

ELEMENTOS PARA CONSIDERAR EN UN PROGRAMA DE VIGILANCIA EPIDEMIOLÓGICA DE TRABAJADORES OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS A RADIACIONES IONIZANTES

NT N° 119 / AÑO 2023

ELABORADA POR:

Alfonso Espinoza L.
Departamento Salud Ocupacional

1. INTRODUCCIÓN.

En Chile, en el marco de la Ley N° 16.744⁽¹⁾, a través de su reglamento, el D.S. N° 101, de 1968, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social⁽²⁾, se encuentra establecido en el artículo 72, letra g), que los Organismos Administradores (OAL) y Administradores Delegados de la Ley 16.744 (AD) deben incorporar a la entidad empleadora a sus programas de vigilancia epidemiológica, al momento de establecer en ella la presencia de factores de riesgo que así lo ameriten o de diagnosticar en los trabajadores alguna enfermedad profesional.

Por su parte, el artículo 21 del D.S. N° 109, de 1968, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social⁽³⁾, establece que el Ministerio de Salud impartirá las normas mínimas de diagnóstico a cumplir por los OAL/AD, así como las que sirvan para el desarrollo de programas de vigilancia epidemiológica que sean precedentes.

El Ministerio de Salud ha impartido normativas para una serie de agentes o factores de riesgo presentes en los ambientes de trabajo, tales como ruido, sílice, plaguicidas, entre otros. Sin embargo, a la fecha, aún no existe una norma formal que haya establecido un programa de vigilancia epidemiológica para el agente radiaciones ionizantes.

En este sentido, la Superintendencia de Seguridad Social (SUSESO), mediante la Circular N° 3.708, del 28 de octubre de 2022⁽⁴⁾, ha instruido a los Organismos Administradores y a los Administradores Delegados del Seguro de la Ley N° 16.744, que deben elaborar un Programa de Vigilancia del Ambiente y de la Salud, entre otros, para el agente radiaciones ionizantes.

El Instituto de Salud Pública de Chile, en forma previa al pronunciamiento formal del Ministerio de Salud en cuanto al establecimiento de un programa

de vigilancia para las exposiciones ocupacionales a radiaciones ionizantes, en su rol de Laboratorio Nacional y de Referencia en la materia, consignado en el D.S. N° 3, de 1985, del Ministerio de Salud⁽⁵⁾, se ha sentido llamado a entregar algunas orientaciones para el establecimiento de estos programas, considerando las diferentes recomendaciones internacionales, contrastado con las capacidades instaladas o disponibles en el medio nacional y por supuesto, acorde a las diferentes regulaciones nacionales existentes y en vigencia.

2. DESCRIPCIÓN RESUMIDA DEL PROBLEMA A NIVEL NACIONAL.

En general, aquellos ambientes laborales donde se encuentra presente en forma continua, esporádica o con alguna periodicidad, el riesgo de exposiciones a algún tipo de radiación ionizante, ya sea por irradiación externa en forma exclusiva o en adición con el riesgo de incorporación de materiales radiactivos, en el país habrá de ser catalogado como una instalación radiactiva o, en casos muy específicos, como una instalación nuclear.

Tanto el D.S. N° 133, de 1984, del Ministerio de Salud⁽⁶⁾, como la Ley N° 18.302, Ley de Seguridad Nuclear⁽⁷⁾, en sus respectivos ámbitos de competencia, describen la necesidad de que estos ambientes cuenten con una específica Autorización de Operación, la cual se emite para la instalación radiactiva o nuclear según corresponda.

En dicho proceso, ya sea por parte de la Autoridad Sanitaria, a través de una específica SEREMI de Salud, o a través de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), se deben verificar un conjunto de condiciones que permitan deducir que en las diferentes prácticas radiológicas a ser realizadas, se generaran condiciones aptas para la salud y seguridad,

tanto de trabajadores como de individuos del público, también en alguna medida, aunque no tan claramente establecida en algunos casos, y en ocasiones, con el uso complementario de otros cuerpos legales, y cuando corresponde, condiciones aptas para pacientes. En general, en todo esto utilizan instrumentos como memorias de cálculo con estimaciones teóricas, cuando es factible además con evaluaciones ambientales con el uso de diferentes detectores de radiación, ya sean estos de tipo activo o pasivo, entre otras herramientas.

En lo relativo a las exposiciones ocupacionales, lo antes señalado constituye inmediatamente una particularidad respecto de otros agentes de riesgo presentes en los ambientes de trabajo, por cuanto, en principio, no debieran encontrarse en funcionamiento instalaciones con definiciones de puestos de trabajo en los cuales existiese un nivel de riesgo intolerable para el contexto del trabajo.

Este nivel de riesgo tolerable se encuentra definido en conjunto con otras disposiciones, en el D.S. N°3, de 1985, del Ministerio de Salud, donde se establecen límites de dosis por radiación ionizante para el cuerpo entero, extremidades, entre otros órganos o tejidos del cuerpo humano.

Así mismo, los D.S. N° 3 y N° 133, antes mencionados, en conjunto describen la necesidad de que en las instalaciones autorizadas se encuentre especificado un conjunto de personas que habrán de ser consideradas como Trabajadores(as) Ocupacionalmente Expuestos(as), en adelante TOE, los cuales deberán contar, en concordancia con este último reglamento, con la denominada Autorización de Desempeño en Instalaciones Radiactivas. Así mismo, en ocasiones específicas, adicionalmente con otra autorización emanada de la Ley de Seguridad Nuclear⁽⁷⁾.

Cabe destacar que la citada Autorización de Desempeño faculta a los TOEs exclusivamente para tener, durante cierto periodo de tiempo, exposición laboral a radiaciones ionizantes, para cuya obtención, entre otros requisitos, son necesarias capacitaciones específicas y formales respecto de los riesgos y comportamiento de este agente en particular. Así mismo, también se describe un mecanismo mediante el cual los TOEs debe renovar estas autorizaciones, existiendo entonces algún medio de control que debiera per-

mitir a la Autoridad Sanitaria renovar la autorización o si se estima que corresponde, limitar la continuidad de la exposición laboral a radiaciones ionizantes de una persona específica.

Otra particularidad de este agente de riesgo, es la descrita en el artículo 4 del D.S. N° 3, de 1985, del Ministerio de Salud, que indica que toda persona que sea considerada TOE en la instalación, debe portar, al menos en todo momento de exposición a radiaciones ionizantes de origen laboral, de un dispositivo denominado dosímetro personal, que debe ser proporcionado por el empleador, con el cual se está en todo momento midiendo y registrando al menos las dosis por irradiación externa, por lo tanto, con posibilidades de conocer, analizar y gestión del riesgo de los niveles de exposición a radiaciones ionizantes de todos los TOEs de la instalación.

La anterior herramienta de vigilancia radiológica personal descrita, tiene una amplia cobertura a nivel nacional, la cual, al menos en lo que respecta a dosimetría personal externa, es además el único tipo necesario para el grueso de los TOEs del país, por cuanto sólo un grupo minoritario de trabajadores, debiera requerir adicionalmente vigilancia por dosimetría interna, debido a que estos últimos, pueden enfrentar además el riesgo de incorporación de materiales radiactivos en sus ambientes de trabajo. Sobre esta última materia se ahondará más adelante en el presente documento, por un lado, por tratarse de un volumen más acotado de trabajadores, y por otro, al hecho de que existe menor claridad respecto de la vigilancia radiológica personal interna a ser aplicada en cada caso, ya sea por materias regulatorias, procesos de autorización, mecanismos disponibles en el país, entre otras explicaciones.

3. PRINCIPIOS DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.

A nivel mundial, para analizar toda exposición a radiaciones ionizantes, incluidas las ocupacionales, se utiliza en general una serie de principios cuya versión moderna se puede encontrar en el documento Principios Fundamentales de Seguridad⁽⁸⁾ del Organismo Internacional de Energía Atómica. Este documento, patrocinado por la Organización Internacional

del Trabajo, entre otras, se manejan 10 principios fundamentales.

Entre ellos se pueden encontrar los clásicamente estudiados y más ampliamente conocidos como los Principios de la Protección Radiológica, como son:

- a) Principio 4. Justificación de las instalaciones y actividades.
- b) Principio 5. Optimización de la protección.
- c) Principio 6. Limitación de los riesgos para las personas.

En el presente documento nos centraremos más sobre estos tres, que además son los que se hacen necesarios analizar para resolver la mayor cantidad de las situaciones que se presentan en el ámbito del trabajo, por ello también, de los cuales debiera dar cuenta cualquier regulación específica en la materia, lo cual se verá en alguna medida plasmado en el Reglamento de Protección Radiológica, D.S. N°3, de 1985, del Ministerio de Salud antes señalado.

Todo aquello en un contexto en el cual, se puede ver también que otros principios fundamentales como el Principio 1. Responsabilidad de la seguridad, y del Principio 2. Función del Gobierno, en alguna medida también se abordan en la Ley N° 16.744, D.S. N°133, de 1984, del Ministerio de Salud y así mismo en la Ley N° 18.302 de Seguridad Nuclear, entre otros.

3.1. Principio de justificación de las instalaciones y actividades.

Este principio plantea que existe un conjunto de actividades, prácticas e instalaciones, las cuales para ser consideradas como justificadas han debido superar un análisis de los riesgos y los beneficios asociados, respecto del cual ha surgido un balance positivo para los beneficios.

Los Estados en función de aquello determinan aquellas actividades que involucran exposición a radiaciones ionizantes en los cuales se ha podido demostrar que sus beneficios son mayores a los riesgos y por lo tanto se traduce en un conjunto de actividades que son factibles de ser autorizadas en el territorio.

Este principio, no muy bien recogido en nuestra regulación nacional, en definitiva, se expresa en las prácticas que son efectivamente autorizadas, en las cuales, en su mayoría, existirán regularmente trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiaciones ionizantes.

De cualquier manera, para efectos de aplicación de cualquier programa de vigilancia epidemiológica en Chile, se partirá de la base de que la instalación está debidamente autorizada, por lo tanto, en principio, se habrá de considerar que allí se realiza un práctica que se encuentra justificada.

3.2. Principio de Optimización de la protección.

Este principio plantea que para toda actividad que involucra la utilización de radiaciones ionizantes, la seguridad que se debe proporcionar sea del nivel más alto que razonablemente se pueda alcanzar, concepto conocido mundialmente como ALARA, aunque sin limitar indebidamente su utilización.

Como se verá más adelante se establecerán ciertos límites a las exposiciones a radiación ionizante, pero para la seguridad y la salud ocupacional el objetivo va mucho más allá del cumplimiento de límites, por cuanto en todo momento para dar cumplimiento a este principio, en ámbito laboral, las exposiciones de los trabajadores deben ser siempre las más bajas que razonablemente se puedan alcanzar, eso sí, sin afectar la calidad del trabajo realizado.

Esto también guarda íntima relación con el hecho de que las radiaciones ionizantes son un agente cancerígeno Grupo 1, Carcinogénico para los seres humanos, según International Agency for Research on Cancer⁽⁹⁾ (IARC), también para United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation⁽¹⁰⁾ (UNSCEAR). Todo esto se analizará con mayor detalle más adelante, pero en esta etapa se quiere destacar el hecho de que en general se asumirá que se trabaja con un agente de riesgo ocupacional que para este efecto en la salud en particular, no presentará un umbral de riesgo, por lo tanto, atendiendo este principio, la conducta siempre a seguir es prevenir exposiciones innecesarias, de allí que la protección radiológica, incluida la ocupacional, debe buscar que las exposiciones de los trabajadores sean lo más bajas que se puedan conseguir y no sólo buscar el cumplimiento de límites.

Este principio no se visualiza expresamente en la regulación nacional, sin embargo se utiliza en los procesos de autorización de las instalaciones, de allí que resulte razonable que en estos procesos se apliquen mayores niveles de restricción que los expresados en los límites, por cuanto en alguna medida se conoce cuáles son los niveles de optimización factibles de alcanzar en las distintas prácticas, por lo tanto, surge en combinación con el principio de justificación, los niveles de exposición que pueden resultar justificados según cada actividad que se realice.

Para la aplicación de cualquier programa de vigilancia epidemiológica esto impone otro aspecto, por cuanto, los niveles de exposición usuales o vistos como tolerables en algunos tipos de trabajo, pudieran ser considerados desde este punto de vista, como intolerables para otras actividades laborales. De allí entonces que para cualquier definición de acción en algún programa se debe considerar el tipo de actividad que se realiza y no sólo los límites que se encuentran plasmados en el Reglamento de Protección Radiológica.

3.3. Principio de Limitación de los riesgos para las personas.

Este principio plantea que para actividades ya previamente justificadas y debidamente optimizadas se aplicarán límites, que como se verá, para el caso de este agente, no se deben entender como la distinción entre seguridad y peligro, sino solo como un nivel de exposición que se estima inaceptable para el tipo de exposición de que se trata.

En este sentido se establecen mundialmente límites de dosis efectivas y equivalentes para exposiciones ocupacionales y de individuos del público, a ser aplicados cada uno según corresponda a la situación.

Estos límites, en su versión internacional más actual, se encuentran en la publicación GSR Parte 3⁽¹¹⁾ del Organismo Internacional de Energía Atómica, un poco anterior, y con algunas diferencias en la Publicación 103⁽¹²⁾ de la International Commission on Radiological Protection (ICRP).

Para nuestro país, el D.S. N°3, de 1985, del Ministerio de Salud, establece estos límites de dosis, con diferencias respecto de lo recomendado en la ac-

tualidad, por cuanto se basan en la Publicación 26⁽¹³⁾ de la ICRP del año 1977.

De cualquier manera, se desprende de la regulación nacional que estos límites son aplicables para aquellos trabajadores que son considerados como ocupacionalmente expuestos en las instalaciones, y que en muchos casos existe un conjunto de trabajadores que en alguna menor medida también tienen exposiciones a radiaciones ionizantes, pero que desde el punto de vista de la protección radiológica aquellos habrán de ser considerados como individuos del público, por lo tanto, para ellos aplican en principio otros límites, con respeto también al principio de justificación.

Para mayores detalles sobre esta materia y sobre cómo distinguir a estos distintos grupos de trabajadores se recomienda la Nota Técnica N° 034, Trabajador(a) Ocupacionalmente Expuesto(a) a Radiaciones Ionizantes⁽¹⁴⁾, del Instituto de Salud Pública de Chile.

En principio se pudiera entender que cualquier programa de vigilancia epidemiológica ocupacional se debiera centrar en aquellos trabajadores que han sido denominados como TOE, sin embargo, se debe destacar que, de acuerdo a lo anteriormente planteado, cualquier acción sobre otros trabajadores debiera considerar el límite específico que aplique analizar para cada situación.

Cabe destacar que los límites actualmente recomendados internacionalmente difieren en alguna medida de los establecidos en el país, sin embargo, al Sistema de Vigilancia Radiológica Personal que administra el Instituto de Salud Pública utiliza bajo la figura de límites secundarios valores más similares a los recomendados internacionalmente, mismos que con la evidencia ya recabada en el país se pueden considerar como adecuados para ser utilizados como criterios de acción preventiva, buscando evitar en forma lo más temprana posible la aproximación a los límites de dosis o a superación de los mismos los que implicarían la exposición de personas a niveles, que no necesariamente se traducirían en alteraciones agudas de la salud de las personas, pero que se considerarían injustificados para el ámbito de las exposiciones ocupacionales.

4. RESUMEN DE EFECTOS BIOLÓGICOS POR RADIACIONES IONIZANTES.

El efecto dañino a la salud por la exposición a radiaciones ionizantes depende principalmente, de la dosis recibida, de su magnitud, distribución, así como del tiempo de exposición, pudiendo ser aplicada en forma aguda, durante breves segundos o minutos, por ejemplo, exposiciones en tratamientos de radioterapia o accidentes, o ser recibida en forma crónica, continua o intermitente, a lo largo de meses o años, por ejemplo, la exposición ocupacional en condiciones normales de trabajo^(15, 16, 17, 18, 19, 20).

Los procesos de ionización y excitación en los tejidos pueden originar cambios en los átomos y moléculas, por lo tanto, con posibilidad de cambiar el ADN, con eventuales daños transitorios o permanentes. Si se producen daños celulares y no se reparan adecuadamente, puede ocurrir que las células afectadas mueran o su reproducción se vea impedida, o bien, que se origine una célula viable, pero modificada; todos estos cambios pueden tener implicaciones para el organismo en su conjunto^(15, 16, 17, 18, 19, 21, 22).

La célula es la unidad básica y esencial del complejo sistema biológico. A grandes rasgos, se compone de un citoplasma donde abunda el agua y otros elementos y estructuras como mitocondrias, lisosomas, ribosomas, etc.; además, la mayoría contiene un núcleo con un contenido fundamental de macromoléculas de Ácido Desoxirribonucleico (ADN) que conforman los cromosomas, con un número determinado y específico para cada especie; en el caso del ser humano, es de 46 cromosomas. Estos portan toda la información genética responsable de su transmisión a las células descendientes y de un organismo a otro, regulando también todas las funciones, tanto en su diferenciación como en su actividad metabólica y la relación con las demás células. De lo anterior se deriva, que el núcleo es esencial para el buen funcionamiento de la célula, así como también, para su reproducción.

Por último, una membrana rodea al núcleo y otra a su vez, a toda la célula, ambas con propiedades selectivas de permeabilidad, garantizando con ello, el buen funcionamiento de la unidad básica de la materia viva, la célula.

Los efectos dañinos y nocivos de las radiaciones ionizantes interactuando con las células, se originan por dos mecanismos: **Acción directa e indirecta** (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25).

a) Por acción directa: Es originada por la acción primaria de ionización y excitación de los átomos que componen las moléculas de las diferentes células que conforman a su vez, los tejidos y los órganos, cuando éstos interactúan con un campo de radiación. De esta manera puede haber, por ejemplo, cambios en la integridad estructural del ADN, cambios enzimáticos, alteraciones de estructuras y componentes celulares, entre otros. Lo anterior origina daño o alteración de las funciones vitales de las células, tales como la síntesis de proteínas, la herencia de las células hijas entre otras, pudiendo conducir entonces, a lesiones irreparables o hasta la muerte celular; en dependencia de la magnitud de este daño y del número de células afectadas será entonces, la gravedad de la lesión o daño del tejido u órgano afectado y como resultado, se manifestarán los aspectos clínicos.

b) Por acción indirecta: En éste, luego de procesos de ionización y excitación con otras átomos y moléculas presentes en el tejido vivo, se originan productos secundarios y tóxicos, principalmente de la ionización de moléculas del agua, que es en definitiva uno de los principales componentes de la estructura general de las células y del organismo. Por este mecanismo se forman principalmente, grupos hidroxilo u oxhidrilos "OH", que son potentes agentes oxidantes, los que tienen una gran toxicidad para los componentes de las células y por lo tanto de los tejidos. Estos elementos son conocidos también como "radicales libres" o "agentes oxidantes".

Una célula es más radiosensible cuanto mayor sea su actividad mitótica y sea menos diferenciada, así como, cuanto más largo es su poder cariocinético, es decir, cuantas más divisiones deba cumplir para adoptar su forma y función definitiva (17, 18, 19, 21, 22, 25).

4.1. Tipos de irradiación.

El término irradiación, conlleva una interacción de las radiaciones con la materia, en este caso, con los tejidos y órganos que componen el organismo, todo depende de la relación de la persona con la fuente emisora. Puede ser:

- a) **Irradiación externa:** Como su nombre lo indica, es cuando el individuo se irradia a partir de una fuente emisora que se encuentra en el exterior, fuera del sujeto que la recibe. Estas pueden ser originadas por fuentes radiactivas, selladas y abiertas, así como por equipos generadores.
- b) **Contaminación:** En ésta, la fuente emisora se encuentra en contacto con la persona. Si es en la superficie, en la piel o mucosa, es una contaminación superficial o externa. Si la fuente se encuentra en el interior del organismo, es una contaminación interna o incorporación. Esta es originada exclusivamente por fuentes radiactivas abiertas.

4.2. Clasificación de los efectos.

Teniendo en cuenta lo recomendado internacionalmente, los efectos dañinos originados por las radiaciones ionizantes se clasifican en:

- a) **Efecto determinístico:** En éstos existe un umbral de dosis para su aparición y hay una relación directa dosis-efecto, tanto en las alteraciones como en la gravedad de estas. Ejemplos: Radiodermatitis, quemaduras radiológicas, alteraciones hematológicas radioinducidas, etc. Estos efectos, por mucho tiempo se han denominado de esta manera, mientras que en la actualidad se está promoviendo su denominación como efectos tisulares.
- b) **Efecto estocástico:** Estos efectos son aleatorios, probabilísticos, se asume la no existencia de un umbral de dosis para su aparición. No obstante, y es una realidad, al aumentar la dosis absorbida, aumenta la probabilidad del riesgo de incidencia de estos efectos. Su gravedad es independiente a la dosis. Dentro de estos efectos se encuentran, exclusivamente, los cánceres y efectos genéticos radioinducidos, de estos, el cáncer radioinducido constituye el principal riesgo.

De acuerdo con los conocimientos actuales, la exposición a las radiaciones ionizantes a niveles por debajo de los límites de dosis ocupacionales existentes, implicará la no aparición de efectos determinísticos y mantendrá la probabilidad de los efectos estocásticos en valores aceptables para el trabajo y similares al riesgo que se puede estimar para la salud por otros agentes o condiciones factibles de estar presentes en los ambientes de trabajo.

4.3. Consideraciones generales de la etiopatogenia de los efectos biológicos por radiaciones ionizantes.

a) Por irradiaciones agudas en cuerpo entero.

En aquellas personas que por algún motivo recibían, de forma aguda, en un tiempo menor a 2 días, ya sea por irradiación externa, por una contaminación radiactiva o ambas a la vez, una dosis de radiación superior a los umbrales específicos, ocurre un número significativo de muerte celular en los tejidos irradiados, con lo que se observará daños en estos y en los órganos involucrados, así como, una sintomatología general en la persona afectada. Estos son, como ya se ha mencionado, los efectos determinísticos, dosis dependientes, o efectos tisulares como están siendo nombrados recientemente en algunas publicaciones internacionales.

Internacionalmente se reconoce un criterio de dosis, donde por debajo de 1 Gy se considera una dosis baja, entre 1 – 10 Gy una dosis moderada y por encima de 10 Gy, alta (16, 17, 18, 19, 20, 21).

En dosis en cuerpo total, entre 0,5 Gy a 1 Gy, no se van a observar manifestaciones clínicas, puede haber náuseas o escasos vómitos, de tipo explosivos que, en dependencia de la dosis, aparecerán alrededor de ½ hora después de la exposición. Por otra parte, lo que sí ocurre, son cambios cromosómicos en las células afectadas que pueden ser detectadas en la dosimetría citogenética, de ahí la importancia de que este examen se efectúe en toda persona con sospecha o que evidentemente hayan recibido dosis superiores a 0,1 Gy (16, 17, 18, 19, 20, 21), similares en muchos casos a 100 mSv.

Dosis recibida por encima de 1 Gy en cuerpo entero, conforma lo que es conocido como el Síndrome Agudo por Radiación (SAR) y en éste, la sintomatología es más precoz, más evidente y prolongada debido, principalmente a las muertes celulares^(16, 17, 18, 19, 21).

Este Síndrome con sus manifestaciones clínicas, se divide en línea general, en 3 tipos:

- De 1 – 10 Gy, es la etapa hematopoyética, donde predominan las manifestaciones hematológicas.
- > 10 – 50 Gy, es la etapa gastrointestinal, donde predominan además de las anteriores manifestaciones hematológicas, las gastrointestinales.
- > 50 Gy, es la etapa neurológica, es la más grave de todas y se considera letal.

En cada una de estas etapas, existe un período prodrómico, de latencia y de manifestaciones. Mientras más alta sea la dosis absorbida, los tiempos de aparición de estos períodos se acortan y más rápido aparecen las manifestaciones clínicas^(16, 19, 20, 22).

Por ejemplo, en irradiaciones elevadas y agudas con exposiciones en el cuerpo entero a estos niveles, uno de los daños más observable y evidente ocurre en la médula ósea, tejido encargado de la formación y reproducción de las células sanguíneas, la cual en su máxima expresión puede llegar a una aplasia medular. Lo anterior ocurre en irradiaciones en cuerpo entero a partir de dosis absorbida de 1 Gy, similar a 1 Sv en la magnitud dosis efectiva para rayos X y Gamma, dado que el wR de estas radiaciones, factor de ponderación relativo al tipo de radiación ionizante, es igual a 1. En un inicio, a las pocas horas, se observará una neutrofilia (aumento de los neutrófilos) como respuesta inicial a la noxa que recibe el organismo, luego de unos días y semanas, en dependencia de la cuantía de la dosis absorbida, a medida que las células maduras circulantes en sangre se van destruyendo de acuerdo a su ciclo de vida, al no haber sustitución de las mismas por estar afectadas las stem cells (células madre, totipotencial) de la médula ósea, que son las más radiosensibles por su gran poder mitótico, se va a observar una leucopenia (disminución de los leucocitos), con riesgo a infecciones secundarias y oportunistas, por otra parte, habrá una anemia por

disminución de los glóbulos rojos circulantes en la sangre, con hipoxia tisular y una plaquetopenia (disminución de las plaquetas) con cuadro de hemorragias, externas e internas^(16, 17, 19, 21, 22). Obviamente cuanto mayor sea la dosis absorbida, más grave serán estas manifestaciones.

De manera general, con exposiciones a partir de 0,5 Gy en cuerpo entero, las náuseas y los vómitos de tipo explosivos, pueden aparecer como a la media hora y constituye una de la sintomatología prodrómica más eficaz indicadora de una sobre exposición aguda, por lo que, en todo evento o accidente con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes, hay que tenerlo muy en cuenta y nos sirve de una manera inicial, para estimar la magnitud del riesgo y el nivel de exposición que ha tenido la persona afectada^(16, 17, 18, 19, 21).

b) Por irradiaciones agudas y elevadas en algunos tejidos y órganos:

- **A nivel de la piel:** Por encima de los 2 Gy en la piel irradiada se va a observar en menos de 1 semana, eritema (enrojecimiento de la piel). Mientras más pronto aparezca éste efecto, significa que la dosis absorbida es cuanto mayor a los 2 Sv^(16, 17, 18, 19, 20, 21, 22).

Con dosis superiores a los 10 Gy en la piel afectada se observa el cuadro clínico de la radiodermatitis, donde se observa una dermatitis exudativa, atrofia de la piel, depilación hasta llegar a la necrosis tisular^(16, 17, 18, 19, 20, 21, 22).

- **A nivel de los ojos:** El cristalino y las células cuboides que lo rodean son altamente radiosensibles, internacionalmente se reconoce que exposiciones elevadas de forma aguda entre 0,5 a 2 Gy puede observarse una opacidad en el cristalino a los pocos días o semanas. En exposiciones crónicas, se plantea que puede ser causa de cataratas, exposiciones superiores a 0,1 Gy al año, en muchos años, de ahí que actualmente el límite primario de dosis recomendado internacionalmente a nivel de cristalino, es de 20 mSv al año^(15, 19, 22).

- **A nivel de gónadas:** Las células testiculares son muy radiosensibles, a partir de dosis absorbida de 0,3 Gy a nivel de este tejido, puede encontrarse una oligospermia, es decir, una disminución transitoria de la producción de espermatozoide. Ya con dosis superiores a los 4 Gy, habrá una esterilidad definitiva^(16, 17, 18, 19, 20, 21, 22).

En la mujer, al estar los ovarios dentro de la cintura pélvica, están más protegidos, por lo tanto, para producir una esterilidad permanente, se plantean dosis absorbida superiores a los 6 Gy a nivel de los ovarios^(16, 17, 18, 19, 20, 21, 22).

- **A nivel de embrión y feto:** En ciertas ocasiones accidentales, la irradiación de la mujer embarazada a nivel de embrión y feto pueden conducir a malformaciones fetales, todas en dependencia de la dosis recibida en el feto y del momento de la irradiación en el curso de la vida fetal. El periodo de mayor riesgo es entre la semana 6 y la semana 15. A partir de dosis absorbida superiores a los 0,3 Gy en la etapa de organogénesis, pueden observarse malformaciones óseas y cerebrales. Con dosis superiores a los 0,5 Gy a nivel de feto, después de la octava semana de gestación, puede observarse retraso intelectual.

Estas alteraciones no se deben confundir con las alteraciones genéticas de los efectos estocásticos. Tienen que ser consideradas como efectos determinísticos, dado que el feto tiene su código genético conformado, es decir, un ser vivo que está en desarrollo^(16, 17, 18, 19, 20, 21, 22).

4.4. Algunas consideraciones del riesgo a cáncer radioinducido.

El riesgo a cáncer es el principal exponente de los efectos estocásticos, ocurre a largo plazo y es aleatorio por exposición a radiaciones ionizantes, donde en principio, se considera que no existe un umbral de dosis para su aparición, por lo tanto, cualquier dosis conlleva este riesgo, de lo que se deriva la importancia y lo primordial de la aplicación del principio básico de la Protección Radiológica, el de la Justificación, en cualquier práctica que conlleve exposición a las radiaciones^(11, 12, 15, 23, 24, 25).

Actualmente se reconoce, que el riesgo a cáncer constituye el efecto estocástico somático de mayor relevancia tras la exposición a dosis bajas de radiación.

Desde épocas remotas, cuando se conocieron las radiaciones ionizantes, el cáncer radioinducido fue reconocido internacionalmente, como, por ejemplo, el cáncer de testículos en trabajadores de minas de uranio, el cáncer de pulmón asociado a la exposición al gas radiactivo Radón y a su progenie, tasas significativas de leucemias en los primeros médicos radiólogos que no tenían o no cumplían ninguna medida de protección radiológica, en los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, etc.^(16, 26).

Ahora bien, cuando las exposiciones están por debajo de los límites de dosis recomendados internacionalmente, el riesgo a cáncer radioinducido es mínimo y significativamente menor en comparación al riesgo que tiene cualquier persona de padecer el mismo cáncer por “causas comunes”. Actualmente, a la luz de los conocimientos actuales, se reconoce que el riesgo de cáncer radioinducido es de índole de $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ^(11, 12, 15, 17, 18, 19, 23, 24, 25).

Su principal patogenia está dada por el daño y las modificaciones que pueden sufrir el ADN de las células irradiadas, las cuáles originarán poner en marcha mecanismos de reparación celular, si es que no se produce un daño mortal de las mismas. Si la reparación no es completa “ad integrum” y se produce la supervivencia de la célula con una mutación, esta modificación será transmitida a las células hijas, las cuáles, si son somáticas, podrían dar lugar al cabo de unos años, a un cáncer.

La transición desde una célula normal a una célula maligna es un proceso complejo que implica diversos cambios e intervienen diferentes variables, cuya naturaleza exacta dependerá del tipo de célula, del mecanismo de acción del carcinógeno implicado y del tipo de cáncer que se origine. En medicina se emplea la palabra cáncer para referirse genéricamente a un conjunto de enfermedades con más de cien formas clínicas diferenciables, de comportamiento biológico y manifestaciones clínicas muy distintas, y que abarcan a su vez, más de un millar de variedades histopatológicas. A pesar de la diversidad, se han desarrollado diversos modelos generales para describir el proceso carcinogénico, siendo el más aceptado

actualmente el modelo multietapa. Dicho modelo predice que un cáncer aparece como consecuencia de una serie de sucesos que pueden ser totalmente independientes, pero que con frecuencia están ligados, pudiendo incluso estar mediados por el mismo agente, considera que el desarrollo de cáncer tiene lugar en cuatro etapas: iniciación, conversión, promoción y progresión^(15, 18, 19, 21, 22).

Aunque en la actualidad los mecanismos implicados en cada una de las etapas del proceso carcinogénico no se conocen en su totalidad, se presupone que, si bien la radiación ionizante podría actuar en cualquiera de estas etapas, es en la iniciación donde su papel carcinogénico es el más relevante^(15, 18, 19, 21, 22).

5. VIGILANCIA RADIOLÓGICA PERSONAL OCUPACIONAL.

La vigilancia radiológica personal o individual está constituida por un sistema mediante el cual, de manera continua y periódica, se miden, registran y analizan las distintas dosis que reciben los trabajadores(as), ya sea por irradiación externa, además y cuando corresponde, por incorporación de materiales radiactivos. Así mismo, se vigila en forma continua el estado de la salud de los trabajadores(as) disminuyendo al máximo posible el riesgo de que los mismos presenten afecciones para su salud derivados del trabajo, así como el agravamiento de cualquier patología existente a consecuencia de alguna condición presente en el ambiente de trabajo.

En el D.S. N°3, de 1985, del Ministerio de Salud, en el artículo 4° se establece en principio la obligatoriedad por parte de los empleadores de brindar a los trabajadores(as) de un dosímetro personal para registrar toda dosis ocupacional por irradiación externa, así mismo, con algunas falencias en la actualidad se busca en el artículo 16° establecer algo similar para medir las dosis por incorporación de material radiactivo.

5.1. Dosimetría personal para irradiación externa.

Antes que todo, se estima pertinente mencionar que este tipo de dosimetría constituye una medición de tipo ambiental, la cual se encuentra enfocada para

una medición de naturaleza individual, ya que considera la utilización de los dosímetros en una posición específica del cuerpo. Por ejemplo, los dosímetros para estimar la dosis efectiva de cuerpo entero se calibran en la magnitud operacional HP⁽¹⁰⁾, para lo cual se simulan las condiciones de retro dispersión y atenuación que produce el tórax de una persona, ubicado inmediatamente debajo del dosímetro.

Los niveles usuales de detección para las diferentes técnicas habilitadas en Chile son algo inferior a los 0,10 mSv, por lo que todas resultan de utilidad para medir entre el valor establecido en Chile como Menor al Nivel de Registro (MNR) y bastante por encima de los valores límites establecidos en el Reglamento de Protección Radiológica nacional.

Debido a que todo efecto determinístico de las radiaciones tiene un umbral bastante por encima del límite anual establecido, aun cuando dicha exposición se dé en forma aguda, se puede concluir que la dosimetría personal para irradiación externa, para toda aquella situación en el que este tipo de irradiación sea la única fuente de dosis, constituirá casi el único medio, para condiciones normales de trabajo, mediante el cual se pueda estimar los niveles de exposición a radiaciones y determinar también el cumplimiento de los límites.

Más adelante se comentará brevemente respecto de la posibilidad de realizar evaluaciones ambientales, ya sea de puestos de trabajo, levantamientos radiométricos u otras. Cabe destacar que en general, si bien algunas de estas evaluaciones han podido ser realizadas anteriormente para superar el proceso de autorización de operación de cada instalación, la utilidad de estas, en general se estima parcial y hasta eventualmente menos precisa que la que se puede obtener por dosimetría personal. Al mismo tiempo, las mismas pueden ser de utilidad también para estimaciones de los niveles de ciertos grupos de exposición similar, sin embargo, en la higiene ocupacional, frecuentemente se recurre a la utilización de estas metodologías ante la dificultad técnica o económica de realizar evaluaciones extensivas de cada una de las exposiciones individuales. Estas últimas, como se ha mencionado acá, para el ámbito ocupacional y las radiaciones ionizantes, son obligatorias para todos los TOEs, por lo tanto, resultaría inoficioso plan-

tear que, ante la disponibilidad de esta valiosa información, que da cuenta de las condiciones específicas de las actividades de cada trabajador(a), se privilegie la realización de otras evaluaciones ambientales por encima de la información que se está teniendo disponible por parte de la dosimetría personal por irradiación externa.

Con todo, es que se estima que, debido a que esta dosimetría es la utilizada por prácticamente todos los TOEs a radiaciones ionizantes y es obligatoria, al menos para el cuerpo entero, para condiciones normales de trabajo, la base de cualquier programa de vigilancia de las exposiciones ocupacionales a radiaciones ionizantes debiera basarse en la información surgida del proceso periódico de esta dosimetría.

5.2. Dosimetría interna.

Existen diferentes metodologías o técnicas para medir la cantidad de materiales radiactivos que pueden ser incorporados por un individuo en su ambiente de trabajo durante el desempeño de sus labores. Lógicamente este tipo de técnicas serán de interés para ser aplicadas exclusivamente para aquellas situaciones de exposición laboral en las cuales existe el riesgo de incorporación de uno o más de los materiales radiactivos que se utilizan en el ambiente de trabajo debido a fuentes abiertas, los cuales pueden ser absorbidos por vía inhalatoria, oral o dérmica.

A partir de la detección de materiales radiactivos en distintas matrices biológicas o en el cuerpo entero, mediante la utilización de diferentes modelos biocinéticos de transferencia de radionucleidos entre diferentes órganos se realizan estimaciones de las dosis efectivas comprometidas que dichas incorporaciones pueden implicar para las personas involucradas en periodos específicos.

Con estas dosis, más las determinadas por dosimetría por irradiación externa se debe determinar el cumplimiento de los límites.

Este tipo de determinaciones son de tipo in-vitro o in-vivo. Las primeras con mayor similitud a los indicadores biológicos utilizados corrientemente para la vigilancia de la metabolización de distintos contaminantes presentes en los ambientes de trabajo utilizados en el país. Por otro lado, la determinación

in-vivo, más específicamente la medición con el contador de cuerpo entero, que más bien guarda relación con un examen médico aplicado a un trabajador, al cual más que aplicarle algún tipo de agente, se busca detectar en el cuerpo la emisión de radiación ionizante desde distintos órganos o tejidos blanco a partir de la cual, en que, con el uso de diferentes modelos biocinéticos, se determinan las dosis involucradas.

5.3. Dosimetría biológica.

Existen metodologías basadas en el recuento de aberraciones cromosómicas para hacer determinaciones de los niveles de dosis que ha recibido un individuo, las cuales, con el desarrollo mundial en la materia, sólo son sensibles a niveles superiores a los límites de dosis permitidos para el trabajo. Así mismo, estas técnicas son, en general, inespecíficas para el agente que las produce.

Existe una amplia gama de técnicas dosimétricas denominadas como citogenéticas que buscan aberraciones cromosómicas en linfocitos de sangre periférica⁽²⁷⁾.

Una de estas técnicas es la dosimetría citogenética de recuento de dicentricos y anillos, la cual es sensible a dosis por encima de 100 mGy en cuerpo entero, valor similar en muchos casos a 100 mSv, lo que es el doble del límite ocupacional anual. Por este motivo, y por la escasa capacidad nacional de realizar estas técnicas en forma masiva, es que su utilización está restringida sólo para aquellas situaciones en las que exista alguna sospecha fundada de que las dosis involucradas en un periodo de tiempo relativamente acotado han sido del orden del doble del límite de dosis anual o superiores.

5.4. Evaluaciones ambientales con detectores activos o de lectura directa.

Existe la posibilidad de realizar evaluaciones de los ambientes de trabajo, es más, parte de la evaluación de estas condiciones se realizan para superar el proceso de autorización de cada instalación radiactiva. Así mismo, el Instituto de Salud Pública de Chile, en su rol de referencia está encomendado al establecimiento de metodologías para evaluar al personal expuesto.

En la actualidad no existen metodologías de referencia para la evaluación de todos los ambientes de trabajo en los que se involucran radiaciones ionizantes en Chile, esto, por la complejidad de las diferentes actividades que desarrollan, algunas de las cuales, además de involucrar exposición a radiación ionizante en forma externa, también incluyen el riesgo de incorporación de materiales radiactivos.

De cualquier manera, en el desarrollo de estas metodologías se ha observado la complejidad de hacer estimaciones precisas y representativas de los niveles de exposición de los trabajadores, en buena medida por la variabilidad de las condiciones de exposición en cada ambiente, con fuerte influencia de distancias, condiciones de dispersión de la radiación, blindajes, tiempos de exposición, orientaciones de haces de radiación, como también concentraciones de materiales radiactivos en aire y presentes en superficies, distintas vías de incorporación, y adicionalmente, por la necesidad de diferentes tipos de detectores para cada una de las diferentes determinaciones.

Con todo, se observa que, para la mayoría de las situaciones de exposición cualquier estimación más precisa de los niveles de exposición de los TOEs es la que se puede obtener por la vía de las diferentes técnicas dosimétricas que rutinariamente se están utilizando para la vigilancia radiológica de los ambientes de trabajo en el país.

Por otro lado, para los procesos de autorización continúa siendo razonable realizar estas evaluaciones que aportan información preliminar respecto de las condiciones de exposición de los trabajadores(as), estimaciones que en condiciones normales serán verificadas o precisadas con la información que aporta la dosimetría personal.

Así mismo, este tipo de metodologías prestan utilidad para aquellas situaciones en las cuales, por alguna razón, no se ha utilizado dosimetría o no se ha podido conocer la información que proporciona la dosimetría personal, así mismo, si existe alguna duda respecto del resultado que arroja la misma. También para situaciones de alerta de dosis originadas por el proceso de vigilancia que administra el Instituto de Salud Pública, a través del cual, se detectan y notifican situaciones de superación de los

límites secundarios de dosis, derivados de los límites legales y recomendaciones internacionales, en cuyos procesos de investigación frecuentemente se demanda la realización de algún tipo de evaluación de puesto de trabajo.

Se reitera la situación que se planteó anteriormente en cuanto a que, para la vigilancia de las condiciones de trabajo de los trabajadores(as) el punto de entrada que se propone es que sea la que es suministrada por el proceso asociado a los procesos de dosimetría personal.

5.5. Realización de exámenes médicos.

En primer lugar, es conveniente mencionar que al estado actual del conocimiento y del desarrollo técnico, para condiciones normales de trabajo, no existen indicadores de exposición para radiaciones ionizantes, siendo la dosimetría personal prácticamente la única herramienta útil para determinar el nivel de exposición a radiaciones ionizantes de los trabajadores, en la medida que dichas exposiciones se encuentren dentro de los límites permitidos para el trabajo e incluso bastante por encima de los mismos.

Con ese contexto, es efectivo que existen algunos exámenes médicos que se pueden emplear para buscar conocer y seguir en el tiempo el estado de salud de los trabajadores. De esta manera no se puede descartar la utilización de exámenes como hemogramas.

Sin embargo, se debe considerar que, de acuerdo con la evidencia conocida, algunos parámetros del hemograma sólo se verán afectados en forma determinística por las exposiciones en forma aguda a radiaciones ionizantes a niveles por encima de 10 veces el límite anual, es decir, con dosis cercanas a los 500 mSv. Así mismo, es factible de utilizar recuento de reticulocitos, los cuales pueden evidenciar, aunque en forma inespecífica, con exposiciones también por encima de 500 mSv, las cuales deben ser practicadas en momentos específicos, de acuerdo a la dinámica de este tipo de efectos.

Cabe destacar que ambas metodologías son inespecíficas para exposiciones a radiaciones ionizantes, pudiendo ser afectadas por una serie de otros factores o condiciones. De acuerdo con ello, es conveniente utilizar estas metodologías exclusivamente cuando

existe algún indicio o sospecha fundada de que una persona se ha sometido a ese tipo de condiciones, de lo contrario, no se recomienda recurrir a este tipo de exámenes, a menos que se tenga claro el tipo de conclusiones que se espera obtener de su aplicación.

5.6. Sistema de Vigilancia Radiológica Personal del Instituto de Salud Pública de Chile.

En el Instituto de Salud Pública, en el ejercicio de su función emanada del artículo 6 del D.S. N°3, de 1985, del Ministerio de Salud, mediante el envío obligatorio de la información emanada de la dosimetría personal, descrita en el artículo 9 del mismo reglamento, se mantiene un sistema de vigilancia que utiliza valores secundarios derivados de las recomendaciones internacionales, las que son más restrictivas que las establecidas en el país.

Dicho sistema ha establecido para todos los servicios de dosimetría personal externa la obligatoriedad de la notificación de toda dosis que supere los siguientes criterios:

- **Dosis de cuerpo entero:** Toda dosis que alcance o supere los 5 mSv.
- **Dosis de extremidades:** Toda dosis que alcance o supere los 125 mSv.
- **Dosis de cristalino:** Toda dosis que alcance o supere los 5 mSv.

En general la dosimetría personal se aplica con periodos trimestrales, por lo que las dosis de 5 mSv en cuerpo entero, de repetirse sistemáticamente, implicarían aproximarse a valores de 20 mSv en el año, similares a lo establecido en las recomendaciones internacionales para exposiciones de cuerpo entero e inferiores a los 50 mSv establecidos en el Reglamento de Protección Radiológica chileno.

Toda dosis que supera estos niveles es analizada en específico solicitándose investigaciones con lo cual se consigue un nivel de acción con un carácter preventivo respecto de los límites de dosis vigentes en el país.

6. CONCLUSIONES.

De todo lo analizado anteriormente, se desprende que para el desarrollo de programas de vigilancia de los niveles de exposición de la salud de los trabajadores y trabajadoras por exposición a radiaciones ionizantes, considerando que las mismas se realizan en instalaciones debidamente autorizadas y por personal debidamente autorizado periódicamente, el punto de partida más adecuado para ponderar el riesgo que implica para la salud de la población trabajadora la presencia de radiaciones ionizantes en el ambiente de trabajo, es sin lugar a dudas la dosimetría personal para irradiación externa, por su extensivo uso y por constituir el más directo mecanismo mediante el cual se puede determinar que las exposiciones se encuentran por debajo los límites permitidos, entendiéndose que el cumplimiento de estos límites asegura la no presencia de efectos determinísticos de las radiaciones, al mismo tiempo, reduce el riesgo de efectos estocásticos a un nivel que se estima tolerable para el contexto de las exposiciones ocupacionales. Todo lo anterior, sin desatender los otros principios de la protección radiológica acá destacados.

Al mismo tiempo, mediante la investigación de las dosis asociadas a las situaciones de alerta detectadas por el Sistema de Vigilancia Radiológica Personal del Instituto de Salud Pública se estima que se permite adecuadamente la gestión de los diferentes mecanismos que establece la Ley N° 16.744 para la acción de los Organismos Administradores, médicos del trabajo, Superintendencia de Seguridad Social, entre otros. Esto no quiere decir que por niveles de exposición por debajo de los establecidos para la vigilancia estos organismos no deben actuar, sino que solamente que a estos niveles y superiores resulta imperativo su intervención, la cual aún mantiene una brecha con carácter preventivo respecto de los niveles de dosis establecidos en la regulación como intolerables para las exposiciones ocupacionales.

Adicionalmente, como se ha expuesto, se puede utilizar otro tipo de exámenes médicos, pero los mismos sólo debieran aparecer como necesarios, ya sea para vigilar las condiciones de salud generales de los trabajadores, entendiéndose que, a los niveles de dosis que se dan en condiciones normales de trabajo, no hay indicadores biológicos de exposición. Así mis-

mo, cuando existe alguna situación que sugiera la superación de los límites establecidos o cuando la respectiva autoridad así lo indique.

Lo anterior se puede complementar con la utilización de dosimetría citogenética, de utilidad exclusiva para situaciones en las que existe algún indicador que sugiera la amplia superación de alguno de los límites de dosis. También con la aplicación de otras metodologías de mediciones ambientales como evaluaciones de puesto de trabajo, todas ellas en general a ser aplicadas, además de en los procesos de autorización de las instalaciones, para aquellas situaciones en las que exista alguna duda respecto de lo que muestra la medición ambiental de la dosimetría personal o como complemento de esta.

Finalmente, se espera que con base en los elementos analizados en la presente nota técnica se establezca con aplicación a nivel nacional un protocolo para la vigilancia de salud de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. Ley N° 16.744 de 1968 del Ministerio de Trabajo y Previsión Social, establece Normas sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.
2. D.S. N° 101, de 1968, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social.
3. D.S. N° 109, de 1968, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social.
4. Circular N° 3.708, del 28 de octubre de 2022.
5. Decreto Supremo N°3 “Reglamento de Protección Radiológica de Instalaciones Radiactivas”, de 1985, del Ministerio de Salud.
6. Decreto Supremo N°133 “Reglamento sobre Autorizaciones para Instalaciones Radiactivas o Equipos Generadores de Radiaciones Ionizantes, Personal que se Desempeña en Ellas, u Opere Tales Equipos y Otras Actividades Afines”, de 1984, del Ministerio de Salud.
7. Ley N° 18.30 de 1984 del Ministerio de Minería, Ley de Seguridad Nuclear.
8. Principios Fundamentales de Seguridad, Colección de Normas IAEA, SF-1, 2007.
9. IARC Monograph on Radiation (vol. 100D, 2012)
10. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report. Annex A: Evaluation of selected health effects and inference of risk due to radiation exposure. Annex B: Lung cancer from exposure to radon. UNSCEAR 2019.
11. General Safety Requirements Part 3, N° GSR Part 3, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, European Commission, Food and Agriculture Organization of United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, IAEA Safety Standards Series N°. GRS Part 3, 2014.
12. International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication 103, 2007.
13. ICRP 26, Recommendations of the ICRP. International Commission on Radiological Protection. 1977.
14. Nota Técnica N° 034, Trabajador(a) Ocupacionalmente Expuesto(a) a Radiaciones Ionizantes, del Instituto de Salud Pública. 2016.
15. Assessment of prospective cancer risk from occupational exposure to ionizing radiation. IAEA Tec Doc. 2021.
16. Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students. IAEA, 2010.
17. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the general assembly with scientific annexes, UNSCEAR 2017
18. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report. Volume IV. UNSCEAR 2020/2021
19. Curso Supervisores de instalaciones radiactivas. TEMA 7: Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico, CEN, Argentina, 2013.

20. Radiobiología, Estudio de los efectos de las radiaciones ionizantes en tejidos biológicos. Curso OIEA Protección Radiológica, Argentina, 2008.
21. Radiación. Efectos y fuentes, PNUMA, 2016.
22. ICRP, Publicación 105, Protección Radiológica en Medicina, 2007.
23. Annals of the ICRP Proceedings of the Fifth International Symposium on the System of Radiological Protection, Australia, 2020.
24. ICRP Publication N° 60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1990.
25. ICRP Annals Publication N° 115, "Lung cancer risk from Radon and progeny and statement of Radon", 2010
26. Dosimetría citogenética: Aplicaciones en materia de preparación y respuesta a las emergencias radiológicas. Organismo Internacional de Energía Atómica, 2014.

8. LINKS DE INTERÉS.

<https://www.suseso.cl/613/w3-propertyvalue-137227.html>

<https://www.suseso.cl/613/w3-propertyvalue-296279.html>

<https://www.ispch.cl/salud-de-los-trabajadores/vigilancia-radiologica-personal/>

<https://www.ispch.cl/salud-de-los-trabajadores/publicaciones-de-referencia/>