

LOS EFECTOS DE LAS BAJAS DOSIS DE RADIACIÓN. UNA POLEMICA CIENTIFICA APASIONANTE Y DE GRAN TRANSCENDENCIA PARA LA INDUSTRIA NUCLEAR

P. COLL (*)

ANTECEDENTES

Desde una perspectiva científica, académica y operacional, el análisis de la evolución de la Protección Radiológica (P.R.) durante las últimas tres décadas propicia una serie de reflexiones y consideraciones que, a nuestro modesto juicio, son de gran interés.

El conjunto de conocimientos y aplicaciones prácticas relacionadas con el uso de las Radiaciones Ionizantes (R.I.) abarcan, [1], dos vertientes; la Radiobiología, que es una rama científica cultivada fundamentalmente por biólogos, que estudia los efectos biológicos de las R.I., y la Protección Radiológica, que es una rama de la ingeniería, cultivada por ingenieros y físicos, que se encarga del diseño, construcción y operación de los medios empleados para lograr una protección óptima de las personas frente al uso de las R.I. En cuanto a la Dosimetría, si bien no sería descabellado considerarla como una especialidad científica con entidad propia, nos inclinamos a incluirla en un capítulo de la Física de las R.I.

Si bien la P.R. es una rama de la tecnología bien desarrollada, no es menos cierto que se apoya en una especialidad científica, la Radiobiología, la cual, dada la gran complejidad de los fenómenos que trata, aún no ha resuelto el problema fundamental objeto a su estudio. Ello es causa de la continuada y progresiva evolución de las estimaciones de los riesgos y, en consecuencia, de los límites de dosis. Incluso las magnitudes y unidades utilizadas para medir los efectos

de las radiaciones están cambiando y perfeccionándose frecuentemente, pudiéndose afirmar que es altamente probable que las actuales perduren por poco tiempo, [2], siendo sustituidas por otras de carácter aleatorio. Por otra parte, el establecimiento de límites de dosis en las normativas y legislaciones de los países implica la existencia de criterios de carácter social y político, los cuales a veces están alejados de las consideraciones estrictamente científicas.

El autor de este artículo debe, ante todo, confesar su condición de ingeniero con unos modestos conocimientos de P.R. y de inexperto en el campo de la Radiobiología. En nuestra labor de profesor de P.R., desde el curso 1969-70, hemos estado atentos y vigilantes ante los cambios antes mencionados. El año 1977 fue importante, al aparecer la Publicación N° 26 de la I.C.R.P., [3], la cual intentó dar un cuerpo doctrinal consistente a la P.R.. Además del establecimiento de los principios fundamentales, se consolidó un sistema de limitación de dosis, basado en los riesgos de los, a partir de entonces, denominados *efectos estocásticos* y en la conocida hipótesis de extrapolación *lineal sin umbral* (L.S.U.) de los efectos conocidos a altas dosis y altas tasas de dosis a los supuestos a bajas dosis y bajas tasas de dosis. Desde entonces hasta la actualidad, hemos enseñado a nuestros alumnos que esta hipótesis era la aceptada por la gran mayoría de miembros de la comunidad científica, expertos en Radiobiología.

Pero, desde hace pocos años, han ido

proliferando, de forma cada vez mas frecuente e insistente, referencias de publicaciones de grupos de investigadores, en las que se cuestiona y, en algunos casos, no se acepta la hipótesis L.S.U. Finalmente, las ponencias presentadas en la Conferencia, celebrada recientemente (noviembre 1997) en Sevilla, bajo el título *Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control*, [4], patrocinada por el I.A.E.A. y la W.H.O., en cooperación con el U.N.S.C.E.A.R., creemos permiten afirmar que estamos ante una formidable polémica científica, en la que crecen de forma muy patente los grupos de investigadores que no son ya partidarios de la hipótesis L.S.U., afirmando unos que no está demostrada esta relación lineal y otros que las bajas dosis pueden ser incluso beneficiosas. En el presente artículo intentaremos analizar los antecedentes, estado actual y posibles consecuencias de esta interesante polémica, al objeto de que pueda servir de ayuda a los profesionales del sector nuclear, no especialistas en el tema, para formarse una opinión propia.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. LA RELACION DOSIS-EFECTO Y LAS DIFERENTES HIPOTESIS

El conocimiento de la naturaleza y las características de la relación entre las dosis de R.I. recibidas y los efectos dañinos producidos en el organismo humano es el problema fundamental de la Radiobiología. Diversas hipótesis acerca de la forma de esta relación se incluyeron en

(*) Conferencia pronunciada en la Sesión, organizada por la Sociedad Nuclear Española y la Asociación de Ingenieros Industriales de Catalunya, celebrada el 21 de mayo de 1998, en Barcelona, en la sede de esta Asociación.

la Publicación N° 26 de la I.C.R.P., [3], de 1977, las cuales se consolidaron en la Publicación N° 60, [2], de 1990. En esta última se presenta el conocido gráfico que reproducimos en la Figura 1, el cual, a su vez, se tomó de un informe muy completo del National Council on Radiation Protection and Measurements (N.C.R.P.), de los E.U.A., [5]. Para dosis altas y altas tasas de dosis, producidas por radiaciones de baja Transferencia Lineal de Energía (T.L.E.), se postula una relación dosis - efecto de forma lineal - cuadrática (curva A), es decir,

$$E = \alpha D + \beta D^2 \quad (1)$$

siendo E los efectos producidos, adicionales a las dosis naturales, medidos como la fracción de personas con daños graves de una población afectada, tras un periodo de latencia

Este tipo de relación tiene una explicación si se adopta el denominado *mecanismo de acción dual de la radiación*, para los efectos deterministas a altas dosis, [2,6] y únicamente se ha podido comprobar en grupos humanos sometidos a altas dosis y altas tasas de dosis (superiores a 0,1 Gy).

En este sentido, cabe mencionar los estudios epidemiológicos de los supervivientes de las poblaciones afectadas por las bombas de Hiroshima y Nagasaki del Japón, en 1945, los cuales constituyen la mas fiable cohorte para estudiar los efectos de las R.I. [2,7]. No cabe duda que los estudios de los efectos del accidente de la Central Nuclear de

Chernobyl-4, en la antigua Unión Soviética, que se están llevando a cabo con cohortes significativas, proporcionarán también una valiosa información para resolver el problema de las incertidumbres asociadas a las dosis recibidas y al incremento de riesgo. A Alonso, [8], ha tratado este tema en detalle, apuntando claramente las dificultades asociadas a este tipo de estudios. Asimismo, conviene mencionar que, en pocos años, se dispondrá de resultados de varios estudios, actualmente en curso, realizados sobre unos 600.000 trabajadores de la industria nuclear de 14 países, por la International Agency for Research on Cancer y sobre grupos de población afectada en accidentes ocurridos en la antigua Unión Soviética (complejo de Chelyabinsk, etc).

La escuela científica responsable de este tipo de relación dosis - efecto *supone* que, a bajas dosis y bajas tasas de dosis, la respuesta es del tipo lineal por el comportamiento de la relación lineal - cuadrática cerca del origen de coordenadas (curva D, de pendiente α_1).

Si se realiza un ajuste lineal de los datos obtenidos a dosis altas y altas tasas de dosis se obtiene una recta de pendiente α_L mayor que α_1 . Esta aproximación lineal y la curva lineal - cuadrática se cortan únicamente en un punto en el que se cumple:

$$\alpha_L D = \alpha_1 D + \beta D^2 \quad (2)$$

La recta que se ajustará a los datos que

"supuestamente" podrán obtenerse a bajas dosis, es decir, los reales, tendrá una pendiente α_{EX} (curva C) intermedia entre α_L y α_1 , según sean los valores de las dosis y tasas de dosis. La I.C.R.P., siguiendo las pautas de la N.C.R.P. y del U.N.S.C.E.A.R., [9], ha denominado *Factor de Eficacia de Dosis y Tasas de Dosis* (F.E.D.T.D.) a la relación α_L/α_{EX} conjeturando valores comprendidos entre 2 y 10, según el tipo de daño, a partir de datos obtenidos en experiencias con animales. Asimismo, en [2], se afirma que "en el campo estadístico no puede descartarse con certeza la existencia de un umbral de dosis para algunos tipos de tumores individuales, ni en seres humanos ni tampoco en sistemas experimentales. Sin embargo, si los umbrales existen, sus valores deben ser inferiores a aproximadamente 0,2 Gy para la mayoría de los cánceres humanos y tal vez sean mucho menores". Obsérvese que este valor de dosis es cuatro veces el actual límite anual para las personas profesionalmente expuestas y diez veces los límites futuros recomendados por la Publicación N° 60 de la ICRP, [2]. Finalmente, la I.C.R.P. recomendó, en esta publicación, la hipótesis L.S.U., a bajas dosis y bajas tasas de dosis, con un valor (FEDTD) = 2, es decir una pendiente de la relación lineal a bajas dosis mitad de la correspondiente al ajuste lineal a altas dosis. También conviene destacar que, en estas últimas recomendaciones, la I.C.R.P. adoptó un concepto del efecto o daño, que en radioprotección suele denominarse *detrimiento*, de tipo multiaTRIBUTO o globalizado, el cual incluye cuatro componentes: la probabilidad de un cáncer atribuible mortal, la probabilidad ponderada de un cáncer atribuible no mortal, la probabilidad ponderada de efectos hereditarios graves y el tiempo relativo de vida perdido.

Los valores de la pendiente α_{EX} , en Sv^{-1} , correspondientes a la hipótesis L.S.U., han ido variando con el tiempo. En 1975 la N.R.C. de U.S.A. recomendó, para los estudios de Seguridad Nuclear, [10], un valor de $1,2 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$, a corregir con diversos factores comprendidos entre 0 y 1 según las tasas de dosis (influencia del factor tiempo para suministrar una dosis determinada). En la Publicación N° 26 de la ICRP, [3], de 1977, se recomendó el valor de $1,65 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$ y en la Publicación N° 60, [2], $7,3 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$, siendo, en este último caso, un riesgo para la población en general basado en el concepto del *detrimiento* global antes mencionado.

Es claro que, en el rango de las bajas dosis con valores iguales o infe-

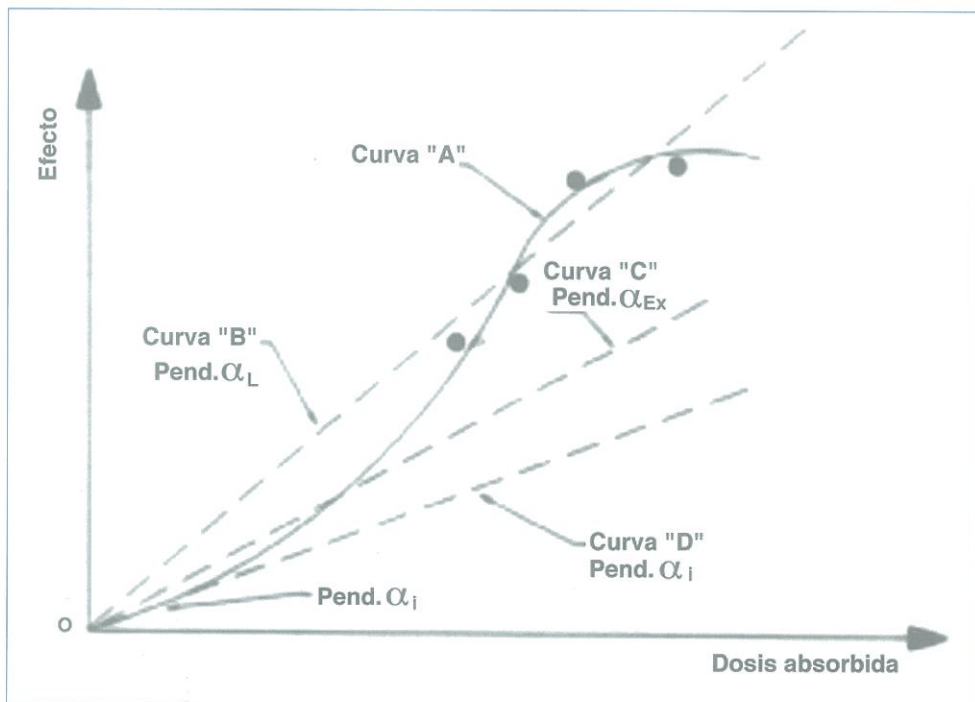


Figura 1. La relación dosis-efecto. Tomado de [2].

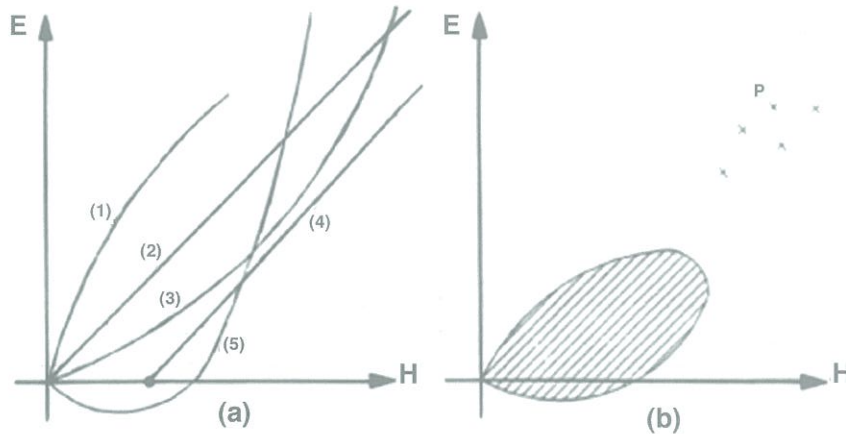


FIGURA 2

Figura II. a) Diversos tipos de solución para la relación Dosis (H) - Efecto (E) a bajas dosis; 1) = relación supralineal, 2) = relación lineal sin umbral, 3) = relación sublineal, 4) = relación lineal con umbral, 5) = relación con "hormesis" b) Representación esquemática de la región del plano (H.E.) a bajas dosis, que podría englobar (zona rayada) los puntos solución del problema, dependiendo de múltiples factores y de características de los individuos. Los puntos P exteriores corresponderían a valores observados experimentalmente. Las escalas son arbitrarias.

riores a los límites anuales actuales del personal profesionalmente expuesto, la hipótesis L.S.U. no ha podido ser confirmada experimentalmente y son cada vez mas abundantes los grupos de investigadores en Radiobiología que la consideran una hipótesis que se sitúa fuera del ámbito estrictamente científico, pareciéndose mas a un paradigma o a una conjetura. Afirman estos últimos que es una hipótesis que nunca podrá ser probada, ya que estadísticamente no podrán deslindarse los efectos de las bajas dosis artificiales de las recibidas por las fuentes naturales de radiación. En los últimos años, según se analiza en los apartados siguientes, cada vez hay mas partidarios de la posible existencia de un umbral, así como de la existencia de la *hormesis*, es decir, efectos beneficiosos de las bajas dosis, al activar las radiaciones los mecanismos de respuesta del sistema inmunitario del organismo.

Por tanto, el problema fundamental de la Radiobiología está en la actualidad por resolver, existiendo varias escuelas científicas que intuyen diversos tipos de solución, según se representa en la Figura II, en la que, en (a) se representan diversas posibles soluciones de la relación Dosis Equivalente - Efecto en forma de curvas de ajuste de los valores medios.

La utilización de la magnitud dosis equivalente permite incluir en una misma curva los efectos de las radiaciones de baja TLE y de alta TLE (neutrones, partículas cargadas pesadas, etc) ya que para estas últimas se tiene en cuenta el factor de ponderación de la radiación, [2], antes denominado factor de calidad, [3].

En (b) se dibuja esquemáticamente una envolvente de la región donde puede situarse la solución del problema, a bajas dosis. También debe tenerse en cuenta que las ordenadas de los puntos del plano (H.E.) de dicha solución serán los puntos medios de los segmentos representativos de la fluctuación estadística asociada a cada posible valor obtenido experimentalmente en una muestra de la población.

Desde el punto de vista estrictamente estadístico, aún aceptando que en una población afectada pudiéramos deslindar los daños de las dosis de radiación artificiales de las debidas a las naturales y a otros agentes no radiológicos potencialmente dañinos, un sencillo cálculo nos orienta acerca de las dificultades del problema fundamental. Supóngase una hipotética población afectada de N personas, habiendo recibido, cada una, una dosis equivalente media *per capita*, a todo el cuerpo, $\bar{H}$ y con una incidencia natural de cáncer mortal f, en tanto por uno. El número de personas afectadas por esta incidencia natural, N_a , tendrá una fluctuación estadística asociada alrededor de su valor medio $\bar{N}_a$. Aceptando que N_a sea una variable aleatoria que sigue la ley de densidad de probabilidad de Poisson, tendente a una ley normal, su desviación tipo será $\sigma = \sqrt{\bar{N}_a}$. El tamaño mínimo N que deberá tener la muestra para que los casos de daños adicionales esperados sean estadísticamente significativos, con el criterio del nivel de confianza de $\pm 3\sigma$ y suponiendo válida la extrapolación lineal con una pendiente o riesgo R, se obtendrá según;

$$N \cdot \bar{H} \cdot R \geq 3\sigma = 3\sqrt{\bar{N}_a} = 3\sqrt{f \cdot N} \quad (3)$$

esto es,

$$N \geq \frac{9f}{R^2 \bar{H}^2} \quad (4)$$

En el caso en que cada persona recibiera una dosis media de $\bar{H}=50$ mSv, con unos valores de $f = 0,2$ y $R = 7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, la cohorte a considerar debería constar, como mínimo, de $N = 147.000$ personas.

LA CREDIBILIDAD DE LA HIPÓTESIS L.S.U. ANTES DEL CONGRESO DE SEVILLA DE 1997

La hipótesis de la extrapolación lineal sin umbral de la relación dosis - efecto, a bajas dosis y bajas tasas de dosis, comenzó a fraguarse a finales de la década 1940-50, siendo varias las causas; su simplicidad matemática, la transposición de los resultados experimentales de los efectos genéticos lineales sin umbral, observados en la irradiación de la mosca de la fruta (*drosophila melanogaster*), realizada por H.J. Muller en 1927, a los efectos somáticos, etc. Bien es cierto que, al principio, esta hipótesis se planteaba como un *límite máximo* para el cálculo de riesgos, puesto que en la región de bajas dosis de radiación no se habrían observado efectos dañinos. En principio, esta suposición, [11], no negaba la posible existencia de un umbral de dosis por debajo del cual no existieran los efectos dañinos.

La controversia científica sobre la validez y aplicabilidad de la hipótesis L.S.U. se acentuó en las famosas audiencias (*hearings*), realizadas, en el periodo 1957-59, en el "Joint Committee on Atomic Energy" del congreso de los E.U.A., acerca de los posibles efectos nocivos a la población derivados de las explosiones nucleares realizadas en la atmósfera en aquellos años. En estas audiencias la mayoría de expertos invitados no apostó por la hipótesis L.S.U.. El citado Comité publicó sus conclusiones indicando que no había evidencia experimental de la existencia de efectos somáticos a bajas dosis, aunque calculó las estimaciones del daño aplicando la proporcionalidad dosis-efecto. Entre los científicos mas relevantes asistentes cabe mencionar a K.Z. Morgan, quien postuló que únicamente algunos tipos de efectos no tenían umbral (las mutaciones genéticas, la leucemia y el acortamiento de vida), y a E.B. Lewis, un profesor de biología, que defendió acérrimamente la hipótesis L.S.U. como base del sistema de limitaciones de dosis y al que puede considerarse como creador del *principio ALARA* (As Low as Reasonably Achievable), [11], tan utilizado en la

actualidad en la práctica de la radioprotección.

El U.N.S.C.E.A.R., desde su primer informe en 1958, afirmó que no se podrían evaluar con precisión algunos de los efectos de las bajas dosis, pero también aplicó el modelo L.S.U. en algunas estimaciones del riesgo. Este organismo, en sus informes posteriores, siguió utilizando este modelo, dando una justificación parcial de este proceder por el hecho de su simplicidad matemática y su conservadurismo inherente.

El Comité B.E.I.R. (Biological Effects on the Ionizing Radiations) de los E.U.A., en su primer informe de 1972, [12], también utilizó la hipótesis L.S.U. a bajas dosis y bajas tasas de dosis y, en este mismo año, la Comisión de Energía Atómica (A.E.C.) de los E.U.A. incorporó el concepto de ALARA en la regulación de este país. Es claro que este principio lleva implícita la aceptación de aquella hipótesis. En 1977 apareció la importante Publicación N° 26, [3], de la ICRP, en la que se recomendó un nuevo sistema de limitación de dosis basado en los tres principios básicos: *la justificación, la optimización y la limitación de las dosis individuales*. En esta publicación, tanto la forma de evaluar los riesgos como la metodología propuesta para hallar las soluciones de los problemas de P.R. aplicando el principio de optimización, se basaban en la aceptación de la hipótesis L.S.U.. La mayoría de los países adoptaron estas recomendaciones, las cuales tuvieron, tienen y tendrán una gran repercusión económica para la industria nuclear, aún sin haber especificado, en muchos casos, valores concretos para el parámetro a (valor monetario de la unidad de dosis colectiva). La repercusión se produce porque muchas decisiones respecto al nivel de seguridad y radioprotección exigibles a una instalación se realizan aplicando el "*principio de optimización*", tanto en las etapas de proyecto y construcción como en las de explotación. En este último caso, no conviene olvidar que los modernos métodos de análisis de rentabilidad de inversiones relacionadas con la Seguridad Nuclear y la P.R., en centrales nucleares en periodo de explotación, basados en los resultados de los *Análisis Probabilísticos de Seguridad* (APS), [13], utilizan con profusión el parámetro a , el cual sólo tiene sentido bajo la hipótesis L.S.U..

La Publicación N° 60 de la I.C.R.P., [2], también se apoya en el modelo L.S.U., usando un valor (FEDTD) = 2 para la pendiente de la relación lineal a bajas dosis y bajas tasas de dosis (valores inferiores a 200 mGy y 100 mGy/h respectivamente), lo que significa considerar a esta pendiente como la mitad de la recta correspondiente a los efectos a dosis altas.

El informe del Comité B.E.I.R.-III, de

1979, también adoptó la relación lineal o lineal-cuadrática, aunque indicó claramente la imposibilidad de determinar posibles efectos dañinos producibles por dosis del orden de 1 mGy/a. El informe del Comité BEIR-V, de 1991, propuso la relación sin umbral, modificada según las tasas de dosis.

Con estos precedentes, la hipótesis L.S.U. se convirtió casi en un paradigma, en el sentido que da el diccionario a este vocablo, como algo ejemplar o un ideal, [11]. Su aceptación y desde luego su aplicabilidad en la práctica ha estado, sin duda, influenciada por los poderes legislativos de los países, los organismos reguladores y el público en general. A extramuros del debate científico, para la opinión pública y sus formadores, la aceptación de esta hipótesis han sido muy general. Ha sido lo que en estos últimos años calificaríamos como una hipótesis *políticamente correcta*.

No obstante, lo que quizá no ha percibido claramente la opinión pública y, a lo mejor, tampoco los legisladores, ni el denominado "establishment" de la P.R., es el enorme coste, en muchos casos injustificado, que la hipótesis L.S.U. ha significado y todavía significará en el futuro, lastrando el uso beneficioso de las R.I. con unos costes muy altos para reducir unos posibles riesgos, cuya existencia, a bajas dosis, posiblemente nunca podrá demostrarse y que, aplicados a la prevención de otro tipo de riesgos mas elevados, hubieran significado un mayor beneficio para la población.

Pero esta historia no siempre se desarrolló en un único sentido. En 1980, en la reunión de apertura del Congreso de la I.R.P.A. en Jerusalén, [14], nada menos que el presidente emérito del N.C.R.P. (National Council of Radiation Protection) de los E.U.A., el prestigioso científico Lauriston Taylor, un superviviente de la época en que se gestó la P.R., a principios de siglo, calificó a la hipótesis L.S.U. como *la utilización profundamente inmoral de nuestra herencia científica*.

En la década 1980-90 aparecieron diversos informes acerca de los probables efectos beneficiosos de las bajas dosis por estimulación del sistema inmunológico. Se trata de la *hormesis*, concepto similar a la homeopatía en el sentido que altas dosis de un agente pueden ser dañinas, pero bajas dosis pueden ser estimulantes al adaptar el sistema inmunológico para la producción de efectos beneficiosos. En 1982, el profesor T.D. Luckey, en un artículo en *Health Physics*, [15], apoyó la hormesis por radiación con ni mas ni menos que 200 referencias solventes y, en 1984, G. Olivetti et al. publican un artículo en *Science*, titulado *Adaptive Response of Human Lymphocytes to Low Concentration of*

Radio-active Thymidine, [16], que desde entonces, ha sido extensamente citado por los científicos contrarios a la hipótesis L.S.U.. Como muestra de que estas escuelas científicas están en auge, en 1985, se celebra en Oakland, California, un simposio titulado *International Symposium on Radiation Hormesis*, dedicado especialmente a la hormesis, y en 1992, en Kyoto (Japón), otro bajo el título *International Conference on Low Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms*.

Asimismo, el U.N.S.C.E.A.R., en su publicación de 1994, [17], asigna un papel importante a la hormesis que se explica en términos de un mecanismo de respuesta *adaptativa* de las células a los bajos niveles de radiación. Z. Jaworowski, presidente del U.N.S.C.E.A.R., en una publicación de 1995, reseñada en [14], afirma; *El principio L.S.U. pertenece al ámbito de la administración y no es un principio científico y, en este mismo año, J. Muckerheide, en Nuclear News*, [18], concluye; *Los actuales conocimientos científicos sobre los efectos a la salud de las dosis bajas y moderadas de R.I. contradicen el pretendido modelo L.S.U. de la relación dosis-respuesta. El uso del modelo lineal, como base para las regulaciones y legislaciones, ha significado unos costes públicos muy elevados con un beneficio despreciable o nulo para la sociedad y una pérdida potencial de las contribuciones de las ciencias y técnicas nucleares a la humanidad*.

Conviene también reseñar los trabajos de B.L. Cohen, quien ha realizado interesantes estudios epidemiológicos al analizar las relaciones entre las concentraciones de radón y el cáncer de pulmón, [19], demostrando, a su criterio, no sólo que no se puede aplicar la hipótesis L.S.U., sino que los resultados sugieren fuertemente la existencia de hormesis.

En los últimos cinco años han sido las mas prestigiosas revistas científicas en el campo de la P.R., las que en sus editoriales, han planteado crudamente esta controversia, casi podríamos decir tocando a rebato, para concienciar a sus lectores de la importancia creciente de las ideas y razones de los no partidarios de la hipótesis L.S.U.. En 1994, P.H. Abelson, [20], en una editorial de *Science*, concluye con la siguiente posición; *La forma corriente de extrapolar los efectos de altas dosis a bajas dosis es errónea, tanto para los agentes químicos como para la radiación. Existen niveles seguros de exposición. El público ha sido innecesariamente alarmado y engañado y se han despilfarrado cientos de millardos de dólares. Debería darse una alta prioridad a un rápido y bien pensado examen de los fenómenos que ocurren con las bajas exposiciones*.

En 1995, la Academia de Ciencias de Francia, mientras se estaban debatiendo a nivel internacional las nuevas recomendaciones de la I.C.R.P., [2], publicó un interesante informe, [21], en el que señalaba que las experiencias realizadas con animales han demostrado la existencia práctica de umbrales de dosis, por debajo de los cuales el riesgo es despreciable o nulo. En este mismo informe se defiende el límite anual de dosis para los trabajadores profesionalmente expuestos de 50 mSv/a y de 5 mSv/a para los miembros del público, remarcando que las dosis recibidas por las fuentes naturales de radiación en Francia oscilan entre 1,5 y 6 mSv/a. El lector debe conocer que esta propuesta no fue recogida por la legislación de la Unión Europea, [22], que ha adoptado las recomendaciones de la I.C.R.P., con unos límites de 20 mSv/a (en medida de 5 años) y 1 mSv/a para el personal profesionalmente expuesto y el público respectivamente. Desconocemos en detalle las opiniones de personas u organismos científicos solventes de los otros países de la U.E. en este debate. Tampoco sabemos si, en España, en la gestación de la nueva Directiva Comunitaria, se consultó a los verdaderos expertos en Radiobiología de manera suficientemente extensa y si nuestras instituciones de carácter similar a la Academia de Ciencias de Francia dieron su opinión al respecto. No cabe duda que en muchos países existe escasa tradición en pedir la opinión de los estamentos científicos cuando hay que preparar leyes sobre aspectos controvertidos en el campo de la ciencia y la tecnología.

En la revista *New Scientist*, en 1995, [23], tres prestigiosos radiobiólogos franceses, especifican claramente que por debajo de 200 mSv nadie ha detectado inducción de cáncer en humanos y, en este mismo año, la Health Physics Society (HPS) de los E.U.A., al indicar su postura en *HPS Newsletter*, recomienda establecer un límite anual de dosis a los profesionales de 50 mSv/a o de 1000 mSv a lo largo de toda la vida profesional, por encima de las dosis naturales, y afirma que la estimación del riesgo a estos niveles de dosis debe ser estrictamente cualitativa, haciendo énfasis en la posibilidad de que no se produzcan efectos dañinos a la salud. Asimismo, la HPS indica que, si bien existe una sustancial y convincente evidencia científica de la existencia de riesgos para la salud a altas dosis, por debajo de los 100 mSv éstos son demasiado pequeños para ser observados o no existen.

EL CONGRESO DE SEVILLA DE 1997. UN BUEN NÚMERO DE PONENCIAS Y REFERENCIAS CONTRARIAS A LA HIPÓTESIS L.S.U.

Con la polémica, entre partidarios y contrarios a la utilización de la hipótesis de la extrapolación lineal sin umbral, L.S.U., de los efectos de las R.I., a bajas dosis y bajas tasas de dosis, planteada en los términos expuestos en los apartados anteriores, no cabe la menor duda que la celebración, en Sevilla (España), en Noviembre de 1997, de una Conferencia Internacional, organizada por el OIEA y la Organización Mundial

de la Salud (O.M.S.), en cooperación con el U.N.S.C.E.A.R., con el título *Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control*, ha significado un importante hito. Colaboraron en la organización varias entidades españolas, tales como ENRESA, ENUSA, UNESA y CIEMAT, lideradas por el Consejo de Seguridad Nuclear (C.S.N.), siendo de destacar el gran número y la calidad de las ponencias presentadas, [4], exponiendo interesantes resultados de investigaciones experimentales en el ámbito de la Radiobiología y de estudios epidemiológicos en cohortes bastante variadas. Según resaltamos a continuación, sorprende, en esta Conferencia, el abundante número de grupos científicos que aportan resultados comprobados que están en contradicción con la hipótesis L.S.U..

En la Tabla 1 se sintetiza la clasificación de todas las 206 ponencias presentadas por áreas temáticas. Si, como creemos razonable, el contenido de este Congreso es muy representativo de los temas que mas interesan actualmente a la comunidad científica en el ámbito de la Radiobiología, podemos afirmar que éstos son: la respuesta adaptativa (R.A.), los estudios epidemiológicos, las estimaciones del riesgo y detrimento producidas por las radiaciones y el control de las bajas dosis.

Asimismo, las opiniones dadas por los numerosos expertos internacionales asistentes, en los resúmenes y discusiones de las diversas sesiones normales y especiales, supusieron una formidable ocasión para auscultar la situación actual de la Radiobiología.

Antes de analizar con cierto detalle las aportaciones mas interesantes, conviene conocer el significado de algunos conceptos utilizados muy frecuentemente en el léxico actual de este campo científico. La denominada *respuesta adaptativa*, (R.A.), -utilizamos el adjetivo adaptativo, traducción del inglés "adaptive", siguiendo a los expertos en radiobiología que utilizan el idioma español, aunque es un vocablo que no está en nuestro diccionario de la lengua-, sería una respuesta beneficiosa del organismo frente a la absorción de dosis bajas de radiación, que se traduce en un aumento de la capacidad de reparación de los daños biológicos, por medio de la activación de determinados enzimas reparadores de las roturas de la molécula de DNA, o bien en la aparición del fenómeno denominado *apoptosis*. Este término hace referencia a la muerte celular programada, en la que la célula diseña y ejecuta el programa de su propia desaparición, en respuesta a estímulos externos o internos, cuya complejidad se está revelando recientemente. Es un proceso que tiene su origen en

TEMA	TÍTULO	NUMERO DE PONENCIAS
1	Mecanismos moleculares de los efectos de la radiación: mutaciones puntuales y clastogénicas	11
2	Respuesta adaptativa: aumento de la capacidad de reparación y apoptosis producidas por la radiación	23
3	Promoción y progresión de los daños inducidos por la radiación	12
4	Efectos de la radiación en células germinales: desórdenes hereditarios	8
5	Evidencias radioepidemiológicas: poblaciones humanas	22
6	Evidencias epidemiológicas: extrapolación de los resultados en animales	12
7	Estimaciones del riesgo y detrimento de la radiación	39
8	Transición de la evidencia científica a la protección radiológica	14
9	Control de bajas dosis producidas por las prácticas	28
10	Reducción de bajas dosis mediante intervenciones	7
11	Interacción entre los controles reguladores y las licencias en la aplicación de las normas de seguridad	14
12	Relaciones entre el control regulador y la investigación científica	9
-	Otros	7
TOTAL		206

Tabla 1. Clasificación de las ponencias del Congreso de Sevilla sobre Bajas Dosis, por áreas temáticas, [4].

el núcleo celular y que se ha observado frecuentemente y documentadamente tras la irradiación a bajas dosis. La *necrosis* es otro fenómeno de muerte celular, pero que se da a altas dosis, produciéndose, como resultado de un daño externo, un colapso metabólico cuando la célula no puede mantener la homeostasis iónica.

Evidentemente con vistas en la posible aparición de los efectos estocásticos, esto es, la capacidad de las R.I. de producir cánceres tras las roturas de la molécula de DNA, los dos últimos efectos antes mencionados son beneficiosos al morir la célula. La R.A. se ha probado experimentalmente al evaluar la fracción de células dañadas tras ser irradiadas a altas dosis (del orden de 1 Sv), habiendo sido, irradiadas previamente con dosis bajas. La fracción de daños graves en este caso resulta inferior al caso en que no se haya realizado la irradiación previa a bajas dosis. De un buen número de ponencias del Congreso se deduce la existencia de centenares de referencias científicas solventes que apoyan la presunta validez de la existencia de la R.A.

Conviene también alertar al espectador de este importante debate científico, acerca del significado del término *bajas dosis*, el cual es cuantitativamente bastante distinto en Radiobiología, donde realizan experiencias de irradiación de cultivos de células para probar la R.A. con dosis bastante instantáneas y casi nunca inferiores a 200 mSv, que en P.R., donde las dosis recibidas por los trabajadores profesionalmente expuestos son mas repartidas en el tiempo y raramente superan los 50 mSv al año.

Tras una atenta lectura de las 206 ponencias, a continuación sintetizamos los contenidos de aquellas que hemos considerado de mayor interés en el campo del debate sobre la hipótesis L.S.U.. El lector debe tener presente que es una selección realizada por un ingeniero que no es experto en Radiobiología y, por tanto, quizá algunos resultados que para nosotros son muy destacables no lo sean para dichos especialistas. Para resumir mejor la exposición, hemos agrupado las ponencias, que a nuestro juicio son mas interesantes del conjunto de las áreas temáticas indicadas en la Tabla 1, en tres grandes grupos: aquellas en que se dan resultados experimentales para probar la existencia de la R.A. a nivel celular, a nivel de grupos de población y aquellas en las que se duda o niega vehementemente la validez de la hipótesis L.S.U.

A) Sobre la respuesta adaptativa (RA) a nivel celular

En la ponencia [24] un grupo de radiobiólogos húngaros describen sus expe-

riencias (ensayos de micronúcleos) en linfocitos humanos en fase Go, irradiados "in vitro" con una dosis inicial de rayos X de 10 mGy y una posterior, tras un intervalo de tiempo de 1 a 8 horas, de 1 Gy, que demuestran la existencia de una R.A.. En [25], un equipo de radiobiólogos de la Universidad de Kyoto, en Japón, presentan unos resultados que prueban la existencia de R.A. en series de experimentos en células V79 del hamster chino, atribuible a la inducción de mecanismos de reparación de la molécula de DNA, con unas dosis previas de 50 mGy.

Especial atención nos merece la ponencia [26], de M Pollycove y C.L. Paperiello de la N.C.R. de los E.U.A., en la que se presenta un gráfico altamente revelador del complejo biosistema encargado del control de los daños a la molécula de DNA. La, para nosotros, sorprendente información se puede sintetizar así; el metabolismo del cuerpo humano, que tiene del orden de 10^{14} células, produce unas 10^7 alteraciones metabólicas del DNA por célula y día (10^{21} alt/día), debidas a inestabilidades térmicas, réplicas de la molécula de DNA y radicales libres generados por el 2-3% del oxígeno metabolizado. Los antioxidantes y otros agentes de prevención reducen esta tasa a un 1%, es decir, 10^5 alt/cel.día. A continuación actúan los enzimas reparadores con una elevada eficiencia, de modo que únicamente no son reparadas o son mal reparadas una de cada 10^4 células, quedando por tanto unas 10 mutaciones/cel.día. De éstas, una importante fracción son eliminadas por apoptosis, necrosis, etc, quedando sólo una tasa de 10^{-1} mutaciones persistentes/cel.día. (10^{13} mut./día), las cuales aún pueden ser eliminadas por el sistema inmunológico. Este eficientísimo sistema biológico previene el envejecimiento prematuro y la aparición de células o tejidos malignos frente al acoso de altas dosis de radiación o de otros agentes tóxicos. La radiación produce alteraciones en la molécula de DNA con una fracción de dobles roturas unas mil veces mas frecuente que las producidas por otros agentes, pero aún así una dosis natural de 1 mSv/a produce una tasa del orden de 10^{-5} mutaciones/cel.día, cifra muy inferior a la metabólica natural (10 mutaciones/cel.día), a la que tiene que sumarse. Suponiendo que la R.A., a bajas dosis, represente un incremento en la eficiencia de este biosistema en un 10%, al pasar de una tasa de dosis de 1 mSv/a a 10 mSv/a, las mutaciones (dobles roturas) inducidas por la radiación crecerían de 10^{-5} /cel.día a $9 \cdot 10^{-5}$ /cel.día, pero al mismo tiempo las mutaciones producidas por el metabolismo decrecerían, por R.A., de 10/cel.día a 9/cel.día. El resultado neto es un decrecimiento del

total de mutaciones pasando de $10,00001$ /cel.día a $9,00009$ /cel.día, es decir, una disminución neta de ≈ 1 mutación/cel.día, cifra que es un factor $\approx 10^4$ veces mayor que el aumento producido por la radiación al pasar la dosis de 1 a 10 mSv/a. Los autores concluyen afirmando que la exposición a bajas dosis, al producir una R.A., causa un decrecimiento de la mortalidad de las personas, hecho según ellos confirmado plenamente por muchos estudios epidemiológicos sobre poblaciones sometidas a dosis relativamente altas de radiación natural en los E.U.A., China, Japón, India y Australia, así como por otras cohortes afectadas por radiación no natural; población de Hiroshima y Nagasaki, grupo de trabajadores profesionalmente expuestos de la marina de E.U.A., población al este de los Urales en Rusia, población expuesta a dosis relativamente altas de radón, cohorte de personas sometidas a exploraciones médicas con rayos X en Canadá, etc.

En [27], investigadores de varios centros de Japón muestran la inducción de radorresistencia significativa en ratones, de razas C57BL e ICR, con dosis iniciales comprendidas en dos tramos: de 50 a 100 mGy y de 300 a 500 mGy, mientras que, también del Japón, T. Ohmishi, de la Universidad de Nara, presenta interesantes resultados, [28], sobre el aumento de concentración de la proteína p53, supresora de tumores, que interviene en los mecanismos de reparación del DNA, en células de diversos órganos de ratones, tras la irradiación con bajas dosis de 100 a 500 mGy de rayos X. Asimismo, otros grupos científicos de Japón presentan argumentos a favor de la R.A.. En [29] se confirma experimentalmente que dosis previas de 100 a 200 mGy de rayos X, seguidas de dosis posteriores de 2 Gy, producen un incremento en las tasas de crecimiento de células humanas (células HE) respecto al caso en que no se dan las dosis previas, apostando por la importancia de los iones Ca^{++} encargados de la comunicación intercelular. En [30] se describen experimentos que demuestran el aumento de los niveles de Thioredoxina (TRX), sustancia radioprotectora y reguladora de las funciones celulares, en linfocitos humanos periféricos después de ser irradiados a bajas dosis, con un efecto máximo para dosis de 250 mGy.

Los grupos investigadores españoles también aportaron interesantes resultados al Congreso. En [31], un grupo de la Universidad Autónoma de Barcelona presenta unos resultados sobre los efectos citogénéticos de la irradiación "in vitro" de espermatozoides humanos, a una amplia gama de dosis, de 0 a 4 Gy, obteniendo una relación lineal para la inducción de aberraciones cromosómicas y la

producción de micronúcleos. Un equipo de científicos de la Universidad de Granada, [32], presenta diversos estudios de biología celular en las que se analiza la respuesta después de la irradiación, concluyendo que la apoptosis no parece crucial para la radiosensibilidad celular y que la relación entre la funcionalidad del gen supresor p53 o la supervivencia clonogénica y dicha apoptosis pudiera ser específica de cada tipo de célula. Otro equipo de la Universidad de Alcalá de Henares y del C.S.I.C., [33], aporta resultados de la irradiación de linfocitos, con dosis de 0,05 Gy y 0,4 Gy, observando la aparición de cromosomas dicéntricos, fragmentos cromosómicos y micronúcleos en células binucleadas, afirmando que estas manifestaciones no pueden servir de dosímetros biológicos válidos a dosis inferiores a 0,4 Gy y que puede haber una correlación entre la tasa de fragmentación y la dosis. Investigadores del C.I.E.M.A.T., [34], dan resultados de alta incidencia de cánceres hematológicos radioinducidos a altas dosis (1-4 Gy) de rayos X en ratones deficientes en el gen p53 que regula la apoptosis. En [35], especialistas del Hospital Gregorio Marañón de Madrid exponen el desarrollo de un protocolo de la técnica FISH para su aplicación en dosimetría biológica (altas dosis), basado en el estudio de las aberraciones cromosómicas (dicéntricos) en linfocitos y, en [36], investigadores de la Universidad de Cantabria analizan el posible efecto de las bajas dosis (1 mGy) debidas al gas radón (Rn-222) y sus descendientes en el sistema inmunológico o en la inducción de procesos de apoptosis, concluyendo que dichas dosis tienen un importante papel en la inducción de genes tanto represores como inductores de apoptosis, al tiempo que hacen disminuir el crecimiento de poblaciones de células tumorales.

B) Sobre la respuesta adaptativa (RA) en grupos de población

En [37], T.D. Luckey, uno de los científicos que mas han impulsado las ideas contrarias a la hipótesis L.S.U., analiza los resultados de nueve estudios epidemiológicos realizados sobre trabajadores de la industria nuclear y militares que observaron explosiones atómicas en la atmósfera, con un total de 13 millones de personas/año, concluyendo que las bajas dosis son beneficiosas para las poblaciones humanas. Con estas cohortes, eliminando convenientemente el denominado *healthy worker effect* (menos riesgo de las personas profesionalmente expuestas respecto a la población en general, en razón de las edades y otros factores), el autor obtiene una tasa de mortalidad por cáncer sólo del 65,8% de la propia de

una población similar no expuesta a las R.I. Este atrevido autor va mas allá llegando incluso a proponer el establecimiento de una *dosis mínima anual recomendable -Minimum Yearly Recommended Allowance (M.Y.R.A.)-*, de 10 mGy/a para la población.

Investigadores del *Atomic Bomb Disease Institute*, de la Universidad de Nagasaki (Japón), en [38], tras estudiar una cohorte de 100.000 personas supervivientes de la bomba atómica, expuestos a una dosis estimada entre 310 y 400 mGy, obtienen una tasa de mortalidad significativamente mas baja que en el caso de una población similar no afectada. Los autores afirman que las bajas dosis recibidas han hecho aumentar la esperanza de vida de los supervivientes. Asimismo, en [39], un grupo de científicos del *Institute of Radiation Epidemiology*, del Japón, aporta interesantes resultados de los efectos, a bajas dosis y bajas tasas de dosis, en una cohorte de trabajadores de la industria nuclear, analizada desde 1986 y constituida por 114.900 personas. Tras un periodo medio de seguimiento de 4,6 años y una dosis acumulada media de 13,9 mSv, se ha evaluado la *tasa de mortalidad normalizada*, concluyendo que no se ha demostrado ningún aumento significativo de muertes con las dosis recibidas. Se ha observado un ligero incremento del cáncer de páncreas, con 10 años de latencia, aunque sin poder dar alguna conclusión al respecto, puesto que en cohortes similares no se ha observado una relación causal entre la dosis y este tipo de cáncer.

En [40], un grupo de investigadores de la India proporciona los resultados de un amplio y ambicioso proyecto de investigación, el *Monazite Survey Project*, basado en estudios citogenéticos de recién nacidos en las áreas de altos niveles de radiación natural, en la costa del estado de Kerala, debidos a minerales de torio. Los niveles de dosis medias "per capita" debidos a la radiación terrestre son unas cuatro veces los valores normales, alcanzándose en determinados puntos geográficos valores comprendidos entre 1 y 35 mGy/a. Tras dos décadas de análisis de las tasas de aberraciones cromosómicas y micronúcleos en los linfocitos se deduce que no existen diferencias significativas entre los recién nacidos de esta cohorte con altas dosis y los de dosis normales.

Un grupo de científicos de la Universidad Autónoma de Barcelona, [41], ha comparado la sensibilidad a los efectos citogenéticos producidos por las R.I. en muestras de linfocitos de individuos profesionalmente expuestos con una población de control, no expuesta. Los resultados, tras la irradiación de

muestras de sangre de esta cohorte, a dosis de 2 Gy y a tasas de 91,95.10-2 Gy/mi, indican la aparición de aberraciones cromosómicas (dicéntricos) con un número significativamente mas pequeño en la muestra de la población expuesta respecto a la no expuesta (R.A.). También en España, la empresa TECNATOM, en colaboración con el Hospital Gregorio Marañón de Madrid, [42], presenta un estudio epidemiológico de una cohorte constituida por personal profesionalmente expuesto, a bajas dosis, con una duración de 13 años y unas dosis anuales medias, "per capita" inferiores a 5 mSv. Tras un exhaustivo análisis comparativo no han observado diferencias significativas respecto a poblaciones normales.

C) Sobre la validez de la hipótesis L.S.U.

En [43], los autores, del *Biosciences Group, Bhabha Atomic Research Centre* de la India, afirman claramente que los resultados recientes de los estudios epidemiológicos de los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki y los trabajos experimentales de la radiobiología molecular no permiten dar un soporte inequívoco a la teoría L.S.U.. Incluso afirman que no puede descartarse la posibilidad que las bajas dosis y altas dosis induzcan efectos cualitativamente opuestos, al tiempo que está creciendo día a día la evidencia que las bajas dosis inducen la hormesis y la R.A., fenómenos no explicables por el actual paradigma de la teoría L.S.U. y que no se producen a altas dosis.

Un grupo de especialistas del "Centro Nacional de Radiobiología" de Bulgaria, [44], propone realizar una definición mas exacta de los intervalos de dosis bajas. Consideran que el paradigma del modelo L.S.U. tiene un carácter ético mas que científico, ya que nunca podrá ser probado o rechazado y, en consecuencia, las dosis colectivas no deberían usarse para evaluar los riesgos de las poblaciones afectadas sin poner restricciones a las dosis individuales. Estos investigadores de Bulgaria (país de las rosas) comienzan su ponencia con una bonita frase: *Las bajas dosis son sueños de rosas en radiobiología. Para la Protección Radiológica son como nubes negras.*

En [45] se afirma que, de ser ciertas todas las referencias y evidencias científicas acerca de la hormesis, la gestión de la radioprotección en el Japón ha sido extremadamente errónea. Se reafirma esta postura informando de la utilización de bajas dosis por el profesor Sakamoto, en el Hospital de la Universidad de Tohoku, para prevenir la reaparición de cáncer.

Un bien armado discurso en contra de la hipótesis L.S.U., que subyace en

las recomendaciones de la I.C.R.P. y del I.A.E.A. y en la legislación de la Unión Europea, se desarrolla en [46], proponiendo la abolición del concepto de dosis colectiva cuando las dosis artificiales individuales al público están por debajo de 100 mSv y por debajo de 50 mSv para personal profesionalmente expuesto. También se propone cambiar los parámetros usados en el análisis coste-beneficio en radioprotección (valor monetario de la unidad de dosis colectiva, α). El autor se pregunta sobre cuan estables son actualmente los cimientos de la *Casa de la Protección Radiológica* y, en caso de no serlo, si dicha casa podrá ser reparada mediante un proceso evolutivo o si se requerirá una reconstrucción total.

Un ponente español, M. Barrachina, [47], nos propone un modelo físico-matemático probabilístico para la relación dosis-respuesta, basado en unas funciones de probabilidad de las lesiones de la molécula de DNA con reparaciones incompletas o fallidas, el cual permite interpolaciones entre altas y bajas dosis y tasas de dosis, en línea con el modelo L.S.U..

En [48], dos técnicos de "Chalk River Laboratories de la A.E.C.L.", del Canadá, profundizan en las diferentes características espaciales y temporales de la interacción de la radiación con los tejidos celulares respecto a los agentes químicos. Una dosis de 1 mSv representa alrededor de una traza de una partícula por célula del organismo y una tasa de dosis de algunos mSv al año representa el impacto de unas cuantas trazas por célula y año, es decir, sólo una pequeña fracción de las células de una persona son blancos cada día. En cambio, un agente químico puede ser tóxico aun con trazas, en concentraciones de 10^{-19} , afectando a muchas moléculas en cada célula. Teniendo presente estas características, los posibles efectos de las R.I. a bajas dosis, tan separadas en el espacio y el tiempo, dependerán de muchas variables biológicas y puede que no tengan carácter general para personas específicas en cualquier tiempo. Los autores recomiendan rechazar la hipótesis L.S.U., fijando la atención en aquellas dosis que estén algún factor por debajo de los umbrales. Estos mismos autores, en otra ponencia, [49], profundizan en la idoneidad de la hipótesis L.S.U., afirmando que no hay estudios en personas expuestas a bajas dosis y bajas tasas de dosis que prueben que los riesgos son inferiores a los coeficientes nominales utilizados. Los estudios *no prueban que no hay efecto*, sino mas bien *no prueban el efecto*. En el texto se citan los mas célebres estudios de cohortes humanas del Reino Unido, China, Suecia, Francia y Japón, en los que no se han obtenido correlaciones dosis-efecto significativas.

En la Conferencia de Sevilla, aparte de la presentación de las ponencias, hubieron intensas discusiones en las sesiones especiales con ponentes invitados. Entre ellas destacamos las siguientes:

A.Kellerer, del "Instituto de Biología de la Radiación" de Alemania, propuso una profunda revisión de las estimaciones de las dosis recibidas por la población en las explosiones atómicas de Hiroshima y Nagasaki del Japón, al poner en evidencia, mediante las medidas de algunos productos de activación como el Ni-63, unas dosis neutrónicas superiores a las admitidas en los estudios de estos últimos años, lo que significaría unos coeficientes de riesgo menores que aquellos que motivaron a la I.C.R.P. a recomendar, [2], una rebaja de los límites de dosis.

Una interesante sorpresa constituyó la intervención de R. Clarke, [50], responsable de la P.R. en el Reino Unido y miembro cualificado de la I.C.R.P., con su propuesta del establecimiento de un nuevo sistema de limitación de dosis, basado en una *dosis controlable*, fijada alrededor de 20-30 mSv/a para la cual, con un riesgo de 10^{-3} /año, se estaría obligado a tomar acciones de protección. Los Organismos Reguladores intervendrían en el rango de dosis comprendido entre 30 mSv/a y 0,3 mSv/a, estableciendo un límite anual para el público de 3 mSv/a. El nivel inferior de 0,3 mSv/a sería el umbral para los niveles de exención, al considerar que representa una dosis con un riesgo trivial, de 10^{-6} /año.

Mientras los diversos grupos de científicos se embarcaron en la controversia acerca de la validez de la hipótesis L.S.U. y de la racionalidad de los nuevos límites de dosis, algunos representantes de los Organismos Reguladores de diversos países manifestaron su "confortabilidad" con dichos límites y otros pidieron un esfuerzo para eliminar las incertidumbres y ganar mas la confianza del público. A. Alonso, del C.S.N. español, indicó, [51]: Los reguladores se encuentran en este momento en el centro de una controversia científica sobre la relación que existe entre la dosis recibida y el incremento relativo del riesgo, cuando la dosis es inferior a unos doscientos milisievert. Cualquiera de las cinco hipótesis (ver Figura 2.a) podría ser aceptable y demostrable sobre bases científicas o estadísticas y cada una de ellas tiene sus detractores y defensores, dentro de los conocimientos actuales y los datos disponibles. La hipótesis L.S.U., recomendada por la ICRP y adoptada por el sistema de Naciones Unidas, puede que represente una medida de protección prudente; sin embargo, si la relación tuviese un umbral o fuese cierta la hormesis, se estaría entonces penalizando y limitando innecesariamente las aplicaciones benefi-

ciosas de las radiaciones ionizantes. Por ello conviene que este problema sea resuelto sobre bases científicas sólidas. Los reguladores están, en principio, de acuerdo en utilizar, siempre que sea posible, la hipótesis L.S.U., pero estiman más conveniente regular caso a caso las actividades, con el objetivo de no tomar acciones que sean absurdas o demasiado onerosas para la sociedad.

C.Paperiello, de la N.R.C. de los E.U.A., afirmó que las recientes propuestas de exigir unos niveles de descontaminación de los emplazamientos nucleares bastante inferiores a las dosis naturales de fondo se prestan a una gran confusión y propician la aparición de contradicciones, tanto para el para el público como las autoridades.

K.H. Lokan, del *Australian Radiation Laboratory*, remarcó la discrepancia entre los límites ultraconservadores impuestos por las autoridades en la industria nuclear y la falta de interés del público y de los políticos para reducir los niveles naturales de radón en las casas que producen dosis mucho mas altas.

A. González, responsable del área de P.R. del I.A.E.A., enfatizó sobre las recomendaciones *irracionales* de los organismos de protección ambiental de algunos países, como en el caso de los E.U.A., que exigen límites para la descontaminación de emplazamientos de 0,15 mSv/a y de 0,04 mSv/a para las aguas subterráneas, [52].

El lector comprenderá que hayamos resaltado mas aquellas ponencias y opiniones contrarias a la hipótesis L.S.U., por ser éstas lo mas destacable de la polémica en la actualidad. Evidentemente siguen habiendo grupos de científicos partidarios de dicha hipótesis o que permanecen a la espera de la resolución del conflicto. A quién esté muy interesado en el tema evidentemente le recomendamos la lectura del conjunto de ponencias del Congreso, [4].

CRITICAS RECIENTES AL "ESTABLISHMENT" DE LA PROTECCION RADIOLOGICA. LA IMPORTANCIA ETICA Y ECONOMICA DE LA POLEMICA

Es muy significativo que en los últimos años hayan aparecido, en las editoriales de las mas prestigiosas revistas de P.R., críticas abiertas a lo que podría denominarse el *establishment* de esta disciplina, constituido básicamente por aquellos organismos internacionales que, como la I.C.R.P., han tenido una influencia decisiva en la gestación de las legislaciones de la mayoría de los países.

En un interesante comentario de M. Gough en *Health Physics*, [53], en 1996, se hace una incursión en la epistemología de la ciencia, afirmando que el análisis

de riesgos a la salud producidos por las bajas dosis de R.I. no constituye un conocimiento científico. Sabido es que, siguiendo a K. Popper, [54], el influyente pensador especialista en la filosofía de la ciencia, la condición indispensable para que una hipótesis tenga carácter científico es que pueda ser *falsada*. Aquellas hipótesis que no están expuestas al famoso *principio de falsación*, no son ciencia, son otra cosa (dogmas religiosos, magia, etc) y aquellas teorías mas potentes son aquellas que son mas vulnerables a la falsación. Las estimaciones del riesgo producido por las bajas dosis no pueden ni podrán ser probadas o falsadas nunca por la imposibilidad de discernir sus efectos de los de la radiación natural de fondo. Son predicciones que no se pueden medir, basadas en hipótesis cuya confirmación es imposible. Hace 15 años, algunas Agencias Federales publicaron guías para el análisis de riesgos que daban prominencia a los resultados positivos que soportaban la relación dosis-efecto lineal, mientras que los resultados negativos eran ocultados o ignorados. En 1995, el *National Research Council* de los E.U.A. publicó una nota diciendo también que el análisis de riesgos no es una ciencia y que debe ser considerado con criterios distintos a la ciencia.

En una editorial de *Radiation Protection Dosimetry*, [14], de 1997, se afirma que existen buenas razones para creer que un determinado número de cuestiones son compartidas por muchos colegas de la comunidad de especialistas en P.R., entre ellas:

a) Decenas de millardos de dólares se gastan cada año en el mundo para poder cumplir con unos límites de exención, en algunos países, de 0,01 mSv/a en el desmantelamiento de instalaciones nucleares, en el reacondicionamiento de minas de uranio o de emplazamientos de residuos, dinero que podría usarse de modo mucho mas beneficioso en otras áreas de la salud pública, en países ricos o pobres.

b) El carácter catastrofista de las afirmaciones que cuantifican los casos adicionales de cáncer que se producirán como consecuencia del accidente de Chernobyl -unos 30.000 según el U.N.S.C.E.A.R.-, del radón en las casas, de las radiografías en medicina, etc, basadas esencialmente en el producto de cero por infinito, sin tener en cuenta el daño psicológico, físico y económico que han provocado. Se han desperdiciado millardos de dólares en la destrucción de alimentos y el I.A.E.A. estima en 40.000 el número de abortos adicionales voluntarios causados por estas predicciones en los países del

este de Europa tras Chernobyl, sin mencionar el daño causado por la pérdida de aceptación de los muchos usos beneficiosos de la R.I., en las aplicaciones médicas, industriales, en la contribución a evitar el cambio climático, etc.

c) Las dosis producidas por las fuentes naturales de radiación, con valores que pueden variar de 1 a 100 mSv/a, que aparentemente no ha producido daños a la salud de las poblaciones afectadas durante muchas generaciones. Si usáramos la radiación natural como una amenaza para limitar y controlar los asentamientos humanos, ¿dónde pondríamos los límites? y, si tratásemos de la misma forma a la radiación artificial que la natural, *como éticamente deberíamos hacer*, probablemente tendríamos que evacuar muchas regiones de la geografía terrestre, o cerrar muchas minas en explotación.

En la Conferencia de Sevilla, [51], en una sesión especial dedicada al Control Regulador y la Investigación Científica, se plantearon varias cuestiones que también entran en el ámbito de la ética. Y. Huating, del "Instituto de Protección Radiológica" de la R.P. China, resaltó la diferencia entre la Radiobiología como rama científica y la implantación de la P.R., que obedece a otros criterios, indicando la gran dificultad de hacer cálculos coste-beneficio en P.R. basándose en las mismas hipótesis (valor de α , etc) en países como China y otros, con un PIB "per capita" 100 veces mas alto, o incluso, dentro de la misma China, entre las ricas áreas costeras y las mas pobres del interior. Otros participantes se han interrogado sobre la idoneidad de disponer de recursos económicos cada vez decrecientes para reducir posibles riesgos que, si existen, son tan pequeños que durante décadas o nunca podrán ser detectados. Algunos, [46] se han interrogado acerca de por qué aparentemente se han ocultado resultados de estudios epidemiológicos contrarios al dogma oficial de la teoría L.S.U. y consideran que el uso de los conceptos superconservadores propios de la misma han sido utilizados de forma no racional por grupos ideológicos y creadores de opinión pública, desembocando el proceso en el establecimiento de una normativa con unos límites de dosis irracionales que representan un coste muy elevado para la sociedad. Incluso hay grupos de científicos que recelan del comportamiento demasiado *politicizado* de la I.C.R.P. y muestran grandes esperanzas en la nueva recién creada organización *Radiation Science & Health Inc*, [46].

En el grupo de espectadores de la polémica, críticos con algunas propuestas de la I.C.R.P., nos situamos también noso-

tros. A nuestro modesto juicio la última recomendación del límite de dosis anual para el público, de 1 mSv/a, es totalmente irracional y es poco ética, al ser menor que las propias fluctuaciones de las dosis naturales. Su establecimiento choca con un *principio de equidad* que debería gobernar a la protección de la población frente a los riesgos a la salud. Significa, a veces, tener que gastar mucho dinero para afirmar que en un lugar con una dosis natural (cósmica, terrestre y propia) de 2 mSv/a no haya ninguna persona que reciba mas de 3 mSv/a, mientras que, a lo mejor, a pocos kilómetros de distancia, haya grupos de población que, asentados sobre una geología distinta, reciban dosis naturales de mas de 3 mSv/a. Quizá la I.C.R.P. debería haber presentado el estado actual de los conocimientos científicos en el campo de la Radiobiología, dando los coeficientes de riesgo para unos rangos de dosis y dejando a los legisladores de los países la fijación de los límites concretos. Posiblemente de esa forma este organismo hubiera salvaguardado mejor su carácter científico despolitizado. Basándose en su prestigio, que indudablemente tiene acumulado desde bastantes años, muchos creadores de opinión y legisladores han impuesto unos límites muy severos, costosos y que paradójicamente incluso se vislumbra que pueden no tener bases científicas sólidas.

Los frecuentes cambios en las definiciones de las magnitudes utilizadas en dosimetría, así como en los valores de los parámetros propuestos recientemente por la I.C.R.P., también han recibido críticas de profesionales muy prestigiosos. Algunos, [55], opinan que los cambios radicales propuestos por la publicación N° 60, [2], posiblemente hayan sido poco necesarios y debieran haber sido mas meditados y estudiados rigurosamente antes de su implantación. Un científico tan prestigioso (puede considerarse el fundador de la *Microdosimetría*) como H. Rossi ha dicho recientemente *Durante las últimas dos décadas los conceptos de la P.R. y las magnitudes físicas aplicables han derivado en algo que tenemos que considerar como un caos*. A juicio de un grupo importante de científicos, actualmente no se cumplen las condiciones mínimas que debiera verificar un sistema administrativo ideal para la protección de la salud de las personas. Los límites deben estar expresados en magnitudes medibles (la dosis efectiva no lo es) y éstas deben ser estables en el tiempo. Los cambios legislativos en estos campos suelen ser muy costosos y debieran implantarse tras rigurosos análisis coste-beneficio. Hay serias dudas que la recién Directiva de la U.E. y posteriores leyes de los países miembros sobre los

nuevos límites de dosis haya seguido estos pasos. En definitiva, lo mas prudente, [55], sería esperar a que las ciencias básicas, especialmente la Biología Molecular y la Microdosimetría, hagan progresos mas sensibles en el campo de la Radiobiología, antes de efectuar cambios radicales en las legislaciones y regulaciones. *La estabilidad también puede conducirnos a la credibilidad.*

CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones que, bajo la óptica de una persona no experta en Radiobiología, consideramos mas importantes tras este atento recorrido que hemos efectuado a través de la polémica de las bajas dosis.

1- Las referencias y opiniones de científicos y profesionales de prestigio en favor de la no aceptación de la hipótesis L.S.U. son cada vez mas abundantes y, por tanto, no es descartable que, en poco tiempo, sus partidarios sean mayoría. Los profesionales de la P.R. deberemos esperar a que los avances de la Radiobiología Molecular vayan acercándose a la solución del problema de los efectos biológicos de las bajas dosis. Entre tanto, convendría que los legisladores y los Organismos Reguladores tuvieran prudencia en sus exigencias.

2- Creemos sinceramente que aquellos profesores que enseñamos la asignatura de Protección Radiológica o afines deberemos modificar la doctrina impartida -esto no es raro en esta materia- en los últimos años, especialmente desde la publicación N° 26 de la ICRP, [3], según la cual afirmábamos que la gran mayoría de la comunidad científica era totalmente partidaria de la extrapolación lineal de los efectos estocásticos de las R.I. a bajas dosis y a bajas tasas de dosis, sin existencia de umbral. A partir de ahora creo deberemos afirmar que esta hipótesis está cada vez cuestionada. Habrá que modificar los apuntes.

3- La hipótesis L.S.U. es coherente con el establecimiento de unos límites de dosis y unos límites de exención muy bajos para algunas prácticas, a veces muy por debajo de las dosis naturales, con el consiguiente dispendio o despilfarro de grandes sumas de dinero para obtener un beneficio que acaso nunca podrá demostrarse y que posiblemente serían mejor aprovechados por la sociedad si se usasen para limitar otro tipo de riesgos. A nuestro criterio las recomendaciones de 1990, [2], de la I.C.R.P., especialmente el límite de dosis al público, de 1 mSv/a, es bastante incoherente o irracional, al ser menor que las propias fluctuaciones de la dosis natural, lo cual plantea problemas de tipo ético nada desdeñables.

4- Es claro que, en los países demo-

cráticos, es y debe ser el poder legislativo el que establezca las normativas en todos los ámbitos y, por tanto, en el de la protección de las personas frente al riesgo de las R.I. Evidentemente este poder, al legislar, puede o no hacer caso de las razones de la comunidad científica. Nosotros preferimos la primera opción y, si estas razones están divididas, convendrá ser prudente. También es claro que los Organismos Reguladores se sentirán cómodos con leyes basadas en hipótesis muy conservadoras como la L.S.U.. Pero el ciudadano contribuyente tiene el derecho a reclamar del legislador que se expliquen las consecuencias de sus actos, especialmente el alto coste económico que se exige a la ciudadanía para prevenir unos riesgos cuya existencia probablemente nunca podrá ser demostrada.

5- La aceptación por los países de la Unión Europea, en su reciente Directiva, [22], de los nuevos límites de dosis recomendados por la I.C.R.P., ha sido un ejemplo muy ilustrativo en relación con la aceptación, por los poderes ejecutivos y legislativos, de unos valores muy conservadores, haciendo poco caso a importantes grupos de expertos en Radiobiología y quizá mas caso a grupos ideológicos o creadores de opiniones no basadas en razonamientos científicos. Como es sabido, el gobierno de Francia encargó un estudio a la prestigiosa Academia Nacional de Ciencias, la cual emitió un informe mostrando su desacuerdo con los nuevos límites, al no existir evidencia científica del daño somático a bajas dosis. En nuestro país, en lo que conocemos, hubo cierto debate, pero mas centrado entre el gobierno, el C.S.N. y algunas sociedades profesionales.

A menudo el poder legislativo y el ejecutivo, en la mayoría de los países, están, mas atentos a los creadores de opinión, a algunos grupos de presión y a agrupaciones que pretenden defender apasionadamente el medio ambiente con principios altamente ideologizados y a veces escasamente racionales. Esperamos que, si en el futuro la opinión científica contraria a la hipótesis L.S.U. se convierte en mayoritaria, estos grupos sepan reconocer su error, al menos de forma mas rápida y sincera que tal como está ocurriendo con la energía nuclear y el efecto invernadero.

6- En relación con el ampliamente utilizado principio de actuación ALARA, en el campo de la minimización u optimización de dosis en la P.R., quizá habría que profundizar en su significado, puesto que posiblemente se está enfatizando excesivamente en el adjetivo escondido tras la letra L, en lugar de dar mas importancia a la letra mas ingenieril y sugestiva del acrónimo, que es la R. Es indudable,

tal como hemos reseñado en los apartados anteriores, que, de no ser cierta la hipótesis L.S.U., se ha estado penalizando económicamente a la tecnología nuclear de forma desproporcionada en comparación con otras tecnologías.

7- Es altamente satisfactorio poder comprobar, como lo habrá hecho el lector a través de las referencias dadas de ponencias del pasado Congreso de Sevilla, el alto nivel alcanzado por la Radiobiología en España. Si bien, hace sólo unos años, eran muy escasos los grupos investigadores que cultivaban esta rama científica, no cabe duda que actualmente los profesionales del sector nuclear español nos felicitamos por este hecho y esperamos que, en el caso de tener que debatir este tipo de problemas, sean éstos expertos los que aporten credibilidad a la controversia nuclear, muy frecuentada, como se sabe, por creadores de opinión sin apenas bagaje científico conocido.

8- Por último, dejando aparte las importantes cuestiones de tipo epistemológico y ético presentes en este fenomenal debate científico y las no menos repercusiones de índole práctico que podrán derivarse, este modesto profesional de la ingeniería y profesor aficionado a la física, al introducirse, como espectador interesado, en la polémica, desearía destacar una ponencia del recién celebrado Congreso de Sevilla, cuyo contenido mas nos ha impactado. En, [56], un grupo de investigadores de Rusia proponen aplicar, ni mas ni menos que la atractiva teoría termodinámica acerca de los mecanismos involucrados en los cambios de fase de la materia (fusión, solidificación, etc), elaborada por el gran físico ruso L.D. Landau, quien recibió por ella el Premio Nobel de física, para la resolución del problema fundamental de los efectos biológicos de las R.I.

Sin duda es apasionante comprobar que, cuando una especialidad científica está lejos de resolver los problemas objeto de sus afanes, todas las demás acuden en su ayuda, incluso aquellas que tienen objetivos aparentemente muy alejados o distintos. Si esta ayuda es útil para resolver el problema luego resulta, a menudo, que problemas aparentemente lejanos tienen fundamentos fenomenológicos similares. En el campo de la dosimetría de las R.I. este ejemplo de apoyo interdisciplinar no es el único remarcable. Sabido es que una especial herramienta matemática, utilizada por la Microdosimetría para caracterizar la cercanía relativa o la densidad geométrica de los diversos puntos de interacción de las partículas, a lo largo de sus trazas, en un elemento de volumen de tejido biológico, la denominada *Función de Proximidad*, [6], nació como un concep-

to útil en geoestadística, en sus intentos de cuantificar las probabilidades de aparición de afloramientos de determinados minerales o estratos geológicos en una región. Asimismo, cabe citar la analogía, descrita con detalle en [57], entre el problema de dosimetría de la determinación de las Trayectorias de Dosis Mínima en los campos de radiación móviles y el problema de las soluciones del principio de Fermat de la Óptica Geométrica, para determinar las trayectorias de los rayos de luz en medios materiales con índices de refracción variables.

REFERENCIAS

- [1] Alonso, A. "Protección Radiactiva para Ingenieros". Apuntes Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Madrid (1974)
- [2] ICRP. "1990 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection". I.C.R.P. Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), Pergamon Press. Oxford (1991).
- [3] ICRP. "Recommendations of the ICRP". ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3), Pergamon Press. Oxford (1977).
- [4] IAEA. "Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control". Contributed Papers. IAEA-TECDOC-976. Noviembre (1997).
- [5] NCRP "Influence of Dose and its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-LET Radiations". NCRP Report N° 64. Bethesda. Maryland.
- [6] Pla, C. "Aportacions a l'Anàlisi Físic i Estadístic dels Fenòmens d'Interacció de la Radiació i de les Magnituds i Conceptes Utilitzats en Microdosimetria". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 1996).
- [7] Shimizu, Y., et al. "Life Span Study Report 11. Part 2. Cancer Mortality in the Years 1950-85". RERF-TR 5-88. Radiation Effects Research Foundation Hiroshima (1988).
- [8] Alonso, A. "El Riesgo de las Radiaciones: La Experiencia de Chernobyl-4". Conferencia Internacional del VI Congreso de la SEPR. Córdoba. Septiembre (1996).
- [9] UNSCEAR "Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation. Annex C. Dose Response Relationships for Radiation Induced Cancer". United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, E. 86 IX.9. Naciones Unidas. Nueva York (1986).
- [10] Coll, P. "Fundamentos de Dosimetría Teórica y Protección Radiológica". Ediciones Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona (1990).
- [11] Kathren, R., L. "Pathway to a Paradigm: The Linear Nonthreshold Dose-Response Model in Historical Context: The American Academy of Health Physics 1995 Radiology Centennial Hartman Oration". Health Physics, 70 (5): 621-635 (1996).
- [12] BEIR. "The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation". Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. National Academy of Sciences. National Research Council. Washington D.C. Nov. (1972).
- [13] Coll, P. "Bases Metodológicas para el Análisis de la Rentabilidad y el Establecimiento de Prioridades de las Inversiones en Centrales Nucleares en Periodo de Explotación. Aplicación a CN Vandellòs II. "Documento de difusión interna de ENDESA e IBERDROLA". Barcelona (1996).
- [14] Becker, K. "Threshold or no threshold, that is the Question". Editorial de Radiation Protection Dosimetry. 71(1): 3-5 (1997).
- [15] Luckey, T.D. "Physiological Benefits from Low Levels of Ionizing Radiation". Health Physics 43: 771-789 (1982).
- [16] Olivelli, G., et al. "Adaptive Response of Human Lymphocytes to Low Concentrations of Radio-active Thymidine". Science 223: 594-597 (1984).
- [17] UNSCEAR "Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex B: Adaptive Response to Radiation in Cells and Organisms". Nueva York (1994).
- [18] Muckerheide, J. "The Health Effects of Low Level Radiation: Science, Data and Corrective Action". Nuclear News, 26-24. Sept. (1995).
- [19] Cohen, B., L. "Test of the Linear Non-Threshold Theory of Radiation Carcinogenesis for Inhaled Radon Decay Products". Health Physics 68: 157-174 (1995).
- [20] Dennis, J., A. "Is There a Threshold?". Editorial de Radiation Protection Dosimetry 63 (2): 83-85 (1996).
- [21] Académie de Sciences. "Problèmes Liés aux Effets des Faibles Doses de Radiations Ionisantes". Rapport N° 34. Tec. Doc, Paris (1995).
- [22] EURATOM. Directiva del Consejo 96. "Normas básicas de Protección Sanitaria de Trabajadores y Población contra los Riesgos de las Radiaciones Ionizantes". Bruselas (1996).
- [23] Tubiana, M., Latajet, R. y Lafuma, J. "Not so stupid". New Scientist 148, (2006), 56 (1995).
- [24] IAEA-TECDOC-976 (ver ref. 4). Koteles, G., J., et al. "Low Dose Effects Detected by Micronucleus Assay in Lymphocytes". IAEA-CN-67/13 (1997).
- [25] Ikushima, T. "Molecular Mechanism of Radioadaptive Response: A Cross-Adaptive Response for Enhanced Repair of DNA Damage in Adapted Cells". IAEA-CN-67/27 (1997).
- [26] Pollycove, M., Paperiello, C., J. "Health Effects of Low-Dose Radiation: Molecular, Cellular and Biosystem Response". IAEA-CN-67/63 (1997).
- [27] Yonezawa, M., et al. "Radio-Adaptive Survival Response in Mice: Hematological Studies on the Acquired Radio-Resistance". IAEA-CN-67/110 (1997).
- [28] Ohnishi, T., "The Induction of a Tumor Suppressor Gene (p53) Expression by Low-Dose Radiation and its Biological Meaning" IAEA-CN-67/127 (1997).
- [29] Ishii, K., et al. "Participation of Intercellular Communication and Intracellular Signal Transduction in the Radio-Adaptive Response of Human Fibroblastic Cells". IAEA-CN-67/129. (1997).
- [30] Hoshi, Y. "Thioredoxin: Inducible Radioprotective Protein by Low-Dose Radiation". IAEA-CN-67/131. (1997).
- [31] Miró, R., et al. "Cytogenetic Effects of in vitro Irradiation of Human Spermatozoa". IAEA-CN-67/164 (1997).
- [32] Siles, E., et al. "Cellular Response after Irradiation: Cell Cycle Control and Apoptosis". IAEA-CN-67/169 (1997).
- [33] Rodríguez, L., et al. "Dosimetría Biológica de Dosis Bajas (0,05-0,4 Gy) con Dicéntricos, Micronúcleos y Fragmentos Cromosómicos". IAEA-CN-67/170. (1997).
- [34] Casado, J., A. et al. "Estudio in vivo de los Mecanismos de Oncogénesis Hematológica tras Exposición a Radiación Ionizante utilizando un Modelo de Ratones Deficientes en p53". IAEA-CN-67/171 (1997).
- [35] Moreno, M., et al. "Desarrollo de la Técnica FISH para su Aplicación en Dosimetría Biológica en el Hospital General Universitario Gregorio Marañón". IAEA-CN-67/189 (1997).
- [36] Soto, J., et al. "Inducción de Factores de Apoptosis en Células Tumorales Humanas por bajas Dosis de Radón". IAEA-CN-67/190. (1997).
- [37] Luckey, T., D. "Ionizing Radiation Decreases Human Cancer Mortality Rates". IAEA-CN-67/64. (1997).
- [38] Okumura, Y., et al. "Effects of Low Doses of A-Bomb Radiation on Human Lifespan". IAEA-CN-67/129. (1997).
- [39] Epidemiological Study Group of Nuclear Workers. "Health Effects Study of the Nuclear Industry Workers in Japan". IAEA-CN-67/142. (1997).
- [40] Cherian, V., D., et al. "Cytogenetic Studies on Newborns from High Level Natural Background Areas of Kerala Coast, South India". IAEA-CN-67/161. (1997).
- [41] Barquinerio, J., F., et al. "Adaptive Response Induced by Occupational Exposures to Ionizing Radiation". IAEA-CN-67/176. (1997).
- [42] Diaz, F., et al. "Análisis de Salud en un Grupo Expuesto a Dosis Bajas de Radiaciones Ionizantes". IAEA-CN-67/202. (1997).
- [43] Kesavan, P., C., et al. "Biological Effects of Low Doses of Ionizing Radiation: Conflict between Assumptions and Observations". IAEA-CN-67/21. (1997).
- [44] Vasilev, G., et al. "Low Doses-A Real Problem for Radiation Protection and Radiobiology or a Semantic Crossword". IAEA-CN-67/36. (1997).
- [45] Hattori, S. "State of Research and Perspective on Adaptive Response to Low Doses of Ionizing Radiation in Japan". IAEA-CN-67/126. (1997).
- [46] Becker, K. "Do We Need a New Cost/Benefit Assessment for Low Radiation Doses?". IAEA-CN-67/137. (1997).
- [47] Barrachina, M. "Proposal of a Probabilistic Dose-Response Model". IAEA-CN-67/168. (1997)
- [48] Osborne, R., V., et al. "From Science Evidence to Radiation Protection". IAEA-CN-67/203. (1997).
- [49] Gentner, N., E., et al. "Risks to Health From Radiation at Low Dose Rates". IAEA-CN-67/204. (1997).
- [50] Nucleonics Week. November 27. (1997).
- [51] Alonso, A. Presentación de la Mesa Redonda sobre "Control Regulador e Investigación Científica". Conferencia de Sevilla. Noviembre 1997. Ver referencia (4).
- [52] Nuclear Energy Institute. Nuclear Energy Overview. December 8. (1997).
- [53] Gough, M. "It's not Science. What Can Science do About It?". Health Physics 71: 3 (1996).
- [54] Popper, K. "The Logic of Scientific Discovery". Harper and Row and Basic Books. New York (1959).
- [55] Thomas, R., H. "We Have Met the Enemy and He is Us". Editorial de Radiation Protection Dosimetry 71(2): 83-84 (1997).
- [56] Rusov, V., D., et al. "Thermodynamic Theory of Phase Transition in Biosubstance from Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation". IAEA-CN-67/156. (1997).
- [57] Coll, P. "La Determinación de las Trayectorias de Dosis Mínima en los Campos de Radiación de Fotones". Cap. 14 de "Fundamentos de Dosimetría Teórica y Protección Radiológica". Ediciones Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona (1990).



Pedro COLL BUTÍ es Doctor Ingeniero Industrial y Profesor de Protección Radiológica en la Universidad Politècnica de Catalunya e Ingeniero de CN Vandellòs II AIE.