundial.²

En los últimos años, con el avance tecnológico ha aumentado significativamente el uso de estudios diagnósticos que emiten radiación ionizante, aumento que se observa día a día en los servicios hospitalarios, en donde médicos de diferentes especialidades solicitan estudios diagnósticos como ayuda, sin control y consciencia limitada hacia los efectos nocivos de esta.³ Según reporta la OMS en el 2016, todos los años a nivel global, se realizan más de 3600 millones de pruebas radiodiagnósticas.⁴

Desde el descubrimiento de los rayos X en 1895 por Roentgen, se observaron los primeros efectos nocivos de la radiación ionizante, presentándose en 1901 el primer estudio de los efectos biológicos de esta en los seres humanos, a lo largo de su evolución estos efectos fueron nombrados como efectos deterministas y estocásticos.⁵ Los deterministas, son de tipo todo o nada, se presentan a corto tiempo de haber sido expuesto a la radiación, estas pueden producir lesiones en la piel, cataratas y alteraciones en gónadas. Por otra parte, los efectos estocásticos, son acumulativos y su probabilidad de aparición se incrementa con la dosis, esta comprende la aparición de cáncer y alteraciones genéticas.³

Se han realizado varios estudios alrededor del mundo que sugieren que la radiación ionizante es nociva para la salud de toda persona que se exponga a esta. En 2014 Tunchez Sarceño elaboró una investigación en el Hospital Roosevelt de Guatemala en donde señala que se presentan daños a la salud de los pacientes después de haber estado durante dos años en la unidad de cuidados intensivos recibiendo radiaciones (rayos X) diariamente y Adriana Cascon concluyó que los procedimientos médicos son la principal fuente de radiación ionizante tanto en el personal médico como en los pacientes que ingresan a las áreas hospitalarias.⁶

La presente compilación monográfica se conforma por cinco capítulos. En el primero se desarrolla la historia, la evolución, las generalidades y la implementación de la radiación

ionizante. El segundo capítulo aborda los efectos nocivos a corto plazo. Así mismo, el tercer capítulo, expone los efectos a largo plazo. El cuarto capítulo, informa sobre la radioprotección y su importancia. Adicionalmente, en el último capítulo, se realiza un análisis de lo concluido de los capítulos anteriores.

La relevancia de esta investigación radica en que la integración de los estudios de imagen que emiten radiación es una realidad incontrovertible, ya que intervienen tanto de manera preventiva como en el seguimiento del tratamiento y constituye un medio esencial para el diagnóstico temprano de infinidad de enfermedades. Sin embargo, también es una realidad que se mantiene un incremento sostenido del uso de estos, ya que muchas veces son utilizados sin tener claro lo que desean obtener del mismo. Por lo tanto, desde el punto de vista médico y ético, se debe exponer lo menos posible a radiación a los pacientes (principio de ALARA), porque en caso contrario se viola el principio de no maleficencia. Si los exámenes se usan con criterio y cuando están indicados (filosofía de la protección radiológica), los beneficios para el paciente superarán largamente los riesgos, al igual que para el personal hospitalario que se involucran en la realización de los estudios radiológicos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Describir los efectos nocivos en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante a nivel mundial.

Objetivos específicos

- Explicar qué es radiación ionizante y su evolución en los estudios de imagen.
- Exponer los efectos nocivos a corto plazo en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante.
- Exponer los efectos nocivos a largo plazo en pacientes con exposición constante a estudios de imagen que emiten radiación ionizante.
- Informar sobre la importancia de la radioprotección.

MÉTODO Y TÉCNICAS

Para la búsqueda de información, en esta monografía de compilación con diseño descriptivo, se utilizó la ayuda de los Descriptores de Ciencias de la Salud (DeCS), para términos en español y encabezados de temas médicos (MeSH) para términos en inglés; se apoyó en las siguientes palabras clave: radiación, ionización, efectos de la radiación, exposición a la radiación, fuentes de radiación, protección radiológica; además, se utilizó sinónimos y conceptos relacionados con el tema principal, por lo que se emplearon los operadores lógicos AND y OR (apéndice A).

La revisión de la literatura se llevó a cabo en los buscadores: Google Académico Beta, Scirus, Highwire Press, ClinicalKey, BVS, MEDES, Science.gov, BASE, HONcode Search. Se eligieron 83 referencias bibliográficas a criterio de los autores, entre estas artículos médicos de revisión, revistas científicas, guías terapéuticas, a través de bases de datos mundiales siendo estas: HINARI, PubMed-MEDLINE, EBSCO, Embase, Cochrane y bases de datos hispanoamericanas siendo estas SciELO, REDALYC, LILACS, Pubindex.

Para seleccionar la información se utilizaron los siguientes criterios de inclusión: publicaciones en español e inglés, de todo el mundo, publicadas desde el año 2015 al año 2022; con énfasis en las actualizaciones y evolución de la implementación de dicha radiación. Mientras que los criterios de exclusión fueron: artículos duplicados y estudios que declaren conflicto de interés. Fueron tomados como unidad de estudio: metaanálisis (revisiones sistemáticas cuantitativas), revisiones sistemáticas (cualitativas), ensayos clínicos, de cohorte, de casos y controles, de revisión y guías de práctica clínica, artículos médicos de revisión, revistas científicas, tesis, monografías de graduación con diseño analítico y descriptivo (apéndice B).

La información recopilada fue organizada en carpetas en la computadora, recursos de almacenamiento de información como Drive y se realizaron fichas bibliográficas, resúmenes y comentarios para su fácil manejo. Se realizaron las referencias bibliográficas con base en las guías para cita y elaboración de referencias bibliográficas estilo Vancouver. Finalmente, se redactó un escrito para explicar de forma sencilla y precisa cómo, de forma teórica, la radiación ionizante emitida por estudios de imagen causa efectos a corto y largo plazo.

CAPÍTULO 1. RADIACIÓN IONIZANTE Y SU EVOLUCIÓN EN LOS ESTUDIOS DE IMAGEN

SUMARIO

- **Inicios de la radiación**
- **Generalidades**
- **Implementación de la radiación ionizante**

Desde el descubrimiento de la radiación ionizante, esta se ha vuelto un elemento importante para la ciencia, siendo hasta el día de hoy, fundamental para el diagnóstico de muchas enfermedades, que da así también el inicio del descubrimiento de algunos efectos nocivos para la salud; por lo que a continuación se desarrolla su historia, los primeros aparecimientos de efectos adversos, la evolución en medicina y los términos que ayuden a su comprensión.

1.1. Inicios de la radiación ionizante

1.1.1 Historia a nivel mundial

El 8 de noviembre de 1895, el físico Wilhelm Conrad Roentgen realiza el descubrimiento de los rayos X.⁷ En esta época los rayos catódicos eran tema con mucho valor científico, por lo que Roentgen como buen físico se encontraba experimentando con ellos en tubos de alto vacío, cuando de manera incidental notó una luminosidad proveniente de un papel pintado con un químico fluorescente sensible a la luz, conocido como platinocianuro de bario.^{7,8} Este papel se ubicada a cierta distancia de un tubo de descarga de gas con el que se encontraba trabajando, el cual cubrió y notó que aun cubriéndolo con cartón, esta fluorescencia persiste.⁸

En este momento Roentgen se da cuenta que descubrió algo completamente nuevo, por lo que pasó días posteriores investigando exhaustivamente estos rayos, los cuales denomina como rayos X, por desconocer el tipo de energía producida; realiza la primera radiografía de la historia, con la mano de su esposa, la Sra. Bertha Ludwing.^{7,8} Por consiguiente, los descubrimientos realizados por Roentgen fueron publicados en el artículo “Una nueva clase de rayos” en la revista *Ueber eine neue art von Strahlen*, por lo que ganó en 1901, el primer Premio Nobel en Física.⁷

El año siguiente al descubrimiento de los rayos X, el científico, Henri Becquerel, descubrió el fenómeno, radiactividad, después de haber guardado en un cajón, placas

fotográficas al lado de un mineral con uranio y que al revelarlas estas se encontraran afectadas por radiación.⁵

Poco después de este acontecimiento la química, Marie Sklodowska-Curie, con investigaciones complementarias, fue la primera que acuñó la palabra radiactividad. Junto con su esposo, Pierre Curie, descubrieron que conforme el uranio iba emitiendo radiación, este se iba transformando en otros elementos, los cuales se denominaron polonio y radio, compartiendo ambos el Premio Nobel de Física en 1903 con Henri Becquerel.⁵

1.1.2 Historia en Centroamérica

Centroamérica inicia con la implementación de los rayos X un año después de su descubrimiento. Guatemala, forma parte de los primeros países de Latinoamérica junto con Chile, en adoptar esta nueva tecnología. El Dr. González, salvadoreño que reside en Guatemala, es quien utilizó por primera vez la radiación X en Guatemala en 1896, quien tradujo al francés un artículo del descubrimiento y construyó una máquina que le permitió realizar las primeras radiografías.⁹

La primera radiografía realizada en Guatemala fue en animales el 16 de mayo de 1896. Hasta, el 2 de diciembre de 1897, se logra hacer la primera prueba en el ser humano. La primera radiografía que se reportada fue de la mano izquierda de un joven de 16 años con padecimiento de osteomielitis tuberculosa en las falanges. Cabe destacar que, en 1907 el Hospital General San Juan de Dios, apertura el primer Departamento de Radiología y Electroterapia por el Dr. Mario Wunderlich. En 1923, se inaugura el Departamento de Rayos X en Quetzaltenango y seis años más adelante el Hospital Militar abre el Departamento de Rayos X con un equipo elaborado por la empresa Lieber-Flarsheim.⁹

En 1980 se realiza la fundación del Centro Scan de Guatemala por los doctores Francisco Arredondo y Marco Tulio Polanco y en 1996 se inició el Postgrado de Radiología en el Hospital Roosevelt y en el Hospital General San Juan de Dios.⁹

Costa Rica inicia la práctica de radiología a comienzos de 1904 con San José Brunetti, profesor italiano, que realizó la primera radiografía con el primer equipo que lleva a la ciudad de San José. El programa de Tecnología Radiológica tiene inicio en 1962 y siete años después se apertura el Hospital México con su Departamento de Radiología. El Postgrado de Radiología se registró en 1979.⁹

Honduras en 1929, tras pedir el primer equipo de rayos X a Alemania, apertura el Departamento de Rayos X. La ley de Actividades Nucleares y Seguridad Radiológica se decretó

en 2009 y en 2014 el Reglamento de Autorizaciones para Instalaciones Radiactivas y Equipos Generadores de Radiaciones Ionizantes, el cual controla las exposiciones del paciente, del público y las ocupacionales.⁹

1.1.3 Evolución de los rayos X

Los años siguientes al descubrimiento de los rayos X fueron claves para el desarrollo del diagnóstico y tratamiento radiológico. Por las limitaciones técnicas y de conocimiento, la aplicación de los rayos X fue limitada a la descripción de estructuras óseas de las extremidades. A medida que el tiempo pasaba y el conocimiento se ampliaba se comenzaron a reconocer distintas alteraciones anatómicas y enfermedades en los huesos, permitiendo realizar tratamientos más exitosos. Es preciso señalar que la primera imagen radiográfica de un órgano del tórax se realizó por el escóses John MacIntyre, utilizando un tiempo de exposición de 60 minutos, con lo que se obtenía una imagen borrosa por lo que el diagnóstico solía ser limitado. Asimismo, los primeros en usar agentes de contraste fueron Eduard Hachek y Otto Lindenthal, quienes utilizaron una mezcla compuesta por cal, mercurio y petróleo, para lograr la captación de los vasos sanguíneos de una mano amputada.⁸

Distintas ramas de la medicina fueron probando los rayos X en su área, con lo que lograron nuevas averiguaciones. Los urólogos también se empezaron a interesar y en 1896 se logra detectar un cálculo renal por medio de la radiografía. En ginecología también se hicieron nuevos descubrimientos con la práctica de poner el cráneo de un feto dentro de la pelvis de un cadáver femenino, usando un tiempo de exposición de 1 hora 30 minutos.⁸

El dermatólogo Leopold Freund fue el primero en llevar a cabo radioterapia. La paciente era una niña que tenía un lunar con vello que abarcaba todo su cuello y espalda, por lo que los padres deseaban que se le quitara el mismo utilizando rayos X. Esta niña recibió radiación durante 10 días, 2 horas de radiación diaria; sin embargo, al poco tiempo aparecieron lesiones cutáneas y en el transcurso del tiempo, también llegó a desarrollar una úlcera grande con necrosis central.⁸

Hoy en día el diagnóstico de múltiples enfermedades se apoya en la intervención de distintos estudios de imagen.⁷ En la actualidad la radiología diagnóstica ha cambiado significativamente. Los avances en la tecnología han ido modificando la práctica médica y ahora se cuenta con radiología intervencionista, ecografías, tomografías computarizadas, resonancias magnéticas, resonancias y tomografías por emisión de positrones.^{7,8} Como resultado, el método de trabajo de los radiólogos también ha ido evolucionando en los últimos 20 años. Se tiene un mayor compromiso y abordaje clínico, que mejoran la seguridad y atención del paciente.⁸

1.1.3.1 Primeros hallazgos de efectos adversos

Desde el descubrimiento de los rayos X se comenzaron a descubrir daños en la salud. En 1896 se hicieron hallazgos de problemas de eritemas, depilación, quemaduras, amputaciones e incluso la muerte.¹⁰ Es importante destacar, de las principales personas en sufrir los efectos de la radiación fue Henri Becquerel, quien sufre daños en la piel por un vial de radio que coloca en su bolsillo.⁵

Roentgen, descubridor de los rayos X, muere en 1923 por cáncer de intestino y Marie Curie, quien también se expuso constantemente a la radiación, muere en 1934 por una enfermedad hematopoyética. Del mismo modo, a finales de la década de los 50, se registraron que por lo menos 359 de las primeras personas en trabajar con radiación, habían muerto a causa de la exposición a la misma.⁵

1.2 Generalidades

1.2.1 El átomo y el núcleo

El átomo es definido como la partícula más diminuta en la que se puede fraccionar un elemento sin verse comprometidas sus propiedades químicas. Todo átomo tiene un núcleo conformado por dos partículas, los protones, con carga positiva y los neutrones, con carga neutra.^{5,11} En la corteza, se ubican los electrones con carga negativa, permitiendo obtener un átomo neutro si el número es igual al de protones.¹¹

Un elemento químico se determina por el número de protones que contiene en sus átomos. Los átomos que tienen el mismo número de protones, pero número distinto de neutrones, se llaman isótopos.⁵

Los átomos pueden ser estables o inestables. Se consideran inestables por no tener la cantidad de protones y neutrones adecuada para mantener sus partículas unidas por lo que se transforman esporádicamente, liberando su energía en forma de radiación, por lo que se denominan radionucleidos. Esta energía puede llegar a hacer interacción con otros átomos y lograr su ionización.^{12, 5}

1.2.2 Ionización

Se le denomina ionización al proceso por el cual un átomo pasa a estar cargado negativa o positivamente por la pérdida o ganancia de electrones.⁵

1.2.3 Radiación

La radiación se define como la energía que se transmite por medio del espacio, en forma de ondas, denominadas ondas electromagnéticas.^{11, 12}

1.2.3.1 Clasificación

1.2.3.1.1 Según su naturaleza

a. Radiaciones electromagnéticas

La radiación electromagnética es la propagación ondulatoria de energía en forma de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares.¹¹

b. Radiaciones corpusculares

La radiación corpuscular se define como la transmisión de energía unida a partículas subatómicas, generalmente de gran velocidad, a través de un medio material.¹¹

1.2.3.1.2 Según su efecto biológico

a. Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes, también conocidas como de alta energía, tienen la capacidad suficiente para ionizar la materia, al arrebatar electrones de su estado de unión con su átomo. Estos procesos pueden llegar a provocar la ruptura de los enlaces químicos e incluso llegar a tener cambios genéticos en las células.^{13, 14, 15} Estas pueden ser:

- Alfa (α): estos átomos son inestables por presentar más neutrones que protones en su núcleo por lo que liberan partículas de gran peso cargadas positivamente para hacerse más estables. La transmisión de esta radiación generalmente ocurre en elementos muy pesados como en el caso del radio y uranio. Son incapaces de atravesar la piel y causar daños a órganos a menos que sean ingeridos.^{12, 16}
- Beta (β): estas partículas tienen carga negativa y sus núcleos liberan partículas más pequeñas que las alfa por lo que reaccionan menos con la materia, pero tienen mayor penetración. Estas pueden ser detenidas por láminas de aluminio, unos centímetros de agua o unos metros de aire.^{12, 16}
- Gamma (γ): su origen proviene de un núcleo excitado, es decir, tras la emisión de una partícula alfa o beta. Estas no poseen ni carga ni masa, por lo que no tienen cambios en su estructura cuando se emiten. Poseen un alto nivel de penetración debido a su longitud pequeña de onda y tienen menor de ionización que las partículas alfa y beta.^{11, 16}

- Rayos X: estos tienen su origen del choque a gran velocidad contra la materia de electrones acelerados, provocado por el cambio de los estados de energía de un átomo. Su longitud es corta y su propagación es lineal. Cuentan con un gran nivel de penetración y su de ionización es tenue.^{6,16}

b. Radiaciones no ionizantes

Las radiaciones no ionizantes son de menor intensidad que las ionizantes, por lo que no son capaces de arrancar electrones de los átomos que componen la materia.¹¹ Esta puede producir calor y algunos efectos fotoquímicos al interactuar sobre el cuerpo.¹³

1.2.3.2 Fuentes de radiación

1.2.3.2.1 Externas

De origen natural, también llamadas radiación de fondo, son las producidas por la radiación cósmica presente en la naturaleza o a causa de material radiactivo presente en la corteza terrestre.¹⁶

La dosis de radiactividad presente en los lugares dependerá de factores como: el nivel del mar, los materiales de construcción, la conformación del suelo y la evolución tecnológica. Algunos alimentos y el agua potable también forman parte de la radiación en nuestro cuerpo.¹¹

1.2.3.2.2 Internas

Estas pueden ser de origen natural, procedentes del medio ambiente al ingerir o inhalar radionucleidos como: potasio-40, radio-226, carbono-14 y de origen artificial como las procedentes de: aparatos de rayos X, aceleradores de partículas, sustancias radiactivas y reacciones nucleares.^{11,16}

1.2.4 Magnitudes fundamentales

1.2.4.1 Magnitudes físicas

- Actividad: es el número de transformaciones nucleares de energía por segundo. Su medición es en desintegraciones por segundo y su unidad de medida es el Becquerelio (Bq).^{5,17}
- Dosis absorbida: cantidad de energía que es depositada por radiación en una unidad de masa de un material. Se mide en gray (Gy) que es equivalente a julios por kilogramo.^{5,11}

1.2.4.2 Magnitudes calculadas

- Dosis equivalente: mide el potencial de la radiación para causar daños a un órgano o tejido. Es el resultado de la multiplicación de la cantidad absorbida y un factor de ponderación de la radiación (W_R). Su unidad de medición es en Sievert (Sv) que es equivalente a julios por kilogramo.^{5,11}

Factores de ponderación de la radiación W_R .¹¹

- Fotones $\rightarrow 1$
- Electrones y muones $\rightarrow 1$
- Neutrones, estos varían según su kiloelectronvoltio (keV) o megaelectronvoltios (MeV)
 - $< 10 \text{ keV} \rightarrow 5$
 - $10 \text{ keV} < X < 100 \text{ keV} \rightarrow 10$
 - $100 \text{ keV} < X < 2 \text{ MeV} \rightarrow 20$
 - $2 \text{ MeV} < X < 20 \text{ MeV} \rightarrow 10$
 - $> 20 \text{ MeV} \rightarrow 5$
- Protones de energía $> 2 \text{ MeV} \rightarrow 5$
- Partículas alfa, núcleos pesados y fragmentos de fisión $\rightarrow 20$ ¹¹
- Dosis efectiva: mide el riesgo posible de aparición de efectos estocásticos, esto dependiendo del tipo de radiación y tipo de órgano.¹¹ Es la dosis equivalente multiplicada por el factor de ponderación de un tejido (W_T). Su unidad de medida es en Sievert (Sv).^{5,11}

Factor de ponderación de los tejidos (W_T)¹¹:

- Pulmones, mamas, médula ósea, estómago $\rightarrow 0.12$.
- Gónadas $\rightarrow 0.08$.
- Tiroides, hígado, vejiga, esófago $\rightarrow 0.04$
- Piel cerebro, superficie ósea, glándulas salivares $\rightarrow 0.01$ ¹¹

- Dosis efectiva colectiva: esta consiste en la suma de todas las dosis efectivas percibidas por un grupo de personas.⁵
- Tasa de dosis: consiste en la tasa de la dosis absorbida por segundo, se expresa como (Gy/s).⁶

1.2.5 Exposición a la radiación

1.2.5.1 Tipos

- Exposición externa: el organismo se expone a fuentes exteriores, es decir no existe contacto directo con el material que está emitiendo la radiación.^{11,17} Un ejemplo de ello son los rayos X, fuentes encapsuladas y aceleradores de partículas.⁸¹
- Exposición interna: el organismo se ve expuesto a fuentes interiores. Este se da en el caso de ingerir, inhalar o ingresar al torrente sanguíneo algún radionucleido. Se puede eliminar de manera natural por el propio cuerpo o por medio de tratamiento.^{11,17}
- Exposición continua: es la exposición prolongada a una fuente de radiación externa o exposición a una fuente interna por la integración persistente de radionucleidos.¹⁷
- Exposición única: es la exposición de duración breve a una fuente de radiación externa o exposición a una fuente interna por la integración de radionucleidos por un tiempo corto.¹⁷
- Exposición global: exposición realizada en todo el cuerpo, se denomina homogénea.¹⁷
- Exposición parcial: exposición en una sola parte del cuerpo, se considera como no homogénea.¹⁷

1.2.5.2 Clasificación

- Ocupacional: se refiere a la exposición de radiación a los trabajadores.¹¹
- Médica: exposición a radiación a las personas por diagnóstico o tratamiento.¹¹
- Pública: comprende al resto de personas no incluidas en las clasificaciones anteriores.¹¹

1.2.6 Efectos

- Efectos estocásticos o probabilísticos: son los efectos que tienen posibilidad de aparecer, pero no por fuerza lo hacen.¹⁶

- Efectos no estocásticos o determinísticos: efectos que aparecen si la radiación recibida supera cierto umbral. Pueden provocar la muerte celular y disfunción en un órgano o tejido.^{11,16}

1.2.6.1 Terminología

- Radiosensibilidad: predisposición a eventos tisulares negativos considerados como efectos de la radiación, no cancerosos y que se atribuyen a la muerte celular. Generalmente se relaciona con los daños en el ADN sin reparar.¹⁸
- Radiosusceptibilidad: predisposición a cánceres generados por radiación, efectos atribuidos a la transformación celular e inestabilidad genómica. Estos se relacionan con los daños en el ADN mal reparados.¹⁸
- Radiogeneración: las respuestas de radiogeneración son efectos adversos no cancerígenos, que se atribuyen con los mecanismos de aceleración del envejecimiento. Este se relaciona con el daño en el ADN no reparado que es tolerado y puede acumularse en las células.¹⁸

1.3. Implementación de la radiación ionizante

1.3.1 Radiodiagnóstico

En el campo de la medicina es muy común la utilización de rayos X en el diagnóstico de varias patologías y en algunos procedimientos terapéuticos. La fuente de estos radiodiagnósticos proviene de un tubo de rayos que transmite radiación para ser captada por los tejidos en menor o mayor medida que al llegar al detector dará lugar a la formación de una imagen.¹¹

Los rayos X se forman cuando se ataca un cuerpo con electrones que van a alta velocidad y son frenados bruscamente, parte de la energía se transforma en calor y el resto de esta se traduce en rayos X.¹¹ Entre estas pueden estar la radiografía convencional, fluoroscopia, tomografía computarizada (TC) y mamografía.¹⁹

1.3.2 Generación de rayos X

Los rayos X se generan en un tubo de vidrio al vacío con dos polos, uno negativo denominado cátodo y otro positivo llamado ánodo. El cátodo consiste en un filamento, compuesto por tungsteno, por donde pasa una corriente medida en mA y el ánodo en una placa hecha de cobre. Los electrones que son generados en el cátodo son acelerados por alto voltaje

hacia el ánodo, teniendo como resultados la generación de los rayos X por medio de la colisión.¹³

1.3.3 Estudios de imagen

1.3.3.1 Radiografía convencional

Este consiste en la formación de imágenes que permiten el estudio de las estructuras internas del cuerpo.¹⁷ Estas son el resultado de la transmisión de rayos X a través del organismo, que al salir del mismo son captados por una película que da origen a la imagen.^{11,19} Una de las radiografías más frecuentes en el diagnóstico médico es la de tórax, que proporciona una dosis de 0.1 mSv.³ Cabe señalar que, el uso de la radiación para la formación de placas fotográficas ha sido el método más utilizado en el ámbito de la medicina.¹⁹

1.3.3.2 Tomografía computarizada

La TC es un estudio de imagen que proporciona imágenes transversales de alta calidad del área del cuerpo explorado. En comparación con el resto de los métodos este es el que más dosis colectiva aporta. Según estudios de la *National Council on Radiation Protection and Measurements*, realizado en Estados Unidos, este es el responsable del 50% de radiación emitida en las prácticas médicas.^{3, 20} Sin embargo, el uso de esta en el campo de la medicina representa el 98% de la dosis de radiación poblacional artificial y el 20% de la exposición total. En promedio la dosis de 1 TC equivale a la dosis de 75 radiografías de tórax.³

1.3.3.3 Fluoroscopia

En las técnicas médicas intervencionistas cada vez se vuelve más común el uso de rayos X para las diferentes especialidades. La Cardiología es una de las que más la implementa a través de la angiografía. Este método consiste en la toma de imágenes en tiempo real, diferenciándose de tal manera de las convencionales, por lo que estos no tienen un tiempo exacto para finalizar el diagnóstico por lo que su exposición es mayor, exponiendo más tanto al paciente como al médico.²¹

1.3.3.4 Mamografía

La mamografía es el estudio radiológico de elección para el tamizaje de lesiones sospechosas de malignidad en el tejido mamario.²² El cáncer de mama es la neoplasia más común en la mujer alrededor de todo el mundo por lo que este tipo de método es utilizado de manera rutinaria.²³ La radiación utilizada en estos estudios son clasificados como de baja energía, debido a que la cantidad suministrada a las células mamarias es de 2-3 mGy.²² La

dosis absorbida de radiación por este tipo de examen es la DGP, que se define como la cantidad captada en promedio en el tejido mamario, con un 50% de tejido glandular y un 50% de tejido adiposo.²⁴

CAPÍTULO 2. EFECTOS NOCIVOS A CORTO PLAZO EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN CONSTANTE A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN RADIACIÓN IONIZANTE

SUMARIO

- **Efecto determinista**
- **Síndrome de irradiación aguda**
- **Lesiones cutáneas por radiación**

El uso de la radiación ionizante en estudios de imagen ha tenido un gran auge en diferentes especialidades médicas, Sin embargo, como en todo procedimiento médico, se pueden presentar situaciones adversas, por eso la importancia de conocer los efectos agudos que se pueden dar después de un procedimiento que emite radiación ionizante; por lo que a continuación se explica, primero, el efecto determinístico o efecto a corto plazo para posteriormente profundizar sobre las formas más comunes de presentación de estos.

2.1 Efecto determinista

2.1.1 Definición

El efecto determinista o también llamado reacción tisular es todo aquel que provoca cambios en los tejidos humanos, esto debido a una desnaturalización de proteínas esto en respuesta a la exposición a radiación ionizante.²⁵ Entre los efectos deterministas se pueden mencionar como ejemplos la esterilidad, las cataratas, el eritema, los trastornos hematopoyéticos y el síndrome agudo por radiación.¹³

2.1.2 Mecanismo

Las lesiones en el ADN son restituidas por los mecanismos propios de la reparación y pueden impedir la síntesis de proteínas o la muerte de la célula por daño de la capacidad reproductiva. Las lesiones en el ADN pueden quedar limitadas a nivel molecular y ser restauradas, o ser fuente para la aparición de células mutadas.²⁶

2.1.3 Naturaleza

Los efectos deterministas son de naturaleza somática.²⁷ Su naturaleza se ve influenciada por la edad de la persona irradiada, la sensibilidad celular, el tejido expuesto, la velocidad, la dosis total, la presencia de morbilidades como diabetes, el hipertiroidismo, factores que

intervienen en el tipo de lesión que se presente, ya que modifican la respuesta normal a la radiación.^{25,28}

2.1.4 Gravedad

Los sistemas de regeneración rápida son, habitualmente los primeros en sufrir efectos determinísticos; así, la piel y los tejidos hematopoyéticos se caracterizan por ser radiosensibles, por otra parte, las células del tejido nervioso y muscular son las más resistentes.²⁶ Según la intensidad de la dosis de radiación recibida, tiempo de exposición y la radiosensibilidad del tejido las manifestaciones pueden presentarse tan solo en horas y comportarse de manera transitoria o permanente.²⁵

2.1.5 Relación dosis-efecto

Los efectos que ocurren en el ser humano son dependientes de la cantidad de dosis recibida.²⁹ Estos efectos poseen además un umbral, que tiene que sobrepasar para manifestarse a nivel clínico.²⁷ Está demostrado que una dosis de 3 a 4 Sv produce la muerte en el 50 % de los casos.²⁸ De los efectos más significativos presentados en los tejidos y órganos, se deben a lesiones celulares y pérdida de capacidad reproductiva.²⁶

2.2 Síndrome de irradiación aguda

2.2.1 Manifestaciones hematopoyéticas

El organismo humano se ve afectado por distintas alteraciones, hablando del sistema hematopoyético, el cual está formado por médula ósea, sangre y tejido linfático, el efecto más significativo es el ocurrido en las células madre sanguíneas, este daño se ve manifestado por un descenso de células sanguíneas periféricas, siendo la línea blanca la que sufre un mayor daño. Estas alteraciones se ven influenciadas por factores como el uso de equipo de protección, tiempo que dura la exposición y la cantidad de tejido expuesto a radiación ionizante.³⁰

Las pruebas de laboratorio consideradas de primera instancia, útiles para evaluar los daños a nivel del sistema hematopoyético son: el hemograma completo; el cual proporciona de manera cuantitativa la concentración de eritrocitos, leucocitos, plaquetas. También, proporciona datos como valor de la hemoglobina, el hematocrito, índices eritrocitarios y el porcentaje de reticulocitos.³⁰

Estas pruebas mencionadas con anterioridad facilitan la realización de una evaluación y monitoreo para la detección temprana de cambios a nivel hematológico. Esto con el fin de

realizar periódicamente controles a población expuesta a radiación ionizante y prevenir daños irreversibles.³⁰

“Un estudio realizado en los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes de los Hospitales de tercer nivel de la ciudad de Sucre en Bolivia, refiere que el 76% de los mismos presentó valores bajos de leucocitos y el 56% valores bajos de linfocitos, reflejando además disminución en los valores de eritrocitos, hemoglobina, hematocrito y reticulocitos”³⁰.

En Buenos Aires, Argentina, fue realizado un estudio titulado *Estudio preliminar de los efectos de las radiaciones gamma sobre los glóbulos rojos humanos*, en el cual se determina que, de las propiedades viscoelásticas de los eritrocitos, la viscosidad superficial de membrana es la única que presenta daños importantes. Lo cual refleja que la alteración principal ocurre en la bicapa lipídica, alterando la permeabilidad de esta, que da como resultado una alteración de la agregación eritrocitaria. Adicional se realiza un análisis de los iones plasmáticos se observa un incremento de la concentración de potasio y descenso en la concentración de sodio, las cuales se hacen más importantes más en dosis mayores.³¹

De los efectos ocasionados por la radiación ionizante, está la leucopenia y linfopenia a nivel periférico. A dosis de 2 a 3 Sv, se puede destruir una gran cantidad de linfocitos, lo que se traduce como linfopenia, que da como resultado, daños en la inmunidad. Por las alteraciones que sufren las células hematopoyéticas, también, se presenta granulocitopenia y trombocitopenia en un lapso de tres a cinco semanas.³⁰

En los últimos 42 años, se realizó una revisión rigurosa de diferentes estudios científicos, estos se llevaron a cabo en unidades de radiodiagnóstico, medicina nuclear, radioterapia cardiología y angiografía intervencionista, en 20 estudios de estos se encontró aberraciones cromosómicas en linfocitos, teniendo procedencia 40% de Europa, 30% de Asia, 25% de América y por último un 5% de África. En cariogramas realizados a linfocitos en muestras tomadas de sangre periférica, se identifican diversas aberraciones cromosómicas entre estas:³²

- Rotura de cromátidas (GAP)
- Fracturas de cromosomas
- Cromosomas acéntricos
- Mitosis poliploidía

2.2.2 Manifestaciones gastrointestinales

En el síndrome de irradiación aguda, se desarrollan una serie de síntomas gastrointestinales entre estos se puede mencionar los vómitos, diarrea, cólicos intestinales, salivación y la deshidratación.⁵

Con dosis menores o iguales 8 Gy, las personas pueden manifestar síntomas de enfermedad por radiación. Sin embargo, pueden no presentar síntomas en primera instancia y fallecer por lesiones gastrointestinales en un lapso de una a dos semanas después.⁵ En dosis mayores de 15 a 20 Gy, recibida en la región abdominal, el revestimiento epitelial del intestino delgado sufre lesiones que comprometen de manera significativa el estado de salud de quien es irradiado, hasta provocar la muerte. Con dosis menores a este rango el revestimiento epitelial logra una regeneración rápida y reanuda su estado habitual en un lapso de 21 días.²⁶

La mucosa intestinal requiere de 10 a 50 Gy para sufrir daños irreversibles. Estos daños se manifiestan en tres etapas. La etapa prodrómica se caracteriza por la presencia de anorexia, náuseas, vómitos y diarrea. En la etapa de latencia se observa una mejora del estado de salud, que tiene una duración de dos a tres días. Durante la última etapa reaparecen los síntomas que se manifiestan en la etapa prodrómica y culmina con la muerte, todo esto suele ocurrir en un lapso de dos semanas.²⁶

En dosis mínimas de radiación, se puede posponer la aparición de la enfermedad y provocar sintomatología sin importancia, con dosis de 2 Gy es frecuente que se presenten vómitos, pero no identificar lesiones intestinales. Sin embargo, se puede producir la muerte pasado unos meses, esto debido al daño sufrido en la médula ósea.⁵

La irradiación abdominal comparada a la radioterapia craneal y a la irradiación corporal total se relaciona ampliamente con alteraciones en el perfil lipídico, resistencia a la insulina y composición corporal. También, se le ha asociado con la deficiencia de la hormona del crecimiento, cambios en la distribución de grasa y alteración de la función pancreática. En el hígado se pueden observar cambios a largo plazo, manifestados por alteraciones en el metabolismo de lípidos, esto se refleja por aumento de los niveles de triglicéridos, lipoproteínas de baja densidad y ácidos grasos libres. En el tejido adiposo se ha observado una sensibilidad importante a la exposición a radiación.³³

En la actualidad, por el conocimiento adquirido por diversos estudios se afirma que uno de los determinantes fundamentales en la respuesta biológica a la radiación es la incitación de alteraciones que sufre el ADN, las proteínas y los lípidos, esto da lugar a una secuencia de respuestas complementarias de las células o tejidos y fundamenta la naturaleza de los efectos

de la radiación. La intensidad de la alteración causada inicialmente es valiosa tanto para crear base para el desarrollo de medidas de radioprotección, sino también genera interés por parte de diversas áreas de la biología, que tiene aplicación en la fisiopatología humana.³³

2.2.3 Manifestaciones neurológicas

La radiación ionizante tiene diversos efectos a nivel del cerebro y las funciones cognitivas, que de manera directa puede provocar alteraciones a nivel del sistema nervioso central y de manera indirecta puede causar daños a distintos sistemas, esto debido al aumento de actividad que sufre el sistema nervioso. El sistema nervioso central se puede ver dañado tanto en dosis mínimas como al recibir grandes dosis, esta afectación ocurre debido a estrés oxidativo, alteración en la función de las mitocondrias, degeneración de proteínas y finaliza con la muerte celular apoptótica que puede causar enfermedades neurodegenerativas.³⁴

Al recibir una dosis de 50 a 100 Gy de radiación ionizante en el cuerpo, el sistema nervioso central inicia con una serie de manifestaciones, las cuales se presentan en etapas, la primera es la etapa prodrómica en la cual aparecen síntomas como cefalea, fiebre, náuseas, vómito, diarrea e hipotensión. Transcurrido 30 minutos se inician con síntomas psíquicos, como irritabilidad y confusión acompañando a estos se presentan síntomas neurológicos, entre estos el más característico la pérdida de consciencia. La etapa de latencia tiene pocas horas de duración, en seguida aparecen convulsiones, coma progresivo y puede ocurrir hasta la muerte en un lapso de uno o dos días.²⁶

A dosis bajas de radiación, la expresión de genes sufre cambios que se ven involucrados en el ciclo celular, la síntesis y reparación del ADN. En el cerebro, las células no proliferan y son más propensas a la acumulación progresiva de daños en el ADN. En los últimos años, el daño y reparación del ADN se ha involucrado de gran manera en las enfermedades neurológicas. En enfermedades neurodegenerativas como en la enfermedad de Parkinson y la enfermedad de Alzheimer, se asocian con daños en la regeneración de roturas de cadena simple o de doble cadena del ADN.³⁴

En estudios realizados en las primeras etapas de evaluación de los cambios en el ADN en respuesta a la radiación ionizante, que da importancia a la arquitectura de la radiación en su interacción con el daño del ADN, que da gran valor a las aberraciones cromosómicas y la muerte celular. En otro trabajo se analiza el genoma de fibroblastos humanos sufre daños en el ADN luego de la irradiación con rayos X.³⁵

La radiación ionizante a nivel del cerebro utiliza la vía microglía y la activación endotelial para desarrollar las reacciones inflamatorias. La microglía se activa al haber roturas de doble

cadena, para posteriormente activar la producción de proteínas asociadas a la inflamación, esta activación es mediada por la vía NF κ B. En las neuronas dañadas interviene la calreticulina, esta es detectada por la microglía y provoca la fagocitosis no solo de las neuronas dañadas sino también de las sanas. La activación surgida en la microglía produce un aumento en la secreción del ligando 2 de quimiocina y su receptor. A través de estos receptores específicamente los receptores de quimiocina CC tipo 2 los macrófagos entran en la barrera hematoencefálica. Posteriormente, la P-selectina inicia su regulación en las células endoteliales del cerebro al recibir radiación.³⁴

Actualmente, el sistema nervioso central ha perdido la característica de ser resistente a la radiación. Ahora, se considera susceptible a esta, incluyendo la exposición a dosis mínimas. Esta susceptibilidad parece depender de la baja capacidad antioxidante, la alta tasa metabólica y la presencia de células.³⁶

2.2.4 Manifestaciones cardiovasculares

En las manifestaciones cardiovasculares es importante mencionar de primera instancia a las células endoteliales por el papel que llevan a cabo en estas manifestaciones. Este tipo de células forman una monocapa que las convierte en el revestimiento interno de toda la vasculatura, tiene una función primordial en este tipo de enfermedades, por ser la barrera entre la sangre y la matriz subendotelial, por lo que sirven de modulador en la coagulación de la sangre, el tono vascular y la respuesta inmunitaria e inflamatoria.³³

“Las células al estar expuestas a radiación ionizante, inmediatamente presentan una respuesta de estrés en segundos. Esta respuesta se inicia por la interacción de la radiación ionizante con la materia biológica, causando daño al interactuar directa o indirectamente a través de la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) con biomoléculas celulares como el ADN, las proteínas y los lípidos. Esta reacción interfiere con todos los orgánulos celulares y tiene la capacidad de afectar sus mecanismos moleculares. Como resultado, se produce la activación endotelial, lo que hace que el fenotipo inactivo cambie a uno proinflamatorio. Cuando la exposición es prolongada y/o repetida, puede agotar el efecto fisiológico protector del endotelio, lo que lleva a una disfunción endotelial. Este estado patológico puede verse como una respuesta desadaptativa a estímulos patológicos y se refiere a una falla del endotelio para realizar sus funciones fisiológicas normales. Como resultado, se produce un deterioro del tono vascular, problemas de hemostasia sanguínea, inflamación y edema en el sitio del endotelio afectado”³⁷.

La radiación ionizante a altas dosis se asocia a un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular con principales alteraciones a nivel de las arterias coronarias e insuficiencia microvascular. Estas dosis elevadas van a provocar el inicio de alteraciones endoteliales que van a tener como característica un estado proinflamatorio y profibrótico con envejecimiento prematuro del endotelio, se elevan los niveles de estrés oxidativo, se reducirá el óxido nítrico y se mejora la adhesividad por alta concentración de selectinas, integrinas y otras moléculas de adhesión celular. La mejora de la adhesión junto a la salida de leucocitos a través del endotelio es el primer paso de inicio para la aterosclerosis. En la línea celular endotelial de la arteria coronaria humana como modelo, se observó una mayor adhesión de los monocitos y la liberación de citocinas proinflamatorias (interleucina-6 e IL-8) a la dosis de 2 Gy de rayos.³³

Las dosis bajas incluso fraccionadas aceleran la inflamación crónica a nivel vascular, que inician la enfermedad aterosclerótica. Sin embargo, aunque no se tiene muchos estudios sobre los efectos nocivos a bajas dosis, en algunos estudios recientes se habla que las funciones biológicas pueden cambiar según la dosis de manera no lineal.³³

2.3 Lesiones cutáneas por radiación

2.3.1 Dermatitis por radiación

“Los Criterios de Terminología Común para Eventos Adversos (CTCAE) del Instituto Nacional del Cáncer se aceptan como una clasificación estándar y escala de calificación para eventos adversos en ensayos clínicos y otros entornos oncológicos. Esta herramienta de clasificación define la dermatitis por radiación como una reacción inflamatoria cutánea que ocurre como resultado de la exposición a niveles biológicamente efectivos de radiación ionizante”³⁸. En otras literaturas, la dermatitis por radiación se define como un conjunto de lesiones cutáneas provocadas al estar expuestos de manera constante a radiaciones. Esta puede ser aguda si se presenta en primeros 90 días después de la radiación, o bien crónica si se presenta después de este lapso.³⁹

En la piel irradiada se pueden presentar un conjunto de manifestaciones estas pueden agruparse en reacciones de primer, segundo y tercer grado, cada grado con sus propias características. Las de primer grado presentan eritema y edema asociados a prurito y dolor. Estas reacciones se presentan en un lapso de dos a siete días posterior a la exposición, su mayor severidad se presenta entre los días 10 y 14. A las cuatro semanas se manifiesta una mancha hipopigmentada o de color café-rojiza que tiene una resolución espontánea. Las reacciones de segundo grado se manifiestan con un eritema de mayor intensidad, edema, vesículas y úlceras que abarcan únicamente la epidermis, están suelen resolver sin dejar

cicatriz en un intervalo de seis a doce semanas. Las reacciones agudas de tercer grado se presentan con úlceras que afectan epidermis y dermis, necrosis y de manera severa pueden llegar a producir daño al tejido óseo e incluso a las vísceras.³⁹

En la escala de CTCAE, las reacciones de bajo grado son categorizadas como grado 1-2 y las de alto grado como \geq grado 3 aunque son poco común de presentarse, su presentación se asocia a factores de riesgo individualizados de cada paciente, entre estos factores se considere el índice de masa corporal alto, la composición de la dosis, la distancia del equipo a la superficie de la piel y por último pero raro de presentarse, daños en el funcionamiento del equipo o la mala administración. El CTCAE versión 5 realiza una clasificación de las lesiones desde el grado 1, como el grado donde ocurre manifestaciones leves hasta el grado 5 que se refiere al grado más letal, donde ocurre la muerte.³⁸

Brevemente, una lesión de grado 1 indica que hay un eritema leve o una descamación seca. La dermatitis por radiación de grado 2 incluye eritema de moderado a intenso, con descamación húmeda irregular y edema que se limita en gran medida a los pliegues y pliegues de la piel. Los pacientes que se presentan con grado 3 pueden exhibir descamación húmeda en áreas distintas de los pliegues de la piel y, a menudo, informan sangrado excesivo causado por traumatismos o abrasiones menores. El grado 4 es una afección potencialmente mortal con necrosis o ulceración de la piel en todo el espesor de la dermis con sangrado espontáneo del sitio afectado. Las lesiones de grado 4 a menudo requieren un injerto de piel o un cuidado avanzado de la herida.³⁸

En México, se realizó un estudio, titulado *Radiodermatitis secundaria a fluoroscopia. Reporte de un caso*, en este estudio se presenta un caso clínico de un paciente de 74 años, con motivo de consulta una úlcera dolorosa en la espalda. En el examen físico se observó dermatosis localizada en la región escapular izquierda, constituida por escamas, costras hemáticas, fisuras y esclerosis formando una placa sobre una piel de aproximadamente 9 x 10 cm. Como antecedentes de importancia el paciente padecía hipertensión arterial, diabetes mellitus tipo 2 y cardiopatía isquémica de evolución crónica, con tres intervenciones hemodinámicas con intervalos de dos años y seis meses, respectivamente, en las cuales hubo exposición a fluoroscopia, donde presentó eritema, con resolución espontánea. Se concluye como diagnóstico de dermatitis crónica por radiación.³⁹

2.3.2 Lesión cutánea por radiación

“Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) definen la lesión cutánea por radiación como una lesión en la piel y los tejidos subyacentes por exposición aguda

a una gran dosis externa de radiación. Se aclara aún más la definición de IRC que ocurre en individuos expuestos a una dosis aguda de más de 2 Gy, independientemente de la fuente de exposición”³⁸.

La severidad de las lesiones cutáneas por radiación se clasifica mediante una escala de I a IV grados, esto debido al tipo y cantidad de síntomas manifiestos. Los CDC describen tres etapas para la enfermedad, siendo estas la etapa prodrómica, latente y manifiesta. Se debe tener presente, que el síndrome clínico que se produce para exposiciones agudas es similar a la lesión cutánea, se diferencian por el curso temporal y la gravedad de la lesión.³⁸

La lesión cutánea por radiación grado I, se presentan en un lapso de dos a cinco semanas transcurrida la exposición, se manifiesta con eritema, edema leve y posible aumento de la pigmentación.³⁸ El eritema es la primera manifestación que se presenta entre el primer y el segundo día, este ocurre por dosis únicas de 3 a 10 Gy, provocado por la vasodilatación de los capilares de la dermis y tiene una resolución espontánea. En algunos casos suele observarse hiperpigmentación, por el incremento de la concentración de la melanina.⁴⁰

Las lesiones grado II, presentan los síntomas del grado I acompañados además de calor, hiperpigmentación, edema y ampollas con descamación húmeda y finalmente se genera la epitelización.³⁸ La reepitelización ocurre en un lapso de seis a ocho semanas transcurrida la exposición, provocando una piel de menor espesor, a los dos o tres meses esta vuelve a la normalidad. En dosis mayores a 10 Gy, se producirá un eritema acompañado de descamación, lo que se conoce como radiodermatitis seca, producida por el incremento en la división de las células muertas.⁴⁰ Las lesiones grado III además de incluir los síntomas de los grados anteriores, presenta erosión y ulceración de la piel. En el grado IV aparecen ampollas con isquemia y necrosis en un lapso de 2 semanas.³⁸

En dosis mayores a 25 Gy provoca necrosis aguda asociada a lesiones vasculares y del tejido conectivo de gran magnitud, que finalmente provocan úlceras durante un lapso de varios meses.⁴⁰ Además, se espera que el grado IV tenga complicaciones extensas y probablemente requiera un injerto de piel.³⁸

“Con múltiples exposiciones repetidas durante mucho tiempo a dosis bajas de radiación puede aparecer radiodermitis crónica, en la que la piel puede llegar a ser hipertrófica o atrófica. La piel hipertrófica se presenta con hiperqueratosis, es más quebradiza y frágil que la normal, con pliegues exagerados y depilación total o parcial. La radiodermitis crónica está relacionada con la incidencia de cáncer cutáneo, principalmente de epiteloma espinocelular”⁴⁰. Es importante mencionar elementos que se encuentran relacionados con la piel, que se ven

afectados por radiación. Como órgano de crecimiento tenemos los folículos pilosos, estos son sensibles a la radiación. Por otra parte, tenemos las glándulas sudoríparas y sebáceas, resistentes a la radiación. En dosis elevadas se llega a presentar atrofia y destrucción completa de estas glándulas.⁴⁰

La piel, es la primera barrera que recibe los rayos X. Se pueden ver lesiones desde un leve eritema, depilación dérmica y caída del cabello, hasta úlceras profundas permanentes. Se recomienda que a dosis de 5.000 mGy, se debe dar seguimiento a los pacientes.²⁵

2.3.3 Quemaduras por radiación

La piel es la primera barrera que tiene contacto con la radiación ionizante, La capa basal de la piel está conformada por células sensibles a la radiación y son dañadas con dosis bajas de radiación. Por esto, las lesiones en la piel entre las alteraciones histopatológicas inducidas por radiación son las que con mayor frecuencia tienen aparición. Las células que han completado su maduración son resistentes a la radiación. Es importante destacar, los primeros reportes de quemaduras por radiación ionizante aparecieron tiempo después del descubrimiento de los rayos X en 1895 por Roentgen. En ese mismo siglo, se reportaron pacientes leucemia y cáncer de piel.⁴⁰

“La literatura relevante que describe "quemaduras por radiación" incluye descripciones de contramedidas médicas relacionadas con eventos nucleares, informes de casos de quemaduras por radiación sostenidas en exposición accidental o en el lugar de trabajo, quemaduras por radiación resultantes del uso terapéutico de radiación ionizante, y quemaduras por radiación sufridas por fluoroscopia u otros procedimientos médicos guiados por radiación”³⁸.

Los médicos e investigadores evalúan los daños en la piel luego de la exposición a radiación ionizante. Se logra la conclusión que las variaciones de la severidad de las alteraciones sufridas en la piel se ajustan a la cantidad de dosis, el fraccionamiento y la energía del haz. De acuerdo con el tiempo que dure la lesión se puede categorizar en fase temprana y tardía. La fase temprana se manifiesta con eritema y edema, asociado a esto se puede dar depilación, descamación seca e hiperpigmentación de la piel. Con el avance de la intensidad de la lesión, los pacientes llegan a presentar prurito, calambres, calor con formación de vesículas, descamación húmeda, ulceración para finalizar con necrosis de la epidermis y dermis. La fase tardía se presenta con atrofia, telangiectasias y puede variar con hipo o hiperpigmentación.³⁸

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) indica que, al cabo de tres a seis semanas, la piel expuesta a radiación presenta descamación seca. La descamación seca tiene origen por la ausencia de queratinización, por la pérdida de células dérmicas de la capa

basal, disminución de la actividad secretora de las glándulas sebáceas y sudoríparas y por otro lado la hiperplasia subendotelial en los vasos sanguíneos da lugar a la presencia de telangiectasias.⁴⁰ Entre las cuatro a seis semanas, tiene aparición la descamación húmeda, provocada por la ausencia epidérmica, está por la destrucción de clonógenos de la capa basal.³⁸

CAPÍTULO 3. EFECTOS NOCIVOS A LARGO PLAZO EN PACIENTES CON EXPOSICIÓN CONSTANTE A ESTUDIOS DE IMAGEN QUE EMITEN RADIACIÓN IONIZANTE

SUMARIO

- **Efecto estocástico**
- **Cáncer**
- **Exposición prenatal y defectos congénitos**
- **Trastornos del sistema reproductor**

En la actualidad, el uso de la radiación ionizante como una herramienta para el diagnóstico precoz de varias patologías ha tenido un gran auge. Sin embargo, este tipo de radiación también provoca efectos nocivos crónicos o a largo plazo en la salud de quien está expuesto, que produce alteraciones del ADN de las células y se traduce en morbilidades leves hasta alteraciones graves como es el cáncer, información que es presentada en este capítulo.

3.1 Efecto estocástico

3.1.1 Definición

El efecto estocástico es un evento probabilístico, en cual no posee un umbral y la posibilidad de aparición incrementa con la dosis.²² Este tipo de efecto es provocado por daños en el material genético de una célula, después de una exposición a la radiación.⁵ Puede llegar a considerarse grave ya que de este puede surgir la presencia de cáncer o teratogénesis.²⁷

3.1.2 Mecanismo

El ADN dañado puede ser restaurado por completo o bien presentar una reparación defectuosa, al superar la dosis umbral, los efectos tienen una manifestación clínica visible; pero, si por el contrario no sobrepasa dicho umbral el efecto estocástico se presenta en una célula. El núcleo de la célula al ser expuesto a radiación puede dañar una cadena del ADN, en casos donde los daños son graves suele encontrarse alteraciones dobles de la cadena de ADN.²⁹

3.1.3 Naturaleza

El efecto estocástico es provocado por las modificaciones a nivel celular y se divide en somático o hereditario. En un efecto somático se produce una neoplasia como respuesta a la radiación, por ejemplo; la radiación en los niños incrementa la posibilidad de ocurrencia de leucemia como puede no presentarse dicho efecto. En un efecto hereditario se transfiere

información genética sobre la mutación de células utilizando la cadena de ADN, para llevar esta información de una generación a otra, esto en respuesta a la exposición a radiación.²⁹

3.1.4 Gravedad

La probabilidad de ocurrencia tiene una proporcionalidad directa con el aumento de la dosis. Sin embargo, la gravedad es independiente del incremento de dicha dosis. Los estudios epidemiológicos tienen una importancia significativa en la comprensión de los efectos tardíos que se presentan en la salud luego de una exposición radiológica. Los tumores sólidos, trastornos genéticos y la leucemia en personas expuestas a radiación, son ejemplos de estos tipos de efectos.⁵

3.1.5 Relación dosis-efecto

En la relación dosis-efecto, la dosis está relacionada de forma directa con el tiempo y la posibilidad de ocurrencia y de forma indirecta con la severidad de los efectos.⁵ El lapso entre la exposición a radiación y la aparición clínica de los efectos puede tardar hasta 20 años; se debe resaltar que entre más joven es una persona mayor es el riesgo de presentar estos efectos a largo plazo y esto es independiente de la fuente de radiación como del sexo de estas.²⁵

“Según las directrices de la ICRP una ocupación con menos de 1 muerte por cada 10.000 trabajadores/año se considera segura. De los especialistas que trabajan con radiación ionizante, los cardiólogos intervencionistas son los que tienen mayor exposición anual a radiación. Un cardiólogo intervencionista tiene una exposición anual a radiación que oscila entre 2-5 mSv año (equivalente a 150 radiografías de tórax año); en 30 años de trabajo la dosis de radiación aproximada equivale a 100 mSv. Dicha cantidad de radiación acumulada se asocia con la aparición de cáncer (mortal y no mortal) por cada 100 sujetos expuestos y un cáncer mortal en 200 sujetos expuestos”²⁵.

3.2 Cáncer

3.2.1 Daños al ADN

La radiación ionizante es reconocida como un elemento carcinógeno para el ser humano.¹ De los efectos que ocurren a nivel de la célula, se ha estudiado asociación a una mayor frecuencia de alteraciones en el crecimiento celular, inhibición en la mitosis, alteraciones en el material genético, transformaciones nucleares y apoptosis; las consecuencias más significativas de la exposición a radiación ionizante son los efectos carcinogénicos, lo que resalta que los efectos nocivos son acumulativos entre ellos.⁴¹

“Existen múltiples estudios, que definen a la radiación ionizante como un agente dañino al ADN y factor de riesgo para el desarrollo de cáncer. Se ha descrito que el mayor efecto de la irradiación celular era considerado como el resultado del depósito de energía en el núcleo de la célula irradiada, provocando el daño en el ADN, inestabilidad del genoma, inducción de muerte celular, entre otras. La inestabilidad genómica inducida por radiación se caracteriza por cambios genéticos incluyendo nuevos arreglos cromosómicos, micronúcleos (MN), transformación, amplificación y variantes en genes y mutaciones letales en células derivadas de una clona de células radiadas”⁴².

El daño al ADN se clasifica como letal y subletal. El daño letal es irreversible, hay un compromiso total de la función y viabilidad de la célula, provoca su muerte durante la interfase. El daño subletal tiene tres presentaciones: reparación completa, la célula sobrevive; reparación incompleta, las alteraciones serán heredadas a las células sucesoras; no ocurre reparación, muerte.⁴³ En otras palabras, como principal alteración se encontrará daño al código genético, daño en la capacidad de reproductiva de la célula y, por último, su muerte. Por lo tanto, estos sucesos provocan una alteración directa sobre las futuras copias de la célula.¹

La radiación ionizante produce efectos transitorios sobre moléculas de lípidos o carbohidratos, las cuales se reparan espontáneamente. Sin embargo, si la alteración es sobre el ADN, los efectos son mucho más importantes ya que puede producirse ²⁸:

- Roturas de la cadena
- Daño o destrucción total de las bases
- Daño o destrucción total de los azúcares
- Formación de dímeros
- Lesiones múltiples, locales, en la molécula

Las variaciones ocurridas en el proceso de reparación de los fragmentos de información genética influyen en la reparación estructural del ADN. Las vías de reparación del ADN, posee una serie de mecanismos: en primer lugar, la reparación por escisión; en segundo lugar, reparación por escisión de nucleótidos; en tercer lugar, desajuste de reparación; el cuarto lugar, unión de extremos no homólogos; por último, lugar, pero no menos importante, la reparación de la recombinación homóloga.^{1,44}

Al haber un daño en el ADN, el mecanismo de reparación celular se activa y detiene el ciclo celular normal, como se ha mencionado con anterioridad la radiación ionizante, llega de forma inevitable a las células normales lo cual provoca alteraciones cromosómicas e incrementa

el riesgo de tumores malignos.⁴⁵ La progresión maligna de la oncogénesis, sigue una serie de pasos para su establecimiento, los cuales se enlista a continuación ²⁹:

- Daño al ADN cromosómico de una célula blanco normal
- Fallo a la correcta reparación del ADN
- Aparición de una mutación específica de inicio de neoplasia
- Crecimiento promocional de pre-neoplasia
- Conversión a fenotipo declaradamente maligno
- Progresión maligna y difusión del tumor

En el 2020, es publicado un artículo titulado *Biomonitoreo genético en trabajadores del servicio de radiología del Hospital Nacional Policial Luis N. Sáenz*, en el cual se realizó un estudio observacional, prospectivo, transversal en un grupo de trabajadores de dicha institución; en este se determinó una alta asociación entre la cantidad de años de exposición con el daño de ADN. Es decir, que entre más años se esté sometido a exposición constante a radiación se tendrá un mayor daño de ADN.⁴⁶

En resumen, la importancia potencial del daño del ADN agrupado se destaca a través de la evidencia de los efectos biológicos asociados, como la mutagénesis, la carcinogénesis, la letalidad y la reparación incompleta.⁴⁴

3.2.2 Modificaciones epigenéticas

A mediados del siglo XX, se establece que el ADN por sí solo no determina todas las características del ser humano. Dado que, se fundamenta de manera crucial que estas características son aporte de la epigenética. El término epigenética fue adoptado en el año 1942, pero el uso de este es reciente, la definición más actualizada es “el estudio de los cambios hereditarios mitóticos y/o meióticos en la función de los genes que no pueden explicarse por cambios en la secuencia del ADN”⁴⁷.

El daño indirecto al ADN es a través de radicales libres del agua, estos radicales se forman a través de la radiólisis del agua, siendo los radicales hidroxilos considerados los más dañinos entre ellos. En condiciones aeróbicas, estos radicales libres se convierten en especies reactivas de oxígeno (ROS) que incluyen radicales libres y radicales no libres.⁴⁷

Los eventos epigenéticos normalizan la actividad y expresión genética, durante el desarrollo y la diferenciación. Con la intención de crear todos los diferentes tipos de células, los mecanismos epigenéticos regular la expresión de genes en las células de nuestro, aunque tengan el mismo genoma. Mientras que afectan la expresión génica en respuesta a estímulos

ambientales, incluida la radiación ionizante. Por consiguiente, la epigenética se considera un puente entre el genotipo y el fenotipo. Los mecanismos genéticos, como las mutaciones, son hereditarios, pero no muy susceptibles o impulsados por la influencia ambiental.⁴⁷

3.2.3. Respuesta inmune

El sistema inmunitario tiene células sueltas por todo el cuerpo del ser humano, cumpliendo distintas funciones entre las cuales cabe destacar, la vigilancia, la homeostasis y la protección contra lo extraño. Alrededor de un billón de células inmunitarias secretan cien millones de trillones de moléculas.⁴⁸ Este sistema se puede dividir en dos tipos: el innato y el adaptativo, cada uno desempeñando roles distintos o trabajando en colaboración. El sistema innato consta de defensores de primera línea que incluyen proteínas sanguíneas, células dendríticas (DC), macrófagos, granulocitos, células asesinas naturales (NK) y componentes inflamatorios. Tiene especificidad y diversidad limitadas. El sistema adaptativo consta principalmente de linfocitos T (CD8+ y CD4+) y linfocitos B con respuestas específicas y diversas. Su crecimiento es autolimitado, donde un mecanismo de retroalimentación regula su proliferación en células efectoras de vida corta.^{48, 49}

El primer informe sobre los efectos inmunitarios por radiación fue conocido a principios del siglo XX.⁴⁸ Los datos de estudios epidemiológicos genuinos sobre alteraciones inmunitarias en el contexto de exposiciones a dosis bajas siguen siendo escasos. Esto puede deberse a que los síntomas de las enfermedades relacionadas con el sistema inmunitario no aparecen en una forma o a lo largo de un curso de tiempo que pueda relacionarse fácilmente con la exposición a la radiación, aparte de la conocida alta sensibilidad a la radiación de muchos linfocitos en reposo.⁴⁹

Por el contrario, los escenarios de exposición de dosis baja (por debajo de 100 mGy) e intermedia (entre 100 mGy y 1 Gy) son mucho más relevantes para la población en general, ya que pueden tener consecuencias para la salud pública. También, son mucho más difíciles de estudiar porque la toxicidad y la carcinogénesis son mucho menos evidentes mientras que otras alteraciones funcionales más sutiles cobran importancia.⁴⁹ Por ejemplo, con una dosis equivalente acumulada de 5 mrad o 0,05 mGy se reporta que la médula ósea se afectó tardíamente y en un grado menor grado en comparación con el bazo, los ganglios linfáticos y la sangre.⁴⁸

3.2.4 Tipos de presentación del cáncer

“El cáncer es responsable de al menos 20% de todas las muertes y es la causa de muerte más común en los países industrializados, después de las afecciones cardiovasculares. Se estima que aproximadamente cuatro de cada diez individuos de la población en general padecerán cáncer durante su vida, aún sin exposición radiológica. En los últimos años, los cánceres más comunes entre los hombres han sido de pulmón, próstata, colon, estómago e hígado; mientras que entre las mujeres han sido los cánceres de mama, colon, pulmón, cuello uterino y estómago”⁵.

El primer cáncer inducido por radiación fue reportado en el año 1902, caracterizado por una úlcera en la piel. Fueron los primeros fundadores de la radiación quienes sufrieron los primeros efectos. Entre estos personajes encontramos a Wilhelm Conrad Roentgen, descubridor de los rayos X murió de cáncer de intestino en 1923. De igual forma, en 1934 Maire Curie, investigadora del fenómeno de la radioactividad, falleció de leucemia, inducida por la radiación en el año.⁵⁰

El cáncer óseo, de tiroides y la leucemia tienen su aparición pocos años después de la exposición a la radiación. Por otro lado, existen otros tipos de cáncer que se manifiestan más tarde, incluso varias décadas después de la exposición.^{5, 50} “Sin embargo, ningún tipo de cáncer es causado únicamente por la exposición a la radiación, resultando imposible distinguir a los tumores inducidos por radiación de aquellos que surgen por otras razones. No obstante, es importante estimar la probabilidad de contraer cáncer como consecuencia de ciertas dosis de radiación a fin de brindar una base científica sólida para establecer límites de exposición”⁵.

En Alemania en el año 2020, fue realizado un estudio, titulado *Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis*, en el cual se analizaron los efectos de la radiación por radiografía convencional y tomografía; en este no encontró ningún riesgo estadísticamente mayor de todos los cánceres, leucemia y tumores cerebrales después de exposiciones prenatales a rayos X o tomografía computarizada. Para la exposición posnatal, se observaron mayores riesgos de leucemia y de tumores cerebrales después de la exposición a la TC.⁵¹

En resumen, la exposición constante a radiación ionizante se relaciona con leucemia y con linfomas, entre los que se incluyen el mieloma múltiple y la leucemia linfocítica crónica este estudio proporciona más evidencia de que los riesgos de leucemia pueden aumentar con la exposición prolongada y a dosis bajas a la radiación externa.⁵²

3.2.5 Relación dosis-respuesta

La incidencia de cáncer infantil y leucemia, entre los 0-15 años de 0,2-0,3 % sin exposición adicional a la radiación natural de fondo. Dosis fetal de alrededor de 10 mGy hay un incremento del 40 % sobre el riesgo natural.⁵³ Cabe señalar que el riesgo de cáncer aumenta mientras mayor sea la exposición; sin embargo, la gravedad es independiente de la dosis de radiación. Así mismo, la incidencia es mayor en mujeres que en hombres.²⁵

Los organismos gubernamentales encargados de velar por la protección radiológica se basan en la hipótesis conservadora, en dosis mínimas o moderadas las radiaciones ionizantes incrementan la probabilidad de contraer cáncer, y que esta probabilidad es directamente proporcional con la dosis recibida.^{28,54} Sin embargo, los estudios epidemiológicos han demostrado que el período de latencia media, el tiempo desde la exposición a la aparición clínica, es de 7-10 años para la leucemia y unos veinte años para los tumores sólidos. Cuando se supera un umbral de dosis el efecto puede llegar a ser perceptible a simple vista; pero, si no alcanza este umbral el efecto estocástico generalmente aparecerá en una célula.²⁹ Por ejemplo, la dosis mínima que provoca daño significativo en el ADN es de 30 Gy. Al sobrepasar esta dosis, incrementa la cantidad de roturas de ADN monocatenario.⁵²

Para establecer las dosis de radiación que son un riesgo, se necesita de una serie de estudios epidemiológicos, para tener una precisión útil. Así como, si se ha registrado un exceso de casos de muerte por cáncer en una muestra de 500 personas en respuesta a una exposición a una dosis de 1000 mSv, entonces se necesitaría una muestra de 50 000 para documentar el efecto carcinogénico de 100 mSv y para 5 millones una dosis de 10 mSv. Esto quiere decir, que la muestra debe aumentar inversamente a la dosis para mantener la precisión.⁵⁵ Por consiguiente, la evidencia epidemiológica y experimental de los riesgos de cáncer por exposiciones a dosis bajas (<100 mGy), se concluye que la evidencia científica disponible es consistente con una relación dosis-respuesta lineal entre la radiación ionizante y el desarrollo del cáncer en humanos.⁵⁶ Sin embargo, estas relaciones dosis-respuesta pueden ser aparentemente afectado por varios puntos finales integradores como reparación de tejidos, proliferación celular compensatoria.⁵⁴

3.3 Exposición prenatal y defectos congénitos

3.3.1 Etapa preimplantatoria

Las primeras cuatro semanas de gestación son conocidas como el período de todo o nada, lo cual significa que al estar expuesto a una radiación ionizante puede haber pérdida o no habrá efecto alguno en el embrión.⁵⁷ Una alteración en la implantación o la pérdida del embrión,

ocurre cuando la cantidad de células es reducida y no hay especialización.⁵³ En efecto, la radiación ionizante es considerada como un teratógeno físico. Los efectos de esta dependen de ciertas variables como la semana de gestación, la dosis y duración de la exposición.⁵⁷ La radiación es inversamente proporcional a la distancia del haz de rayos X.⁵³

En esta primera etapa, la cual comprende desde la concepción hasta la adhesión uterina, específicamente en las primeras dos semanas de gestación, la radiación puede ser letal para el embrión con una dosis umbral >200 mGy.^{5, 53} En esta etapa, resulta difícil definir los efectos que se pueden presentar; la información presentada en los estudios en su mayoría es de experimentos con animales, donde se confirma que el efecto mortal sobre el embrión se debe a dosis que sobrepasan los umbrales.⁵

3.3.2 Etapa organogénesis

La etapa de la organogénesis comprende de la tercera a la octava semana de gestación.²⁹ Esta etapa es de las más susceptible a la exposición a radiación ionizante; a partir de la tercera semana, se pueden presentar malformaciones con una dosis umbral de 100 a 200 mGy.^{29, 53}

Los tejidos embrionarios y fetales son más fácilmente dañados y el periodo más peligroso corresponde a los tres primeros meses del embarazo, cuando la organogénesis es más activa (cuando, además, el estado de gravidez a menudo se desconoce). Los efectos embriológicos pueden manifestarse por anomalías en el nacimiento, detención del crecimiento, retraso mental y muerte intrauterina⁴¹.

Las líneas horizontales definen que el nivel de 100 mGy, es el umbral establecido para que se presenten efectos deterministas a corto plazo durante la organogénesis. Sin embargo, la dosis de radiación presenta una serie de variaciones, por depender de la edad gestacional, la constitución física de la madre y los parámetros utilizados para la imagen.⁵⁸ Por lo tanto, se determina que la organogénesis es la etapa donde se observan las anomalías.⁵⁷ El riesgo más importante, es que la radiación produce malformación de los órganos en crecimiento y hasta la muerte al momento del nacimiento.⁵

3.3.3 Etapa fetal temprana

Esta etapa tiene inicio en la octava semana de gestación. La exposición entre la semana ocho y quince de gestación tiene mayores efectos.²⁷ Conforme aumenta el tiempo posterior a la concepción la sensibilidad a la radiación disminuye. Resulta difícil establecer una relación causa-efecto por la existencia de agentes teratogénicos ajenos a la radiación; por tanto, los

efectos son inespecíficos y no relacionados únicamente a la radiación. En la radiación ionizante, pueden ocurrir tres tipos de efectos: letalidad, anomalías congénitas y efectos muy tardíos.²⁶

Entre los efectos provocados por la radiación ionizante está la disminución del coeficiente intelectual, este depende de la dosis absorbida; en una dosis de 5 mSv produce una disminución de 0.15 puntos en el coeficiente intelectual, esto es indetectable. La dosis umbral de estos efectos está entre 0.1 Sv y 1 Sv.²⁷ Un umbral entre 100 y 200 mGy está asociado a malformaciones, específicamente a alteraciones en el sistema nervioso central.²⁶ El retraso mental está asociado a factor de riesgo de 0.4 Sv entre las semanas 8 y 15 de gestación, por la sensibilidad del sistema nervioso central y de la semana 15 a la 25 el retraso grave se da con un factor de riesgo de 0.1 Sv.²⁶⁻²⁷ En los avances sobre los efectos en el cerebro, se tiene como antecedente 30 niños sobrevivientes de bombardeos atómicos que con una dosis de 1 Gy, tuvieron discapacidades intelectuales extremas.⁵

La dosis absorbida por un feto en el primer trimestre es menor para la TC que para la gammagrafía pulmonar, en el segundo trimestre las dosis son comparables y en el tercer trimestre la dosis para el feto es algo mayor para un procedimiento de TC.⁵⁸

“El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) establece qué dosis fetales menores de 100 mGy no deberían considerarse una razón para la interrupción del embarazo, esto se aplica a pacientes gestantes ya que las trabajadoras no están expuestas a tal alta dosis de radiación”⁵³. El Consejo Nacional para la Protección contra la Radiación de los Estados Unidos (USNR) establece que una dosis umbral menor a 50 mGy no es suficiente para producir efectos significativos.⁵⁷

De manera general, se realiza una estimación donde se determina que dos de cada 1000 niños nacidos vivos que han sufrido exposiciones a radiación con una dosis de 1cGy en el útero, tendrán repercusiones; comparado esto con el 6% que tendrá los mismos efectos de manera natural. La gran mayoría de los fetos afectados de manera grave no sobreviven. Se ha estimado que al menos el 50% de todos los abortos espontáneos presentan una constitución genética anormal; Al nacimiento, los bebés con alteraciones genéticas tienen 5 veces más probabilidad de fallecer antes de los cinco años.⁵

3.4 Trastornos del sistema reproductor

3.4.1 Sistema reproductor femenino

El sistema reproductor femenino tiene como función principal la reproducción del sexo femenino. La reproducción femenina es un proceso que necesita de una serie de procesos

precursores para llevarse a cabo. La gametogénesis a través de la meiosis da origen a los gametos, llevando a cabo dos ciclos consecutivos, el primer ciclo consta de dos divisiones meióticas y el segundo de una fase de replicación de ADN. La ovogénesis es un proceso fisiológico complejo que se diferencia de la espermatogénesis, entre estas diferencias están la morfología y la diferenciación de los gametos, la duración y la ubicación. En la maduración de los ovocitos es importante resaltar la reanudación de la meiosis, la cual es detenida en la profase la primera división meiótica. En el ser humano, la foliculogénesis tiene una duración de 375 días y normalmente está regulada, lo que se manifiesta que durante toda la vida reproductiva femenina hay folículos en el ovario en las diferentes etapas del desarrollo.⁵⁹

En estudios in vitro, el efecto duradero de un incremento de frecuencia de mutaciones en la descendencia de padres irradiados: este efecto persiste durante al menos 20 a 40 divisiones celulares que tienen lugar después de la irradiación del ovocito en primera etapa, con la mayor predisposición a la ocurrencia de mutaciones en los ovocitos cerca de la ovulación. La sensibilidad de las células germinales femeninas se ve influenciada por distintos factores: el folículo y la tasa de mutación.⁵⁹

En ovarios, luego de exponerse a una dosis única de 2 a 6 Gy se produce esterilidad temporal. Conforme la mujer avanza en edad es más radiosensible y el umbral para esterilidad efectiva disminuye con los años.¹¹ Asimismo, la dosis esterilizante efectiva según su grupo etario es: al nacimiento 20.3 Gy, a los 10 años 18.4 Gy, a los 20 años 16.5 Gy, a los 30 años 14.3 Gy. Por lo que se concluye que conforme más edad se tiene es necesaria recibir menos dosis para que se produzca fertilidad.⁵⁹

3.4.2 Sistema reproductor masculino

El sistema reproductor masculino tiene como principal asegurar la reproducción en las personas de sexo masculino. La reproducción masculina es definida como el proceso conformado por la proliferación y diferenciación celular.⁶⁰ La espermatogénesis es la encargada de la formación de espermatozoides con base en células madres germinales conocidas como las espermatogonias, estas proceden de los gonocitos conocidos también como las células precursoras; las espermatogonias sufren divisiones y se transforman a espermatocitos de primer orden, estos a través de la meiosis se convierten en segundo orden y posteriormente a espermátides que se diferencian y evolucionan a espermatozoides.⁶¹ En el transcurso de este proceso, los espermatozoides por meiosis se transforman en espermátides haploides, que terminan convirtiéndose en espermatozoides maduros.⁶⁰

La radiación ionizante puede provocar la apoptosis germinal en diferentes intensidades esto varía según el tipo de célula, en primera instancia a los espermatocitos seguido de las espermatídes. Los espermatozoides expuestos a radiación con error cromosómico, guardar cierto grado de fertilización, pero pueden dirigir una producción de embriones anormales.⁶⁰ La sensibilidad a la radiación del testículo a dosis entre 0.08 y 6 Gy, puede presentar pérdida de espermatogonias; en dosis de 6 Gy solo hay presencia de células espermáticas luego de 17 meses y tienes recuperación en los 5 años posteriores.²⁶

En la meiosis, se conoce que las células tienen cierto grado de protección contra la radiación ionizante; esta protección se explica a que las proteínas que intervienen en la reparación del ADN también forman parte de los espermatocitos de primer orden, los cuales tiene participación en el mantenimiento de la fertilidad en humanos.⁶¹ La infertilidad masculina es evaluada a través de dos variables: la viabilidad y la tasa de anomalía de los espermatozoides.⁶⁰

La exposición de las gónadas masculinas a radiación a dosis de 3.5 a 6 Sv se caracteriza por provocar infertilidad permanente y riesgo de presentar anomalías congénitas en la descendencia. Sin embargo, en el caso de dosis inferiores, superiores a 150 mSv, puede producirse infertilidad transitoria. La dosis mínima de radiación que causó daños detectables en el ADN fue de 30 Gy.⁶¹

En estudios realizados sobre los efectos de las dosis bajas de radiación en la fertilidad masculina en grupos expuestos a dicha radiación, se reportó una disminución de la motilidad de los espermatozoides.⁶¹ En otros estudios, se demuestra que la estructura de los testículos de personas irradiadas, presentan cierto grado de degeneración en los túbulos seminíferos, con una dosis de 5 Gy se observa una degeneración total de los mismos.⁶²

CAPÍTULO 4. IMPORTANCIA DE LA RADIOPROTECCIÓN

SUMARIO

- **Definición**
- **Importancia**
- **Seguridad radiológica**
- **Conocimientos sobre radioprotección**

Se sabe que desde el descubrimiento de la radiación y su utilización en el campo de la medicina esta ha traído la aparición de efectos adversos, tanto en pacientes como en el personal en contacto con esta; por lo que en el transcurso del tiempo se han ido implementando términos y medidas de protección que ayudan a evitar este tipo de consecuencias; sin embargo, hay mucho desconocimiento y desinterés sobre lo mismo; por lo que, a continuación, se presenta información que ayuda a conocer más sobre el tema.

4.1 Definición

La radioprotección se define como el conjunto de normas y conocimientos técnicos científicos que tienen como objetivo el proteger a las personas y al medio ambiente de los riesgos que pueden proceder de la utilización de la radiación, ya sea de manera natural o artificial en las áreas de medicina, industria e investigación.¹⁷

4.2 Importancia

Los métodos diagnósticos de imagen cada vez se vuelven más importantes en la medicina moderna y sus beneficios hacia los pacientes no tienen discusión.⁶³ Se ha tenido mucha controversia en si aún dosis bajas de radiación pueden provocar efectos nocivos para la salud y a pesar de que el riesgo que ocurra esto es muy bajo, si está se vuelve de manera rutinaria puede llegar a tener un impacto negativo en el organismo.^{64, 65}

En el 2016, la OMS publica que, en los últimos años a nivel global, se realizan más de 3600 millones de pruebas radiodiagnósticas, 37 millones de pruebas en medicina nuclear y 7.5 millones de tratamientos con radioterapia. Cabe destacar que, la ICRP estima que el trabajador ocupacionalmente expuesto a dosis pequeñas y a tasas de dosis bajas tiene 4% más de probabilidad de morir de cáncer inducido por radiación que los trabajadores que no se encuentran expuestos.⁴

El Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), en sus últimos informes ha resaltado que el uso de radiación ionizante en el campo de la medicina es la principal fuente de exposición a radiación artificial a nivel mundial, debido al creciente uso de dosis altas en procedimientos radiodiagnósticos e intervencionistas. El 43% de la dosis colectiva a nivel global es atribuible a la utilización de TC.^{66,67}

4.3 Seguridad radiológica

La utilización de la radiación ionizante en los estudios de imagen ha sido beneficiosa para muchos pacientes, por lo que hoy en día es muy utilizado en el diagnóstico de muchas enfermedades. Sin embargo, desde sus inicios está generó muchas inquietudes sobre su seguridad por lo que se ha visto necesario el desarrollo de medidas de protección radiológica que ayuden a equilibrar los riesgos y beneficios del uso de esta.^{63,68} Es importante destacar, la radioprotección tiene como objetivo evitar la aparición de efectos deterministas y disminuir la probabilidad de incidencia de los estocásticos. Para cumplir con esto se deben aplicar tres principios básicos del Sistema de Protección Radiológica (SPR), establecidos por la ICRP: justificación, optimización y limitación de dosis.⁶⁹

4.3.1 Principios de radioprotección

4.3.1.1 Justificación

Este principio indica que ninguna práctica que implique la exposición de personas a la radiación ionizante debe ser realizada a menos que esta signifique un beneficio para el individuo expuesto.⁴ Esta solo se justifica si se genera confianza, exactitud, eficiencia, eficacia y efectividad. Se debe evaluar el riesgo-beneficio, en donde se asegure que el bien total será mayor que las consecuencias negativas.⁷⁰

Se dice que ningún examen radiológico es justificado si no se da a favor del paciente, aun si este se asocia a un riesgo menor comparado con el riesgo de una exposición natural.⁴ Sin lugar a dudas, es de suma importancia que todo el público sepa que los estudios radiológicos implican un riesgo y que su utilización solo se justifica si el examen tiene una indicación médica.¹⁷ Si es posible se debe valorar la utilización de otro método diagnóstico que no utilice radiación ionizante, especialmente en niños y jóvenes.⁷¹

En la actual pandemia Covid-19, se dio uso de la tomografía de tórax sin la justificación adecuada. Tomando en cuenta, primero que la especificidad se ve afectada por el hecho de que la afectación pulmonar por COVID-19 no tiene un hallazgo radiológico patognomónico, sino que muestra signos habituales de neumonía intersticial y síndrome de estrés respiratorio agudo

en la mayoría de los casos. En segundo lugar, dentro de las primeras 48 horas, los resultados de la TC de tórax pueden ser completamente normales. Tercero, y quizás el más pasado por alto, la TC de tórax expone al paciente a la radiación ionizante y, cuando se usa repetidamente, pone al paciente en recuperación en riesgo de desarrollar tumores malignos secundarios en el futuro.⁷²

4.3.1.2 Optimización

Cuando se realizan estudios radiológicos es inevitable que algunas personas sean expuestas a la radiación, es por esto por lo que se tendrá una mejor protección en cuanto menor sea la dosis administrada.⁷⁰ En efecto, una vez que los estudios radiológicos ya están justificados se procura que estos sean realizados en las condiciones óptimas. Esto bajo el principio de *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA), que al español se traduce como tan bajo como sea razonablemente posible.^{71, 4}

4.3.1.3 Limitación de dosis

Esto establece que el total de dosis recibidas por las personas no deben exceder los límites dadas en cada circunstancia.⁶⁹ Por lo tanto, a continuación, se detallan estos:

- Exposición ocupacional para mayores de 18 años:
 - Dosis efectiva de 20 mSv al año promediada en cinco años seguidos (100 mSv en 5 años) y 50 mSv en cualquier año.⁷³
 - Dosis equivalente de 20 mSv en el cristalino al año promediada en 5 años seguidos y 50 mSv en cualquier año.⁷³
 - Dosis equivalente en manos y pies o piel de 500 mSv en un año.⁷³
 - Embarazadas ocupacionales: 1 mSv en el embarazo.¹¹
- Exposición en estudiantes aprendices de 16 a 18 años:
 - Dosis efectiva de 6 mSv en un año.⁷³
 - Dosis equivalente de 20 mSv en el cristalino en un año.⁷³
 - Dosis equivalente de 150 mSv en extremidades o en la piel en un año.⁷³
- Exposición al público:
 - Dosis efectiva de 1 mSv en un año.⁷³

- En casos especiales se puede aplicar un valor más alto de dosis efectiva en un año, siempre y cuando la dosis efectiva en 5 años seguidos no exceda de 1 mSv por año.⁷³
- Dosis equivalente de 15 mSv en el cristalino en un año.⁷³
- Dosis equivalente de 50 mSv en la piel en un año.⁷³

Este principio tiene excepciones, no es aplicable en las siguientes situaciones:

- Personas que se encuentren en el marco de su tratamiento o diagnóstico médico.
- Exposición voluntaria para ayudar a los pacientes con el diagnóstico o tratamiento.
- Exposición voluntaria por participar en alguna investigación.⁶⁹

Para el control de las exposiciones es necesario valorar los niveles de radiación a los que están expuestos los individuos.⁷⁴ Según la ICRP en los pacientes se debe dar principal énfasis en la justificación, optimización y la utilización de niveles de referencia para diagnóstico (DRLs) ya que a veces la limitación de dosis puede perjudicar la eficacia del diagnóstico, provocando más perjuicios que beneficios.^{20,66} De forma tal que, los DRLs se definen como una herramienta en la investigación para contribuir a la optimización de la radioprotección en los pacientes expuestos a radiación por estudios diagnósticos y de intervención.^{4,66} Es importante destacar que los niños y jóvenes son la población más susceptible a la exposición a radiación.⁷⁵

4.3.2 Medidas básicas de protección radiológica

4.3.2.1 Distancia

Esta se basa en la ley de la inversa al cuadrado, lo que significa que la magnitud de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La tasa de dosis va a depender del cuadrado de la distancia al que se encuentre la fuente de radiación, por lo que esta debe ser lo más grande posible.¹⁷

4.3.2.2 Tiempo

La dosis es directamente proporcional al tiempo que se expone el individuo. Esto significa que entre más tiempo sea expuesto a la radiación, la dosis será mayor.¹⁷

4.3.2.3 Blindaje

También, denominadas pantallas, son todo tipo de barreras ubicadas entre el individuo y la fuente de radiación que bloquean o limitan el paso de esta. Esto se aplica principalmente al personal ocupacionalmente expuesto.⁴

4.3.3 Valores éticos

Desde 1974 se inicia la discusión de los principios de la bioética con el Congreso de los Estados Unidos de América, quien crea la *Comisión Nacional para la Protección de los Sujetos Humanos de Investigación Biomédica y del Comportamiento*, la cual se basa en la identificación de los principales valores éticos para guiar la investigación médica en los seres humanos.²

El *Informe Belmont* publicado en 1978, menciona 3 valores éticos, los cuales son: beneficencia, justicia y respeto por las personas. Sin embargo, Tom L. Beauchamp y James F. Childress, reformulan estos en su libro *Principios de ética biomédica* para aplicarlos en la ética asistencial y en la toma de decisión médicas, en donde se distinguen los siguientes: beneficencia, no maleficencia, justicia y autonomía.²

En el caso de la aplicación de estos valores a la práctica con radiación, la ICRP propuso los siguientes valores para el SPR: ²

- Beneficencia: consiste en la acción de hacerle el bien a otros. Esta siempre implica una acción de bien y se puede clasificar en beneficencia positiva y la utilidad. La positiva implica la provisión de beneficios y la utilidad exige un balance entre beneficios y perjuicios.²
- No maleficencia: consiste en no causarle daño a otros.²
- Prudencia: es la capacidad de visualizar posibles eventos que pueden llevar a riesgos y cambiar la conducta para evitar los mismos. También, incluye la facultad para elegir sobre lo que está a nuestro alcance hacer y lo que no. Se debe tener experiencia, conocimiento y buen juicio para la correcta toma de decisiones.²
- Justicia: incluye la justicia distributiva, que comprende la distribución equitativa de desventajas y ventajas dentro de grupos de personas, la justicia retributiva que es la compensación de pérdidas y la justicia procesal, que abarca la justicia en las normas y procedimientos para la toma de decisiones.²
- Dignidad: toda persona merece respeto, independientemente de las circunstancias como la edad, sexo, etnia, salud, discapacidad, estatus social, religión, entre otros.²

Investigaciones realizadas por otras fuentes también incluyen valores como la sensibilidad, confidencialidad y consentimiento informado. Los cuales consisten en¹⁰:

- Sensibilidad: consiste en poner en una balanza los valores éticos de una persona y el interés científico.¹⁰
- Confidencialidad: no se debe divulgar nada de la información obtenida por estudios de imagen. Se debe respetar la decisión del paciente respecto a los resultados.¹⁰
- Consentimiento informado: debe haber una aceptación por parte del paciente para realizarse los estudios radiológicos, después de que se le hayan mencionado los riesgos y beneficios.¹⁰

4.3.4 Derechos del paciente

La mayoría de las veces los pacientes son sometidos a procedimientos radiológicos sin su previo consentimiento, por lo que se han establecido ciertos derechos.⁷⁶

- Derecho a recibir información sobre lo que conlleva el procedimiento a realizar, de una manera adecuada y comprensible.⁷⁶
- Derecho a la asistencia humana y científica.⁷⁶
- Derecho a rechazar o aceptar los procedimientos.⁷⁶
- Derecho a su intimidad y confidencialidad de la información.⁷⁶
- Derecho a evitar el sufrimiento y respetar su dignidad.⁷⁶
- Derecho a que se respeten sus creencias y culturas.⁷⁶

4.3.5 Normas de radioprotección

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) es una organización que establece normas para la seguridad internacional del uso de la radiación. Según su Estatuto está autorizado a “establecer o adoptar normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad”. Sus normas las establece mediante publicaciones de la *Colección de Normas de Seguridad de OIAE*, que da origen a su programa en 1958.⁷³

Esta organización se ha encargado de dar énfasis en su mejora continua y hoy en día los principios fundamentales para la seguridad radiológica ya se encuentran incluidos en estas normas. Sus servicios abarcan la seguridad operacional, radiológica, técnica, seguridad de transporte de material radiactivo y manejo de los desechos radiactivos.⁷³

Estas normas son una responsabilidad para toda institución que utiliza radiación y muchos de los Estados las adoptan para incluirlas dentro de sus reglamentos nacionales. La seguridad es un requisito fundamental para la protección de las personas y el medio ambiente. Los efectos nocivos que puede traer la radiación deben evaluarse y controlarse, sin impedir la contribución de ésta al desarrollo. Toda institución tiene la obligación de que las fuentes de radiación y material nuclear se utilicen de manera beneficiosa y segura. Por lo que la OIEA tiene como finalidad ayudar a cumplir esto con facilidad y aceptación, evaluando las normas con prioridad para asegurarse que estas se ajusten a las necesidades de los usuarios.⁷³

Este programa está conformado por requisitos, por lo que en los próximos enunciados se hablará de los más importantes.⁷³

4.3.5.1 Restricciones de dosis

- 1.22. Las restricciones son para todo personal ocupacional y público expuesto. Esta busca la optimización de la protección y seguridad a través de la restricción de dosis y niveles de referencia.⁷³
- 1.23. En la exposición ocupacional, las restricciones de dosis son un instrumento del que se debe encargar la organización responsable. En las exposiciones del público, en donde estas son planificadas, el gobierno es el encargado de la aprobación de las restricciones de dosis, tomando en consideración la instalación y actividad.⁷³
- 1.24. Los niveles de referencia serán utilizados para la protección y seguridad en situaciones de exposiciones de emergencia y en situación de exposición existente. En casos de exposición ocupacional y al público, el nivel de referencia sirve para la variedad de opciones para fines de la aplicación de medidas protectoras.⁷³
- 1.25. La ICRP propone una escala de dosis donde se abarcan dos órdenes de magnitud en entre los cuales se selecciona el valor de restricción de nivel de referencia. Siendo el nivel más bajo de la escala de hasta aproximadamente 1 mSv, respecto a la dosis recibida durante un año debido a fuentes naturales.⁷³
- 1.26. Las restricciones de dosis de 1 a 20 mSv se utilizan cuando la exposición es beneficiosa para las personas.⁷³
- 1.27. Los niveles de referencia de 20 a 100 mSv se utilizan a exposiciones de radiación procedentes de fuentes no controladas. Toda acción que proporcione dosis superiores a 100 mSv se considera inaceptable.⁷³

- 1.28. La restricción de dosis se basa en la situación de exposición, tomando en consideración lo siguiente: la naturaleza de la exposición y viabilidad de prevenir o disminuirlos, los beneficios que trae la exposición para los individuos y sociedad y factores regionales o nacionales.⁷³
- 1.29. Inclusión de los criterios para la protección de la exposición al radón por el sistema de protección y seguridad.⁷³
- 1.30. Las restricciones de dosis no se aplican a la exposición de pacientes que están sujetos a procedimientos diagnósticos o tratamientos médicos.⁷³
- 1.31. En las imágenes radiológicas por rayos X, procedimientos de intervencionismo y la utilización de medicina nuclear para diagnóstico, se usa un nivel de referencia con el fin de mostrar la necesidad de hacer una investigación. Se realiza una evaluación periódica de los niveles de radiofármacos que se usan en una instalación médica. Si estos son demasiado altos o muy bajas, se realiza un examen local para ver si se ha optimizado la seguridad y si se necesita correcciones.⁷³

4.3.5.2 Exposición ocupacional

- Requisito 19: este es responsabilidad del organismo regulador, quienes deben velar por el cumplimiento de los límites de dosis para el personal ocupacionalmente expuesto asegurando así la optimización de la protección y seguridad.⁷³
- Requisito 20: consiste en los requisitos para monitorear y registrar las exposiciones ocupacionales.⁷³
 - 3.73. El organismo regulador debe encargarse de: velar por el establecimiento y cumplimiento de la monitorización, evaluar los programas de monitoreo de los titulares registrados y de licencias, autorizar proveedores de servicios para prestar servicios de monitoreo individual y calibración, examinar periódicamente informes de exposiciones laborales, tener lo necesario para mantener los registros de las dosis recibidas en las exposiciones, verificar que se cumplan los requisitos del control de exposición ocupacional.⁷³
- Requisito 21: es responsabilidad de los empleadores, titulares registrados y con licencia cumplir con la protección para los trabajadores ocupacionalmente expuestos.⁷³
 - 3.78. Los empleadores se deben encargar de que los trabajadores sepan de que la protección y seguridad es parte del programa general de protección

ocupacional y que este implica responsabilidades y obligaciones que velan por la seguridad propia y de terceros.⁷³

- Requisito 23: los trabajadores deben cumplir con sus obligaciones y funciones para la protección y seguridad.⁷³
 - 3.83. Los trabajadores deben: observar todas las reglas establecidas por el empleador, utilizar debidamente el equipo de monitoreo y equipo de protección personal, colaborar con el empleador con los programas de protección, brindarle la información necesaria al empleador de sus labores presentes y pasadas para asegurar una protección efectiva, debe aceptar las instrucciones y capacitaciones sobre la protección y seguridad.⁷³
- Requisito 23: debe haber colaboración entre los empleadores, titulares de licencia y titulares registrados para asegurarse que se cumplan todos los requisitos.⁷³
- Requisito 24: los empleadores, titulares de licencia y titulares registrados deben asignar las zonas de trabajo con el fin de mantener un mejor control en la monitorización, protección y seguridad. Estas se dividen en zonas controladas, zonas supervisadas y zonas supervisadas.⁷³
 - Zona controlada: es toda zona que requiere de medidas de protección específicas.⁷³
 - Zona supervisada: son todas las zonas que no hayan sido designadas como zonas controladas, pero que necesitan mantener exámenes de las condiciones de exposición ocupacional, aunque generalmente no sea necesario la utilización de medidas de protección específicas.⁷³
- Requisito 25: los empleadores deben encargarse de examinar y documentar todas las exposiciones ocupacionales y de vigilar la salud de sus trabajadores.⁷³
- Requisito 26: los empleadores, titulares registrados y de licencia deben proporcionar a todos los trabajadores, información, instrucciones y capacitación sobre la protección y seguridad.⁷³
- Requisito 27: los empleadores no deben ofrecer prestaciones a cambio de medidas de protección.⁷³
- Requisito 28: se deben tener consideraciones especiales para la protección y seguridad de trabajadoras y para menores de 18 años que estén en capacitación.⁷³

- 3.113. Los empleadores deben dar información sobre: riesgo para el feto por exposiciones a embarazadas, importancia de avisar con tiempo si se tiene sospecha de embarazo, riesgo sobre el lactante si se está dando de amamantar.⁷³
- 3.114. No se excluirá a una mujer del trabajo por sospecha de lactancia o embarazo. El empleador se encargará de modificar las medidas para mantener la seguridad del feto o lactante.⁷³
- 3.115. Los empleadores, titulares registrados o de licencia se deben encargar que ningún menor de 16 años esté ocupacionalmente expuesto.⁷³
- 3.116. Los empleadores se deben encargar de que los menores de 18 años se encuentren en una zona controlada.⁷³

4.3.5.3 Exposición médica

Estas se aplican a toda exposición médica, que sea voluntaria, involuntaria y accidental.⁷³

- Requisito 34: el gobierno debe asegurarse que los participantes tengan la autorización para asumir sus funciones, y velar porque se implementen niveles de referencias de diagnóstico, restricciones de dosis y criterios de alta de los pacientes.
- Requisito 35: el organismo regulador debe asegurar que todo profesional sanitario cumpla con todos los requisitos para trabajar en el área.⁷³
 - 3.150. Todo personal con autorización para realizar exposiciones médicas debe: estar especializados en el área de radiología, cumplir con los requisitos en cuanto a la enseñanza, capacitación y competencia sobre la protección radiológica, figurar en la lista como titular registrado o de licencia, actualizándose constantemente.⁷³
- Requisito 36: los titulares registrados o de licencia se deben asegurar de que ningún paciente se exponga médicamente, salvo que éste haya sido referido a un especialista, se haya aceptado la responsabilidad de brindar protección y seguridad y que se le haya informado al paciente los riesgos y beneficios que este conlleva.⁷³
 - 3.151. Los titulares deben asegurarse de que ninguna persona sea sometida a una exposición médica a menos que: el procedimiento radiológico haya sido solicitado por un médico, que brinda información sobre el contexto clínico y que

la exposición sea justificada por medio de consultas entre el médico prescriptor y el encargado de los procedimientos radiológicos o forme parte de un programa autorizado de detección de enfermedades.⁷³

- Requisito 37: las exposiciones médicas tienen que ser debidamente justificadas antes de realizarlas.⁷³
 - 3.157. La justificación deberá ser realizada entre el médico prescriptor y el responsable de realizar el procedimiento radiológico, teniendo consideraciones especiales en el caso de pacientes embarazadas, lactantes o pediátricos, siguiendo lo siguiente: urgencia del procedimiento, características del paciente y de la exposición médica, la información de los procedimientos radiológicos previos del paciente.⁷³
- Requisito 38: los titulares se encargarán de velar porque los procedimientos radiológicos garanticen la optimización de la protección y seguridad en la exposición médica.⁷³
 - 3.166. Los titulares registrados y de licencia se asegurará que se cuenten con aspectos especiales para la optimización de exposiciones médicas en: pacientes pediátricos, pacientes sometidos a exposición por un programa de detección de enfermedades aprobado, voluntarios expuestos en un programa aprobado de detección de enfermedades, dosis altas administradas a un paciente, exposición del feto.⁷³
- Requisito 39: está indica que los titulares deben asegurarse de la implementación de mecanismos de protección en casos de embarazadas o lactantes.⁷³
- Requisito 41: los titulares deben asegurarse de que no ocurran exposiciones involuntarias y accidentales.⁷³
- Requisito 42: los titulares registrados y de licencia se encargarán de realizar exámenes periódicamente en las instalaciones de radiación médica y que estos se mantengan registrados adecuadamente.⁷³

4.4 Conocimiento sobre radioprotección

La celebración de la *Conferencia Internacional de Protección Radiológica en Medicina*, organizada por la OIEA se llevó a cabo en Alemania el año 2012, en donde asistieron 536 participantes de 16 organizaciones internacionales y 77 países diferentes. El objetivo de esta

era discutir sobre la protección radiológica en medicina, sus problemas y posibles soluciones. Al final de la conferencia se presentó el documento *Llamado de Bonn a la acción*.⁷⁷

En la conferencia se exponen los 5 problemas más importantes en la protección radiológica en radiodiagnóstico en Latinoamérica: justificación de los estudios, optimización de los estudios, educación de profesionales, registro de dosis o niveles de referencia y cultura de protección radiológica y su diálogo riesgo-beneficio.⁷⁷

- Justificación de los estudios: el comité llegó a la conclusión que aún faltan muchos conocimientos y lineamientos que permitan la completa justificación de los exámenes radiológicos en esta región. Considerando la falta de guías clínicas de radiodiagnóstico para los médicos prescriptores y que a nivel mundial la limitación de estas es la falta de apego a las mismas. Las razones que dieron lugar a esto son: la falta de conciencia sobre los efectos de la radiación, falta de comunicación entre el prescriptor y médico radiólogo, disponibilidad baja de otros estudios que no utilizan radiación ionizante y el buscar proteger de problemas medicolegales al médico tratante.⁷⁷

Como solución a esto propusieron la elaboración de guías para médicos clínicos basándose en el modelo del Colegio Americano de Radiología, que pueden ser estas adaptadas por las federaciones o sociedades radiológicas nacionales.⁷⁷

- Optimización de los estudios: se llegó a la conclusión que existe un conocimiento limitado sobre las herramientas utilizadas para el control de dosis, esto debido a que estudios similares en diferentes establecimientos han tenido diferentes resultados. Se hizo énfasis en la existencia de pocos manuales para el control de la calidad para cada método radiológico y sobre todo la falta de protocolos para casos especiales como pediatría, seguimiento de neoplasias, embarazo y enfermedades crónicas; que da como posible solución, la elaboración de manuales para controlar la calidad en los distintos estudios de imagen como: mamografía, TC, fluoroscopia, etc.⁷⁷
- Educación de profesionales: el principal problema que se notó es que las normas de protección radiológica se enfocan más en la seguridad ocupacional y no del paciente. La solución planteada para este fue el realizar actividades informativas y educativas en los congresos de Radiología, sobre la radioprotección en el paciente, que considera que las industrias deben poner más dedicación en la educación de su personal técnico y operadores de equipos radiológicos.⁷⁷
- Registro de dosis o niveles de referencia diagnóstica: Los NRDs son herramientas que ayudan a la optimización de dosis a nivel nacional. Estas permiten realizar

comparaciones con otros centros radiológicos de una misma ciudad para llegar a una conclusión de dosis idóneas para la práctica radiológica; sin embargo, el problema es que estas no se reportan en Latinoamérica.⁷⁷

La solución propuesta para esto es el establecer NRDs para el diagnóstico radiológico y TC a nivel nacional, para permitir la comparación de la práctica en una escala nacional y regional.⁷⁷

- Cultura de la protección radiológica y el diálogo riesgo-beneficio: se concluyó que en la actualidad existe cultura de protección radiológica entre los profesionales; sin embargo, se ha visto la necesidad de avanzar más en la educación de los radiólogos, debido a que estos han perdido la interacción clínica. Así como la insistencia en la educación de los médicos prescriptores que tiene poco conocimiento sobre la radioprotección; que da como solución a esto el establecer actividades que promuevan la radioprotección en los servicios de radiología y toda la comunidad hospitalaria.⁷⁷

Nguyen y sus colaboradores realizan una investigación sobre la frecuencia de radiodiagnóstico en las afecciones del intestino, en patologías como enfermedad de Crohn y colitis ulcerosa. Para esto utilizaron información de aproximadamente 73000 casos de enfermedades inflamatorias del intestino (EII) entre los años 1994 y 2016 y los compararon con un estudio de cohorte de 730 000 pacientes. Con esto demostraron que la utilización de imágenes abdominales se usa más en pacientes con patologías intestinales que en los pacientes control, exponiéndose así a más radiación ionizante. De los procedimientos radiológicos como: radiografías simples de abdomen, enema de bario y TC, estos fueron realizadas al menos una vez en un tercio de los pacientes con EII.⁷⁸

Se observó que esta cantidad de exámenes con radiación ionizante disminuyeron considerablemente en los últimos años, esto debido a que se encontraron métodos diagnósticos alternativos como ultrasonido y resonancia magnética, las cuales no utilizan este tipo de radiación. Sin duda, Nguyen muestra en este estudio la importancia de buscar métodos alternativos para el diagnóstico de EII, reduciendo así la exposición a la radiación facilitando el acceso a la resonancia magnética y promoviendo la utilización del ultrasonido.⁷⁸

En los años 2017 y 2018 se realizó una investigación en el área de Radiología y Hemodinámica en el Hospital Dr. Arnulfo Arias Madrid, para determinar el nivel de conocimiento del personal sobre radioprotección. En este se utilizó una muestra de 182 trabajadores ocupacionalmente expuestos que ejercen en el área ya mencionada, de los cuales solo 129 aceptaron participar. Tomando como criterios de inclusión el que tuvieran más de 3 meses de

experiencia y de exclusión que estuvieran de vacaciones o que trabajaran en áreas ajenas a la utilización de radiación ionizante. Las variables incluidas fueron: sexo, edad, área de trabajo, conocimientos sobre radioprotección, prácticas de radioprotección, conocimiento sobre efectos estocásticos y determinísticos y capacitación en protección radiológica.⁷⁹

Teniendo como conclusión que de los 129 participantes el 40 % tuvo un puntaje deficiente, el 30% un puntaje regular y el 30% un puntaje bueno. El nivel de conocimiento sobre radioprotección se consideró deficiente en un 40%. La pregunta con más respuestas incorrectas con el 55%, consistía sobre la principal fuente de radiación en fluoroscopia. Los especialistas con menor conocimiento fueron los gastroenterólogos, anestesiólogos y neumólogos. En la evaluación de prácticas de radioprotección, el 33% no cuenta con dosímetro personal y el 62% no conoce su registro dosimétrico.⁷⁹

En el año 2018 H. Ribeiro y O. Husson realizaron una investigación con el objetivo de evaluar la consciencia del paciente ante exposiciones a radiación ionizante. Para esto se buscaron 140 artículos que hablarán de los conocimientos de los pacientes sobre el tema; sin embargo, por criterios de exclusión solo se llegaron a evaluar 4 de ellos. A cada uno se le realiza una evaluación crítica, en donde se demuestra que todos reportan que los pacientes carecen de conocimientos, destacando que el principal problema de esto es la falta de comunicación entre el médico y paciente. Como conclusión afirman que hay una necesidad evidente de informar de mejor manera a los pacientes sobre las exposiciones a la radiación.⁸⁰

En el año 2019, se realiza una encuesta a 139 profesionales ocupacionalmente expuestos a radiación ionizante en unidades de Cardiología Intervencionista en Sudamérica, de 7 países por medio de una plataforma web. La encuesta constaba de 23 preguntas en las cuales se incluía las variables: sexo, edad, años de experiencia en el área, cantidad de procedimientos en los que participa, rango profesional, elementos de radioprotección y dosímetros utilizados, ubicación de estos y posición de trabajo.⁸¹

En los resultados se obtuvieron que a nivel global los trabajadores ocupacionalmente expuestos usan en un 95.5% los delantales, en un 98.4% los cuellos tiroideos y en un 42.4% las pantallas plomadas. Utilizan en un 36.8% los lentes plomados, en un 34.2% los guantes plomados y en un 6.8% los gorros plomados. Con respecto a la ubicación anatómica de los dosímetros solo el 7.9% lo utiliza correctamente. En conclusión, se obtuvo que los equipos de radioprotección tradicionales son utilizados de forma correcta; sin embargo, falta la adecuada implementación de los nuevos en el mercado. Con relación a la dosimetría se considera de urgencia intervenir en las técnicas para cambiar el desconocimiento sobre este tema.⁸¹

Se realizó un estudio del 1 de junio del año 2019 al 31 de mayo del año 2020 en pacientes que se encontraban en sala de espera para realizarse exámenes radiológicos en 16 hospitales distintos de Italia. Los criterios de exclusión utilizados fueron, incapacidad física o mental y edad menor de 18 años. La encuesta consistió en 23 preguntas, que estaban destinadas a evaluar el conocimiento de los pacientes sobre los riesgos de la radiación ionizante.⁸²

La encuesta fue realizada a 3039 pacientes, presentando una tasa de respuesta de un 94.3%. El nivel de educación de los participantes fue bajo para el 23.1%, intermedio para el 47.7% y alto para el 29.2%. Las mujeres tuvieron un mejor nivel de conocimiento que los hombres con un 32.1%. En conclusión, se obtuvo que a pesar de que el 98.5% de los participantes se había realizado estudios de imagen, pocos de ellos conocían el riesgo de la radiación y algunos de estos conocimientos los habían adquirido fuera del ámbito médico. Esto sugiere que la comunicación entre el personal sanitario y pacientes no es la adecuada y exige una mejora en esto para proteger la salud de los usuarios.⁸²

En el año 2020 se realizó un estudio en Ecuador que tuvo como objetivo evaluar el nivel de conocimiento de los profesionales que laboran en el área de radiología de un hospital público en la ciudad de Portoviejo. Para esta investigación se encuestó a 20 de los 21 trabajadores ocupacionalmente expuestos. De estos el 75% eran técnicos radiólogos, el 15% médicos radiólogos y el 10% asistentes en el área de radiología. De ellos solo el 55% refiere que utilizan el equipo de protección radiológico, mientras que el 45% lo utiliza ocasionalmente. El 70% de los participantes afirma tener nivel alto en conocimiento de protección radiológica, mientras que el 30% considera que este es moderado. El 85% de los trabajadores afirman que utilizan el dosímetro de una manera correcta. Sin embargo, el 15% afirma que ni siquiera tienen disposición de ellos.⁸³

Con esta investigación llegaron a la conclusión que no importa la profesión ni los años de experiencia para tener conocimientos sobre radioprotección. En relación con las preguntas realizadas se considera que es necesaria la implementación de cursos de actualización relacionados con la protección radiológica.⁸³

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS

Los artículos *Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos X y la creación de una nueva profesión médica*, publicado en el año 2016 por la Revista Argentina de Radiología y en el artículo *Radiología e imagen*, publicado en el año 2018 por la Revista Facultad de Medicina, hablan del fascinante descubrimiento de los rayos X por el físico Roentgen, que da un nuevo giro al campo de la medicina.^{7,8} Sin embargo, en el año 2016 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, realiza una publicación, titulada *Radiación efectos y fuentes*, en el cual se habla sobre los principales hallazgos negativos de la radiación ionizante en las primeras personas en contacto con esta, tanto a corto plazo, en el caso de las lesiones en la piel, como a largo plazo, con la aparición de cáncer y enfermedades hematopoyéticas. Con esto se observa que los efectos han venido desde hace mucho tiempo atrás sin embargo el uso de esta no se ha limitado por el beneficio que trae hacia la detección de enfermedades.⁵

En el año 2022 el OIEA hace una actualización de la definición de radiación, la cual define como, la energía que se transmite por medio del espacio a través de ondas electromagnéticas. Hacen mención a dos tipos de radiación, ionizantes y no ionizantes.¹² En el año 2015 la Revista de la Sociedad Española del Dolor publicó una revisión llamada, *Fluoroscopia y protección radiológica en tratamiento del dolor*, en la cual se hace mención sobre que la radiación ionizante es capaz de atravesar el material para cambiar la composición de sus átomos para dar origen a un ion, que puede producir pérdida de los enlaces químicos y cambios genéticos en las células.¹³

En el año 2017 la Revista Sensors publicó un artículo titulado, *Ionizing radiation measurement solution in a Hospital Environment*, en el cual se la define como la energía suficientemente capaz de ionizar la materia y hace mención de la clasificación de la misma en: alfa, gamma y beta.¹⁴ Sin embargo, en una tesis de Postgrado, publicada en Perú, llamada *Conocimiento de los médicos sobre radiación ionizante Hospital Nacional Luis Nicasio Sáenz Policía Nacional del Perú 2019*, realizada por Yuly Rodríguez, menciona dentro de la clasificación, los rayos X.⁶ En la tesis de Postgrado, publicada en 2015 por Berta Coto llamada, *Dosimetría de la energía ionizante en médicos y técnicos del departamento de radiología*, vuelve a hacer mención de la misma clasificación.¹⁶

En ambas se define a los rayos X como radiación electromagnética de longitud corta, capaz de penetrar el cuerpo humano y hacen mención que esta es la utilizada en los estudios diagnósticos, como: radiografía convencional, TC, fluoroscopia y mamografía.^{6,16} Por lo tanto,

se determina que los rayos X son un tipo de radiación ionizante que sí es capaz de atravesar la materia y provocar cambios químicos, por lo que son los utilizados para crear imágenes del interior del cuerpo humano. No obstante, así como producen cambios en los enlaces químicos y en los genes de las células para ser beneficios, estos pueden producir cambios perjudiciales para la salud.

En la tesis *Estudio de técnicas de imagen, radiaciones ionizantes y sus aplicaciones en radioterapia*, elaborada por Eva Herranz en Madrid 2019 se menciona que los rayos X han tenido un gran auge en el diagnóstico de diversas enfermedades y terapias, entre las utilizadas, se encuentran: los rayos X, fluoroscopia, TC y mamografía.¹¹ En Guatemala, el año 2018, Ana Beckley en su tesis, *Exposición a radiación ionizante en el personal médico del departamento de Anestesiología*, reportó que la radiografía convencional es la más utilizada en el ámbito de la medicina.¹⁹ Sin embargo, estudios publicados por La Facultad de Ciencias Exactas y Naturales en su artículo, *Importancia del índice de dosis en tomografía computarizada (CTDI) para la protección radiológica de los pacientes sometidos a estudios tomográficos*, la TC es la responsable del 50% de la radiación emitida por prácticas médicas.²⁰

La Revista Médica del Uruguay en su artículo, *Dosis acumulada en tomografía computada 2014-2017: análisis descriptivo de una población del Hospital de Clínicas*, indica que la TC comprende el 98% de la radiación artificial en la población y el 20% de la radiación total. También, reporta que la dosis de 1 TC equivale a 75 rayos X de tórax.³ Por lo que se puede afirmar que la radiografía de tórax es la más frecuentemente solicitada por los médicos a nivel hospitalario y clínico; sin embargo, la fuente de radiación más tóxica para el ser humano es la proveniente de la TC.

En el artículo publicado en el año 2018 por la Revista Colombiana de Cardiología, titulado *Radiación ionizante: revisión de tema y recomendaciones para la práctica*, se determina que actualmente a los efectos nocivos a corto plazo de aparición aguda son reconocidos como reacciones tisulares y que dependen de una dosis umbral para su aparición.²⁵ Sin embargo, en el artículo publicado en el año 2020 por la Revista Neuronum, titulado *Una mirada real y actualizada sobre los efectos de las dosis de radiación percibidas por los pacientes y los trabajadores del área de radiología*, se define como efecto nocivo a corto plazo o bien aún conocido como efecto determinístico, aquel efecto que tiene aparición inmediata y que es caracterizado por poseer una dosis umbral, que se tiene que sobrepasar para manifestarse a nivel clínico.²⁷ Por lo que ambos comparten que un efecto a corto plazo para manifestarse necesita sobrepasar una dosis establecida y que a lo largo de los años se le ha nombrado de distintas formas entre estas reacciones tisulares o bien efectos determinísticos.

En la tesis publicada por la Universidad del Azuay, en Ecuador, titulada *Alteraciones producidas por radiaciones ionizantes en las células sanguíneas en el personal de Medimagen, Cuenca 2018*, se establece que luego de realizar estudios, las manifestaciones a nivel hematológico comprenden valores bajos de leucocitos, de linfocitos, eritrocitos, hemoglobina, hematocrito y reticulocitos. En efecto, hace mención que la línea blanca es la que sufre un mayor daño.³⁰ Asimismo, el artículo publicado por la Revista Anales de la Asociación Física Argentina, titulado *Estudio preliminar de los efectos de las radiaciones gamma sobre los glóbulos rojos humanos* hace mención que la alteración principal ocurre en la bicapa lipídica, que altera la permeabilidad de esta; que da como resultado una alteración de la agregación eritrocitaria.³¹ Por ende, tanto a nivel de los glóbulos rojos como blancos, se presentan alteraciones significativas provocadas por la exposición a radiación ionizante.

En el año 2016 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, realiza una publicación, titulada *Radiación efectos y fuentes*, donde hace referencia a que en el síndrome de irradiación aguda, se desarrollan una serie de síntomas gastrointestinales entre estos se puede mencionar los vómitos, diarrea, cólicos intestinales, salivación y la deshidratación.⁵ Por otro lado, En el artículo publicado en el año 2020 por la Revista Colombia de Cardiología, titulado *Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes*, da a conocer que las manifestaciones a nivel gastrointestinal suceden en tres etapas, en las cuales se presentan una serie de síntomas y entre los más frecuentes está la anorexia, náuseas, vómitos y diarrea.²⁶ Por lo tanto, en ambas revisiones se establece que los síntomas gastrointestinales más presentados por las personas expuestas a estudios de imagen que emiten radiación son la diarrea, náuseas y vómitos.

En el año 2018, es publicado el artículo titulado *Role of Ionizing radiation in neurodegenerative diseases*, el cual señala que el sistema nervioso central se puede ver dañado tanto en dosis mínimas como al recibir grandes dosis, esta afectación ocurre debido a estrés oxidativo, alteración en la función de las mitocondrias, degeneración de proteínas y finaliza con la muerte celular apoptótica que puede causar enfermedades neurodegenerativas.³⁴ Asimismo, en el año 2020 la revista *International Journal of Molecular Sciences*, publica el artículo titulado *Radiation damage in biomolecules and cells*, en el cual se habla de la importancia de la arquitectura de la radiación en su interacción con el daño del ADN, que da gran valor a las aberraciones cromosómicas, se analiza que el genoma de fibroblastos humanos sufre daños en el ADN luego de la irradiación con rayos X.³⁵ En pocas palabras, las manifestaciones neurológicas que se observan clínicamente, se presentan como resultado de una serie de alteraciones a nivel celular, que finalmente terminan como daño irreversible causando su muerte y morbilidades sucesivas.

En el artículo titulado *Pathological effects of ionizing radiation: endothelial activation and dysfunction*, realiza mención que el daño a nivel del endotelio impide la realización de sus funciones fisiológicas normales y como resultado se produce un deterioro del tono vascular, problemas de hemostasia sanguínea, inflamación y edema en el sitio del endotelio afectado.³⁷ De manera análoga, en el artículo publicado en el año 2020 y titulado *Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases*, establece que la exposición a radiación ionizante provoca el inicio de alteraciones endoteliales que van a tener como característica un estado proinflamatorio y profibrótico con envejecimiento prematuro del endotelio.³³ Por consiguiente, las manifestaciones cardiovasculares son principalmente debido a un daño a nivel del endotelio y que esto es el primer paso para que surjan una serie de alteraciones que finalmente culminan como morbilidades cardiogénicas.

El artículo publicado en el 2019 por la Revista Dermatología Cosmética, Médica y Quirúrgica, titulado *Radiodermatitis secundaria a fluoroscopia; Reporte de un caso*, se describe que en la piel irradiada se pueden presentar un conjunto de manifestaciones estas pueden agruparse en reacciones de primer, segundo y tercer grado, cada grado con sus propias características.³⁹ En el artículo publicado en el año 2021, titulado *Review of the terminology describing ionizing radiation-induced skin injury: a case for standardization*, al evaluar los daños en la piel luego de la exposición a radiación ionizante. Se logra la conclusión que las variaciones de la severidad de las alteraciones sufridas en la piel se ajustan a la cantidad de dosis, el fraccionamiento y la energía del haz. De acuerdo al tiempo que dure la lesión se puede categorizar en fase temprana y tardía.³⁸ Como se ha demostrado, los daños en la piel pueden ser categorizados de acuerdo a la magnitud de la dosis, el tamaño de la lesión, las características de estas y por lo anterior se le dará un orden creciente en cuanto a su severidad.

En el año 2015, la Universidad Nacional de Colombia realiza la publicación de la tesis titulada *Evaluación de riesgos de un servicio de radiología de las Clínicas Reina Sofía y Clínica Universitaria Colombia en la Organización Sanitas Internacional*, determina que los efectos tardíos o de largo plazo son conocidos también como efecto estocástico y son provocados por modificaciones a nivel celular y que estos generalmente son divididos en somático o hereditario.²⁹ Como se ha mostrado, en la publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, titulada *Radiación efectos y fuentes* el efecto estocástico es un evento probabilístico, en cual no posee un umbral y la posibilidad de aparición incrementa con la dosis y apoya que el origen de este efecto es provocado por daños en el material genético de una célula, después de una exposición a la radiación.⁵ Por lo tanto, un efecto nocivos a largo plazo también es conocido como efecto estocástico por su principal característica de aparición tardía;

que su principal causa es el daño ocurrido a nivel celular y puede ser dividido como somáticos o hereditarios por la capacidad de ser transferido por mutaciones a futuras generaciones.

En el año 2015 la revista *Medisur* realiza la publicación del artículo *Exposición radiológica en estomatología: riesgo en silencio y a largo plazo*, define que entre los efectos a largo plazo por exposición a radiación ionizante son los efectos carcinogénicos, son la consecuencia más significativa.⁴¹ Del mismo modo, en este mismo año es publicado el artículo titulado *Ionizing radiation-induced DNA injury and damage detection in patients with breast cancer*, en el cual se habla de que al haber un daño en el ADN, el mecanismo de reparación celular se activa y detiene el ciclo celular normal, como se ha realizado mención la radiación ionizante, llega de forma inevitable a las células normales lo cual provoca alteraciones cromosómicas e incrementa el riesgo de tumores malignos.⁴⁵ Por ende, daño causado por la exposición constante a radiación ionizante, causa daños a nivel del material genético, provocando reparaciones defectuosas del ADN, que altera la funcionalidad normal del ciclo celular, que aumenta así el riesgo de presentar distintos tipos de cáncer a futuro.

En la revista *Intervencionismo* es publicado el artículo titulado *Radiólogas intervencionistas embarazadas, ¿y ahora cómo lo hago yo?*, hace referencia que la exposición a radiación ionizante es más resistente cuando la cantidad de células es reducida y no hay especialización que provoca una alteración en la implantación o la pérdida del embrión,⁵³ Así mismo, en el artículo publicado en el presente año, titulado *Radiation exposure in pregnancy: outcomes, perceptions and teratological counseling in Turkish women*, el cual afirma que la radiación ionizante es considerada como uno de los principales teratógenos físicos y que los efectos de esta dependen de ciertas variables como la semana de gestación, la dosis y duración de la exposición.⁵⁷ Por consiguiente, el daño causado por la radiación ionizante será mayor entre menos semanas de gestación tenga la paciente expuesta, ya que habrá una menor especialización de parte de las células, lo que las hará más susceptibles a la radiación.

En el año 2019, la revista *Human & Experimental Toxicology* publica el artículo titulado *Effect of ionizing radiation on the female reproductive system*, en el cual se expone, lo que se determina luego de estudios in vitro, estableciendo que hay un incremento de frecuencia de mutaciones en la descendencia de padres irradiados, este efecto persiste durante al menos 20 a 40 divisiones celulares.⁵⁹ Además, esta misma revista, en el mismo año, publica el artículo titulado *X-ray-induced reproductive dysfunction and differentially expressed piRNAs in male mice*, donde define que la radiación ionizante puede provocar la apoptosis germinal en diferentes intensidades, esto varía según el tipo de célula. Los espermatozoides expuestos a radiación con error cromosómico guardan cierto grado de fertilización, pero pueden dirigir una

producción de embriones anormales.⁶⁰ Como resultado, en ambos sistemas reproductores, la principal consecuencia de la irradiación es la presentación de mutaciones en sus células germinales provocando embriones con anomalías.

El Ministerio de Energía y Minas en su publicación *Encargados de Protección Radiológica. Práctica Tipo II Rayos Dental*, en el año 2015, define la radioprotección como las medidas que están creadas para evitar los efectos deterministas y disminuir la probabilidad de los estocásticos y expone que esta necesita de 3 principios para ser cumplida: la justificación, optimización y limitación de dosis. En la tesis *Conocimientos, actitudes y prácticas de la protección radiológica en el personal de salud que labora en el Hospital Escuela Roberto Calderón Gutiérrez de la ciudad de Managua, 2016*, Allan Ortez, expone que la radioprotección es el conjunto de normas y conocimientos que tiene como objetivo el preservar la salud del ser humano y el medio ambiente de cualquier riesgo que pueda proceder de la radiación, sea esta natural o artificial.¹⁷ Por lo tanto, la radioprotección fue creada para velar por el bienestar de toda persona que es expuesta a radiación ionizante, sin importar si esta es trabajador ocupacionalmente expuesto, paciente o público.

En el 2017 la Revista Acta Bioethica, en su artículo, *Radiología medicolegal. Un dilema ético para el técnico en radiología*, expone que la radioprotección debe velar por el respeto de los derechos de los pacientes, principalmente de: derecho a recibir información, a la asistencia humana y científica, rechazar o aceptar procedimientos, intimidad y confidencialidad, a evitar su sufrimiento, respetar sus creencias y culturas.⁷⁶ La Revista Chilena de Radiología en 2021, en su artículo, *Valores éticos de la protección radiológica en procedimientos de radiodiagnóstico e intervencionismo radiológico*, habla sobre que la radioprotección incluye 5 valores básicos, los cuales son: beneficencia, no maleficencia, prudencia, justicia y dignidad.² Sin embargo, en 2022, la Revista MULTIMED, agrega a estos 5 valores, 3 más, los cuales consisten en: sensibilidad, confidencialidad y consentimiento informado.¹⁰

El OIEA en sus normas de seguridad, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*, establece lineamiento que deben ser cumplidos a nivel internacional para la protección de la salud y reducción del peligro para la vida y la propiedad.⁷³ Estas abarcan tanto lo humano como lo ambiental. Por ende, se establecen normas de radioprotección que se rijan en principios, valores y derechos, ayuda a los médicos prescriptores a tomar una correcta decisión sobre la solicitud de estudios de imagen de manera prudente y justificada y así preservar la salud, en los pacientes, técnicos, público y hasta en ellos mismos.

La Revista Chilena de Radiología, realiza una publicación de un artículo llamado, *Radioprotección al día en radiología diagnóstica: Conclusiones de la Conferencia Iberoamericana de Protección Radiológica en Medicina (CIPRaM) 2016*, en donde reporta los 5 problemas más relevantes en la radioprotección según una conferencia organizada por el OIEA, los cuales consisten en incumplimiento o dificultades de: justificación de los estudios, optimización de los estudios, educación de profesionales, niveles de referencia de dosis y cultura y diálogo riesgo-beneficio.⁷⁷ La Revista Intervencionismo, en su artículo *Nivel de conocimiento en protección radiológica del personal expuesto a radiaciones ionizantes en un complejo hospitalario*, reporta una investigación realizada en Panamá, en los años 2017 y 2018 en donde se evalúan a 129 trabajadores ocupacionalmente expuestos sobre los conocimientos de radioprotección, que llega a la conclusión que el 30% tuvo un puntaje alto, el 30% puntaje regular y el 40% puntaje deficiente.⁷⁹

La Revista Chilena de Cardiología, en el año 2020, realiza un estudio llamado, *Descripción de elementos de radioprotección y dosimetría en Unidades de Cardiología Intervencionista Sudamericanas: Un estudio piloto*, con el objetivo de evaluar los conocimientos en las unidades de cardiología sobre los elementos de protección radiológica y dosimetría. Para esto se encuestó a 139 profesionales expuestos a radiación en unidades de Cardiología en Sudamérica, de 7 países distintos. Como conclusión tuvieron que solo el 7.9% utiliza los dosímetros de manera correcta y que el equipo de protección si es utilizado de manera correcta; sin embargo, no hay implementación de los nuevos equipos del mercado.⁸¹ Así mismo, en el año 2020 la Revista Actualidad Médica, publica el artículo, *Uso de radiaciones ionizantes en estudios de diagnóstico en una institución de salud de Ecuador*, con el objetivo de evaluar el nivel de conocimiento de protección radiológica de los profesionales que laboran en el área de radiología de un hospital público en la ciudad de Portoviejo.

Para este estudio realizaron una encuesta a 20 participantes. La conclusión fue que solo el 55% usa de manera correcta el equipo de protección, mientras que el 45% lo utiliza de manera ocasional y con sus hallazgos indican que, no importa la profesión ni los años de experiencia para tener conocimientos sobre radioprotección.⁸³ Por ende la mayoría de personal encargado de realizar procedimientos radiológicos, no saben sobre radioprotección, tanto para los pacientes como para ellos, como personal ocupacionalmente expuesto. Así mismo, se ve la falta de conocimiento de todos los médicos prescriptores, lo que explica que muchos procedimientos radiológicos no tengan justificación y se realicen de manera rutinaria, sin pensar los riesgos que pueden causar.

En el año 2018, H. Ribeiro y O. Husson hacen una publicación en la Revista *Radiography*, titulada *Ionising radiation exposure from medical imaging - A review of Patient's (un) awareness*, en donde realizan una evaluación crítica de 4 artículos, donde hablaban de los conocimientos de los pacientes sobre la radioprotección, llegando a la conclusión que los pacientes carecen de conocimiento y que el principal problema es la comunicación médico-paciente.⁸⁰

En el año 2021, JAMA Network Open, publica un artículo llamado *Ionizing Radiation from Medical Imaging*, con el objetivo de evaluar el conocimiento sobre los riesgos de la radiación en pacientes que se encontraban en sala de espera para hacerse estudios radiológicos. Para esto entrevistaron a 3039 pacientes de 16 hospitales distintos de Italia. Como conclusión tuvieron que el 23.1% tenía un nivel bajo, el 29.2% un nivel alto y el 47.7% un nivel intermedio de conocimiento.⁸² Por lo tanto, la mayoría de los pacientes que se realizan exámenes radiológicos no saben por qué se los prescriben y el riesgo que estos conllevan. Esto debido a la falta de comunicación del médico tratante o radiólogo, quienes deberían de explicar tanto el riesgo como el beneficio de cada procedimiento, ya que todos tienen derecho a cuidar su salud y decidir si se realizan un estudio o no.

CONCLUSIONES

La radiación ionizante es la energía que se libera en forma de ondas electromagnéticas donde un átomo pierde o gana electrones para formar un ion de alto voltaje en la materia, capaz de atravesar el cuerpo humano para la creación de imágenes de su interior.

La evolución de la radiación ionizante inicia desde el año 1895 con su descubrimiento, la cual, hasta el día de hoy, es la más utilizada en el diagnóstico por imágenes de diversas enfermedades a nivel mundial.

Los estudios de imagen que emiten radiación ionizante y que tienen un mayor auge como uso de herramientas diagnósticas, en orden descendente de frecuencia son los rayos X, tomografía computarizada, fluoroscopia y mamografía.

Los efectos nocivos de la radiación ionizante que se presentan a corto plazo o bien conocidos como deterministas, se definen como aquellos que provocan cambios en los tejidos del ser humano, siendo los más característicos el eritema, los trastornos hematopoyéticos y el síndrome agudo por radiación.

La exposición constante a radiación ionizante es la cantidad de veces que es expuesto un paciente a estudios de imagen y la dosis recibida en cada uno de estos, se vuelve acumulativa y finalmente dañina.

Los efectos nocivos a largo plazo de la radiación ionizante también son conocidos como estocásticos, estos son los que su probabilidad de aparición aumenta con la dosis recibida, y su principal característica es que su causa radica en daños a nivel del ADN.

La protección radiológica es la serie de medidas preventivas, determinadas por los organismos capacitados para la implementación segura de la radiación ionizante y garantizar la protección del ser humano, de sus descendientes, de la población en general; esta se basa en tres principios justificación, optimización, limitación de dosis.

Se observa deficiencia de conocimiento sobre la protección radiológica por parte de los diferentes profesionales de la salud que prescriben estudios diagnósticos de imagen de manera repetitiva y sin justificación.

RECOMENDACIONES

La radiación ionizante es una energía de alto voltaje que puede generar cambios en la materia. Es fundamental que todo personal de salud conozca su funcionalidad, para comprender mejor cómo actúa esta en el cuerpo humano.

Es importante la evolución que ha tenido la radiación ionizante aplicada en estudios de imagen en el transcurso del tiempo. Es imprescindible, actualizar a todo el gremio médico sobre la dosis, la técnica y en qué casos se utilizan para tener el máximo beneficio y este supere el riesgo.

Los estudios de imagen con mayor utilidad en el campo de la medicina son los que emiten radiación ionizante. Es importante informar a todas las especialidades médicas, sobre cuáles son estos para que sepan solicitarlos de manera más consciente.

Los procedimientos radiológicos muchas veces son realizados de manera inapropiada. Es de suma importancia, capacitar a los técnicos encargados de la realización de los estudios radiológicos para limitar el tiempo de exposición en cada procedimiento y evitar la repetición de estos por mala técnica y que impacte en la reducción de efectos determinísticos.

En diferentes instituciones médicas, se indica de manera frecuente el mismo tipo de estudio de imagen al mismo paciente y sin el tiempo prudente entre estos. Se debe concientizar a los médicos tratantes en justificar el por qué se indica nuevamente la realización del mismo estudio.

Algunos efectos de la exposición a la radiación aparecen de manera tardía. Es importante, dar a conocer tanto al personal médico como al paciente, que cada estudio contiene una dosis de radiación que se acumula a lo largo de la vida, pudiendo convertirse en un efecto nocivo a largo plazo, entre estos cáncer y problemas en su descendencia.

La radioprotección ha perdido importancia en el afán de ahorrar tiempo en cada procedimiento y cubrir la demanda de pacientes. Es primordial, educar tanto al médico tratante como al paciente de que existen medidas de protección para el cuidado de su salud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Serrato D, Nieto R, Aguilera A. Efectos negativos de la radiación ionizante empleada en diagnóstico odontológico. Rev Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes [en línea]. 2018 [citado 9 Jun 2022]; 26(74): 81-87. Disponible en: <https://revistas.uaa.mx/index.php/investycien/article/view/1761/1644>
2. Ubeda de la Cerda C, Soffia Sánchez P, Inzulza Contardo A, Miranda Gonzalez P, Aragón Caqueo G, Aragón Caqueo D. Valores éticos de la protección radiológica en procedimientos de radiodiagnóstico e intervencionismo radiológico. Rev chil radiol [en línea]. 2021 Dic [citado 2 Jun 2022]; 27(4): 164-169. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-93082021000400164&lng=es
3. Servente Luquetti L, Martinucci Silva F, Chozza Lecuna N, Hartmann Larronda H, Irazoqui Cortazzo M, Maguna Baubeta C, et al. Dosis acumulada en tomografía computada 2014-2017: análisis descriptivo de una población del Hospital de Clínicas. Rev Méd Urug [en línea]. 2018 Sep [citado 2 Jun 2022]; 34(3): 19-44. Disponible en: http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1688-03902018000300019&lng=es
4. Saa Loor JL, Cantos Vines JC. Medidas de protección contra la radiación ionizante en el personal ocupacionalmente expuesto en el ámbito hospitalario [tesis Máster en Seguridad y Salud Ocupacional en línea]. Ecuador: Universidad San Gregorio de Portoviejo, Facultad de Posgrados; 2021 [citado el 24 Ago 2022]. Disponible: <http://repositorio.sangregorio.edu.ec/handle/123456789/2060>
5. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Radiación efectos y fuentes [en línea]. Austria: PNUMA; 2016 [citado 4 Jun 2022]. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources_SP.pdg.pdf?sequence=7&isAllowed=y
6. Rodríguez Pérez YP. Conocimiento de los médicos sobre radiación ionizante Hospital Nacional Luis Nicasio Sáenz policía nacional del Perú 2019 [tesis Especialidad de Radiología en línea]. Perú: Universidad de San Martín de Porres, Facultad de Medicina Humana; 2019 [citado 07 Jul 2022]. Disponible en:

https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/5178/rodriguez_pyp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

7. Ramírez Arias JL. Radiología e imagen. Rev Fac Med UNAM [en línea]. 2019 [citado 23 Ago 2022]; 62(2):7-14. doi: <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2019.62.2.03>
8. Busch U. Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos X y la creación de una profesión médica. Rev Argent Radiol [en línea]. 2016 Oct [citado 5 Jun 2022]; 80(4):298-307. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-argentina-radiologia-383-articulo-wilhelm-conrad-roentgen-el-descubrimiento-S0048761916301545>
9. Sosa Rivera A M, Borjas L. Historia y evolución de la Radiología en Centroamérica. Rev Fac Cienc Méd [en línea]. 2015 [citado 3 Sep 2022]; 12(2): 30-40. Disponible en: <http://www.bvs.hn/RFCM/pdf/2015/pdf/RFCMVol12-2-2015-5.pdf>
10. Dornes Ramón R, Vásquez Mora Y, Vásquez Roque A, Alberna Cardoso A. Las radiaciones ionizantes como expresión del desarrollo científico-tecnológico: responsabilidad social en su uso. MULTIMED [en línea]. 2022 [citado 23 Ago 2022]; 26(1): 1-13. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mmed/v26n1/1028-4818-mmed-26-01-e2006.pdf>
11. Herranz Heredia E. Estudio de técnicas de imagen, radiaciones ionizantes y sus aplicaciones en radioterapia [tesis Ingeniería en Tecnológicas Industriales en línea]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales; 2019 [citado 1 Sep 2022]. Disponible en: https://oa.upm.es/54133/1/TFG_EVA_HERRANZ_HEREDIA.pdf
12. Organismo Internacional de Energía Atómica [en línea]. Viena: Vienna International Centre; 1998-2022 [actualizado 22 Jun 2022; citado 24 Ago 2022]; ¿Qué es la radiación?; [aprox. 2 pant.]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion>
13. Hernández García J M, Reina M A, Vidal Marcos A. Fluoroscopia y protección radiológica en tratamiento del dolor. Rev Soc Esp Dolor [en línea]. 2015 Oct [citado 03 Ago 2022]; 22(5):217-223. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1134-80462015000500006&lng=es

14. Garcia Sánchez AJ, Garcia Angosto EA, Moreno Riquelme PA, Serna Berna A, Ramo Amores D. Ionizing radiation measurement solution in a Hospital Environment. *Sensors* [en línea]. 2018 [citado 19 Jun 2022]; 18(2):510. doi: <https://doi.org/10.3390/s18020510>
15. Valle Bourrouet L, Ortiz Morales F, García Lima O, González Mesa J E, Chaves Campos A, Rodríguez González M, et al. Inicio de la dosimetría biológica en Costa Rica y su importancia en la atención de poblaciones sobreexpuestas a radiaciones ionizantes. *Población y Salud en Mesoamérica* [en línea]. 2022 Ene [citado 1 Jun 2022]; 19(2):1-18. doi: 10.15517/psm.v0i19.49210
16. Coto Pacheco B E, Ceballos García M A. Dosimetría de la energía ionizante en médicos y técnicos del Departamento de Radiología [tesis de Maestría en Ciencias Médicas con Especialidad en Radiología e Imágenes Diagnósticas en línea]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Médicas; 2015 [citado 3 Sep 2022]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/05/05_9637.pdf
17. Rugama Ortiz A. Conocimientos, actitudes y prácticas de la protección radiológica en el personal de salud que labora en el Hospital Escuela Roberto Calderón Gutiérrez de la ciudad de Managua, 2016 [tesis en Especialidad en Radiología en línea]. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad de Ciencias Médicas; 2016 [citado 1 Jun 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unan.edu.ni/1477/1/40173.pdf>
18. El Nacheff L, Al Choboq J, Restier Verlet J, Granzotto A, Berthel E, Sonzogni L, et al. Human radiosensitivity and radiosensitization: what are the differences? *Int J Mol Sci* [en línea]. 2021 [citado 23 Ago 2022]; 22(13): 1-20. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms22137158>
19. Izaguirre Beckley AJ. Exposición a radiación ionizante en el personal médico del Departamento de Anestesiología [tesis en Maestría en Ciencias Médicas con Especialidad en Anestesiología en línea]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Médicas; 2018 [citado 3 Sep 2022]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/05/05_10816.pdf
20. Gómez Grance FJ, Rodríguez Zárate YL. Importancia del índice de dosis en tomografía computarizada (CTDI) para la protección radiológica de los pacientes sometidos a estudios tomográficos. *Rep cient FACEN* [en línea]. 2018 Jun [citado 2 Jun 2022]; 9(1): 24-30. Disponible en: http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2222-145X2018000100024&lng=en

21. Castrillon Giraldo WS, Morales Aramburo J, Jaramillo Garzón W. Control de calidad en equipos de rayos X en intervencionismo. *Rev Colomb Cardiol* [en línea]. 2020 [citado 22 Ago 2022]; 27 Suppl 1: S88-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2019.09.009>
22. Pereira L, Ferreira M T, Lima A G F, Salata C, Ferreira Marchado S, Lima I, et al. Biological effects induced by doses of mammographic screening. *Phys Med* [en línea]. 2021 Jul [citado 23 Ago 2022]; 87(1): 90-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.06.002>
23. Pauwels EKJ, Foray N, Bourguignon M H. Breast cancer induced by X-ray mammography screening? A review based on recent understanding of low-dose radiobiology. *Med Princ Pract* [en línea]. 2016 [citado 24 Ago 2022]; 25(2):101-109. doi: <https://doi.org/10.1159/000442442>
24. Gómez Grance F J, López Espinoza A. Estimación de dosis glandular promedio de pacientes expuestos a exámenes mamográficos convencionales. *Reportes Científicos de la FACEN* [en línea]. 2018 [citado 22 Ago 2022]; 9(1): 3-8. Disponible en: <https://revistascientificas.una.py/index.php/rcfacen/article/view/1112/1110>
25. Badel A, Rico Mesa J, Gaviria M, Arango D, Hernández C. Radiación ionizante: revisión de tema y recomendaciones para la práctica. *Rev Colomb Cardiol* [en línea]. 2018 Abr [citado 4 Jun 2022]; 25(3): 222-229. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-cardiologia-203-articulo-radiacion-ionizante-revision-tema-recomendaciones-S0120563318300275>
26. Puerta A, Morales J. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Rev Colomb Cardiol* [en línea]. 2020 [citado 6 Jun 2022]; 27 Suppl 1: S61-71. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-cardiologia-203-pdf-S0120563320300061>
27. Bueno Díaz J A, Romero Uribe M, Chacón Zambrano L A, Bolaños Ordoñez A. Una mirada real y actualizada sobre los efectos de las dosis de radiación percibidas por los pacientes y los trabajadores del área de radiología. *Rev Neuronum* [en línea]. 2020 [citado 30 Ago 2022]; 6(2): 185-197. Disponible en: <https://eduneuro.com/revista/index.php/revistaneuronum/article/view/238>

28. Fuentes L, Felipe S, Valencia V. Efectos biológicos de los rayos X en la práctica de Estomatología. Rev Habanera de Cienc Médicas [en línea]. 2015 [citado 9 Jun 2022]; 14(3): 337-347. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v14n3/rhcm11315.pdf>
29. Simbaqueba Ariza A D. Evaluación de riesgos de un servicio de radiología de las Clínicas Reina Sofía y Clínica Universitaria Colombia en la Organización Sanitas Internacional [tesis Magister en Física Médica en línea]. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencia, Departamento de Física; 2015 [citado 7 Jul 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54387>
30. García Alvear J L, Bustamante Toledo J C. Alteraciones producidas por radiaciones ionizantes en las células sanguíneas en el personal de Medimagen, Cuenca 2018 [tesis Magíster en Salud Ocupacional y Seguridad en el Trabajo en línea]. Ecuador: Universidad del Azuay, Departamento de Posgrados; 2019 [citado 01 Sep 2022]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8897/1/14545.pdf>
31. Estrada E, Castellini H, Acosta A, Di Tullio L, Borraz J, Chinellato A, et al. Estudio preliminar de los efectos de las radiaciones gamma sobre los glóbulos rojos humanos. An AFA [en línea]. 2020 Ago [citado 17 Jun 2022]; 31(2): 51-54. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-11682020000200003&lng=es&tlng=es
32. Ramos S, Rivera D, Segura K, Thraves E, Durán A, Soto V, et al. Análisis citogenético en linfocitos de trabajadores expuestos a radiación ionizante en una unidad de cardiología intervencional de Chile: estudio piloto y revisión de la literatura. Rev Chil Cardiol [en línea]. 2020 Abr [citado 17 Jun 2022]; 39(1): 8-15. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-85602020000100008&lng=es
33. Tapio S, Little M, Kaiser J, Impens N, Hamada N, Georgakilas A, et al. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases. Environment international [en línea]. 2020 [citado 17 Jun 2022]; 146: 106235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106235>
34. Sharma N, Sharma E, Mathur D, Sharad S, Minhas G, Bhatia K, et al. Role of ionizing radiation in neurodegenerative diseases. Front Aging Neurosci [en línea]. 2018 Mayo [citado 20 Jun 2022]; 10(134): 1-15. doi: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00134>

35. Carante MP, Ballarini F. Radiation damage in biomolecules and cells. *Int J Mol Sci* [en línea]. 2020 Oct [citado 23 Ago 2022]; 21(21): 1-3. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms21218188>
36. Restrepo D. Salud mental de los cardiólogos intervencionistas: estrés ocupacional y consecuencias mentales de la exposición a radiación ionizante. *Rev Colomb Cardiol* [en línea]. 2020 [citado 22 Ago 2022]; 27 Suppl 1: S13-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2019.12.001>
37. Baselet B, Sonveaux P, Baatout S, Aerts A. Pathological effects of ionizing radiation: endothelial activation and dysfunction. *Cell Mol Life Sci* [en línea]. 2019 [citado 19 Jun 2022]; 76(1): 699-728. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00018-018-2956-z.pdf>
38. Burnett L, Hughes R, Rejeski A, Moffatt L, Shupp J, Christy R, et al. (2021). Review of the terminology describing ionizing radiation-induced skin injury: a case for standardization. *Technology in cancer research & treatment* [en línea]. 2021 [citado 17 Jun 2022]; 20(1): 1-8. doi: <https://doi.org/10.1177/15330338211039681>
39. Muñoz Muñoz R, Alfaro Orozco LP, Martínez Félix M. Radiodermatitis secundaria a fluoroscopia: reporte de un caso. *DermatologíaCMQ* [en línea]. 2019 [citado 22 Ago 2022]; 17 (4): 269-271. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=91636>
40. Alcocer P, Marquez C, Quintana F, Chalén S, Gamarra E. Quemaduras radioinducidas. *Cir Plást Iberolatinoam* [en línea]. 2020 Abr [citado 1 Jun 2022]; 46 Suppl 1: S107-114. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-78922020000200017&lng=es
41. Duany Mejias T, Balbis Cabrera M. Exposición radiológica en estomatología: riesgo en silencio y a largo plazo. *Medisur* [en línea]. 2015 Abr [citado 22 Ago 2022]; 13(2): 337-339. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2015000200001&lng=es
42. Elizondo Plazas A. Asociación entre la exposición aditiva a radiación ionizante y su efecto en la estabilidad del DNA [tesis de Especialista en Genética Médica en línea].

México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Medicina; 2021 [citado 22 Ago 2022]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/20363/1/TESIS%20-%20AEP.pdf>

43. Cháves Campos A, Valle Bourrouet L, Melaspín Bendaña W, Ramírez Mayorga V. Ensayo de micronúcleos con bloqueo de la citocinesis como biomarcador de daño genético en poblaciones sobreexpuestas a radiaciones ionizantes. *Población y Salud en Mesoamérica* [en línea]. 2022 [citado 23 Ago 2022]; 19(2): 1-19. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/psm/v19n2/1659-0201-psm-19-02-00553.pdf>
44. Mavragani I, Nikitaki Z, Kalospyros S, Georgakilas A. Ionizing radiation and complex DNA damage: from prediction to detection challenges and biological significance. *Cancers* [en línea]. 2019 Nov [citado 19 Jun 2022]; 11(11):1-29. doi: <https://doi.org/10.3390/cancers11111789>
45. Borrego G, Ortiz R, Rojas A. Ionizing radiation-induced DNA injury and damage detection in patients with breast cancer. *Gent Mol Biol* [en línea]. 2015 [citado 6 Jun 2022]; 38(4): 420-432. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4763322/pdf/1415-4757-gmb-S1415-475738420150019.pdf>
46. Infantes Vizcarra W I. Biomonitoring genético en trabajadores del servicio de radiología del Hospital Nacional Policial Luis N. Saénz. *Rev Fac Med Hum* [en línea]. 2020 Ene [citado 23 Ago 2022]; 20(1):51-54. doi: <http://dx.doi.org/10.25176/rfmh.v20i1.2256>
47. Belli M, Tabocchini M A. Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection. *Int J Mol Sci* [en línea]. 2020 Ago [citado 20 Jun 2022]; 21(17): 1-34. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms21175993>
48. Dawood A, Mothersill C, Seymour C. Low dose ionizing radiation and the immune response: what is the role of non-targeted effects?. *International journal of radiation biology* [en línea]. 2021 [citado 17 Jun 2022]; 97(10): 1368–1382. doi: <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1962572>
49. Lumniczky K, Impens N, Armengol G, Candéias S, Georgakilas A, Hornhardt S, et al. Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environment international* [en línea]. 2021 [citado 17 Jun 2022]; 149: 106212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212>

50. Rosero López JD. Lesiones tiroideas asociada a la exposición de radiación ionizante en el personal de salud [tesis Médico y Cirujano en línea]. Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Médicas; 2020 [citado 1 Sep 2022]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/52435>
51. Abalo K, Rage E, Leuraud K, Richardson D, Le Pointe H, Laurier D, et al. Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol* [en línea]. 2020 [citado 23 Ago 2022]; 51(1): 45-56. Disponible en: <https://www.schcp.cl/wp-content/uploads/2020/11/Pediatr-Radiol-2020.pdf>
52. Ávila Carrillo V P. Alteraciones clínicas en la salud del personal expuesto a radiaciones ionizantes en los hospitales. *Revista San Gregorio* [en línea]. 2022 [citado 24 Ago 2022]; 1(50): 133-147. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S252879072022000200133&script=sci_abstract
53. Gallego Riol M, Guirola JA, Gregorio MA. Radiólogas intervencionistas embarazadas, ¿y ahora cómo lo hago yo?. *Intervencionismo* [en línea]. 2020 [citado 01 Sep 2022]; 20(1):33-37. doi: 10.30454/2530-1209.2020.1.4
54. Vaiserman A, Koliada A, Zabuga O, Socol Y. Health impacts of low-dose ionizing radiation: current scientific debates and regulatory issues. *SAGE* [en línea]. 2018 Sep [citado 19 Jun 2022]; 16(3): 1-27. doi: <https://doi.org/10.1177%2F1559325818796331>
55. Ali Y, Cucinotta F, Ning Ang L, Zhou G. Cancer risk of low dose ionizing radiation. *Front Phys* [en línea]. 2020 Ago [citado 20 Jun 2022]; 8(234):1-9. doi: <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00234>
56. Hauptmann M, Daniels R, Cardis E, Culling H, Kendall G, Laurier D, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis. *J Natl Cancer Inst Monogr* [en línea]. 2020 Jul [citado 19 Jun 2022]; 200(56): 188-200. doi: <https://doi.org/10.1093/jncimonographs/lgaa010>
57. Seven M, Yigin AK, Agirbasli D, Alay MT, Kirbiyik F, Demir M. Radiation exposure in pregnancy: outcomes, perceptions and teratological counseling in Turkish women. *ANN SAUDI MED* [en línea]. 2022 [citado 23 Ago 2022]; 42(3): 214-221. doi: <https://doi.org/10.5144/0256-4947.2022.03.03.1200>

58. Mattson S, Leide Svegborn S, Andersson M. X-ray and molecular imaging during pregnancy and breastfeeding-when should we be worried?. *Radiat Prot Dosimetry* [en línea]. 2021 Oct [citado 23 Ago 2022]; 195(3-4):339-348. doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab041>
59. Skrzypek M, Wdowiak A, Panasiuk L, Stec M, Szczygiel K, Zybala M, et al. Effect of ionizing radiation on the female reproductive system. *Ann Agric Environ Med* [en línea]. 2019 [citado 20 Jun 2022]; 26(4): 606-616. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/112837>
60. Liu X, Chen Q, Ding X, Zhao Y, Zhang K, Yu P, et al. X-ray-induced reproductive dysfunction and differentially expressed piRNAs in male mice. *Hum Exp Toxicol* [en línea]. 2019 Mayo [citado 23 Ago 2022]; 35(5):533-546. doi: <https://doi.org/10.1177%2F0960327118812187>
61. Wdowiak A, Skrzypek M, Stec M, Panasiuk L. Effect of ionizing radiation on the male reproductive system. *AAEM* [en línea]. 2019 [citado 18 Jun 2022]; 26(2): 210-216. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/106085>
62. Schwarz FC, Mansano NS, Chies AB, Viani GA, Spadella MA. Potential radioprotective effect of AT1 receptor antagonists against morphological and ultrastructural changes in the testes induced by ionizing radiation. *Int J Morphol* [en línea]. 2017 [citado 23 Ago 2022]; 35(3): 820-830. Disponible en: <https://www.scielo.cl/pdf/ijmorphol/v35n3/art05.pdf>
63. Vassileva J, Homberg O. Radiation protection perspective to recurrent medical imaging: what is known and what more is needed? *Br J Radiol* [en línea]. 2021 Oct [citado 23 Ago 2022]; 94(1126): 1-12. doi: <https://doi.org/10.1259/bjr.20210477>
64. González AJ. Protección contra la exposición a bajas dosis de radiación ionizante: un paradigma en evolución (una aproximación a qué y cuánto es una dosis baja). *Rev Soc ciente Párrafo* [en línea]. 2018 Dic [citado 1 Jun 2022]; 23(2): 175-198. doi: <https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-2.175-198>
65. Nejaim Y, Vasconcelos K, Roque Torres G, Meneses López A, Bóscolo Frab N, Haiter N F. Racionalización de la dosis de radiación. *Rev estomatol Hered* [en línea]. 2015 Jul [citado 22 Ago 2022]; 25(3): 238-245. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1019-43552015000300010&Ing=es

66. Ubeda C, Vaño E, Ruiz R, Soffia P, Fabri D. Niveles de referencia para diagnóstico: una herramienta efectiva para la protección radiológica de pacientes. *Rev chil radiol* [en línea]. 2019 [citado 6 Jun 2022]; 25(1): 19-25. Disponible en: <https://www.scielo.cl/pdf/rchradiol/v25n1/0717-9308-rchradiol-25-01-00019.pdf>
67. Serra A, Ramírez C, Véliz J, Salas MI, Pérez J, Vera F, et al. Valores típicos de dosis para tomografía computada de cerebro en pacientes adultos. *Rev chil radiol* [en línea]. 2020 [citado 24 Ago 2022]; 26(1): 25-31. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-93082020000100025
68. Yeung A. The “As Low As Reasonably Achievable” (ALARA) principle: a brief historical overview and a bibliometric analysis of the most cited publications. *Radioprotection* [en línea]. 2019 [citado 1 Jun 2022]; 54(2): 103-109. doi: <https://doi.org/10.1051/radiopro/2019016>
69. Guatemala. Ministerio de Energía y Minas. Encargados de Protección Radiológica. Práctica Tipo II Rayos X Dental [en línea]. Guatemala: MEM; 2015 [citado 2 Jun 2022]. Disponible en: <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/03/Contenido-MINIMO-CURSO-EPR-DENTAL-PANOR%C3%81MICO-TIPO-II.pdf>
70. Dones Ramón R, Vásquez Mora Y, Abreu Figueredo N. Dilemas bioéticos y científico-tecnológicos en la protección radiológica. *MEDICIEGO* [en línea]. 2019 [citado 24 Ago 2022]; 25(4): 490-500. Disponible en: <http://www.revmediciego.sld.cu/index.php/mediciego/article/view/1173/2338>
71. Samuel Espin R S, Llopis Pardo M, Avila Venegas A M, Alarcón Cano R, Juaneda Seguí I, García González F J. Optimización de la dosis de radiación en tomografía computarizada: una guía actualizada [en línea]. En: 34 Congreso Nacional Pamplona de la Sociedad Española de Radiología Médica; 2018 Mayo 24-27; Pamplona, España: SERUM [citado 22 Ago 2022]. Disponible en: <https://www.piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/2960/1478>
72. Yurdaisik I, Nurili F, Aksoy S, Agirman A, Aktan A. Ionizing radiation exposure in patients with covid-19: more than needed. *Radiation protection dosimetry* [en línea]. 2021 [citado 19 Jun 2022]; 194(2-3): 135-143. doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab092>

73. Organismo Internacional de Energía Atómica. Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad [en línea]. Viena: OIEA; 2016 [citado 22 Ago 2022]. Disponible en: https://servei.org/wp-content/uploads/P1578_S_web.pdf
74. Ubeda de la C C, Nocetti D, Inzulza A, Oyarzún C, Alarcón R. Magnitudes y unidades para dosimetría del personal ocupacionalmente expuesto en radiodiagnóstico e intervencionismo. *Rev chil radiol* [en línea]. 2018 Mar [citado 2 Jun 2022]; 24(1): 5-11. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-93082018000100005&lng=es
75. Aznárez Sanado N, Aznárez Sanado M, Sierrasesúmaga L, Bilbao JI, Martí Climent JM, Patiño García A. Radiación ionizante recibida por pruebas de radiología intervencionista durante el tratamiento con quimioterapia intraarterial en pacientes afectos de osteosarcoma. *An Sist Sanit Navar* [en línea]. 2017 [citado 23 Ago 2022]; 40(1):85-92. doi: <https://dx.doi.org/10.23938/assn.0009>
76. Del Barrio Fernández J L, Rodríguez Caravaca G, Vicente Ramírez R M. Radiología medicolegal: un dilema ético para el técnico en radiología. *Acta bioeth* [en línea]. 2017 [citado 22 Ago 2022]; 23(2): 245-251. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55453395005>
77. Soffia P, Ubeda C, Miranda P, Rodríguez JL. Radioprotección al día en radiología diagnóstica: Conclusiones de la Conferencia Iberoamericana de Protección Radiológica en Medicina (CIPRaM) 2016. *Rev chil radiol* [en línea]. 2017 [citado 10 Jul 2022]; 23(1):15-19. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-93082017000100004&lng=es
78. Zundler S. Utilization of diagnostic imaging and ionizing radiation exposure-has the tide already turned? *Inflammatory bowel diseases* [en línea]. 2020 Sep [citado 19 Jun 2022]; 26(6): 907-908. doi: <https://doi.org/10.1093/ibd/izz220>
79. Troetsch B. Nivel de conocimientos en protección radiológica del personal expuesto a radiaciones ionizantes en un complejo hospitalario. *Revista Intervencionismo* [en línea]. 2019 [citado 22 Ago 2022]; 19(3): 103-110. Disponible en: http://revistaintervencionismo.com/wpcontent/uploads/3.19_original1.pdf

80. Ribeiro A, Husson O, Drey N, Murray I, May K, Thurston J, et al. Ionising radiation exposure from medical imaging-A review of Patient's (un) awareness. *Radiography (Lond)* [en línea]. 2020 Mayo [citado 23 Ago 2022]; 26(2): 25-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radi.2019.10.002>
81. Ramos Avasola S, Uribe J, Orsi F, Alarcón T, Álvarez J, de Franco A, et al. Radioprotección y dosimetría en Unidades de Cardiología Intervencionista de América del Sur: un estudio piloto. *Rev Chil Cardiol* [en línea]. 2020 [citado 24 Ago 2022]; 39(2):105-113. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-85602020000200105&lng=es
82. Bastiani L, Paolicchi F, Faggioni L, Martinelli M, Gerasia R, Martini C, et al. Patient perceptions and knowledge of ionizing radiation from medical imaging. *JAMA Netw Open* [en línea]. 2021 Oct [citado 23 Ago 2022]; 4(10): 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.28561>
83. Cadenas Martínez R, Sornoza Miele S, Torres Puentes J. Uso de radiaciones ionizantes en estudios de diagnóstico en una institución de salud de Ecuador. *Actual Med* [en línea]. 2021 [citado 23 Ago 2022]; 106(812):16-23. doi: <http://dx.doi.org/10.15568/am.2021.812.or02>

APÉNDICES

Apéndice A

Tabla 1: Términos de búsqueda de descriptores y operadores lógicos

DeCS	MeSH	Calificadores	Conceptos relacionados	Operadores Lógicos
“anomalías inducidas por radiación”; “radiación ionizante”; “efectos de la radiación”; “exposición a la radiación”	“abnormalities radiation-induced”; “acute radiation syndrome”; “ionizing radiation”; “radiation effects” “radiation exposure”	radiación, ionización, radiación dañina, radiación, absorción radiológica, radiación perjudicial.	“contaminación radioactiva”; “fuentes de radiación”; “protección radiológica” “protectores contra radiación”; “tolerancia a radiación”	AND
				“radiation” AND “ionizing”; “radiation” AND “effects”; “radiation” AND “job”
				NOT
				“radiation” NOT “cosmic”; “radiation” NOT “ultraviolet”; “radiation” NOT therapeutic “radiation” NOT “thermal”
				OR
“radiation ionizing” OR “ionized radiation”				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice B

Tabla 2: Matriz de los artículos según tipo de estudio

TIPO	TÉRMINO UTILIZADO	NÚMERO DE ARTÍCULOS
Todos los artículos	(sin filtro)	1,326
Ensayos con asignación aleatoria	Radiation exposure [MeSH]	5
	Radiación Ionizante [DeCS]	28
Estudios de cohorte	Radiation malignancy [MeSH]	489
Estudios de casos- controles	Ionizing radiation [MeSH]	117
	Radiation protection [MeSH]	244
	ionizing radiation studies [MeSH]	81
	Exposicion a la radiación [DeCS]	258
Reporte de caso	Radiation effects [MeSH]	53
	Efectos de la radiación [DeCS]	38
Estudios de prevalencia	Ionizing radiation damage [MeSH]	1
	Abnormalities radiation-induced [MeSH]	12

Fuente: elaboración propia.

Apéndice C

Tabla 3: Matriz consolidativa de datos de buscadores, descriptores y operadores lógicos

Buscadores	Términos y operadores lógicos	
	Español	Inglés
EBSCO	Términos DeCS: Radiación ionizante	Términos MeSH: Ionizing radiation
	Términos DeCS: Efectos de la Radiación	Términos MeSH: Radiation effects
PubMed-MEDLINE	Términos DeCS: Radiación ionizante	Términos MeSH: Ionizing radiation
	Términos DeCS: Radioprotección	Términos MeSH: Radioprotección
HINARI	Términos DeCS: Historia de la radiación	Términos MeSH: History of radiation
	Términos DeCS: Radiación ionizante	Términos MeSH: Ionizing radiation
	Términos DeCS: Exposición a la radiación	Términos MeSH: Radiation exposure
Scielo	Términos DeCS: Anomalías inducidas por radiación	Términos MeSH: Abnormalities radiation-induced
	Términos DeCS: Radiación ionizante	Términos MeSH: Ionizing radiation
	Términos DeCS: Exposición a radiación	Términos MeSH: Radiation exposure
REDALYC	Términos DeCS: Estudios de imagen con radiación ionizante	-----
	Términos DeCS: Equipo de protección radiológica	-----
	Términos DeCS: Efectos de la radiación ionizante	-----
Publindex	Términos DeCS: Radiación ionizante y sus efectos	-----

Fuente: elaboración propia.

Apéndice D

Tabla 4: Matriz consolidativa de los artículos utilizados según tipo de estudio

Tipo de estudio	Término utilizado	Número de artículos
Artículos utilizados	Ionizing radiation [MeSH] Radiation protection [MeSH] ionizing radiation studies [MeSH] Exposicion a la radiación [DeCS] Radiation effects [MeSH] Efectos de la radiación [DeCS]	83
Revisión	Radiation exposure[MeSH] Radiación Ionizante [DeCS]	20
Transversales	Ionizing radiation damage [MeSH] Abnormalities radiation-induced [MeSH]	9
Revisión sistémica	Ionizing radiation [MeSH] Radiation protection [MeSH] ionizing radiation studies [MeSH] Exposicion a la radiación [DeCS]	19
Página web	Radiation exposure[MeSH] Radiación Ionizante [DeCS]	1
Estudios de cohorte	Radiation malignancy [MeSH]	6
Estudios de casos y controles	Ionizing radiation [MeSH] Radiation protection [MeSH] Exposicion a la radiación [DeCS]	5
Reporte de caso	Radiation effects [MeSH] Efectos de la radiación [DeCS]	1
Metaanálisis	ionizing radiation studies [MeSH] Exposicion a la radiación [DeCS]	10
Guía de práctica	Radiation exposure[MeSH] Radiación Ionizante [DeCS]	3
Artículo de opinión	ionizing radiation studies [MeSH] Exposicion a la radiación [DeCS]	2
Estudios de prevalencia	Ionizing radiation damage [MeSH] Abnormalities radiation-induced [MeSH]	5
Literatura gris	Radiación Ionizante [DeCS]	2

Fuente: elaboración propia.

SIGLARIO

ADN	Ácido desoxirribonucleico
ALARA	Tan bajo como sea razonablemente posible
CD	Células dendríticas
CDC	Centro para el control y la Prevención de Enfermedades
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
CTCAE	Criterios de terminología común para eventos adversos
DGP	Dosis glandular promedio
DRLs	Niveles de referencia para diagnóstico
EII	Enfermedades inflamatorias del intestino
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
NK	Células asesinas naturales
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMS	Organización Mundial de la Salud
ROS	Especies reactivas de oxígeno
SPR	Sistema de protección radiológica
TC	Tomografía computarizada
UNSCEAR	Comité Científico de Naciones Unidas sobre Efectos de la Radiación Atómica
USNR	Consejo Nacional para la Protección contra la Radiación de los Estados Unidos