

TERCER EJERCICIO

GRUPO B – PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

TEMA 2

Magnitudes y unidades en protección radiológica

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	3
2. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN	3
3. OBJETIVOS.....	4
4. INTRODUCCIÓN	4
5. HISTORIA	5
6. MAGNITUDES Y UNIDADES	7
6.1. MAGNITUDES DE RADIOMETRÍA.....	7
6.2. COEFICIENTES DE INTERACCIÓN.....	8
6.3. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS	9
6.4. MAGNITUDES DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA	10
7. APLICACIÓN DE LAS MAGNITUDES OPERACIONALES	17
8. BIBLIOGRAFÍA.....	20

1. RESUMEN

Este tema proporciona la información necesaria para conocer las definiciones de las magnitudes y unidades utilizadas en Protección Radiológica, tanto las denominadas magnitudes básicas o limitadoras, como las magnitudes operacionales.

La dosis absorbida no es suficiente para cuantificar el riesgo radiológico correspondiente a los efectos estocásticos de la radiación ionizante, al no considerar la “calidad” de la radiación ni la sensibilidad relativa de los diferentes órganos y tejidos para la ocurrencia de estos efectos.

La magnitud equivalente de dosis se define para considerar el tipo y energía de la radiación incidente en un punto determinado del tejido biológico, pero al ser una magnitud de punto debía promediarse a través de todo el órgano o tejido de interés. Debido a este inconveniente, la ICRP definió la magnitud limitadora dosis equivalente en un órgano o tejido, que utiliza factores de ponderación del tipo de radiación independientes de la dirección de incidencia de la radiación, del tipo de tejido, de la posición, así como de las partículas secundarias que puedan producirse. Al depender sólo del tipo de radiación incidente y de su energía, estos factores ponderales de radiación constituyen una aproximación. No obstante, esta aproximación se considera aceptable para los fines de la Protección Radiológica.

La dosis efectiva se define a partir de la dosis equivalente para considerar la radiosensibilidad de los diferentes órganos y tejidos del cuerpo en relación con la ocurrencia de efectos estocásticos y poder obtener una magnitud que se correlacione con el riesgo de todo el cuerpo para la ocurrencia de estos efectos.

Por otro lado, la dosis efectiva se define para un modelo de persona de referencia, no considera las características del individuo que recibe la exposición, por lo que no es apropiada para realizar estudios epidemiológicos, evaluaciones de riesgo en un individuo en particular, evaluaciones de la posibilidad y gravedad de reacciones tisulares o evaluaciones de dosis accidentales para decidir sobre un determinado tratamiento médico. Se define sólo con fines de limitación y de verificación del cumplimiento, para evaluaciones prospectivas durante la planificación y optimización de las exposiciones y en evaluaciones retrospectivas para demostrar el cumplimiento de los límites.

La dosis efectiva se puede obtener mediante cálculo, a partir de magnitudes físicas y la aplicación de coeficientes de dosis. Sin embargo, no se puede obtener directamente mediante mediciones, por lo que se definen magnitudes operacionales para la vigilancia radiológica, que proporcionan estimaciones conservadoras de la dosis efectiva, en los escenarios más probables de exposición.

2. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN

Tema 14 del primer ejercicio. La Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre Energía Nuclear. Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas. Régimen de autorizaciones de estas instalaciones: Instrucciones Técnicas Complementarias. Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes. Instrucciones del Consejo de Seguridad Nuclear. El Plan Básico de Emergencia Nuclear. Directriz básica de

protección civil ante el riesgo radiológico. La protección física de las instalaciones, los materiales nucleares y las fuentes radiactivas.

Tema 17 del primer ejercicio. Organismos internacionales sobre Seguridad Nuclear y Protección Radiológica. El Organismo Internacional de la Energía Atómica de las Naciones Unidas. La Agencia de Energía Nuclear de la OCDE. La Comisión Internacional de Protección Radiológica. El Comité Científico sobre los Efectos de las Radiaciones Ionizantes de las Naciones Unidas.

Tema 1 del tercer ejercicio: Interacción de las radiaciones ionizantes con la materia viva. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

Tema 3 del tercer ejercicio: Instrumentación y métodos analíticos utilizados en la detección y medida de la radiación ionizante. Verificación, calibración y control de calidad.

Tema 4 del tercer ejercicio: El sistema de protección radiológica. Principios de justificación, optimización y limitación de dosis.

Tema 5 del tercer ejercicio: Protección radiológica ocupacional de los trabajadores expuestos. Principios generales, medidas de protección en el diseño y en la operación de las instalaciones.

Tema 7 del tercer ejercicio: La dosis de ida a la radiación externa. Tema

8 del tercer ejercicio: La dosis debida a la contaminación interna.

3. OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen con este tema son:

- a) Comprender las definiciones de las magnitudes utilizadas en Protección Radiológica.
- b) Actualizar los conceptos asociados, según las últimas recomendaciones y normativas internacionales, así como la nueva normativa nacional.
- c) Conocer la relación que existe entre las magnitudes de Protección Radiológica.
- d) Contribuir a la aplicación adecuada de las magnitudes de Protección Radiológica durante la realización de mediciones, cálculos y evaluaciones radiológicas.

4. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos prioritarios e indispensables para proteger al público, los trabajadores y al medio ambiente frente los efectos adversos de la exposición a las radiaciones ionizantes, es la evaluación cuantitativa de dichas exposiciones. Por ello, se definieron las magnitudes de protección radiológica.

La dosis absorbida es la magnitud física fundamental que permite cuantificar la energía impartida media por la radiación ionizante a la unidad de masa, en un determinado material. Sin embargo, la dosis absorbida no considera la forma en la que se distribuye la energía depositada en el material. Mediante la magnitud dosis absorbida podemos cuantificar, por ejemplo, la energía impartida media por unidad de masa en el tejido biológico, pero no es posible considerar la forma en la que se deposita o distribuye esa energía, digamos, en el interior de una célula o en el volumen de una macromolécula de ADN.

Los resultados disponibles sobre las investigaciones de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes indican que la distribución de la energía depositada, a escala celular y subcelular, guarda estrecha relación con la probabilidad de aparición de efectos estocásticos perjudiciales. Estas conclusiones evidenciaron la necesidad de definir nuevas magnitudes de protección radiológica para poder cuantificar la probabilidad de ocurrencia de los efectos biológicos estocásticos perjudiciales de las radiaciones ionizantes, o sea, para poder correlacionar la magnitud dosis absorbida con la probabilidad de ocurrencia de tales efectos.

Las magnitudes de protección radiológica permiten, por tanto, implementar el principio de la limitación de dosis, estableciendo valores que eviten la aparición de efectos deterministas o reacciones tisulares y acoten los riesgos debidos a los efectos estocásticos perjudiciales a niveles similares a los que existen en otras actividades y (o) circunstancias consideradas “normales” o aceptables por la sociedad.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología (ISR) y modificada con su nombre actual en 1950, se ocupa de elaborar recomendaciones en relación con la protección radiológica, incluyendo la limitación de dosis y la definición de las magnitudes y unidades que la sustentan. En este campo colabora con la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU), creada en 1925 con el objetivo de definir formalmente las magnitudes y unidades radiológicas, su uso apropiado y los métodos adecuados de medida.

En el año 2007 se publicó el informe 103 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, con las nuevas recomendaciones de la Comisión, donde se incluyen las definiciones actualizadas de las magnitudes de Protección Radiológica. Esta publicación, que sustituye el informe 60 de ICRP de 1990, ha sido considerada en la directiva europea 59 EURATOM del año 2013 y esta última transpuesta al RD 1029/2022 de 20 de diciembre.

5. HISTORIA

La normativa internacional que inició la normalización de las magnitudes y unidades en el campo de la Metrología tuvo su arranque cuando en el año 1875 diecisiete países firmaron la “Convención del Metro”, cuyo órgano de decisión es la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). Para asegurar la uniformidad mundial de las unidades de medida, ya sea por acción directa o presentando propuestas en la CGPM, se creó el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), con la coordinación internacional a cargo de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), ubicada en París.

La necesidad de establecer normas de protección contra los efectos biológicos perjudiciales de las radiaciones ionizantes se hizo patente a los pocos meses del descubrimiento de los rayos X, por Röntgen en 1895, y el comienzo del trabajo con elementos radiactivos en 1896. Como consecuencia del trabajo con radiaciones ionizantes, algunos operadores en este campo comenzaron a manifestar efectos nocivos. El análisis de síntomas patológicos de un conjunto de radiólogos, permitió establecer en 1922 que la incidencia de cáncer en este grupo de trabajo era significativamente más alta respecto a otros médicos, circunstancia que demostró la peligrosidad de las radiaciones ionizantes y la necesidad de establecer normas específicas de protección. Para establecer esas normas y poder cuantificar los procesos asociados a las radiaciones ionizantes era paso imprescindible y básico la definición de magnitudes radiológicas y de sus correspondientes unidades.

En 1925 se creó la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU), este organismo se ocupa de la definición formal de las magnitudes y unidades radiológicas así como de desarrollar recomendaciones internacionalmente aceptables acerca del uso de dichas magnitudes y los métodos adecuados de medida. Por otra parte, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología (ISR) y modificada con su nombre actual en 1950, se ocupa de establecer recomendaciones similares en relación con la protección radiológica, incluyendo la limitación de dosis con objeto de evitar la aparición de efectos deterministas o reacciones tisulares y acotar el riesgo de los efectos estocásticos. La ICRU y la ICRP colaboran en la elaboración de recomendaciones en el campo de la Protección Radiológica.

Los comienzos del BIPM no fueron excesivamente alentadores, ya que fue imposible armonizar los sistemas de magnitudes y unidades, hasta las reuniones de los años 1954 y 1960, en las que el denominado Sistema Internacional de Unidades (SI) tomó existencia legal y adquirió paulatinamente ámbito mundial, en especial en la comunidad científica. Desde esa fecha, el BIPM se encarga de promover el uso del SI.

Entre 1953 y 1962 la ICRU definió diferentes magnitudes radiológicas, entre ellas: la exposición, el kerma, la dosis absorbida, la actividad y el equivalente de dosis y sus correspondientes unidades el röntgen, el rad, el curio y el rem, respectivamente. Estas unidades no eran coherentes con el Sistema Internacional de Unidades (SI), por lo que en 1975 y a propuesta de la ICRU, la CGPM aceptó como unidad de actividad el becquerel (Bq) y como unidad de las magnitudes dosis absorbida y kerma, el gray (Gy). La unidad de la magnitud exposición no recibió un nombre especial como las anteriores, pasando a ser el C/kg. Por último y a propuesta de la ICRU se aceptó, en 1979, la unidad de la magnitud equivalente de dosis, el sievert (Sv).

La legislación europea establece que desde el 1 de enero de 1986 las mediciones de radiaciones ionizantes se expresen en unidades del Sistema Internacional (SI). El hecho de que se citen en este documento las unidades históricas obedece únicamente a la existencia de instrumentación de medida que aún presenta sus lecturas expresadas en ese tipo de unidades.

La definición formal y una descripción completa de las magnitudes radiológicas fundamentales o de uso general pueden encontrarse en el informe ICRU-85 del año 2011, que reemplaza al informe ICRU-60 del año 1998. Por otro lado, en 2007 se publicó el informe ICRP-103 con las nuevas recomendaciones de la ICRP, donde se incluyen las definiciones actualizadas de las magnitudes de Protección Radiológica. Esta publicación ha sido considerada en la directiva europea 2013/59 EURATOM ya transpuesta al RD 1029/2022 de 20 de diciembre, español.

6. MAGNITUDES Y UNIDADES

Las magnitudes pueden agruparse en cuatro categorías:

1. Magnitudes de Radiometría: Son las magnitudes que definen el campo de radiación en ciertos puntos de interés. Permiten cuantificar el número y energía de las partículas ionizantes, así como sus distribuciones espaciales y temporales.

2. Coeficientes de interacción: Son aquellas magnitudes asociadas con la interacción de la radiación con la materia. Permiten relacionar las magnitudes radiométricas con las magnitudes dosimétricas.

3. Magnitudes Dosimétricas: Son las magnitudes relacionadas con la medida de la energía depositada o absorbida y de su distribución. Estas magnitudes, en general, se obtienen como productos de las magnitudes de las dos categorías anteriores.

4. Magnitudes para la medida de la Radiactividad: Son las magnitudes destinadas a la cuantificación de la cantidad de sustancia o de material radiactivo y de los procesos de desintegración radiactiva.

5. Magnitudes de Protección Radiológica: Se definen para cuantificar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Parten de las magnitudes dosimétricas e incorporan factores de ponderación que consideran los tipos de radiación y los tejidos irradiados.

6.1. MAGNITUDES DE RADIOMETRÍA

Estas magnitudes tratan o con el número o con la energía de las partículas, lo que se refleja en sus nombres, por ejemplo: flujo o fluencia de partículas.

El número de partículas, N , es el número de las partículas que se emiten, transfieren o reciben.

Unidad: 1.

La energía radiante, R , es la energía (excluida la de la masa en reposo) que se emite, transfiere o recibe.

Unidad SI: J.

El flujo de partículas, N , es el cociente de dN por dt , donde dN es el incremento del número de partículas en el intervalo de tiempo dt .

Unidad SI: s^{-1}

El flujo de energía, R , es el cociente de dR por dt , donde dR es el incremento de la energía radiante en el intervalo de tiempo dt .

Unidad SI: W

La fluencia de partículas, Φ , en un punto del espacio, es el cociente de dN por da , donde dN es el número de partículas incidentes sobre una esfera centrada en dicho punto, de sección recta, da .

Unidad SI: m^{-2}

La distribución de la fluencia de partículas en energía, FE , es el cociente de $dF(E)$ por dE , donde $dF(E)$ es la fluencia de partículas con energías entre E y $E + dE$

Unidad SI: $m^{-2}J^{-1}$

La distribución angular de la fluencia de partículas, FW , es el cociente de $dF(W)$ por dW , donde $dF(W)$ es la fluencia de partículas que se propagan dentro de un ángulo sólido dW , en una dirección determinada.

Unidad SI: $m^{-2} \cdot sr^{-1}$

La fluencia de energía, Y , es el cociente de dR por da , donde dR es la energía radiante incidente sobre una esfera de sección recta da centrada en dicho punto.

Unidad SI: $J \cdot m^{-2}$

La distribución angular de la fluencia de energía, $\square\square$, es el cociente de $d\square(\square)$ por $d\square$, donde $d\square(\square)$ es la fluencia de energía de las partículas que se propagan dentro de un ángulo sólido $d\square$, en una dirección determinada.

Unidad SI: $J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$

La tasa de fluencia de partículas, \square , es el cociente del incremento de la fluencia de partículas, $d\square$, por el intervalo de tiempo, dt , en el que se produce.

Unidad SI: $m^{-2} s^{-1}$

La tasa de fluencia de energía, Ψ , es el cociente de $d\square$ por dt , donde $d\square$ es el

incremento de la fluencia de energía en el intervalo de tiempo dt .

Unidad SI: $J m^{-2} s^{-1}$ ($W m^{-2}$)

Esta magnitud se conoce también bajo el nombre de densidad del flujo de energía.

6.2 COEFICIENTES DE INTERACCIÓN

Cuando la radiación ionizante incide en un medio determinado ocurren diferentes procesos de interacción. En una interacción se altera la energía, la dirección, o ambas propiedades de la partícula incidente. La interacción puede conllevar la emisión de una o de varias partículas secundarias. La probabilidad de tales interacciones se cuantifica mediante los coeficientes de interacción. Cada coeficiente de interacción se refiere a un proceso de interacción específico y a un tipo y energía de la radiación específicos, en un material determinado. El coeficiente de interacción fundamental es la sección eficaz de interacción. El resto de los coeficientes de interacción puede ser expresado en términos de la sección eficaz de interacción.

La sección eficaz de interacción para un blanco determinado y para una interacción particular, producida por una partícula cargada o no cargada de un tipo y energía determinados, es el cociente de P por Φ , donde P es la probabilidad de interacción para el blanco de que se trate cuando está sometido a una fluencia de partículas, Φ .
Unidad SI: m^2

La unidad especial de la sección eficaz es el barn, b. $1b = 10^{-28} m^2$

La probabilidad de interacción, P , se entiende como el número promedio de interacciones que ocurren por cada elemento del blanco sometido a la fluencia Φ . La definición de la magnitud sección eficaz puede representarse geométricamente como el área del blanco, con la que puede “chocar” una partícula incidente, cuya fluencia es $1 m^{-2}$, es decir, cuando una partícula incide en $1 m^2$ del material del blanco. Si multiplicamos entonces la sección eficaz de interacción por la fluencia de partículas incidentes y por el número de entidades del blanco por unidad de volumen (por ejemplo, átomos por cada cm^3), obtenemos el número de interacciones que ocurren por unidad de recorrido de las partículas incidentes.

Existen varios **coeficientes de interacción**: Coeficiente de atenuación lineal, coeficiente de atenuación másico, coeficiente de transferencia de energía másico, coeficiente de absorción de energía másico, poder de frenado másico, transferencia lineal de energía, energía media disipada, alcance, recorrido libre medio.

6.3. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS

Concebidas para proporcionar una medida física que se correlacione con los efectos reales o potenciales de la radiación, estas magnitudes y unidades fueron descritas por última vez en el reporte ICRU-85 del año 2011. En reportes del Organismo Internacional de Energía Atómica, se les denomina también magnitudes y unidades “físicas”. Estas magnitudes son:

Exposición (X): corresponde al cociente del valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire (dQ), cuando todos los electrones liberados por fotones, en un volumen elemental de aire (dm) son completamente frenados en dicho medio. Se expresa en unidades de $C\cdot kg^{-1}$ o la unidad especial denominada Röentgen (R), equivalente a $2,58 \cdot 10^{-4} C\cdot kg^{-1}$.

Tasa de exposición (\dot{X}): se define como la exposición producida en cierta masa de aire, en un periodo de tiempo definido. Se expresa en $C\cdot kg^{-1}\cdot s^{-1}$ o $R\cdot s^{-1}$.

Kerma (K): *acrónimo de kinetic energy release in matter*. Representa la suma de energía cinética inicial de todas las partículas ionizantes con carga, liberadas por radiación ionizante sin carga, en una masa dm . Se expresa en unidades de $J\cdot kg^{-1}$ o la unidad especial denominada Gray (Gy).

Tasa de kerma : corresponde al kerma producido en un periodo de tiempo determinado, expresado en unidades de $J\cdot kg^{-1}\cdot s^{-1}$ o $Gy\cdot s^{-1}$.

Dosis absorbida (D): se define como el cociente de la energía media () impartida por la radiación ionizante a una masa (dm) de materia. Se expresa en unidades de $J\cdot kg^{-1}$ o la unidad especial denominada Gray (Gy).

Tasa de dosis absorbida (\dot{D}): corresponde a la variación de dosis absorbida (dD) en un intervalo de tiempo (dt). Se expresa en $J\cdot kg^{-1}\cdot s^{-1}$ o $Gy\cdot s^{-1}$.

6.4. MAGNITUDES DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

A) CONCEPTOS BÁSICOS

La transferencia lineal de energía (Linear Energy Transfer, LET) o poder de frenado lineal electrónico restringido, L_{Δ} , de un material para partículas cargadas, es el cociente de dE_{Δ} por dl , donde dE_{Δ} es la energía perdida promedio por las partículas cargadas debidas a las interacciones con los electrones al atravesar una distancia dl , menos la suma promedio de las energías cinéticas de todos los electrones liberados en tales interacciones, con energías cinéticas que excedan el valor Δ .

$$L_{\Delta} = dE_{\Delta}/dl$$

Unidad en el SI: J m⁻¹

En el transcurso de este tema nos referiremos a la transferencia lineal de energía LET, como L_{∞} .

$$L_{\infty} = dE_{\infty}/dl$$

La Eficacia Biológica Relativa (RBE del inglés Relative biological effectiveness) se utiliza fundamentalmente en Radiobiología. La eficacia biológica relativa de un tipo de radiación determinado se define como el cociente de la dosis absorbida de la radiación de referencia de baja transferencia lineal de energía y la dosis absorbida del tipo de radiación del que se trata, que producen un efecto biológico idéntico.

RBE = Dosis absorbida de radiación referencia / Dosis abs radiación dada que produce el mismo daño
Como radiación de referencia se suelen utilizar los fotones de baja LET, es decir, fotones que producen electrones secundarios de baja transferencia lineal de energía. Por ejemplo: fotones de 662 keV (¹³⁷Cs), 1,25 MeV (⁶⁰Co) y fotones de RX de más de 200 kV.

La eficacia biológica relativa depende de la dosis absorbida, la tasa de dosis absorbida, el efecto biológico, el tejido o tipo de células, el fraccionamiento de a dosis absorbida, el tipo de radiación y su energía. En protección radiológica, tiene un interés particular la RBE para efectos estocásticos a dosis bajas (RBEM).

B) MAGNITUDES LIMITADORAS

Las definiciones de las magnitudes que aparecen en lo que sigue proceden del informe 103 de ICRP, publicado en el año 2007: "Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica". Estas definiciones, sin embargo, no difieren sustancialmente de las que aparecen en la publicación 60 de ICRP, del año 1990.

En el transcurso del tema se definirán fundamentalmente dos tipos de magnitudes de protección radiológica: las magnitudes limitadoras o primarias y las magnitudes operacionales.

Las **magnitudes limitadoras**, también conocidas como primarias, son magnitudes en cuyas unidades se han recomendado o se recomienda expresar los límites de dosis.

Estas magnitudes tienen una desventaja práctica y es que son esencialmente inmedibles en un individuo determinado colocado en un campo de radiación arbitrario.

El Factor de calidad de la radiación: El factor de calidad, Q , es un factor convencional adimensional, por el que se multiplica la dosis absorbida en un punto para tener en cuenta la eficacia biológica relativa para la inducción de efectos estocásticos de las partículas cargadas que han producido esa dosis absorbida. El factor de calidad de la radiación fue introducido por la ICRP en los años 60 para definir las magnitudes de Protección Radiológica. El ICRP establece por convención el valor numérico de $Q(L)$ como una función de la transferencia lineal de energía, L , en agua.

En la publicación 103 de ICRP se ha mantenido la función $Q(L)$ dada en las recomendaciones anteriores de ICRP, en su publicación 60. Para valores de $L < 10$ keV/pm el factor de calidad es igual a la unidad. Este es el caso de los electrones, con energías superiores a 1 keV. Para los protones entre 1 keV y 10 MeV el factor de calidad puede variar entre 1 y algo más de 20.

Equivalente de dosis, H : La magnitud “Equivalente de dosis” es una magnitud fundamental de Protección Radiológica, que se definió en el año 1962 de forma conjunta por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU) y por la Comisión de Protección Radiológica (ICRP), con el objetivo de poder correlacionar la magnitud física “Dosis absorbida” con la probabilidad de aparición de efectos biológicos estocásticos perjudiciales y poder establecer límites apropiados para la exposición de las personas a las radiaciones ionizantes. La magnitud equivalente de dosis es la base de las magnitudes limitadoras de Protección Radiológica. El nombre de esta magnitud “Dose equivalent” fue traducido erróneamente al castellano, en los años 60, como “Dosis equivalente”.

El equivalente de dosis, H , en un punto del tejido biológico se define como:

$$H=Q*D$$

La unidad en el SI= $J*kg^{-1}$ (Sv)

Dónde: D es la dosis absorbida en el punto de interés del tejido y Q es el denominado factor de calidad de la radiación.

Dosis absorbida promedio, D_T :

La magnitud dosis absorbida se define para poder asignar un valor específico en cualquier punto de la materia. Sin embargo, en aplicaciones prácticas las dosis absorbidas a menudo se promedian sobre volúmenes de tejido más grandes. Se acepta pues que, para dosis bajas, el valor medio de la dosis absorbida en un órgano o tejido determinado, puede ser correlacionado con el detrimento debido a los efectos estocásticos de las radiaciones en todas las partes de ese órgano o tejido, con exactitud suficiente para los propósitos de la protección radiológica.

En la práctica la dosis absorbida media en un órgano o tejido T , se escribe habitualmente D_T . El promediado de las dosis absorbidas en los diferentes órganos y tejidos del cuerpo humano y su suma ponderada constituyen la base para la definición de las magnitudes de protección empleadas para limitar los efectos estocásticos a dosis bajas. Esta aproximación está basada en la suposición de una

relación lineal sin umbral para la relación dosis-respuesta (modelo LNT) y permite la adición de las dosis debidas a las exposiciones externas e internas. La definición de todas las magnitudes para la protección está basada en la suposición fundamental del modelo lineal sin umbral LNT en la región de las dosis bajas.

D_T , es la dosis absorbida promediada sobre un órgano o tejido T y viene dada por el cociente entre la energía media total impartida en ese órgano o tejido (E_T) y la masa de dicho órgano o tejido (m_T):

$$D_T = E_T / m_T$$

La unidad para la dosis absorbida media es el julio por kilogramo (J/kg), y recibe el nombre especial de gray (Gy).

Dosis equivalente en un órgano o tejido, H_T : es la dosis absorbida media en un órgano o tejido, D_T , ponderada por un factor (w_R) que es función del tipo y calidad de la radiación implicada (R):

$$H_T = \sum w_R * D_{T,R}$$

El sumatorio se extiende a todos los tipos de radiación involucrados.

La unidad para la dosis equivalente es el julio por kilogramo (J/kg), y recibe el nombre especial de sievert (Sv).

El valor de w_R puede ser considerado como un factor que representa la calidad de la radiación promediada sobre los diferentes órganos y tejidos del cuerpo. Se obtiene a partir de los datos de RBE en estudios in-vivo y del factor de calidad promedio en los diferentes tejidos y órganos del cuerpo, a partir de la función $Q(L)$, obtenida de los estudios in-vitro. Los w_R ofrecen valores representativos de los datos conocidos, son suficientemente exactos para los fines de la Protección Radiológica, son seleccionados mediante el juicio de expertos y no tienen valores de incertidumbre asociados.

La ICRP especifica los valores numéricos de w_R en función del tipo de partícula y energía.

Tipo de radiación y energía	w_R
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión e iones pesados	20
Neutrones	Ver explicación
En el caso de la exposición externa los valores se relacionan con la radiación incidente sobre el organismo y, en el caso de la exposición interna, con la radiación emitida por la fuente.	

El factor de ponderación de radiación para neutrones presenta una dependencia con la energía y se expresan de la siguiente manera:

$$wR = 2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E)]^{2/6}} \text{ para } E < 1 \text{ MeV}$$

$$wR = 5,0 + 17,0 e^{-[\ln(2E)]^{2/6}} \text{ para } 1 \text{ MeV} < E < 50 \text{ MeV}$$

$$wR = 2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0.04E)]^{2/6}} \text{ para } E > 50 \text{ MeV}$$

Dosis Efectiva, E: es la suma de las dosis equivalentes (H_T) en todos los órganos y tejidos del organismo ponderadas por un factor (W_T) que depende del órgano o tejido irradiado. Viene dada por la siguiente expresión:

$$E = \sum W_T * H_T$$

La unidad para la dosis efectiva es el julio por kilogramo (J/kg), que recibe el nombre especial de sievert (Sv).

La suma se realiza sobre todos los órganos y tejidos del cuerpo humano considerados en la definición de E y para los cuales se incluyen valores de w_T , según las recomendaciones de la publicación 103 de ICRP. Esta magnitud se define tanto para la exposición externa como interna.

TEJIDO U ÓRGANO	W_T	$\sum W_T (1)$
Médula ósea, colón, pulmón, estómago, mama	0.12	0.60
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0.04	0.16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivares, piel	0.01	0.04
Resto de órganos (2)	0.12	0.12

(1) Los factores w_T representan la contribución relativa de cada órgano o tejido al detrimento de la salud resultante de una exposición total del organismo y, por ello, dichos factores de ponderación deben sumar la unidad.

(2) Se incluyen los siguientes tejidos (14 en total): glándulas suprarrenales, región extra-torácica, vesícula biliar, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo y útero.

Los valores de w_T se han establecido con base en una población de referencia con igual número de miembros de cada sexo y un rango amplio de edades y, por ello, de cara al cálculo de la dosis efectiva, dichos valores son aplicables tanto a los trabajadores expuestos como a los miembros del público, de uno y otro sexo en ambos casos.

Los factores de ponderación de tejido constituyen una herramienta que solo debe emplearse con fines de protección radiológica y que, por tanto, no deben utilizarse con otros propósitos como, por ejemplo, juzgar una posible relación causa-efecto entre la exposición a radiaciones y la aparición de determinadas enfermedades.

Dosis equivalente comprometida y dosis efectiva comprometida:

Los radionucleidos incorporados en el cuerpo humano irradian los tejidos durante periodos de tiempo que dependen tanto de su periodo de semidesintegración físico como de su retención biológica dentro del cuerpo. Por lo tanto, pueden dar lugar a dosis en los tejidos del cuerpo durante periodos cortos, o a lo largo de la vida. Por ejemplo, en el caso de incorporaciones de agua tritiada, debido a su corto semiperiodo biológico de retención (10 días; periodo de semidesintegración físico de 12,3 años), toda la dosis es producida esencialmente en los 2-3 meses después de la incorporación. Sin embargo, en el caso del ^{239}Pu , tanto sus tiempos de retención biológica como su periodo de semidesintegración físico (24.000 años) son muy largos, y la dosis se acumulará a lo largo del resto de la vida del individuo contaminado.

Dosis equivalente comprometida, $H_T(\tau)$ en un órgano o tejido T se define como la integral de la tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido T:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

La unidad en el SI es el $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Sv).

Dosis efectiva comprometida, $E(\square)$, se define como:

$$E(\square) = \sum W_T * H_T(\square)$$

La unidad en el SI es el $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Sv).

Para los trabajadores, la dosis comprometida se evalúa normalmente para el periodo de 50 años posterior a la incorporación. El periodo de integración de 50 años es un valor aproximado considerado por ICRP como la esperanza de vida de una persona joven que empieza su vida laboral. La dosis efectiva comprometida por incorporación se utiliza también en estimaciones prospectivas de dosis para miembros del público. En estos casos se considera un periodo de integración de 50 años para los adultos. Para lactantes y niños la dosis se evalúa hasta los 70 años de edad.

C) MAGNITUDES OPERACIONALES.

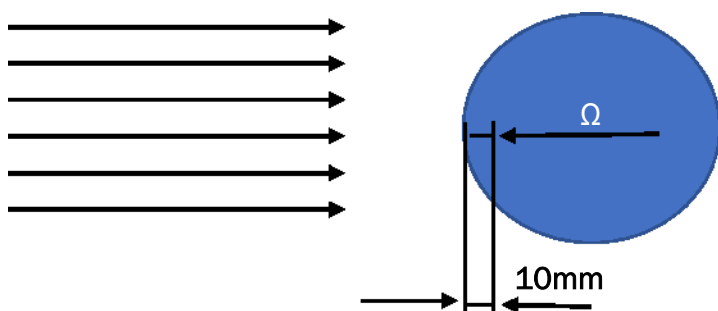
Dado que las magnitudes limitadoras no son medibles en la práctica, éstas deben ser estimadas mediante el empleo de otras **magnitudes denominadas operacionales**, que pueden ser medidas con instrumentos relativamente sencillos y proporcionan estimados razonablemente conservadores de las magnitudes limitadoras y así poder verificar el cumplimiento de los límites de dosis.

-Magnitudes operacionales para la exposición externa:

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las magnitudes operacionales para la exposición externa:

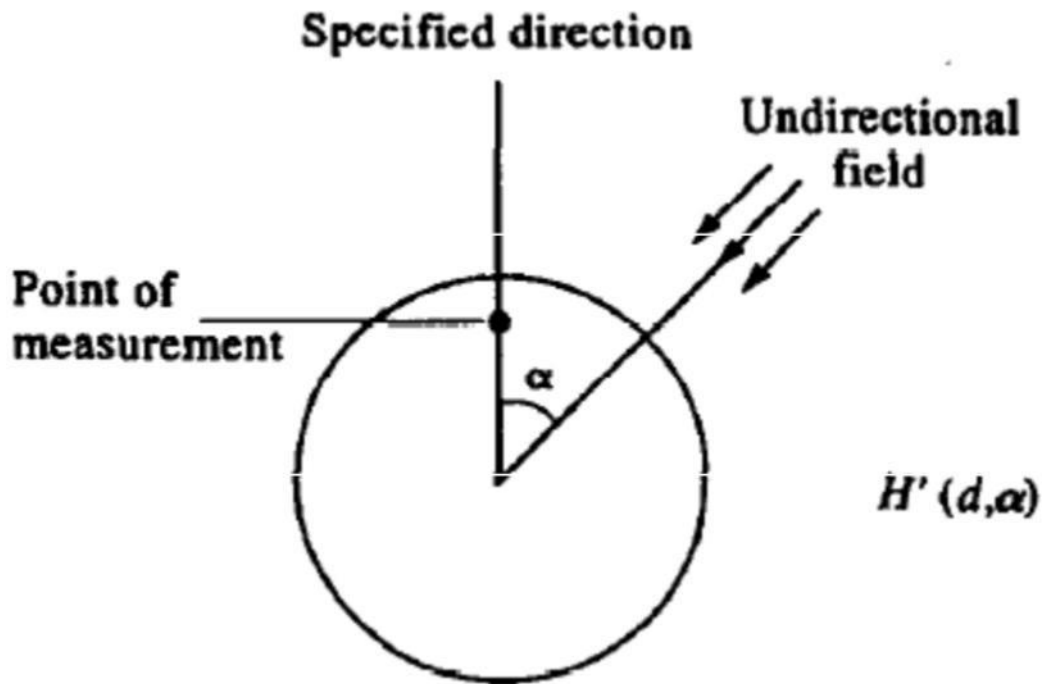
Cometido	Magnitudes operacionales para:	
	Vigilancia de área	Vigilancia individual
Control de la dosis efectiva	Equivalente de dosis ambiental, $H^*(10)$	Equivalente de dosis personal, $H_p(10)$
Control de la dosis a la piel, las manos y pies	Equivalente de dosis direccional, $H'(0.07, \Omega)$	Equivalente de dosis personal, $H_p(0.07)$
Control de la dosis en cristalino	Equivalente de dosis direccional, $H'(3, \Omega)$	Equivalente de dosis personal, $H_p(3)$

Equivalente de dosis ambiental, $H^*(10)$: El equivalente de dosis ambiental, $H^*(10)$, en un punto de un campo de radiación, es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm y sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad para el equivalente de dosis ambiental es el julio por kilogramo (J/kg), y recibe el nombre especial de sievert (Sv).



Equivalente de dosis direccional, $H'(0.07, \Omega)$: $H'(d, \Omega)$, en un punto de un campo de radiación es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo expandido en la esfera ICRU a una profundidad d y en un radio en la dirección Ω especificada. Para la superficie de la piel $d = 0,07$ mm y para el cristalino del ojo de adopta una profundidad $d = 3$ mm. $H'(d, \Omega)$ se escribe luego como $H'(0,07, \Omega)$ o $H'(3, \Omega)$.

La unidad en el SI es el J/kg, y recibe el nombre de Sievert (Sv).



Equivalente de dosis personal, $H_p(d)$: El equivalente de dosis personal, $H_p(10)$, es el equivalente de dosis en tejido (blando) ICRU (con una densidad de 1 g cm^{-3} , y composición másica: 76,2% oxígeno, 11,1% carbono, 10,1% de hidrógeno y 2,6% nitrógeno) a una profundidad d y por debajo de un punto especificado del cuerpo humano. El punto especificado lo determina usualmente la posición en la que se porta el dosímetro personal. Para la evaluación de la dosis efectiva se recomienda una profundidad $d = 10 \text{ mm}$, y para evaluar la dosis equivalente en la piel, manos y pies $d = 0,07 \text{ mm}$. En los casos especiales en los que se precise vigilancia del cristalino se ha propuesto como apropiada una profundidad $d = 3 \text{ mm}$.

La unidad SI de la magnitud $H_p(10)$ es el J/kg , siendo su nombre especial, sievert (Sv).

Otros términos que se mencionan en las magnitudes anteriores son:

Campo expandido: es un campo de radiación hipotético en el que su fluencia y su distribución angular y energética tienen en todo el volumen de interés los mismos valores que en el punto de referencia del campo de radiación real.

Campo alineado y expandido: es un campo expandido en el que su fluencia es unidireccional.

Esfera ICRU: es el maniquí de referencia utilizado por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación para la definición de las magnitudes operacionales empleadas en la estimación de las dosis por exposición externa. Consiste en una esfera de 30 cm de diámetro, hecha de material equivalente a tejido con una densidad de 1 g/cm^3 y una composición en masa de 76,2% de oxígeno, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrógeno y 2,6% de nitrógeno.

Magnitudes operacionales para la exposición interna

No ha sido definida ninguna magnitud operacional específica para proveer una evaluación de la dosis equivalente o la dosis efectiva para la dosimetría interna. En general, se realizan diversas mediciones de los radionucleidos incorporados y se utilizan modelos biocinéticos para estimar la incorporación de radionucleidos. La dosis equivalente comprometida o la dosis efectiva comprometida es calculada a partir de la incorporación usando los coeficientes de dosis de referencia (las dosis por unidad de incorporación, Sv Bq⁻¹) recomendados por la ICRP.

La actividad incorporada, *I*, o incorporación es la cantidad de un determinado radionucleido introducido en el cuerpo humano por ingestión, inhalación o absorción a través de la piel. La actividad incorporada se utiliza a menudo como una magnitud operacional para la estimación de la dosis efectiva. En general no puede medirse directamente y tiene que determinarse a partir de otros datos, tales como medidas de cuerpo entero o parcial, estimaciones de actividad en excretas o medidas ambientales tales como muestras de aire, aplicando modelos biocinéticos de distribución de los radionucleidos en el organismo humano, como por ejemplo, el modelo del sistema respiratorio dado en la publicación 66 de ICRP o el modelo del tracto alimentario en la publicación 100 de ICRP. En el caso de accidentes, la actividad también puede introducirse en el cuerpo a través de heridas. Para estimar la actividad incorporada por esta vía se ha definido un modelo por el National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), en su publicación 156.

7. APLICACIÓN DE LAS MAGNITUDES OPERACIONALES

Exposición ocupacional

En los casos de exposición ocupacional, las dosis pueden deberse a fuentes de radiación externas e internas. Para la exposición externa la vigilancia individual se lleva a cabo normalmente mediante la medida del equivalente de dosis personal *H_p(10)*, utilizando un dosímetro personal y tomando este valor medido como una estimación aceptable del valor de la dosis efectiva bajo la hipótesis de una exposición uniforme a todo el cuerpo. En caso de exposición interna las dosis efectivas comprometidas se determinan en base a la estimación de las actividades incorporadas de los radionucleidos a partir de medidas de bioensayo o de otras magnitudes (p. ej. actividad retenida en el cuerpo, o actividad en excretas de 24 horas) y aplicando los coeficientes de dosis apropiados.

Por motivos prácticos los valores de ambos tipos de magnitudes deben combinarse en la estimación del valor de la dosis efectiva total, para demostrar el cumplimiento de los límites y de las restricciones de dosis.

En la mayor parte de las situaciones de exposición ocupacional la dosis efectiva, *E*, puede ser obtenida a partir de magnitudes operacionales utilizando la fórmula siguiente:

$$E \cong H_p(10) + E(50)$$

Donde: *H_p(10)* es el equivalente de dosis personal por exposición externa y *E(50)* es la dosis efectiva comprometida por exposición interna.

Para la estimación de la dosis efectiva por exposición externa empleando, de acuerdo con la ecuación anterior, un dosímetro personal que mida *H_p(10)*, es

necesario que el dosímetro personal se lleve puesto en una posición sobre el cuerpo que sea representativa de la exposición del cuerpo.

Si el valor de dosis medido está claramente por debajo del límite anual de dosis, el valor de $H_p(10)$ se toma normalmente como una estimación suficiente de la dosis efectiva. Para dosis personales elevadas, cercanas o excediendo el límite anual de dosis, o en campos de radiación fuertemente no homogéneos este procedimiento puede que no sea suficiente, por lo que sería necesario considerar con cuidado la situación real de la exposición en el cuerpo humano a la hora de estimar la dosis efectiva. Puede que sea necesario tener en cuenta también la utilización de equipamiento de protección personal y otras medidas de protección.

En el caso especial de exposición de las tripulaciones aéreas a la radiación cósmica, la vigilancia radiológica individual para la estimación de la dosis efectiva usualmente no se lleva a cabo con dosímetros personales que midan $H_p(10)$. Puede que haya otros ambientes de trabajo en los que no se utilicen dosímetros personales. En estos casos la dosis efectiva por exposición externa puede estimarse a partir de la medida del equivalente de dosis ambiental, $H^*(10)$, o mediante cálculo utilizando las propiedades del campo de radiación.

En los casos de exposición externa a radiación poco penetrante, por ejemplo, rayos β , $H_p(10)$ no estimará suficientemente la dosis efectiva. En tales casos, puede utilizarse $H_p(0,07)$ para estimar la dosis equivalente en piel y su contribución a la dosis efectiva aplicando el factor de ponderación $w_T = 0,01$ para la piel.

En los casos de exposición externa a partículas beta, la irradiación del cuerpo puede ser no homogénea, incluso para dosis efectivas por debajo de los límites, podrían producirse altas dosis equivalentes en zonas localizadas de la piel, pudiendo ser posible la aparición de reacciones tisulares. Por esta razón, el límite anual de dosis equivalente en la piel (500 mSv para exposición ocupacional) corresponde a la dosis equivalente en piel localizada, definida como la dosis equivalente media en 0,07 mm de profundidad promediada sobre cada cm² de la piel.

La dosis efectiva comprometida, $E(50)$, por incorporación de radionucleidos se estima mediante:

$$E(50) = \sum_j e_{j,inh}(50) \cdot I_{j,inh} + \sum_j e_{j,ing}(50) \cdot I_{j,ing}$$

Dónde: $e_{j,inh}(50)$ es el coeficiente de dosis efectiva comprometida para incorporaciones por inhalación de un radionucleido j , $I_{j,inh}$ es la actividad incorporada por inhalación de un radionucleido j , $e_{j,ing}$ es el coeficiente de dosis efectiva comprometida para incorporaciones por ingestión de un radionucleido j , $I_{j,ing}$ es la actividad incorporada por ingestión de un radionucleido j . En el cálculo de la dosis efectiva para radionucleidos específicos hay que tener en cuenta las características del material introducido en el cuerpo.

Los coeficientes de dosis utilizados en la ecuación anterior son aquellos especificados por la ICRP, sin modificaciones respecto a las características anatómicas, fisiológicas y biocinéticas del hombre y de la mujer de referencia. Sin embargo, hay que tener en cuenta el diámetro aerodinámico de la mediana de la

actividad (AMAD) del aerosol inhalado y la forma química de las partículas a las que un determinado radionucleido está agregado.

La dosis efectiva asignada en el historial dosimétrico del trabajador, “la dosis para el registro” es el valor de la dosis efectiva que la Persona de Referencia experimentaría debido a los campos de radiación y a las actividades incorporadas por el trabajador. El periodo comprometido de 50 años está relacionado con la esperanza de vida de una persona que empieza su vida laboral.

Puede ser necesario evaluar la exposición a aerosoles conteniendo radionucleidos de gases nobles en el lugar de trabajo, a añadir a la indicada por $H_p(10)$. En tales casos es necesario incluir en la ecuación anterior un término representando el producto de la concentración del aerosol del gas noble integrada en el tiempo por un coeficiente de dosis efectiva para la llamada exposición de inmersión (ICRP 119).

Exposición de público

Las exposiciones del público pueden deberse a fuentes naturales de radiación que son susceptibles de modificación por la actividad humana, a instalaciones tecnológicas o a una combinación de ambos tipos de fuentes.

La dosis efectiva anual de los miembros del público es la suma de la dosis efectiva obtenida durante un año por exposición externa y de la dosis efectiva comprometida por incorporación de radionucleidos durante ese mismo año.

Normalmente la dosis efectiva no se obtiene mediante la vigilancia radiológica individual como en el caso de la exposición ocupacional, sino que se determina principalmente mediante medidas ambientales, datos de los hábitos de la población y modelización.

La dosis efectiva puede estimarse a partir de:

- Simulación y predicción de los niveles de los radionucleidos en efluentes provenientes de la instalación o de la fuente durante el periodo de diseño,
- Vigilancia radiológica de los efluentes y de los niveles de radiación durante el periodo operacional; y
- Modelización radioecológica (análisis de la vía de transporte en el medio ambiente, p. ej. liberación de radionucleidos y transporte de los mismos a través del suelo a las plantas, a los animales y a los humanos).

Las exposiciones externas de los individuos pueden ocurrir debido a radionucleidos liberados desde instalaciones, presentes en el aire, en el suelo o en el agua. Las dosis efectivas pueden calcularse a partir de concentraciones de actividad en el medio ambiente mediante modelización y computación, aplicando coeficientes de conversión de dosis.

Las exposiciones internas pueden ocurrir por inhalación de radionucleidos en el aire procedentes de una nube, por inhalación de radionucleidos resuspendidos y por ingestión de comida o agua contaminadas. La dosis efectiva comprometida puede calcularse a partir de los niveles estimados de actividad incorporada, aplicando los coeficientes de dosis aplicables.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
2. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40 (2-5).
3. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.).
4. ICRU Report 95, 2020. Operational Quantities for External Radiation Exposure.
5. Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
6. Curso de experto en protección radiológica. CIEMAT, 2019.