



Universidad de Valladolid

Protección Radiológica: su
origen en el ámbito
internacional y su posterior
desarrollo en Estados Unidos

Autor: Javier Gómez-Sellés

Tutor: Alfredo Marcos

Departamento de Filosofía

Índice

Resumen	1
Abstract.....	1
1. Introducción	2
2. El descubrimiento de las radiaciones ionizantes:	3
2.1. El descubrimiento de los rayos X.....	3
2.2. El descubrimiento de la radiactividad natural y el radio.....	6
3. Las primeras propuestas de normas y la creación de organizaciones nacionales	9
4. El proyecto Manhattan y las bombas sobre el Japón: el nacimiento de la era nuclear. 13	
5. La controversia sobre la lluvia radiactiva.	17
6. La irrupción de la Energía Nuclear para fines pacíficos.....	22
7. El concepto ALARA: Tan bajo como como razonablemente sea posible:	26
8. Consideraciones finales:.....	30
9. Referencias.....	31

Resumen

El descubrimiento de las radiaciones ionizantes trajo aparejado el de los daños que estas producían en el ser humano. El uso que se hizo de ellas para fines civiles y militares supuso el surgimiento de la protección contra éstas, tanto de los trabajadores, como de los pacientes y del público en general. Esto contribuyó a la aparición de organizaciones a nivel nacional e internacional que promulgaron leyes y normas que fijaron, entre otras cosas, dosis mínimas permisibles de exposición a las citadas radiaciones. Asimismo, el lanzamiento de las bombas atómicas sobre el Japón, el miedo a la lluvia radiactiva y la irrupción de la energía nuclear propiciaron un debate que pasó del ámbito científico al político-social.

Palabras clave: Radioprotección, Dosis, Lluvia radiactiva, Rayos X, Radio, Energía nuclear.

Abstract

The discovery of radioactivity brought with it the harm produced on human beings. The civil and military double use meant the birth of radioprotection for workers, patients and the public in general. This contributed to the creation of national and international organizations that promoted

laws and regulations that established, among other things, minimum permissible doses of exposure. Likewise, Hiroshima and Nagasaki bombs, the fear to fallout and the irruption of nuclear energy triggered a debate that moved from the scientific to the political-social sphere.

Keywords: Radioprotection, Dose, Fallout, X ray, Radio, Nuclear energy.

1. Introducción

El Consejo de Seguridad Nuclear indica en uno de sus documentos que «*la protección radiológica tiene por finalidad la protección de los individuos, de sus descendientes y de la humanidad en su conjunto, de los riesgos derivados de aquellas actividades que debido a los equipos o materiales que utilizan suponen la exposición a radiaciones ionizantes*» (CSN 2012). Es decir, la protección radiológica es una disciplina cuyo origen y desarrollo es inseparable de las radiaciones ionizantes; pero, a un tiempo, la importancia e influencia de las radiaciones ionizantes en la historia reciente no pueden entenderse sin sus efectos y, por tanto, sin el desarrollo de la protección frente a estos.

El descubrimiento de las radiaciones ionizantes durante el cambio de siglo se produce en un momento histórico pleno de profundos cambios debido a los grandes avances científicos y tecnológicos que tuvieron lugar durante el cambio de siglo: el automóvil, el cinematógrafo, el aeroplano, el generador de corriente alterna, el «*annus mirabilis*» de Einstein, las revoluciones científicas, Marconi, Tesla, Edison, Planck... y el nacimiento de los premios Nobel son muestras de la importancia que alcanzaron la ciencia y la tecnología en esos años. Algunos autores dividen este periodo en tres o cuatro etapas, con difusos límites temporales, que, sin tener mayor relevancia, nos ayudan a comprender su evolución. Una primera etapa, que se inicia con el descubrimiento de los rayos X y el radio en 1895-96 y llega hasta los años 20, comprende sus primeras aplicaciones médicas e industriales, la experimentación con ellas y el descubrimiento de sus beneficios y sus efectos biológicos negativos. Otra segunda, que alcanza hasta el comienzo de la II Guerra Mundial, está ligada al desarrollo de la radiología y al surgimiento de los primeros organismos y regulaciones de radio-protección. Hay una tercera etapa, centrada en el desarrollo y lanzamiento de la bomba atómica, que comprende el perfeccionamiento de la protección radiológica como ciencia. Y una cuarta, que llega hasta los 70, ligada al nacimiento de la era nuclear y la utilización de esta energía para usos civiles, donde el debate sale del ámbito científico y pasa al social y político (Khare, y otros 2014) (Brodsky y Kathren 1989) .

Este trabajo realiza un recorrido por estos primeros 70-80 años de las radiaciones ionizantes en general y de la protección radiológica en particular, fundamentalmente en Estados Unidos. Los enmarca dentro de su contexto científico-técnico, político y social, incluidas las organizaciones nacionales, internacionales y la reglamentación creada a su alrededor, mostrando cómo ayuda a

configurar la sociedad de comienzos y mediados del siglo XX. Una sociedad que Beck llamará del riesgo (Beck 1998), con posibles influencias en las generaciones futuras, como su propia definición recoge. En cada una de esas etapas se mostrará la protección radiológica como fruto de un momento histórico y como elemento fundamental que influye en éste, en un recorrido de ida y vuelta: el amor-odio hacia el desarrollo tecnológico; el mundo socio-laboral; el orden mundial establecido; el efecto en la vida de las personas; el desarrollo económico; la labor de la opinión pública y los medios de comunicación; la legislación sanitaria y laboral; los organismos internacionales; la economía; la sociología, etc. Asimismo, se muestra la evolución de los conceptos dentro de la disciplina fruto de la investigación propiamente dicha y del momento histórico en el que se produce. Desde la búsqueda de un umbral de dosis, pasando por la dosis permisible y llegando al concepto ALARA.

2. El descubrimiento de las radiaciones ionizantes:

2.1. El descubrimiento de los rayos X.

En noviembre de 1895, Wilhelm Roentgen estaba estudiando la naturaleza de los rayos catódicos cuando, accidentalmente, se dio cuenta de que unas láminas fotosensibles que se encontraban a cierta distancia del tubo presentaban cierta luminiscencia, aun cuando éste se hallaba aislado por unas pantallas de cartón. Investigaciones posteriores revelaron que este hecho había sido causado por una radiación desconocida con una gran capacidad de penetración, denominada rayos X. Todo ello le llevó a la concesión del primer Premio Nobel de Física de la historia en 1901 (Nobel Media AB 2019).

Ya desde un principio, desde la propia publicación del artículo¹ anunciando el descubrimiento, quedó constancia de la importancia que éste iba a tener en medicina, pues incluía la primera imagen radiográfica de la historia: el esqueleto de la mano de su mujer. Tal fue el impacto que provocó el conocimiento de este acontecimiento que, en enero de 1896, Thomas Edison ya había construido su propia máquina de Rayos X. Lo mismo ocurrió en otros lugares del mundo como Italia, Alemania, Francia o los Estados Unidos, donde científicos e ingenieros comenzaron a experimentar (Kevles, 1997). Así que, ya a las pocas semanas, los Rayos X comenzaron a utilizarse con fines diagnósticos y terapéuticos, tales como la determinación de lesiones, la localización de cuerpos extraños alojados en el cuerpo por heridas de metralla e, incluso, la resolución de crímenes por medio de la medicina forense. El mismo Edison prestó su fluoroscopio perfeccionado para que se pudieran extraer los perdigones que un millonario de Nueva York había recibido accidentalmente en una mano durante un accidente de caza (Kevles 1997, 35). Asimismo, *La American Journal of*

¹ El artículo fue publicado el 8 de noviembre de 1895 en *Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik-mediz* y traducido ya por *Science* en 1896.

Medical Sciences dejó constancia de que en 1896 se habían usado los Rayos X para obtener una imagen de la cabeza de un feto (Walker 2000). Por otro lado, existen evidencias de que en mayo de 1896 empezaron ya a usarse por el ejército italiano en los hospitales de campaña durante la guerra de Abisinia; por el ejército británico en Pakistán en 1897, como Winston Churchill menciona en su libro *The Story of the Malakind Field Force* (Clarke y J.Valentin 2009); y por el ejército norteamericano en Cuba y Filipinas durante la guerra del 98.

Pero, simultáneamente, se sucedieron aplicaciones frívolas: casos como la supresión de vello o la mera observación del esqueleto humano se producían como si de una atracción de feria se tratase: el mismo año de 1896, grandes almacenes de Nueva York y París alternaban en sus establecimientos demostraciones al público de máquinas de rayos X con otras del cinematógrafo² (Kevles 1997). El propio Edison fue uno de los primeros en subirse al carro y participó en varias exhibiciones durante los primeros meses. De hecho, durante los primeros cinco años, el aparato de rayos X fue más un juguete interesante que un arma valiosa para la medicina. Y, aunque en mayo de 1896 ya se editara el primer manual de radiología, *Practical Radiography*, cuya portada era una radiografía de tórax, si echamos la vista atrás, parece sorprendente que se hubiera podido obtener algún resultado positivo con un aparato prácticamente improvisado y poco fiable, sobre todo teniendo en cuenta la variedad de exámenes intentados y su éxito relativo. Este impacto arrollador fue posiblemente fruto de la facilidad con la que se podía mostrar el esqueleto humano, debido al hecho de que la estructura ósea es más radio-opaca que otros tejidos y a la familiaridad que se tenía con dicho esqueleto humano, por lo que en seguida se confió en los rayos X por su capacidad para mostrar la realidad (Pasveer 1989) .

Si bien al comienzo de su uso no había conciencia de sus riesgos, como lo demuestra la radiografía del feto antes citada, la comunidad científica empezó a apercebirse de ello enseguida. El propio Roentgen, en mayo de 1896, ya se había percatado de pérdida de pelo y cierta toxicidad en la piel, aunque su práctica rutinaria de sostener entre sus dedos una lámina de plomo mientras tomaba radiografías había estado protegiendo fortuitamente sus manos de los daños de la radiación (Khare, y otros 2014). En 1896, por ejemplo, un médico austriaco que había tratado el lunar de una niña de 5 años a altas dosis reportó que, aunque el tratamiento había sido eficaz, también le había provocado quemaduras. Y trabajadores que habían colaborado en exhibiciones en Bloomingdale's sufrieron quemaduras, aunque en muchos casos se atribuyeron a descargas eléctricas. También Edison relató que había realizado una serie de experimentos que lo dejaron con

² No es casual la alternancia de tales eventos, pues el fenómeno del cinematógrafo y de los rayos X tuvieron muchos puntos en común en cuanto a la fecha de nacimiento (diciembre y noviembre de 1895) la técnica, la revolución que supusieron en el mundo de la imagen y la fascinación que provocaban entre el gran público.

los ojos irritados y erupciones en la piel. Más adelante colaboró en la mejora de la tecnología, pero sufrió una gran desilusión y abandonó sus esfuerzos a partir de 1902. Para entonces, un colaborador suyo, Clarence Dally, al que había encargado los primeros trabajos con rayos X, sufrió, al cabo del tiempo, quemaduras en la cara, pérdida de vello capilar y facial, amputaciones de dedos y manos... y acabó muriendo en 1904 con una terrible agonía, debido a úlceras y dolores por todo el cuerpo que le impedían mantenerse tumbado. Algo similar le ocurrió a una radiógrafa³ del ejército norteamericano que los utilizó durante la guerra del 98 (Kevles 1997). Así, veinte años después del descubrimiento de los rayos X los científicos ya sabían que éstos podían causar esterilidad, enfermedad en los huesos o cáncer (Walker 2000).

A pesar de que en seguida aparecieron evidencias de los riesgos inherentes a la exposición a radiaciones ionizantes, la percepción dominante en las sociedades occidentales durante el primer tercio del siglo XX fue su carácter inocuo e, incluso, beneficioso para la salud, de tal forma que esas incipientes sociedades de consumo de los años 20 las percibieron como una tecnología fascinante y útil en la vida cotidiana, además de como una panacea terapéutica y una fuente de salud (Menéndez-Navarro y Sánchez Vázquez 2013). Tan es así que, presentando como presentaban los rayos X determinados beneficios, muchos achacaban las quemaduras a las descargas eléctricas de los propios tubos, a la radiación ultravioleta o, incluso, al ozono emitido cerca del tubo. Esto llevó en 1896 a Elihu Thomson, físico e ingeniero cofundador de General Electric junto con Edison, a ser el primero en investigar las quemaduras producidas directamente por los rayos X. Tomando como muestra su propio dedo meñique, lo irradió durante sesiones de media hora manteniendo parte de él cubierto por una lámina de aluminio, con el fin de mostrar que los daños eran debidos a los mismos rayos X y no a efectos colaterales de la máquina. Asimismo, avanzó por primera vez la posibilidad de la existencia de un umbral de dosis a partir del cual los rayos X podrían ser dañinos (Kevles 1997) (Pacific North Pacific Northwest National Laboratory s.f.).

Por otro lado, en 1896, el ingeniero estadounidense Wolfram Fuchs dio la que parece la primera recomendación de protección contra la radiación: hacer la exposición lo más breve posible; no permanecer a menos de 30 cm del tubo; y cubrir la piel con vaselina, dejando una capa adicional en el área más expuesta (Clarke y J.Valentin 2009). Es decir, sólo un año después del descubrimiento de los rayos X, se establecieron las tres medidas básicas de protección contra la radiación que aún perduran en nuestros días: tiempo de exposición, distancia y blindaje. Un poco más adelante, en 1902, Albert Frieben publicó por primera vez la relación directa entre la aparición de un cáncer de piel y la exposición continuada a los rayos X: se trataba de un carcinoma de células escamosas en

³ El término radiógrafo, *radiographer*, es el usado en el mundo anglosajón para lo que en España se denomina técnico/a de rayos.

el lado derecho de un trabajador de 33 años que trabajaba en una fábrica de tubos de rayos X en Hamburgo. Al parecer, el trabajador había estado usando sus manos para focalizar el haz a diario durante más de 4 años (Clarke y J.Valentin 2009). Asimismo, en 1903, el biólogo alemán George Perthes observó una correlación entre la exposición de células de ratones a la radiación y la reproducción de éstos, además de descubrir que los rayos X podían inhibir el crecimiento de tumores, proponiendo su uso en el tratamiento del cáncer.

Del mismo modo, el médico y dentista William H. Rolling, publicó en 1904 un experimento realizado con cerdos de Guinea que mostraba que los rayos X podían ser letales para los mamíferos, para luego dar sus propias recomendaciones sobre tiempo de exposición, distancia y protección (blindaje). Asimismo, introdujo el concepto de la cantidad mínima de exposición necesaria para que el trabajo fuera realizado adecuadamente, e ideó una especie de chapa, que incluía una película, que el trabajador podría llevar en el pecho y que cuando se empañaba indicaba al portador que había estado expuesto a una cantidad excesiva de rayos X. Este invento fue el precursor de los dosímetros de cuerpo que en la actualidad llevan en el pecho muchos trabajadores radio-expuestos. (Kevles 1997) (Walker 2000).

Igualmente, Jean Alban Bergonie y L. Tribondeau formularon en Francia en 1906 una ley descriptiva sobre los efectos de la radiación que permaneció como hipótesis de trabajo durante los años treinta. Éstos postularon que el efecto de la radiación en las células vivas es mayor en la etapa más temprana de la división celular; que la radiación afecta a las células reproductivas más que a otras células; y que causa la proliferación de células cancerosas en proporción a su etapa de desarrollo. Es decir, fijaron las bases de la diferenciación de los efectos biológicos de la radiación según el tipo de tejido afectado. Pero no fue hasta 1927 cuando el genetista Herman Muller, pionero en la materia, después de irradiar muestras de *Drosophila*, señaló que las células reproductivas eran altamente susceptibles de ser dañadas, incluso con pequeñas cantidades de radiación, produciendo mutaciones, y demostrando que la radiación era perjudicial para los animales durante su época reproductiva. Muller obtuvo el Premio Nobel en 1946 (Kevles 1997).

2.2. El descubrimiento de la radiactividad natural y el radio

Otro de los descubrimientos de final del siglo XIX fue la primera observación de la radiactividad natural en 1896, por Antoine-Henri Becquerel. Cuando éste estudiaba cómo los rayos X afectaban a las sales de uranio descubrió, por accidente, que éstas emitían espontáneamente una radiación que se podía registrar en una placa fotográfica. Estudios posteriores determinaron que esta radiación era algo novedoso, y no radiación proveniente de los propios rayos X, dejando al descubierto un nuevo fenómeno: la radiactividad.

Los trabajos de Becquerel inspiraron a Marie y Pierre Curie a investigar más a fondo ese fenómeno. Examinaron diferentes sustancias y minerales en busca de signos de radiactividad y descubrieron que un mineral, denominado pechblenda, era más radiactivo que el uranio, llegando a la conclusión de que debía contener otras sustancias radiactivas. De ella lograron extraer dos elementos previamente desconocidos, el polonio y el radio. A esa emisión espontánea la denominaron radiactividad. Por ambos trabajos, los tres científicos compartieron el premio Nobel de 1903. (Nobel Media AB 2019).

Al descubrimiento del radio le siguió un patrón de comportamiento similar que al de los Rayos X: interés por parte de la comunidad científica y fascinación por el público, además de un uso indebido, con lo que los peligros de la exposición a éste se hicieron evidentes gradualmente. Los médicos enseguida reconocieron que este elemento podía suponer un rápido avance en la lucha contra el cáncer, aunque sin llegar a entender realmente cómo aplicarlo. Así, el primer tratamiento documentado de pacientes tuvo lugar en Estocolmo en 1899, con dos pacientes con carcinomas de piel tratados por Stenbeck y Sjögren (Kardamakis, y otros 2010) (Clarke y J.Valentin 2009). Pero pronto se produjo un uso indiscriminado, atribuyendo al radio tales propiedades que los médicos lo prescribían para un rango de dolencias que iban desde la cura del acné a la de enfermedades cardíacas; desde la impotencia sexual a la hipertensión; incluso los vendedores ambulantes llegaron a vender agua o sales de radio como tónicos para la salud de uso diverso. Uno de los casos más famosos fue el del millonario y playboy Eben M. Byers, que comenzó a beber a diario un tónico llamado Radithor durante dos años para resolver una dolencia menor en un brazo. Dichas botellas contenían ^{226}Ra y ^{228}Ra . Al cabo de dos años comenzó a perder peso y quejarse de dolores de cabeza y dientes, hasta que perdió la mayoría de su mandíbula superior e inferior y acabó muriendo en 1932. La publicidad de este caso, así como las acciones llevadas a cabo por *la Federal Trade Commission* y la *Food and Drug Administration*⁴ hicieron que la industria de patentes relacionadas con el radio se hundiera. Habría que añadir que, además, el uso dañino de estos tónicos no se hizo relevante de forma inmediata puesto que, debido al alto precio (un dólar por botella, frente a los dos centavos que costaba un periódico entonces), la población afectada era muy escasa. (Walker 2000) (Cooper y Grinder 2008) (Vanchieri 1990).

Pero incluso antes de que este hecho llegara a la luz pública debido a la notoriedad de su protagonista, los científicos ya habían empezado a percibir el riesgo que entrañaba la ingestión de este elemento, a pesar de que sus daños, siendo más severos que los de los rayos X, llevaba más tiempo identificarlos. A diferencia de estos, que representaban una amenaza para la salud de las

⁴ Federal Trade Commission es una agencia federal norteamericana con la misión de proteger a los consumidores y promover la competencia. La Food and Drug Administration corresponde al ministerio de sanidad.

personas expuestas debido al poder de penetración de una fuente de energía externa, el radio causaba su mayor daño si se introducía dentro del cuerpo. Y mientras que algunas de las consecuencias de la sobreexposición a los rayos X eran visibles y casi inmediatas, los efectos dañinos del radio no salían a la luz hasta pasado un tiempo.

Por eso, no fue hasta el denominado caso de «*Las Chicas del Radio*» cuando empezó a haber una especial concienciación. En 1912 cientos de mujeres jóvenes que se encontraban trabajando en plantas de Nueva Jersey e Illinois se expusieron accidentalmente a una pintura luminosa mientras pintaban diales de instrumentos de medida y esferas de relojes de uso militar. La pintura contenía radio, de tal forma que la esfera de los relojes brillaba en la oscuridad y podía ser vista por los soldados durante la noche. Durante su jornada laboral algunas trabajadoras chupaban el pincel con los labios, con el fin de poder obtener un trazo más fino, ingiriendo así el radio de forma inadvertida. Otras, incluso, fascinadas por su brillo y la fama que había adquirido, llegaban a pintarse los labios o la cara con la pintura sobrante. Como consecuencia de ello, nueve jóvenes murieron entre 1922 y 1924, y otras sufrieron daños de consideración, sin que se conocieran los motivos. La causa fue asumida por la *New Jersey Consumers League* y la *National Consumer League*, que solicitaron al médico Harrison S. Martland que iniciara una investigación. Éste realizó exámenes médicos y autopsias a las jóvenes, que habían estado ingiriendo grandes dosis acumuladas, estableciendo el vínculo entre la ingestión del radio y los daños producidos, y determinando que, una vez que «*el radio u otras sustancias radiactivas de larga duración entraban en el cuerpo, irradiaban de forma espontánea y continua los tejidos responsables de la producción de células sanguíneas*», pudiendo causar, con el tiempo, anemia grave y otros trastornos. También, junto con otros investigadores, concluyó que no había forma de eliminar, cambiar o neutralizar la radiación depositada internamente. Sus primeros trabajos fueron publicados en 1925 en la *Journal of the American Medical Association*. (Walker 2000) (Jones 2005) (Inkret, Meinhold y Taschner 1995)

Podemos concluir que, al final del siglo XIX, la Segunda Revolución Industrial trajo consigo una gran atracción por la ciencia y la tecnología, que convivía con las críticas y rechazo provocados por la situación de los trabajadores en las fábricas, el abandono del campo y el miedo a la pérdida de puestos de trabajo debido a la sustitución del ser humano por la máquina. Aun así, desde su nacimiento, el descubrimiento de las radiaciones desencadenó una moda diferente a cualquier otra que hubiera existido antes. Aunque, visto con perspectiva, también trajeron con ellos un nuevo miedo a la tecnología pues, a diferencia de otros grandes inventos coetáneos, sus efectos, no sólo eran instantáneos, sino que podían pervivir a largo plazo⁵ y llegar a ser mortales. En todo caso, la

⁵ Como en el caso de la polución, que también mantendrá otros elementos comunes a los efectos de la radiación.

fascinación por los rayos X y el radio fue amplia, se extendió de forma espectacular e, inicialmente, superó los posibles miedos que podía acarrear (Kevles 1997, 24-25).

3. Las primeras propuestas de normas y la creación de organizaciones nacionales

Vistas las experiencias obtenidas durante las dos primeras décadas que siguieron al descubrimiento de las radiaciones ionizantes, las sociedades médicas que se constituyeron alrededor de la radiología, como la *Deutschen Roentgengesellschaft*, la *British Roentgen Society* y su *X-ray and Radium Protection Committee* y la *American Roentgen Ray Society*, comenzaron a proponer recomendaciones generales para la protección radiológica de los trabajadores en 1913, 1915 y 1922 respectivamente. Esto proporcionó una base sólida para los usuarios de los equipos de rayos X pero, sobre todo, propició un interés organizativo en la protección contra estos, que se cristalizó en el primer Congreso Internacional de Radiología, ICR⁶, que tuvo lugar en Londres en 1925. Entonces, se reconoció la necesidad de cuantificar la medida de la exposición a la radiación como el tema más acuciante, concibiéndose la creación de la *International Commission on Radiation Units and Measurements*⁷ (ICRU), que fue finalmente establecida en Estocolmo en 1928 durante el segundo Congreso Internacional. Su primer objetivo era proponer una unidad de medida para la radiación aplicada en medicina, adoptándose, ese mismo año de 1928, el roentgen⁸ como unidad de exposición a los rayos X y a las radiaciones gamma. La ICRU, ya desde su inicio, tuvo como principal tarea el desarrollo de recomendaciones aceptables internacionalmente con respecto a:

- Las cantidades y unidades de radiación y radiactividad;
- Los procedimientos adecuados para la medición y aplicación de estas cantidades en radiología de diagnóstico, radioterapia, biología de la radiación y operaciones industriales; y
- Los datos físicos necesarios para la aplicación de estos procedimientos, cuyo uso tendiese a asegurar la uniformidad en los informes que llegaran a realizarse (BIMP 2019).⁹

Asimismo, en este segundo congreso se fundó el actual International Commission of Radiation Protection, ICPR¹⁰ (ICRU 2019) y se comenzaron a dar recomendaciones a los

⁶ International Congress of Radiology.

⁷ La actual ICRU fue inicialmente denominada International X-ray Unit Committee y posteriormente International Committee for Radiological Units hasta alcanzar la presente denominación.

⁸El Roentgen se define como la cantidad de radiación ionizante que produce 1 unidad electrostática de carga negativa en 1 centímetro cúbico de aire. Para rayos X, su equivalencia es 1 rad = 1 rem = 0.96 roentgen (INFOCITEC 2010).

⁹ La ICRU es una organización independiente de La *Oficina Internacional de Pesas y Medidas* (BIMP, *Bureau International des Poids et Mesures*), fundada en 1875 y coordinadora de la metrología a nivel mundial, pero mantiene relaciones orgánicas con ésta. Fue impulsora de la creación del Departamento de Radiaciones Ionizantes dentro de la BIMP, y forma parte de su comité consultivo, el CCRI; la BIMP participa en reuniones de la ICRU y ambas organizaciones comparten directivos.

¹⁰ Inicialmente se denominó *International X-ray and Radium Protection Committee* (IXRPC), para pasar a ser en 1934 la *International X-ray and Radium Protection Commission*,

trabajadores expuestos, como el número de horas diarias y semanales a trabajar, las vacaciones anuales que debían tener, añadiendo, durante el congreso de 1934, la necesidad de que se sometieran a exámenes médicos con periodicidad semestral y al incorporarse a su empleo.

Volviendo a esas primeras reuniones, en septiembre de 1924, en una reunión de la American Roentgen Ray Society, Arthur Mutscheller fue la primera persona en recomendar una tasa de dosis «tolerable», para los trabajadores expuestos a radiaciones, denominada «dosis de tolerancia», que a su juicio podría tolerarse indefinidamente. Basó su recomendación en observaciones llevadas a cabo sobre médicos y técnicos que trabajaban en áreas de trabajo blindadas. Estimó entonces que los trabajadores habían recibido aproximadamente una décima parte de una dosis de eritema¹¹ por mes, medida a través de los datos recogidos de la corriente y el voltaje del tubo de rayos X, la filtración del haz, la distancia de los trabajadores al tubo de rayos X y el tiempo de exposición. También observó que ninguno de los individuos había mostrado signos de lesión por radiación. Mutscheller concluyó entonces que los niveles de tasa de dosis en las habitaciones blindadas eran aceptables, pero, al proponer un umbral de tolerancia de dosis, aplicó un factor de seguridad de diez y recomendó que el límite de tolerancia se estableciera en una centésima parte de una dosis de eritema por mes. Se asumió entonces esa «*dosis de tolerancia*» fuera una dosis de radiación a la que el cuerpo podía ser sometido sin producir en él efectos dañinos. Mutscheller publicó su trabajo en 1925. De forma causal, Rolf Maximilian Sievert¹² llegó al mismo tiempo a límites análogos utilizando un enfoque similar.

Pero no fue hasta 1934, cuando el Comité Asesor de los Estados Unidos para la Protección contra Rayos X y el Radio (U.S. Advisory Committee on X-ray and Radium Protection, ACXRP) propuso la primera norma formal para proteger a las personas de las fuentes de radiación externa. Para entonces ya se había extendido el uso del roentgen, por lo que se fijó el límite recomendado para la tasa de dosis en 0,1 roentgen/día para todo el cuerpo, en línea con la recomendación de Mutscheller, adoptada más tarde por la ICR de 0,2 roentgen/día (Inkret, Meinhold y Taschner 1995). Esta diferencia no significaba un gran problema, pensando que los grupos de trabajo de ambas organizaciones basaban sus recomendaciones en evidencias que ellos mismos creían incompletas. Consideraban que sus propuestas de dosis de tolerancia proporcionaban un nivel de seguridad razonable para personas en un entorno laboral tipo, y no pensaban dichos niveles como inviolables. Sin embargo, sí creían que dosis por debajo de esta dosis de tolerancia eran generalmente seguras y era poco probable que causaran un daño permanente. Es necesario señalar aquí que estos límites iniciales impuestos a la exposición a los rayos X no se lograron a través de la observación

¹¹ Mínima dosis de radiación capaz de producir eritema (Ferriolsa, y otros 2014)

¹² Sievert da nombre a la unidad más utilizada en la actualidad

cuantitativa de los cambios biológicos producidos por las radiaciones ionizantes, sino a través de un juicio basado en la ausencia de daño biológico observado. En todo caso, esta dosis de tolerancia supuso un gran avance en la protección radiológica (Walker 2000)

En 1941 El Comité Americano dio otro gran paso al recomendar una dosis de tolerancia para las fuentes de radiación depositadas internamente. La muerte de Eben Byers y el caso de las «*Chicas del radio*» empujaron a los científicos a investigar cómo calcular los emisores internos de radiación. El radio tenía muchas aplicaciones, tanto médicas como militares e industriales, y era necesario investigar sobre sus efectos. Otro acontecimiento que hizo avanzar la investigación sobre los efectos biológicos del radio fue el comienzo de la II Guerra Mundial: a final de 1940 el ejército norteamericano se preparaba para entrar en la contienda, y era necesario producir gran número de diales para los distintos instrumentales de guerra que se empezaban a fabricar en masa. Visto lo sucedido en los años 20, el ejército norteamericano no estaba dispuesto a sufrir bajas durante la fabricación de este material, por lo que impulsó la investigación. Los investigadores se encontraron con que, debido a que el radio tiene un periodo de semidesintegración¹³ muy largo, éste se considera prácticamente como una fuente constante de radiación, en contraste con otros elementos que decaen de forma exponencialmente corta (Inkret, Meinhold y Taschner, Radiation Protection and the Human Radiation Experiments: Radium, the Benchmark for Alpha Emitters 1995).

Aunque las investigaciones llevadas a cabo inicialmente por Martland en los años 20 ya habían propiciado la modificación de ciertas prácticas seguidas en las plantas de pintura de diales, disminuyendo notablemente el número de casos por envenenamiento por radio, los hechos citados anteriormente contribuyeron a que la investigación continuara. Estas investigaciones determinaron que la causa del envenenamiento no había sido química, sino radiactiva, debido, principalmente a las partículas α , descubiertas en 1899 por Ernst Rutherford. Las partículas α , muy poco penetrantes, se depositaban en las células y producían mutaciones genéticas, que provocaban el desarrollo del cáncer. El propio Martland continuó con las investigaciones junto con otros colegas, como Robley D. Evans, y determinó que había dos grupos de pacientes: un primer grupo de personas que presentaban síntomas agudos durante los primeros 7 años y morían rápidamente. Y un segundo grupo que, aparentemente saludable, desarrollaba enfermedades relacionadas con el radio entre 13 y 23 años después de estar expuesto a éste. Debido al poco poder de penetración de las partículas α , éstas eran imposible de detectar fuera del cuerpo, por lo que Evans ideó un método

¹³ Período de semidesintegración: tiempo necesario para que la mitad de los átomos de una sustancia radiactiva se desintegren, y la actividad de ésta se reduzca a la mitad de su valor inicial. Es característico de cada isótopo radiactivo y varía entre millonésimas de segundo y miles de millones de años siguiendo una ley de decrecimiento exponencial.

indirecto en 1934, en el MIT, haciendo medidas *in vivo* del radio a través de la detención de los tres productos resultantes del decaimiento del radio. Con ello, se hicieron observaciones clínicas de 27 personas que habían sido expuestas internamente al radio durante dos décadas y se vio que las siete personas con cargas residuales corporales de menos de 0,5 mg de radio no mostraban ningún efecto adverso (al contrario de las otras 20 con cargas superiores), por lo que se determinó que, aplicando un factor de seguridad, el nivel de tolerancia sería 0,1 mCi¹⁴. Aunque los datos se referían a medidas tomadas por Evans entre los 15 y 20 años posteriores al comienzo de la exposición al material radiactivo, sin embargo, este límite fue tomado como *máxima carga de radio permisible en el momento de la ingesta*, aumentando, así, el nivel de seguridad.

Si retrocedemos hasta 1936 veremos que se produce la inauguración del «Memorial de los Mártires», un monumento erigido en Hamburgo en memoria del personal sanitario que habían perecido como consecuencia de enfermedades inducidas por la radiación. Este monumento incluye los nombres de 169 víctimas de 15 países, entre los que se encontraban Marie Curie, o Jean Bergonié. Este hecho, pudiendo considerarse anecdótico, es un síntoma del curso que la normalización (en el sentido de proceso normativo) de la protección radiológica ha seguido hasta nuestros días: la diferente manera de abordar el problema del riesgo por la exposición a las radiaciones ionizantes según el sujeto fuera trabajador, paciente o público en general y que se abordará más adelante. ¿A qué podía ser debido?

Efectivamente, si repasamos los ejemplos citados hasta hora, la mayoría de los casos reportados correspondían a trabajadores, ya fueran las «*Chicas del radio*», el empleado de Edison o la radiógrafa del ejército americano; y luego, en menor medida, los pacientes. De hecho, el doctor E. L. Hoffman, que había participado en las investigaciones iniciales del caso de las chicas del radio, había sugerido que se trataba de una enfermedad ocupacional. Además, en esa época era muy común que los radiólogos recibieran altas dosis de radiación en las manos, que llegaban a provocar la pérdida de dedos, pues su práctica era usar sus propias manos para focalizar el haz de rayos X, con lo que esta mala práctica les convertía en víctimas propiciatorias. Por otro lado, la exposición de los trabajadores era muy frecuente, frente a lo esporádica de los pacientes tratados, que sólo eran expuesto al recibir tratamiento. De ahí que las recomendaciones se centraran en el ámbito laboral.

Hay que entender también el contexto histórico y social en que estas recomendaciones se producen, en un primer tercio de siglo donde los derechos de los trabajadores han sido ya colocados en el centro del debate y están teniendo lugar hechos determinantes: la revolución rusa en 1917; el nacimiento de la Organización Internacional del Trabajo, «*creada en 1919, como parte del*

¹⁴ 1 g de radio tiene una actividad de un Curie, 1 Ci

Tratado de Versalles que terminó con la Primera Guerra Mundial, y reflejó la convicción de que la justicia social es esencial para alcanzar una paz universal y permanente» (OIT 2019); y, posteriormente, la participación en la II Guerra Mundial de los Estados Unidos, cuyo poderío industrial, más que el militar, fue uno de los factores que decantó la guerra en favor de los aliados¹⁵, (Kershaw 2002) lo que hizo que las fábricas cobraran una importancia determinante. Todo ello contribuyó, sin duda a que se produjera una diferenciación en el tratamiento de los trabajadores, los pacientes y el público en general, que se mantiene hasta nuestros días. Tal es la huella que nos ha llegado que, no sólo la regulación es diferente, sino que las propias empresas ligadas a la fabricación de productos sanitarios o medicamentos emisores de radiación se organizan de tal manera que destinan departamentos distintos a la seguridad del paciente y a la del trabajador. Esta separación puede ser entendida como normal en otro tipo de industrias, pues puede considerarse como diferente la tipología del riesgo al que está sujeto, por ejemplo, un trabajador de una fábrica de montaje del automóvil que el conductor de éste. Pero resulta más chocante en el caso de los productos que nos ocupan. La tipología del riesgo y severidad del posible daño causado por la exposición a radiaciones ionizantes es similar en el caso del trabajador que opera o manipula una fuente que la del paciente o, incluso, la del público. Sólo variaría la frecuencia de exposición, y no siempre.

4. El proyecto Manhattan y las bombas sobre el Japón: el nacimiento de la *Era Nuclear*.

El denominado *Proyecto Manhattan* fue un proyecto de investigación liderado por el ejército de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial, con el apoyo del Reino Unido y Canadá, que dio lugar a la fabricación de las primeras bombas atómicas de uranio (²³⁵U) y plutonio (²³⁹Pu), lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki en agosto de 1945. Parte fundamental del proyecto era el Laboratorio Nacional Los Álamos, dirigido por Robert Oppenheimer, y que contaba con físicos como Enrico Fermi entre sus miembros. Este esfuerzo de construcción de las bombas atómicas supuso un reto formidable para los científicos que buscaban que los empleados trabajaran en condiciones de seguridad radiológica.

Como consecuencia de las investigaciones llevadas a cabo en distintos laboratorios, se produjeron una gran cantidad de sustancias radiactivas, por lo que los científicos intensificaron la investigación en un ámbito en el que se solapaban la física nuclear y la medicina. De un lado, se encontraba la recién bautizada «*Física de la Salud*», que se concentraba en mantener a las personas

¹⁵ Para Ian Kershaw, los tres factores que llevaron a Hitler a perder la guerra fueron: la apertura del frente ruso; la resistencia del Reino Unido gracias, entre otras cosas, al apoyo logístico de los Estados Unidos; y el poderío industrial norteamericano.

a salvo de los efectos de la radiación. Del otro lado, estaba la medicina nuclear, que esperaba aprovechar el poder de la radiación para diagnosticar y tratar enfermedades. De ahí que, a medida que el país iba entrando en la guerra, la investigación pasó de las aplicaciones médicas de la radiación a los efectos de la radiación en el cuerpo, y las herramientas y técnicas necesarias para proteger a los trabajadores del Proyecto Manhattan. (Atomic Heritage Foundation 2017).

El término «*Física de la Salud*» surgió en parte por la naturaleza secreta del proyecto y en parte porque la mayoría de los empleados eran físicos que trabajaban en problemas relacionados con la salud. Así, se creó un grupo en la Universidad de Chicago dirigido por el físico Ernest Wollan, bajo la supervisión del director médico del Proyecto Manhattan, Stafford Warren. Sus actividades incluyeron el desarrollo de instrumentos de monitorización apropiados, el desarrollo de controles físicos y procedimientos administrativos, la monitorización de la exposición a la radiación del personal y de sus áreas de trabajo, la eliminación de residuos radiactivos, etc. En resumen, todo el espectro de los problemas actuales de la protección radiológica. De hecho, fue durante el Proyecto Manhattan cuando nacieron muchos de los conceptos modernos de protección radiológica, tales como la unidad de medida rem, que tiene en cuenta los efectos biológicos de la radiación, o la máxima concentración permisible (MPC) para la radiactividad inhalada. Es de hecho cuando la protección radiológica alcanza su madurez (Khare, y otros 2014). Asimismo, adoptaron las recomendaciones del ACXRP para aquellos que trabajan con materiales radiactivos, y alentaron la práctica de prevenir cualquier tipo de exposición. Sin embargo, el objetivo no siempre se pudo lograr, y a pesar del impresionante historial de seguridad, los casos de sobreexposición se produjeron de forma inevitable. El más grave tuvo lugar después de la guerra, cuando dos accidentes distintos acabaron con la vida de dos investigadores que fueron expuestos a una dosis letal de radiación (Walker 2000).

El nacimiento del rem¹⁶ provino de la necesidad de encontrar un indicador que ayudara a cuantificar la cantidad de radiación absorbida por una persona, basándose en el aspecto biológico en lugar de en la ionización del aire, como era el caso del roentgen. También se perfeccionó la tecnología de los dosímetros de película y de fibra, y se crearon programas de protección radiológica, que incluían análisis de sangre periódicos. Estos análisis seguían siendo el mejor método para investigar una posible sobredosis, a pesar de que el recuento de glóbulos blancos en sangre no representaba una medida fiable por la variabilidad que existe entre una persona y otra. Asimismo, se comenzó a investigar en los efectos del plutonio y en los efectos medioambientales,

¹⁶ El rem es la unidad de medida de la dosis equivalente, que resulta de multiplicar la dosis absorbida de cada tipo de radiación (rayos X y rayos γ , electrones (rayos β), neutrones, partículas α ...) por un factor de calidad Q, que refleja la capacidad de ese tipo particular de radiación de generar daño.

estudiando la diseminación de los productos radiactivos en la tierra, el mar y la atmósfera¹⁷ (Atomic Heritage Foundation 2017).

El plutonio utilizado en la segunda bomba atómica fue descubierto por Glenn Seaborg en el Lawrence Radiation Laboratory, de la Universidad de Berkeley, en 1941. Debido a la *juventud* del nuevo elemento, a que la mayoría de los datos que se tenían sobre los efectos de la radiación interna estaban relacionados con el radio, y también a las similitudes entre estos elementos (ambos eran pesados; tenían un periodo de semidesintegración muy largo; y decaían en forma de partículas α) la tendencia era mantener las medidas de protección que se habían fijado en torno al radio. Pero, pocos años después, en 1944, al pensarse que podía empezar a haber *una producción en masa* de plutonio, elemento para la fabricación de una de las bombas, se vio necesario intensificar las investigaciones sobre la exposición al uranio y al plutonio. Además, accidentes como el de un químico que ingirió fortuitamente unos 10 mg de plutonio durante su manipulación, contribuyeron, por un lado, al conocimiento de los efectos biológicos del dicho elemento y, por otro, a fomentar su estudio. El trabajador fue inmediatamente monitorizado. Su piel fue limpiada en profundidad y se le realizó un lavado de estómago, comprobándose que en las primeras 24 horas su cuerpo presentaba una actividad muy baja de plutonio. Aun así, 30 años después, y ya con métodos más sofisticado de medida, el químico aún mostraba presencia de plutonio en su cuerpo.

Todo esto propició que se llevaran a cabo una serie de ensayos médicos con humanos para obtener datos metabólicos del plutonio (y uranio en menor medida) después, incluso de que se lanzaran las bombas atómicas sobre el Japón, que fueron muy controvertidos. Su propósito era desarrollar una herramienta de diagnóstico que pudiera determinar la captación de plutonio en el cuerpo a partir de la cantidad excretada en orina y heces. Según los organizadores del proyecto, esta herramienta era esencial para la protección de los trabajadores que trabajaban con plutonio para la construcción de las primeras bombas atómicas. La idea era poder retirar a un operario del trabajo cuando se determinara que había recibido una dosis interna que estaba cerca o por encima del límite considerado como seguro. (Atomic Heritage Foundation 2017).

El proceso fue el siguiente: a final de 1942 se comenzaron a realizar estudios sobre la toxicidad radiactiva del uranio y del plutonio. Ya se conocía la toxicidad química del uranio como metal pesado, que se depositaba en riñones y huesos, pero el plutonio era un enigma, por lo que se empezó a experimentar con ratas para trazar el recorrido que la radiactividad realizaba a través del cuerpo (Moss y Eckhardt 1995). Sin embargo, al no obtenerse pruebas concluyentes, debido a

¹⁷ Según la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear «Productos o desechos radiactivos» son los materiales radiactivos que se forman durante el proceso de producción o utilización de combustibles nucleares o cuya radiactividad se haya originado por la exposición a las radiaciones inherentes a dicho proceso.

la incapacidad que se tenía detectar cantidades peligrosas de plutonio en el cuerpo humano, se decidió dar un paso más allá y, entre 1945 y 1947, se inyectó plutonio a dieciocho pacientes como parte del esfuerzo por calibrar la carga de actividad radiactiva corporal. Los experimentos se llevaron a cabo varios en centros bajo los auspicios, primero del Proyecto Manhattan y, más adelante, de la AEC, (Atomic Energy Commission) de la que hablaremos más adelante. Los investigadores estaban convencidos de que las dosis que administraban eran demasiado pequeñas para producir consecuencias a corto plazo y, según todas las indicaciones, parece que estaban en lo cierto. Sin embargo, los riesgos a largo plazo fueron más problemáticos: en la mayoría de los casos, las inyecciones se administraron a pacientes de los que no se esperaba que vivieran lo suficiente como para desarrollar cáncer, u otros efectos retardados provocados por dichas exposiciones. (Moss y Eckhardt 1995).

Aunque se tomaron precauciones para proteger de lesiones a las personas sometidas a los experimentos, no les informaron de su alcance. Sólo en un caso un paciente firmó un formulario de consentimiento: la mayoría no sabía que se les había inyectado material radiactivo ni que formaban parte de un experimento. De hecho, los investigadores no esperaban que los pacientes recibieran ningún beneficio terapéutico y realizaron un esfuerzo deliberado para evitar que fueran conscientes de su participación involuntaria en los ensayos (Moss y Eckhardt 1995). Estas pruebas hicieron replantearse a la AEC la cuestión del consentimiento informado, emitiéndose instrucciones para que los científicos que trabajaran bajo contrato con la AEC pudieran llevar a cabo investigaciones sobre radiación en humanos sólo si había motivos para esperar algún valor terapéutico para los sujetos y si éstos eran informados y aceptaban el procedimiento¹⁸ (Walker 2000). Cuando el material relativo a este ensayo se desclasificó, su naturaleza secreta y la falta de información hacia los sujetos objeto de ensayo generó indignación y desconfianza en la opinión pública con relación a las prácticas de los laboratorios nacionales (Moss y Eckhardt 1995).

Al final de la guerra y comienzo de la posguerra se desarrollaron una gran cantidad de investigaciones sobre los efectos biológicos de la radiación. Así, Estados Unidos, Canadá y Gran Bretaña celebraron una conferencia en Chalk River en 1949 sobre dosis permisible y protección radiológica, cuyos resultados se publicaron en un informe tripartito. Además, se desarrollaron una serie de nuevos conceptos relacionados con la medición de la dosis a través de estudios en animales. Entre ellos se encontraban: la dosis absorbida (medida en *rad*); la dosis equivalente (medida en *rem*); la eficacia biológica relativa (*RBE*¹⁹), que relaciona el *rad* con el *rem* para

¹⁸ Como consecuencia de las deliberaciones de los Juicios de Núremberg, en 1947 se publicó el «Código de ética médica de Núremberg», que recoge una serie de principios que habrían de regir la experimentación con humanos (Palomo López y Redondo Mena 2012)

¹⁹ Relative Biological Effectiveness.

diferentes tipos de radiaciones; la dosis absorbida en función de la energía y profundidad que alcanza el fotón en el tejido (dosis profunda); la radiotoxicidad del plutonio y el concepto de referencia anatómica humana. El informe tripartito también recomendó límites para la protección contra la radiación interna y externa, incluyendo límites de carga corporal para el plutonio y límites semanales para la médula ósea y la piel. A excepción del límite del plutonio, todos fueron adoptados por la ICRP y NCRP posteriormente, en 1953 y 1954 (Inkret, Meinhold y Taschner, *Radiation Protection and the Human Radiation Experiments: A Brief History of Radiation Protection Standards* 1995).

5. La controversia sobre la lluvia radiactiva.

El nacimiento de la era atómica después de los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki hizo de la seguridad contra los efectos de la radiación una tarea mucho más compleja. Una de las razones fue que a partir de la fisión nuclear²⁰ se crearon muchos isótopos radiactivos que no existían en la naturaleza, con lo que habría que ampliar los conocimientos existentes más allá del radio y los rayos X. Además, el número de personas expuestas a la radiación por el desarrollo de las aplicaciones civiles y militares de la energía atómica iba a aumentar drásticamente. La protección radiológica iba a pasar, entonces, de ser una mera cuestión médica e industrial, a una cuestión de salud pública de grandes dimensiones, al menos, potencialmente. Por esos motivos, tanto el comité americano como el internacional modificaron su filosofía de seguridad radiológica, bajando los límites de exposición sugeridos hasta la fecha. Asimismo, se vieron obligados a realizar un cambio de nombre, para ajustarse a la nueva realidad, pasando a denominarse *National Committee on Radiation Protection (NCRP)* e *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* en 1946 y 1950 respectivamente (Walker 2000).

En 1946, el NCRP abandonó el concepto de «dosis de tolerancia», que sugería que por debajo de ese umbral de dosis la exposición era segura y no producía daño, a uno más adecuado a la realidad de «*máxima dosis permisible*». Uno de los motivos fue el resultado de los trabajos realizados por Muller y otros genetistas que demostraban la vulnerabilidad de las células reproductivas, que propició que durante la Segunda Guerra Mundial se hubiera abandonado el consenso existente hasta ese momento sobre la inocuidad de la radiación por debajo de un determinado umbral de dosis. El cambio filosófico y conceptual era importantísimo: se definía la dosis permitida como aquella que, «a la luz del conocimiento actual, no se espera que cause una lesión corporal apreciable a una persona en ningún momento durante su vida» (Walker and Wellock

²⁰ La fisión nuclear es la reacción en la que el núcleo de un átomo pesado, al capturar un neutrón incidente, se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros, llamados productos de fisión, emitiendo en el proceso neutrones, rayos gamma y grandes cantidades de energía (CSN 2019).

2010). Además, se reconocía explícitamente la posibilidad de sufrir consecuencias perjudiciales debidas a la radiación en cantidades por debajo de dichos límites permisibles. Pero el NCRP enfatizó que la dosis permisible se basaba en la creencia de que «*la probabilidad de que ocurran tales lesiones debe ser tan baja que el riesgo sea fácilmente aceptable para el individuo promedio*». Así mismo, se redujo la dosis permisible para cuerpo entero y se ampliaron los trabajos a otros isótopos radiactivos, no sólo naturales sino artificiales.

Es decir, durante sus primeros 60 años, el propósito de la protección radiológica era evitar los efectos deterministas²¹ de la exposición a las radiaciones por motivos laborales, y su principio era mantener a los individuos por debajo de unos umbrales pertinentes. La base ética de la protección radiológica apenas se había discutido de manera formal, y todo el discurso ético parecía haberse centrado en torno a un *sentido interno* de orientación moral. Las dosis bajas de radiación se consideraron beneficiosas, en gran parte, porque la mayoría de los usos de la radiación eran para fines médicos y, además, existía una gran abundancia de productos de consumo radiactivos. Es ahora cuando se descubre que por debajo de ese umbral existen efectos estocásticos, lo que hace que el concepto de riesgo y su manejo cambien radicalmente y el debate ético se hace imprescindible.

Poco tiempo después del final de la Segunda Guerra Mundial, políticos, periodistas, científicos y líderes empresariales sugirieron que, a la vista del poder de las armas nucleares, los beneficios derivados de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear podrían ser extraordinarios. Pero la primera prioridad del gobierno estadounidense era mantener el control estricto sobre la tecnología atómica e investigar sus aplicaciones militares. De ahí que el Congreso estableciera en 1946 la AEC mediante la *Atomic Energy Act*, citada anteriormente, para gestionar los programas de Energía Atómica del país. Asimismo, esta ley asignaba a la AEC la responsabilidad de proteger la seguridad y salud pública²² de los peligros de la radiación producida por la fisión nuclear. Su autoridad reguladora no se extendía al radio, rayos X, ni a otras fuentes naturales o artificiales de radiación. Además, en su función protectora de la salud, la AEC seguía las recomendaciones de radio-protección de la NCRP, compartiendo miembros y manteniendo con ella una relación institucional que no siempre fue fácil (Walker and Wellock 2010).

²¹ Hay dos clases de efectos, los que ocurren con seguridad al superarse un valor determinado de la dosis de radiación recibida (deterministas) debidos a la incidencia directa de la radiación y los que tienen una probabilidad de ocurrencia creciente al aumentar dicha dosis (estocásticos o probabilísticos), por la acción indirecta de ésta debido a la acción de los radicales libres generados (CSN 2012).

²² El término usado en inglés es “*health and safety*”, tomado prestado del ámbito laboral *salud e higiene* en el trabajo, y posteriormente, protección de riesgos laborales. En este caso, el uso es trasladado al público en general.

Así, aunque el decreto de 1946 alentaba la investigación en el ámbito de la tecnología nuclear para usos civiles, lo cierto es que el principal objetivo asignado fue la producción de materiales aptos para la fisión nuclear a utilizar en armas nucleares. De ahí que su función tuviera mucha controversia por el papel militar que estaban jugando sus actividades, inmersas en el comienzo de la *Guerra Fría*. De hecho, esta ley no permitía la comercialización privada de energía atómica, sino que creaba un monopolio virtual de la tecnología nuclear. La excepción fue la distribución generalizada de isótopos radiactivos producidos en reactores nucleares para usos civiles. El primer caso recogido fue el de la adquisición, en 1946, de una pequeña cantidad de Carbono 14 (^{14}C) para la investigación contra el cáncer por un Hospital de San Luis, que había sido producido en un reactor del Oak Ridge National Laboratory, entidad que, formando parte del Proyecto Manhattan, había sido heredada por la AEC. El caso tuvo una gran repercusión: la entrega fue presenciada por más de 150 personas; fue portada de muchos periódicos; y el Washington Post realizó un reportaje en el que afirmaba que el cáncer se podría curar en 10 años. Así, la AEC, calificó al programa como «*la primera gran contribución del desarrollo de la energía atómica al bienestar en tiempos de paz*», anunciando que los isótopos de Oak Ridge se utilizarían en más de mil proyectos en medicina, industria, agricultura e investigación científica (Walker 2000). Esto, siendo cierto, no era otra cosa que un intento de paliar la nueva conciencia que se empezaba a crear sobre los riesgos de la energía nuclear.

Otro cambio conceptual que comenzaba a producirse fue el de tener en cuenta el tratamiento a la población de una forma diferenciada. Como he apuntado anteriormente, a mediados de los años 50 empezaba a existir una preocupación creciente en la opinión pública por los riesgos inherentes a la radiación. Por un lado, el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki en 1945 hizo que la opinión pública pusiera su atención en la acción devastadora de la explosión, más que en las consecuencias de la radiación. Pero, más adelante, durante la década de 1950, se llevaron a cabo estudios sobre los supervivientes de los bombardeos que indicaban un cambio aparente en la proporción de niños y niñas entre los bebés nacidos de los supervivientes, aunque estudios posteriores demostraron que ese análisis era incorrecto. Simultáneamente, estudios sobre pacientes tratados a altas dosis y datos experimentales de estudios hechos con animales parecían demostrar que exposiciones muy altas podrían inducir cambios genéticos.

Asimismo, el aumento de las pruebas de armas nucleares durante la Guerra Fría²³, de mayor poder destructivo que la de Hiroshima, y la contaminación radiactiva resultante, e incidentes como el del *Lucky Dragon*, influyeron significativamente en la opinión pública. El *Lucky Dragon*, era un

²³ Estas pruebas fueron prohibidas por el Tratado de Prohibición Parcial De Ensayos Nucleares de 1963.

barco pesquero japonés que navegaba por el Pacífico coincidiendo con un ensayo nuclear de los Estados Unidos que tuvo lugar en las Islas Bikini. Como consecuencia de éste, hubo que evacuar dichas islas, y los pescadores japoneses del mencionado barco sufrieron irritación y quemaduras en la piel, náuseas, pérdida de pelo, y otras secuelas. Uno de ellos murió a los 6 meses, más probablemente por una hepatitis contagiada durante una transfusión para tratar los efectos de la radiación que por ella directamente. A raíz de ello, los efectos genéticos inducidos por la radiación se convirtieron en una preocupación dominante en los 50. Esto inspiró la creación de personajes de Ciencia Ficción como Godzilla, El Increíble Hombre Menguante, la Cosa, o el Increíble Hulk, entre otros (Inkret, Meinhold y Taschner 1995) (Walker 2000).

La ICRP reconoció entonces la necesidad de proteger al público en general debido al uso creciente de fuentes radiactivas y al previsible aumento de la expansión de la energía nuclear. La decisión de ser más cautelosos con la exposición de la población se basaba en la conciencia de que el mayor problema residía en la posibilidad de la transmisión hereditaria de los daños causados por la radiación, además del conocimiento del aumento de casos de leucemia entre los radiólogos, y la información que llegaba sobre el también incremento de casos de leucemia entre los supervivientes japoneses. Así, en 1954 La ICRP recomendó que, en el caso de una exposición prolongada de una gran población, se redujeran los niveles máximos permitidos en un factor de diez por debajo de los aceptados para las exposiciones ocupacionales (Clarke y J.Valentin 2009).

Sin embargo, esta aproximación no fue aceptada por la NCRP, excepto para los menores de 18 años, quien evitaba dar la apariencia de la existencia de un doble rasero para los trabajadores radio-expuestos (Walker 2000). En ese contexto, tal vez valga la pena indicar que la ICRP nunca argumentó que habría alguna razón para permitir más radiación en el ámbito laboral (como podría ser el hecho de conocer el peligro de las radiaciones ionizantes, y / o recibir un salario mayor en forma de prima de riesgo). En cambio, la opinión de la ICRP era (y sigue siendo) que se debía permitir una radiación menor para el público en general en vista de los posibles efectos genéticos y, más tarde, sobre la base de que el público en general incluye a personas más sensibles, como los niños y los enfermos (Clarke y J.Valentin 2009). En todo caso, estas recomendaciones representaron el primer esfuerzo formal para establecer pautas de protección radiológica para la población en general fuera de las «áreas controladas» donde se aplicaban las dosis permisibles fijadas para los trabajadores radio-expuestos (Walker 2000). Por último, hay que señalar que estos años son también los del establecimiento de límites diferentes según la sensibilidad a la exposición de los distintos órganos.

A medida que la radiación de bajo nivel pasaba del dominio restringido de los científicos y los médicos a ser un tema destacado en reportajes periodísticos y campañas políticas, los efectos de

las radiaciones ionizantes se convirtieron por primera vez en una cuestión de interés y debate público. Y a este debate se unía el hecho de que los científicos no se ponían de acuerdo en cuanto a la seriedad del riesgo de la lluvia radiactiva. La AEC, que era la responsable de llevar a cabo los ensayos con armas nucleares, insistía en que los niveles de radiactividad eran demasiado bajos como para suponer una amenaza para la salud pública y que, en todo caso, su riesgo era mucho menor que el que podía suponer perder la delantera en la carrera armamentística con la Unión Soviética. En un informe de 1955 declaraba que «*el riesgo debía ser equilibrado*». Pero los críticos, incluidos miembros veteranos del Proyecto Manhattan como Ralph E. Lapp, utilizaban sus mismos datos para llegar a conclusiones diferentes. El tema central era si los beneficios que suponían para la seguridad nacional los ensayos con bombas nucleares justificaban los peligros de la lluvia radiactiva²⁴. Y esa era, fundamentalmente, una cuestión política. La controversia sacaba a la luz no sólo la valoración política, sino el hecho de mostrar que los científicos no sabían todas las respuestas (Walker 2000).

Como consecuencia del debate, la National Academy of Sciences, una prestigiosa entidad no ligada al gobierno, llevó a cabo una investigación involucrando a más de cien científicos, para tratar aspectos genéticos, patológicos, alimentarios y agrícolas, meteorológicos, oceanográficos y de residuos radiactivos. El informe se publicó en 1956 y, en cierto modo, resultó tranquilizador, pues concluía que las consecuencias de las pruebas con de armas representaban un peligro importante para la salud hasta ese momento. Pero en otros aspectos era perturbador, haciendo énfasis en los efectos genéticos de la radiación y el consiguiente riesgo para las generaciones futuras, pidiendo un control cuidadoso de la radiación en vista de la expansión que el uso de la energía nuclear para fines pacíficos estaba teniendo. Asimismo, instaba a que los exámenes radiográficos, que se consideraban excesivos y, en ocasiones, indefendibles, «*se redujeran tanto como se pudiera con el fin de que fuera adecuada a la necesidad médica*». La National Academy of Sciences pidió que se siguiera investigando más sobre la radiación, pero también señaló que el aumento de los datos científicos y el conocimiento técnico no eran suficientes en sí mismos para resolver las controversias ligadas a ella sobre los problemas de la protección radiológica. Las preguntas éticas, políticas, económicas y militares generadas sobre los riesgos y beneficios relativos al uso de la energía atómica no podían ser respondidas sólo con información científica (Walker 2000).

El debate sobre la lluvia radiactiva tuvo un impacto importante e inmediato en la protección radiológica de tres maneras. El primero fue el aumento de la conciencia pública de sus peligros. El segundo, fue el daño serio que sufrió la credibilidad de la AEC como garante de la salud pública

²⁴ Deposición en la superficie terrestre de la radiactividad existente en la atmósfera a causa, fundamentalmente, de las pruebas nucleares (CSN 2019)

norteamericana. Así, Eisenhower, creó en 1959 la Federal Radiation Council (FRC), como órgano consultivo de la Casa Blanca y las agencias federales, y potenció el papel del Departamento de Salud, Educación y Bienestar del gobierno estadounidense. Y el tercero fue provocar que la NCRP y la ICRP disminuyeran sus límites permisibles de exposición y adoptaran unidades de medida que ya habían ganado adeptos en detrimento del roentgen, como el rad y el rem, con el fin de medir la dosis absorbida en función de su grado de ionización de los tejidos y los efectos biológicos relativos, respectivamente, en 1956, 1958 y 1959 (Walker 2000). Sin embargo, la NCRP aún se resistía a fijar un límite de dosis permisible para público en general.

Este cambio de aproximación y la reducción drástica de las dosis permisibles hacía pensar si los límites anteriores habían tenido realmente validez y los trabajadores no habían sido expuestos de forma innecesaria y excesiva. Ambas comisiones lo negaban, y argumentaban que se habían llegado a ello por consenso y por el cambio de uso de la energía atómica. En todo caso, la nueva filosofía quedaba expresada en esta declaración del máximo responsable de la NCRP, Lauriston S. Taylor: *«Cualquier exposición a la radiación recibida por el ser humano debe ser considerada como dañina. Por lo tanto, el objetivo debe ser mantener la exposición del hombre lo más baja posible y, al mismo tiempo, no interrumpir el uso de la radiación completamente»*. En 1957 la AEC modificó su reglamentación, reduciendo los límites tanto para la radiación externa como para los emisores internos basándose en los niveles recomendados por la NCRP, y también impuso un límite de una décima parte del límite ocupacional para los miembros del público potencialmente afectados por las operaciones de sus licenciarios. Esto significaba, en la práctica, que la AEC no asumía que los límites impuestos representaran un umbral de seguridad para cualquiera que fuera expuesto a la radiación. Podemos concluir que el debate sobre la lluvia radiactiva planteaba cuestiones filosóficas, morales y políticas que la evidencia científica por sí sola no podía resolver. El temor de la población a la radiación iba aumentando a la vez que el uso de la energía atómica para fines civiles se iba extendiendo, en gran parte como resultado de esta controversia y de la incertidumbre existente (Walker 2000)

6. La irrupción de la Energía Nuclear.

A medida que la carrera armamentística iba tomando proporciones más dramáticas con el desarrollo de bombas termonucleares, el deseo de demostrar los beneficios de la energía atómica se hacía más acuciante. Como consecuencia de ello, el presidente Dwight D. Eisenhower, incitado por la detonación del primer artefacto de hidrógeno de la URSS, describió de manera cruda el horror de la guerra nuclear en un discurso ampliamente difundido ante la Asamblea General de las Naciones Unidas en diciembre de 1953. Éste se basó en el informe del “panel Oppenheimer”, un comité formado por su antecesor, Harry S. Truman, responsable del lanzamiento de las bombas

sobre el Japón, que tenía un perfil más pesimista por las consecuencias devastadoras del bombardeo. Fueron en realidad los científicos participantes en la creación del arma atómica (Niels Bohr, Leó Szilárd y Robert Oppenheimer, entre otros) quienes propusieron la reorientación de la energía nuclear hacia los usos civiles, lo que no significa que cuestionaran la obtención de la bomba²⁵. Pero sí hubo posturas diferentes sobre si se acertó con su lanzamiento, y la mayoría se justificó bajo el imperativo militar-patriótico. Oppenheimer pensaba que había que dejar las decisiones al respecto en manos de los científicos en vez de en las de los políticos, pues sólo estos conocían el poder destructor de la energía nuclear, y veía el uso civil como una forma de expiar el pecado del lanzamiento de la bomba (Calcines s.f.).

Su propuesta fue una campaña de información pública, la «operación franqueza», que preveía un discurso presidencial muy importante. Pero Eisenhower, en vez de centrarse exclusivamente en los peligros de la guerra atómica, alabó las aplicaciones nucleares civiles en la agricultura, la medicina y la generación de energía y enfatizó que «*la mayor de todas las fuerzas destructivas puede convertirse en una gran bendición, en beneficio para toda la humanidad*». Eisenhower propuso establecer un “organismo internacional de energía atómica” que promoviese los usos pacíficos de la energía nuclear en dicho beneficio. El discurso, denominado «*Átomos para la Paz*» sentó las bases de un orden nuclear internacional, y fue el detonante que impulsó la creación de la Organización Internacional para la Energía Atómica, OIEA (Röhrlich 2013).

El resultado de esta iniciativa fue La Ley de Energía Atómica de 1954, que enmendaba la de 1946, y permitía por primera vez el uso generalizado de la energía atómica para aplicaciones pacíficas. Así, redefinía el programa de energía atómica poniendo fin al monopolio del gobierno sobre la tecnología y situaba como objetivo nacional el crecimiento de una industria nuclear comercial importante. Asimismo, asignaba a la AEC tres funciones primordiales: continuar con el programa de armamento, promover los usos comerciales de la energía nuclear y proteger contra los peligros de estas aplicaciones pacíficas (Walker 2000).

Así, el final de la década de los 50 y principio de los 60 se convirtieron en unos años de crecimiento para la industria de la construcción y operación de centrales nucleares para la producción de electricidad, de tal manera que un directivo de una compañía eléctrica llamó a este momento «*The Bandwagon Market*»²⁶. Esto es, que un montón de compañías decidieron subirse al tren del gran negocio de la energía nuclear que se abría ante ellos. Esta aguda inflación del mercado fue una consecuencia de varios proyectos de plantas promovidas por empresas como General

²⁵ Szilárd propuso a Einstein escribir a Roosevelt para convencerlo, como indican sus célebres cartas

²⁶ Bandwagon hace referencia al carro sobre el que tocaban las bandas de música durante los desfiles. *To jump on the bandwagon* significa subirse al carro, en el sentido de seguir aquello que está de moda (Collins Cobuild 1988).

Electric y Westinghouse que se desarrollaron de forma casi simultánea y que aumentaron el atractivo de la energía nuclear para las empresas dedicadas a los servicios públicos, las denominadas «*Utilities*», desde mediados de los 50 hasta finales de los años 60 (Walker and Wellock 2010).

General Electric²⁷ realizó una serie de movimientos audaces para aumentar las ventas de sus reactores y convencer a las empresas de servicios públicos de que la energía nuclear era una alternativa para la generación de energía eléctrica segura, fiable y competitiva en costes con los combustibles fósiles. Y lo hizo a través de los denominados «*proyectos llave en mano*»: esta empresa se ofrecía a construir la totalidad de la instalación nuclear, desde el reactor hasta los edificios, y dejarla operativa para su cliente, una compañía eléctrica, que sólo tendría que *girar la llave* para comenzar a operar la planta. Y lo haría a un precio fijo, perdiendo dinero en su primer proyecto. Pero así logró superar en la oferta de sus competidores. El objetivo de este primer proyecto, Oyster Creek, era impulsar el mercado de la energía atómica, al calor de la iniciativa de Eisenhower y del empuje de la AEC. El resultado fue todo un éxito y supuso el disparo de salida del *Bandwagon Market*, cuyo punto culminante se alcanzó en 1966-67 (Walker and Wellock 2010).

Además de los proyectos llave en mano, también contribuyeron a este éxito el aumento cada vez mayor de la capacidad de producción de las plantas y de interconexión, que ayudaba a la redistribución de la energía sobrante. Pero otro hecho que lo impulsó decididamente y que abrió un debate aún sin cerrar fue la creación de una concienciación de la opinión pública cada vez mayor sobre la protección al medioambiente. Las plantas térmicas de carbón eran las mayores contribuyentes al deterioro de la calidad del aire, y las compañías eléctricas empezaron a concienciarse de los costes que suponían, no ya para el control de dicha polución, sino para su imagen. Por ello, volvieron la vista hacia una energía que, aparentemente, era mucho más limpia (Walker and Wellock 2010). Este debate, que se encuentra fuera del alcance de este trabajo, continuó hasta muy avanzados los años 70 y, como otros muchos relacionados con las radiaciones ionizantes, aún no se ha cerrado. Desastres como Harrisburg, Chernóbil y Fukushima no han hecho más que acentuarlos y traerlos a la actualidad.

El rápido incremento en el número de reactores y el aumento del tamaño y de la complejidad de las centrales propició una enorme carga de trabajo para la AEC. Las instalaciones requerían de licencia previa otorgada por ésta, y las plantas, cada vez más complicadas, sacaban a la luz problemas de seguridad difíciles de resolver. Aunque había una prohibición tácita por parte de la AEC para ubicar las centrales en terrenos urbanos (existió una propuesta de ubicación en el centro

²⁷ General Electric, había participado activamente en el desarrollo de los primeros equipos de rayos X para fines médicos.

de la ciudad de Nueva York), los emplazamientos se desplazaban a áreas aledañas, no demasiado alejadas de la población. Este tipo de localización provocó que hubiera un cambio de enfoque en el modelo clásico de protección de la población ante un posible accidente nuclear. Se pasó de poner el énfasis en el concepto de «emplazamiento remoto» a ponerlo en el de «salvaguardia tecnológica»²⁸, que era incorporado durante la fase de diseño del reactor (Walker and Wellock 2010).

Estas «salvaguardias tecnológicas» tenían dos funciones fundamentales: la primera era evitar el sobrecalentamiento y la posible fusión del núcleo del reactor, que contenía el combustible nuclear; y, la segunda, evitar que los productos radiactivos resultantes de la fisión generada en el núcleo del reactor se escapasen de la planta si éste resultaba dañado. La última línea de defensa era, en caso de que las medidas de seguridad fallasen, el edificio de contención: una estructura grande, a menudo con forma de cúpula, que rodeaba al reactor, al equipo de producción de vapor y a los sistemas de seguridad asociados.

A pesar de todo, en los años 60 comenzaron a surgir dudas sobre su fiabilidad a la hora de prevenir un escape masivo de radiactividad al medio ambiente en caso de accidente grave, y se empezaba a concebir la posibilidad de que una serie de concatenación de fallos pudieran sortear los distintos enclavamientos de seguridad: lo que se trataba era de reducir, al mínimo, la probabilidad de que se produjera un accidente. Por ello, entre los requisitos que fijaba la AEC era la inclusión de múltiples equipos de respaldo (con diferentes sistemas duplicados) y la incorporación de redundancias en los diseños de seguridad. También obligaba a que durante el diseño se partiera de asunciones conservadoras a la hora de evaluar la probabilidad de ocurrencia de un accidente (Walker and Wellock 2010). Este modo de proceder a la hora de evaluar los riesgos y fijar acciones para contrarrestarlos sigue vigente hoy en día y se ha trasladado a múltiples campos, como la aviación, la industria química, la prevención de riesgos laborales o, incluso, la seguridad de los sistemas de información.

Estos años que van desde el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki hasta la proliferación de las centrales nucleares, unido a otros desarrollos industriales, va a dar un significado nuevo al concepto de «riesgo», como «*un peligro*²⁹ *generado por decisiones sociales, derivadas de las ventajas y oportunidades generadas industrialmente*». Por eso, los peligros se van a convertir en una cuestión política (Escobar 2002). Para autores como Ulrich Beck, se va a propiciar una ruptura

²⁸ Las salvaguardias tecnológicas son un conjunto de sistemas diseñados para garantizar la protección del reactor (detención inmediata de la reacción nuclear y mantenimiento en este estado) así como el confinamiento de los productos radiactivos de forma que se eviten los accidentes y se reduzcan sus consecuencias exteriores a límites mínimos (Foro Nuclear 2019).

²⁹ La evaluación de riesgos, que tiene entre sus precursores a la industria nuclear, diferencia entre riesgo y peligro, entendiendo el primero como: el producto de la *probabilidad* de que ocurra una situación de *peligro*; por la *posibilidad* de que éste produzca *daño*; por la *severidad* de dicho *daño*.

dentro de la modernidad, acuñando lo que denomina «*sociedad del riesgo*». Beck describe una situación, en especial después de los desastres antes citados, en la que la «*producción social de riqueza va acompañada sistemáticamente por la producción social de riesgos*», por lo que «*la imperceptibilidad de los peligros, su dependencia respecto del saber, su supranacionalidad, la «expropiación ecológica», el paso de la normalidad a la absurdidad, etc.*» determinarán esta nueva sociedad (Beck 1998).

7. El concepto ALARA: Tan bajo como como razonablemente sea posible:

Los problemas medioambientales también abrieron otro debate en torno al apoyo que hasta entonces había recibido el desarrollo industrial y tecnológico por parte de la sociedad estadounidense. En un entorno de crecimiento de la demanda de electricidad que se doblaba cada diez años, crecía la preocupación, no sólo popular sino también política, por el deterioro del aire, el agua y el suelo. Sin embargo, como señalaba *Fortune*, los norteamericanos no estaban dispuestos a que las *Utilities* siguieran devorando los recursos naturales y contaminando el medio ambiente; pero tampoco deseaban reducir su consumo de electricidad. Y ambas situaciones eran incompatibles. De ahí que las grandes empresas de servicios públicos contemplaran la energía nuclear como la respuesta a ese dilema e, incluso, algunos ecologistas la vieran con buenos ojos como una alternativa «limpia». Todo ello, a pesar de la contaminación térmica que se producía por el calentamiento del agua usada en los sistemas de refrigeración de las plantas y devuelta a ríos y embalses de los alrededores. Así, la AEC, promovía activamente la idea de que la energía nuclear era la respuesta a la crisis energética y medioambiental, evitando entrar en todo lo referente a la contaminación producida, alegando que ella sólo se dedicaba a la protección contra la radiación. Esto último le llevó a recibir duras críticas (Walker and Wellock 2010).

Pero las críticas al proceder de la AEC alcanzaron al ámbito de la protección radiológica cuando dos eminentes científicos que trabajaban en un laboratorio financiado por la propia AEC, John W. Gofman and Arthur R. Tamplin, sugirieron que, si todo el mundo en Estados Unidos fuera expuesto a la dosis permisible fijada para la población, el número de casos de cáncer se incrementarían en 32.000, proponiendo que bajara esos límites en un factor 10. Además, ponían en duda el consenso existente acerca del análisis positivo del coste/beneficio de la energía nuclear. Estos estudios tuvieron mucho eco en los medios de comunicación, pero la AEC y otros expertos en radio-protección negaron sus conclusiones (Walker and Wellock 2010).

En 1970 La AEC publicó una propuesta que requería a sus licenciatarios que las emisiones radiactivas de las plantas nucleares fueran «*tan bajas como fuera practicable*»³⁰. Para los activistas

³⁰ *As low as practicable.*

medioambientales, que pretendían que las emisiones fueran «cero», este objetivo era muy bajo. Simultáneamente la AEC propuso unas guías numéricas que, en principio, no eran inflexibles, y que recomendaban que las plantas se diseñaran de tal forma que sus efluentes irradiaran menos del 5 por ciento de la radiación natural de fondo³¹, con el fin proporcionar un amplio margen de seguridad frente a los riesgos de radiación de las centrales nucleares, pero de forma que fuera un objetivo asumible por éstas. Sin embargo, también recibió muchas críticas por parte de los operadores de las centrales. En todo caso, el miedo a la irradiación de la población causado por la operación rutinaria de las centrales nucleares siguió aumentando, por lo que, en 1971, la AEC propuso a debate público que los límites de radiación para los efluentes de las centrales nucleares se redujeran en un factor 100 con el fin de apaciguar las críticas provenientes de la opinión pública³². Al final, la controversia existente acerca de la radiación proveniente de las centrales nucleares a principios de la década de 1970 condujo a dos desarrollos importantes: un nuevo estudio sobre los peligros de la radiación para la población general realizado por la Academia Nacional de Ciencias; y la publicación por la AEC de dichas guías (Walker 2000).

El estudio citado fue el BEIR³³, denominado así por *el Comité Asesor sobre los Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes*, panel de expertos que lo llevó a cabo, centrándose en los efectos medioambientales, de crecimiento y desarrollo, genéticos y somáticos sobre la población debido a su exposición a bajas dosis de radiación. El estudio reafirmaba las conclusiones del trabajo anterior de la Academia Nacional, señalando que las fuentes de mayor exposición a la radiación para el público era la radiación natural de fondo y las aplicaciones de diagnóstico médico. Éstas representaban aproximadamente el 90 por ciento de la «*dosis total de radiación artificial a la que estaba expuesta la población de los EE. UU.*», mientras que la debida a la energía nuclear contribuía en menos del uno por ciento, incluida la radiación de fondo. Además, instó a que la exposición del público a la radiación se mantuviera al mínimo sin sacrificar los beneficios de las aplicaciones médicas, la energía nuclear, etc. Por otro lado, aunque las consecuencias genéticas de la exposición a radiaciones bajas aún no podían identificarse con precisión, parecían ser menos dañinas de lo que indicaban estudios anteriores. Sin embargo, también señalaba que no había alternativa razonable a la práctica usada hasta ahora de la extrapolación lineal de los datos obtenidos a altas dosis. Asimismo, llegaba a unos resultados análogos al Informe Gofman-Tamplin, pero menos alarmistas. También recomendó que las normas fueran sujetas a un análisis coste-beneficio (Walker 2000).

³¹ Fuentes de radiaciones ionizantes como los rayos cósmicos, materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre no alterada, en el aire o incorporados a los alimentos, e incluso sustancias radiactivas que se encuentran en el interior del organismo humano (⁴⁰K, ¹⁴C, etc) (CSN 2012)

³² La NCRP, sin embargo, mantuvo sus límites para trabajadores expuestos y público en general (Walker 2000).

³³ Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, BEIR.

El informe BEIR puede ser considerado como un tratamiento razonado, equilibrado y sobrio de los peligros de radiación para la población. Sus conclusiones y recomendaciones se ajustaron en gran medida a las prácticas existentes y las regulaciones de la AEC y otras agencias gubernamentales, así como las recomendaciones de la NCRP y otros grupos de expertos aceptaron la hipótesis lineal, asumiendo que ningún nivel de exposición a la radiación era certificadamente segura, adoptando la receta «*tan baja como sea prácticamente posible*» (Walker 2000).

Mientras el informe BEIR se llevaba a cabo, la AEC celebró una serie de audiencias públicas sobre su propuesta de ajustar sus normas de radiación a través de unos «*objetivos de diseño*» propuestos para las emisiones de efluentes, de forma que proporcionaron pautas numéricas con las que cumplir el requisito de que las plantas nucleares mantuvieran sus emisiones tan bajas como fuera posible en la práctica. Propuso que en los alrededores de las instalaciones nucleares hubiera menos del 5 por ciento del promedio de radiación natural. Pero como esos límites eran flexibles, más de 60 organizaciones ecologistas protestaron, pues lo veían como una vía de escape para las empresas del sector. Éstas, por el contrario, protestaban por la inflexibilidad de la AEC. Como ejemplo, ponían el patrón que se estaba usando: el «Milkpathway» o «sendero de la leche»: las vacas que pastaban en los alrededores de las centrales podían consumir una cantidad determinada de yodo que podía llegar a los hogares a través de su leche. Los niveles alcanzados al otro lado de la valla de la central debían ser tales que esto no ocurriera. Sin embargo, Los dueños de las eléctricas consideraban que esto era una generalización excesiva, y sólo aplicable en determinados casos. En todo caso, los resultados de estas audiencias llevaron al desarrollo de las guías citadas anteriormente (Walker 2000)

En consonancia con la filosofía de «*tan bajo como sea práctico*», se trató de encontrar un equilibrio que considerara las capacidades tecnológicas del momento y los costes de los equipos, al tiempo que se brindaba una amplia protección al público. Aun así, siguió habiendo ciertas controversias, sobre todo cuando se llegó a pensar en la posibilidad de tomar un patrón económico de medida: 1000 \$ por persona y año como medida razonable de gasto. En cualquier caso, la NRC lo desestimó, pues daba la impresión de que se asignaba un valor monetario a la vida humana, y consideraba que no era necesario, pues ya las nuevas regulaciones iban a proteger aún más al público en general. Entretanto, cuatro consultores de Oak Ridge hicieron sus propias sugerencias de reducción, y, entre otras cosas, sugirieron que se cambiara la receta «*tan baja como sea prácticamente posible*» por una que había adoptado la ICRP recientemente: ALARA (Walker 2000)

Debido a esta preocupación despertada en la población y a algunos errores cometidos por la propia AEC, ésta se convirtió en una organización asediada por las protestas a comienzos de los 70. El conflicto de intereses existente debido a su doble función como agencia reguladora y promotora

del uso civil de la energía nuclear, y la preeminencia que había otorgado a sus funciones militares, dañó su credibilidad y socavaron la confianza que se tenía en ella. Por ello, sufrió una partición en dos agencias en 1974: El DOE, Department of Energy, focalizado en la promoción de la energía nuclear, y la NRC, Nuclear Regulatory Commission, dedicada a la seguridad nuclear y quien otorgaría las licencias de las instalaciones (Baumer 2015).

La AEC había tomado la decisión de hacer más restrictiva su reglamentación más por la presión de la opinión pública que por el resultado de evidencias científicas, pues aún no se sabía demasiado sobre los efectos de las dosis bajas de radiación. Por ello, fue en este contexto, intentando satisfacer ambas posturas, cuando se adoptó el nuevo (concepto) protocolo de protección radiológica, ALARA³⁴, «*tan bajo como como razonablemente sea posible*», asumido por la NRC en 1975, que se definió como:

«Hacer todos los esfuerzos razonables para mantener la exposición a la radiación tan por debajo de los límites de dosis como sea práctico y consistente con el propósito para el cual se realiza la actividad autorizada, teniendo en cuenta el estado de la tecnología, los costes económicos de las mejoras a llevar a cabo con relación al estado de la tecnología, los costes económicos de las mejoras en lo tocante a los beneficios para la salud pública y la seguridad, y otras consideraciones sociales y socioeconómicas, relativas a la utilización de la energía nuclear y los materiales autorizados en el interés público» (U.S. Code of Federal Regulations 2015).

Este protocolo se sumaba a las restricciones de dosis máximas permitidas ya fijadas por el regulador, por lo que el resultado de su aplicación fue que aquellos trabajadores expuestos de los que se recogían datos podían aportar una tendencia de resultados de dosis absorbida promedio decreciente con el tiempo, llegando a ser hasta 50 veces más bajas de los límites establecidos, y similares a los del público en general. De hecho, muchas empresas comenzaron a establecer protocolos tales que iniciaban investigaciones en cuanto un trabajador recibía una dosis mensual sensiblemente menor al límite de dosis permisible anual. Estos datos demostraron el éxito de la implantación de este protocolo, que fue adoptado internacionalmente. Pero también era cuestionado por aquellos que pensaban que era demasiado conservador e imponía costes innecesarios a la industria y a la sociedad en su conjunto. El concepto ALARA permanece en nuestros días, y la legislación norteamericana lo asume con los mismos términos que en 1975 (Baumer 2015).

La controversia sobre la energía nuclear como una de las principales fuentes de energía continuó creciendo durante la década de los 70, pero el foco se alejó de la protección radiológica hacia otros temas que iban surgiendo como consecuencia del uso cada vez mayor de la tecnología.

³⁴ *As Low As Reasonably Achievable.*

Sin embargo, el debate sobre la radiación, al igual que el debate de la lluvia radiactiva una década antes, dejó su huella en la actitud de la opinión pública estadounidense. Aunque no es posible medir el impacto de las acusaciones del informe Gofman-Tamplin, éstos recibieron mucha atención en los medios de comunicación, contribuyendo a la discusión. Asimismo, su informe se publicó casi al mismo tiempo que la preocupación del pueblo norteamericano por la protección del medio ambiente y la salud pública iba creciendo, especialmente a raíz de los reportajes alarmantes que surgían sobre derrames de petróleo, insecticidas, aditivos alimentarios y otro tipo de peligros. Es en los 60-70 también donde se empieza a poner foco en la protección de los pacientes debido a la generalización de las campañas de cribado de cáncer de mama a través de mamografías, continuando en los 80 con el aumento de dosis recibida con el nacimiento del TAC³⁵. Los accidentes de Harrisburg, Chernóbil y Fukushima acentuaron esta discusión.

8. Consideraciones finales:

Las radiaciones ionizantes nacieron en un momento de frenesí por todo lo tecnológico y son otro exponente más de aquellos que veían en la ciencia y la tecnología una especie de panacea que resolvería todos los males del mundo. Y, a pesar de los riesgos evidentes que suponían la sociedad tardó mucho tiempo en ser consciente de ellos, deslumbrada por sus ventajas. En este trabajo he nombrado 9 premios Nobel que obtuvieron su galardón gracias a ellas, pero hubo muchos más que de forma directa o indirecta se relacionaron con ellas. Esto da una idea del impacto que supusieron para la sociedad, no sólo en el ámbito científico sino en lo social y político.

Desde el comienzo los científicos conocieron el peligro que representaba la radiación, y fijaron las bases de la protección radiológica: distancia, tiempo y blindaje. Pero es cierto, que, como en otros ámbitos de la ciencia, se avanzó a ciegas, actuando reactivamente ante la aparición de efectos hasta entonces desconocidos. Las primeras acciones de protección se centraron en los trabajadores, dando por hecho que el beneficio obtenido por los pacientes superaba con creces sus riesgos. Esta aproximación ha llegado prácticamente hasta nuestros días. Así, pasó de ser una cuestión de salud laboral a, finalmente, considerarse un tema de salud pública. La protección radiológica es pionera también en las metodologías utilizadas en la prevención de riesgos, laborales o no, como las redundancias, los análisis de fallos y efectos, coste/beneficio o ALARA.

La evolución a la hora de acometer el problema de los efectos biológicos, pasando del concepto de umbral de dosis al de dosis permisible, da idea también del tránsito de lo determinista a lo probabilístico, como metáfora de la irrupción de la incertidumbre en otros ámbitos de la

³⁵ Sirva como ejemplo el registro de dosis recibida por los trabajadores, implantado desde los años 40, Sin embargo, la legislación europea no incorpora este requisito para los pacientes, salvo para procedimientos intervencionistas, hasta el año 2013 con la directiva Euratom

ciencia, no sólo por la interacción física-biología que esta disciplina conlleva, sino por el tránsito que realizó la propia física con la aparición de la cuántica.

La protección radiológica también es pionera en el uso de ensayos clínicos y en conceptos como el consentimiento informado y la necesidad de incorporar a comités éticos para su ejecución en los años 40. El uso de seres humanos para los ensayos biológicos con plutonio sin su conocimiento, su idoneidad, y el «todo por mor de la ciencia» da muestra de las implicaciones entre lo científico, lo ético, lo político-militar y lo social y el debate que se abrió a su alrededor.

Pero, sin duda, la explosión de las bombas atómicas en el Japón, el miedo a la lluvia radiactiva y el dilema del doble uso suponen el trasvase de la discusión relativa a la protección frente a las radiaciones ionizantes del ámbito científico al político y social, otorgando «*al riesgo nuclear y/o radiológico su carácter único*», debido (...) «*a la compleja interdependencia entre ciencia, tecnología, política y sociedad que, desde sus orígenes, subyace a la tecnociencia nuclear como actividad humana, incluyendo su dimensión ética y moral*». Demostrando que La tecnociencia nuclear es un artefacto inherentemente político, hasta conformar redes sociotécnicas militares. (Calcines s.f.). La fascinación por lo nuclear, *Hulk* y la *Hormiga Atómica*, van a dejar paso a un rastro de miedo e incertidumbre que se plasmará años después en la cuestión de los residuos radiactivos y el shock por la incapacidad de reacción del ser humanos ante los accidentes de Harrisburg, Chernóbil y Fukushima (que quedan fuera de este estudio). Se va a producir una *socialización* del riesgo, que habrá abandonado el ámbito científico, laboral y sanitario. Así, queda aún abierto un debate abordado con la suficiente tranquilidad y madurez, alejado del populismo y los intereses creados: la idoneidad o no del uso de la energía nuclear por el riesgo debido a sus efectos dañinos. Un debate público y libre, donde aquellos que hagan la evaluación final de las distintas opiniones, incluidas las rivales, puedan hacerlo sobre la base del apoyo probatorio acumulado por cada una de ellas (Kitcher 2011).

9. Bibliografía

Atomic Heritage Foundation. 2017. «History: Health Physics & Nuclear Medicine During the Manhattan Project.» *Atomic Heritage Foundation Web site*. 29 de junio. Último acceso: 5 de abril de 2019. <https://www.atomicheritage.org/>.

Baumer, Michael. 2015. «ALARA: The History and Science of Radiation Safety.» *Coursework for PH241*. Editado por Prof. Robert B. Laughlin. Stanford University. <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/baumer2/>.

Beck, Ulrich. 1998. *La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*. Traducido por Jorge Navarro, Daniel Jiménez y M^o Rosa Borrás. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica, S.A.

- BIMP. 2019. *Worldwide metrology - BIPM liaison work - ICRU*. Último acceso: 1 de junio de 2019. <https://www.bipm.org/>.
- BOE. 1964. «Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear. texto Consolidado.» *Boletín Oficial del Estado*.
- Brodsky, Allen, y Ronald L. Kathren. 1989. «Historical Development of Radiation Safety Practices in Radiology.» *RadloGraphics* 9: 1267-1275.
- Calcines, Argel. s.f. «El carácter único del riesgo nuclear y/o radiológico.» *Tesis Doctoral (En preparación)* (Universidad de Valladolid).
- Clarke, R.H., y J.Valentin. 2009. «The History of ICRP and the Evolution of its Policies: Invited by the Commission in October 2008.» *Annals of the ICRP* (Elsevier Ltd.) 39 (1): 75-110.
- Collins Cobuild. 1988. *Essential English Dictionary*. Londres: Collins Publishers.
- Cooper, Dan, y Brian Grinder. 2008. «The Playboy and the Radium Girls (Part I: The Playboy).» *Financial History* (The EWU Finance Server) 12-13. <https://www.centreforfinancialhistory.org/>.
- CSN. 2019. *Monografías: Consejo de Seguridad Nuclear*. Último acceso: 8 de junio de 2019. <https://www.csn.es/>.
- . 2012. «Protección Radiológica: CSN.» *Página Web del CSN*. Último acceso: 18 de abril de 2019. <https://www.csn.es/documents/10182/914805/>.
- Edison Tech Center. 2010. *Engineering Hall of Fame - Elihu Thomson*. Último acceso: 26 de abril de 2019. <https://edisontechcenter.org/thomson.html>.
- Escobar, R. Modesto. 2002. «Ulrich Bech. La sociedad del riesgo global.» *Reis* 101 (03): 279-303.
- Federal Trade Commission. s.f. *About the FTC*. Último acceso: 03 de mayo de 2019. <https://www.ftc.gov/es>.
- Ferriolsa, A. Pérez, J. Aguilera, P. Aguilera, D. de Argila, M.A. Barnadas, X. de Cabo, J.M. Carrascosa, y otros. 2014. «Determinación de la dosis eritemática mínima y reacciones anómalas a radiación ultravioleta A según fototipo.» *Actas Dermo-Sifiliográficas* (Academia Española de Dermatología y Venereología (AEDV)) 105 (8): 729-808. doi:0001-7310.
- Foro Nuclear. 2019. *Energía Nuclear - Glosario: Forno Nuclear*. Último acceso: 6 de junio de 2019. <https://www.foronuclear.org/>.
- ICRU. 2019. *About ICRU: History*. Último acceso: 31 de junio de 2019. <https://www.icru.org/>.
- INFOCITEC. 2010. «Curso de Capacitación para Supervisores de Instalaciones Radiactivas.»

- Inkret, William C., Charles B. Meinhold, y John C. Taschner. 1995. «Radiation Protection and the Human Radiation Experiments: Radium, the Benchmark for Alpha Emitters.» *Los Alamos Science* (Los Alamos National Laboratory) (23): 224-233. <https://fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/number23.htm>.
- Inkret, William C., Charles B. Meinhold, y John C. Taschner. 1995. «Radiation Protection and the Human Radiation Experiments: A Brief History of Radiation Protection Standards.» *Los Alamos Science* (Los Alamos National Laboratory) 116-124. <https://fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/number23.htm>.
- Jones, Cynthia Gillian. 2005. «A review of the history of US radiation protection regulations, recommendations, and standards.» *HEALTH PHYSICS - The Radiation Safety Journal* (US NRC (Nuclear Regulatory Commission) 88 (2): 105-124. <https://www.nrc.gov/docs/ML0504/ML050400427.pdf>.
- Kardamakis, Dimitrios, Evi Gustavson-Kadaka, Ekaterini Spiliopoulou, y Sten Nilsson. 2010. «The history of Radiumhemmet in Stockholm in the period 1895-1950. The transformation of an outpatient clinic to an academic department.» *Vesalius: acta internationales historiae medicinae* 16 (2): 95-99.
- Kershaw, Ian. 2002. *Hitler*. Traducido por José Manuel Álvarez Flórez. Barcelona: Ediciones Península, S.A.
- Kevles, Bettyann Holtzmann. 1997. *Naked to the bone: medical imaging in the twentieth century*. New Brunswick: Rutgers University Press.
- Khare, Pooja, Preeti Nair, Amit Khare, Vandana Singh, y Rhiti Chatterjee. 2014. «The Road To Radiation Protection: A Rocky Path.» *Journal of Clinical & Diagnostic Research* 8 (12): ZE01–ZE04. doi:10.7860/JCDR/2014/5832.5223.
- Kitcher, Philip. 2011. *Science in a Democratic Society*. New York: Prometheus Books.
- Menéndez-Navarro, Alfredo, y Luis Sánchez Vázquez. 2013. «La protección radiológica en la industria nuclear española durante el franquismo, 1939-1975.» *História, Ciências, Saúde – Manguinhos* 20 (3): 797 - 812.
- Moss, William, y Roger Eckhardt. 1995. «The Human Plutonium Injection Experiments.» *Los Alamos Science: Radiation Protection and the Human Radiation Experiments* (Los Alamos National Laboratory) (23): 176-223.
- Nobel Media AB. 2019. *The Nobel Prize in physics*. Nobel Media AB. Último acceso: 06 de abril de 2019. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics>.
- OIT. 2019. *About us: OIT*. Último acceso: 3 de junio de 2019. <https://www.ilo.org/global/>.

- Pacific Northwest National Laboratory. s.f. *History of radiation timeline*. John Burroughs School. Último acceso: 19 de marzo de 2019. science.jburroughs.org.
- Palomo López, Patricia, y Cristina Redondo Mena. 2012. «Legislación vigente y Ética en Investigación Clínica.» *Revista Internacional de Ciencias Podológicas* 6 (2): 81-93.
- Pasveer, Bernike. 1989. «Knowledge of shadows: the introduction of X-ray images in medicine.» *Sociology of Health & Illness* 11 (4): 360-381.
- Röhrlich, Elisabeth. 2013. «Los Átomos para la Paz de Eisenhower: El discurso que inspiró la creación del OIEA.» *Boletín del OIEA (Organización Internacional de la Energía Atómica)* 54 (4): 3-4.
- Smith, H. 1988. «The International Commission on Radiological Protection: Historical overview.» *IAEA Bulletin* 30 (3): 42-44. <https://www.iaea.org/sites/default/files/30302094244.pdf>.
- Standards For Protection Against Radiation*. 2015. 10 CFR 20.1002 (US NRC). <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-text.html#part020-1002>.
- Vanchieri, Cori. 1990. «Radiation Therapy Pursuit Leads to Unearthing of “Hot Bones”.» *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 82 (21): 1667. doi:<https://doi.org/10.1093/jnci/82.21.1667>.
- Walker, J. Samuel. 2000. *Permissible Dose: A History of Radiation Protection in the Twentieth Century*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.
- Walker, J. Samuel, and Thomas Raymond Wellock. 2010. *A short history of nuclear regulation, 1946-2009*. US Nuclear Regulatory Commission, 2010.