

Magnitudes y Unidades Fundamentales para la Radiación Ionizante

LOS TRADUCTORES

Diego Eduardo Burgos Trujillo
Jefe de Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica
Hospital Universitario "San Cecilio". Granada

José Manuel Reinoso Cobo
Radiofísico
Complejo Hospitalario de Jaén. Jaén

Javier González González
Radiofísico
Complejo Hospitalario Torrecárdenas. Almería

Karina Matilde Tang Guin
Traductora

NOTAS DE LOS TRADUCTORES

Aunque hemos tratado de ser lo más fieles posible al original, nos hemos permitido unas licencias en el formato con objeto de mejorar su legibilidad:

- Hemos preferido no utilizar doble columna en algunas partes.
- El tipo de letra del texto es Arial en lugar de Times, aunque se ha mantenido el tipo Times para las ecuaciones.
- A las tablas se les ha dado formato libre por claridad y comodidad en su maquetación.

Se han corregido algunos errores del original, como numeración incorrecta de ecuaciones o definición de magnitudes en las tablas resumen.

Se ha preferido el símbolo ε al símbolo ϵ en las magnitudes correspondientes a la deposición de energía por no disponer del segundo en el editor de ecuaciones.

© SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA MÉDICA

Impresión y encuadernación:

Editorial:

Depósito Legal:

Magnitudes y Unidades Fundamentales para la Radiación Ionizante

Publicación: 30 de Diciembre de 1998
Edición española: 1 de junio de 2003

COMISIÓN INTERNACIONAL PARA
LAS UNIDADES Y MEDIDAS DE LA RADIACIÓN
7910 WOODMONT AVENUE
BETHESDA, MARYLAND 20814
U.S.A.

LA COMISIÓN INTERNACIONAL PARA LAS UNIDADES Y MEDIDAS DE LA RADIACIÓN

PARTICIPANTES EN LA ELABORACIÓN DE ESTE INFORME

Miembros de la Comisión durante la Elaboración de este Informe

A. ALLISY, *Presidente*
A. WAMBERSIE, *Vice Presidente*
R. S. CASWELL, *Secretario*
K. DOI
L. FEINENDEGEN
M. INOKUTI
I. ISHERWOOD
J. R. MALLARD
H. PARETZKE
H. H. ROSSI
G. F. WHITMORE
L.S. TAYLOR, *Presidente Honorario y Miembro Emérito*

Miembros de la Comisión Actual

A. WAMBERSIE, *Presidente*
P. DELUCA, *Vice Presidente*
R. S. CASWELL, *Secretario*
K. DOI
L. FEINENDEGEN
M. INOKUTI
W. KALENDER
H. MENZEL
R. MICHAEL
H. PARETZKE
S. SELTZER
G. F. WHITMORE
L.S. TAYLOR, *Presidente Honorario y Miembro Emérito*
H. O. WYCKOFF, *Presidente Honorario*
A. ALLISY, *Presidente Honorario*

Consejero Científico Principal

H. H. ROSSI

Secretario

W. R. NEY

Comité

A. ALLISY, *Presidente*
Bureau International des Poids et Mesures
Sèvres, France
W. A. JENNINGS
National Physical Laboratory
Teddington, Middlesex, United Kingdom
A. M. KELLERER
Strahlengbiologisches Institut der Universität München
Munich, Germany
J. W. MÜLLER
Bureau International des Poids et Mesures
Sèvres, France
H. H. ROSSI
Upper Nyack, New York, U.S.A.
S. M. SELTZER,
National Institut of Standards and Technology
Gaithersburg, Maryland, U.S.A.

Consejero Científico del Comité

H. O. WYCKOFF
Mitchellville, Maryland, U.S.A.

Consultor del Comité

D. BURNS
Bureau International des Poids et Mesures
Sèvres, France

Editor Jefe de ICRU NEWS

H. G. EBERT

Consejero financiero de la Comisión

O. LINTON

La Comisión desea expresar su agradecimiento a las personas involucradas en la elaboración de este informe, por el tiempo y el esfuerzo dedicado a esta tarea, y expresar su agradecimiento a las organizaciones a las cuales están vinculados.

Prefacio

La Comisión Internacional para las Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU), desde sus inicios en 1925, ha tenido como principal objetivo el desarrollo de recomendaciones que puedan ser aceptadas internacionalmente, relativas a:

1. Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad.
2. Procedimientos apropiados para la medida y aplicación de estas magnitudes en radiología y radiobiología clínica.
3. Datos físicos necesarios para la aplicación de estos procedimientos, cuyo uso tiende a asegurar uniformidad en los informes.

Asimismo, la comisión considera y hace recomendaciones similares en el campo de la protección radiológica. En este sentido, su trabajo se lleva a cabo en estrecha cooperación con la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

Propósito

La ICRU se esfuerza en recopilar y evaluar los datos e informaciones más recientes, relacionados con los problemas de la medida de la radiación y la dosimetría, y en recomendar los valores y técnicas más aceptables para su uso actual.

Las recomendaciones de la Comisión se mantienen en permanente revisión a fin de estar al día en el rápido desarrollo del uso de la radiación.

La ICRU opina que es responsabilidad de las organizaciones nacionales introducir sus propios y detallados procedimientos técnicos para el desarrollo y mantenimiento de las normas. Sin embargo, insta a que todos los países se adhieran, en la medida de lo posible, a los conceptos básicos sobre magnitudes y unidades de radiación recomendados internacionalmente.

La Comisión cree que su responsabilidad es desarrollar un sistema de magnitudes y unidades con el mayor rango posible de aplicabilidad. Ocasionalmente, podrían surgir situaciones en las que sería aconsejable una solución particular a un problema concreto. Sin embargo, en general, la Comisión cree que las acciones basadas en la conveniencia son desaconsejables a largo plazo, e intenta basar sus decisiones en las ventajas de mayor proyección que se esperan obtener.

La ICRU invita y agradece los comentarios y sugerencias constructivas respecto a sus recomendaciones e informes, los cuales deben ser remitidos al presidente.

Programa actual

La Comisión reconoce su obligación de facilitar guías y recomendaciones en las áreas de radioterapia, protección radiológica y en recopilar datos importantes para estos campos y para la investigación científica y aplicación industrial de las radiaciones. La Comisión se está centrando cada vez más en los problemas de protección al paciente y en la evaluación de la calidad de la imagen en radiología diagnóstica. Estas actividades no merman el compromiso que ICRU tiene de proporcionar un conjunto rigurosamente definido de magnitudes y unidades útil para una gran variedad de tentativas científicas.

Actualmente, la Comisión está comprometida en la elaboración de informes ICRU que tratan los siguientes asuntos:

- Estándares de Dosis Absorbida para Irradiación con Fotones y su Divulgación*
- Evaluación de la Calidad de Imagen en Medicina Nuclear*
- Aplicaciones Terapéuticas con Rayos Beta*
- Densitometría Ósea*
- Radiografía de Tórax – Evaluación de la Calidad de Imagen*
- Dosimetría Clínica de Protones – Parte II: Especificación de Dosis para la Elaboración de Informes, Planificación de Tratamientos y Calidad de Radiación*
- Determinación de las Cargas Corporales por Radionucleidos*
- Especificaciones de Dosis y Volumen para Elaboración de Informes de Terapia Intersticial en Ginecología*
- Especificación de Dosis en Medicina Nuclear*
- Procedimientos Dosimétricos en Radiodiagnóstico*
- Mamografía – Evaluación de la Calidad de Imagen*
- Medición de Magnitudes Operacionales para Neutrones*
- Datos Nucleares para la Radioterapia con Neutrones y Protones y la Protección Radiológica*

Prescripción, Registro y Elaboración de Informes de Terapia con Haces de Electrones
Requerimientos para Muestreo Radioecológico
Evaluación Retrospectiva de la Exposición a Radiaciones Ionizantes
Análisis ROC
Poder de Frenado para Iones Pesados
Sustitutos del Tejido, Características de Tejidos Biológicos y Maniqués para Ultrasonidos

Además, la ICRU está evaluando la posibilidad de ampliar su programa para incluir la radiación no ionizante, especialmente en lo concerniente a magnitudes y unidades.

La Comisión revisa continuamente la ciencia de la radiación con el objetivo de identificar áreas donde la elaboración de guías y recomendaciones puedan ser una contribución importante.

Relaciones de la ICRU con otras organizaciones

Además de su estrecha relación con la ICRP, la ICRU ha fomentado las relaciones con otras organizaciones interesadas en los problemas de las magnitudes y unidades radiológicas y su medición. Desde 1955, la ICRU mantiene una relación oficial con la Organización Mundial de la Salud (OMS) por la cual la ICRU ha cuidado de las directrices primarias en materia de unidades radiológicas y medición y, a su vez, la OMS ayuda a la divulgación por todo el mundo de las recomendaciones de la Comisión. En 1960, la ICRU pasó a ser asesora de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA). La Comisión mantiene una relación formal con el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), por lo que los observadores ICRU están invitados a asistir a las reuniones del UNSCEAR. La Comisión y la Organización Internacional de Estandarización (ISO) intercambian, de manera informal, información de sus reuniones, y la ICRU está designada formalmente como enlace entre dos de los Comités Técnicos de la ISO. La ICRU también remite e intercambia informes definitivos con las siguientes organizaciones:

Bureau International de Métrologie Légale
Bureau International des Poids et Mesures
European Commission
Council for International Organizations of Medical Sciences
Food and Agriculture Organization of the United Nations
International Committee of Photobiology
International Council of Scientific Unions
International Electrotechnical Commission
International Labor Office
International Organization for Medical Physics
International Radiation Protection Association
International Union of Pure and Applied Physics
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

La Comisión considera que sus relaciones con todas estas organizaciones son fructíferas y sustancialmente beneficiosas para el programa ICRU. Las relaciones con estas organizaciones internacionales no afectan a la afiliación de la ICRU con la Sociedad Internacional de Radiología.

Financiación

En los primeros días de su existencia, la ICRU actuaba esencialmente en base al voluntariado, siendo los gastos de viajes y organización costeados por las organizaciones a las que pertenecían los participantes. (Inicialmente sólo fue posible la ayuda simbólica de la Sociedad Internacional de Radiología). Reconociendo la imposibilidad de continuar con este modo de funcionamiento de forma indefinida, se buscó financiación procedente de varias fuentes.

Recientemente, el principal apoyo financiero ha venido de la Comisión Europea, el Instituto Nacional del Cáncer del Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. y la Organización Internacional de la Energía Atómica.

Además, durante los últimos diez años, el soporte financiero se ha recibido de las siguientes organizaciones:

Sociedad Americana para la Oncología y Terapia Radiológica
Consejo para el Control de la Energía Atómica.
Bayer AG
Consejo de las Centrales Eléctricas Generadoras
Comisariado de la Energía Atómica
Sociedad Alemana de Radiodiagnóstico
Eastman-Kodak Company

Ebara Corporation
Électricité de France
Fuji Medical Systems
General Electric Company
Hitachi, Ltd.
Asociación Internacional de Protección Radiológica
Sociedad Internacional de Radiología
Asociación Italiana de Radiología
Asociación de Industrias Japonesas de Sistemas Radiológicos
Konica Corporation
Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos
Philips Medical Systems, Incorporated
Sociedad de Investigación en Radiación
Scanditronix AB
Siemens Aktiengesellschaft
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.
Theratronics
Toshiba Corporation
Hospital Universitario, Lund, Suecia
Organización Mundial de la Salud

Además del apoyo económico directo de estas organizaciones, muchas otras proporcionan un soporte indirecto a los programas de la Comisión. Esta ayuda se brinda de varias formas, incluyendo entre otras, subsidios para (1) el tiempo de participación individual en las actividades ICRU, (2) coste de viajes de reuniones ICRU, y (3) instalaciones y servicios para sus reuniones.

En reconocimiento al hecho de que su trabajo es posible gracias a la generosa aportación de todas las organizaciones que apoyan su programa, la Comisión expresa su más profundo agradecimiento.

André Wambersie
Presidente, ICRU

Bruselas, Bélgica
15 de Octubre de 1998

Contenidos

Prefacio.....	v
Introducción.....	1
1. Consideraciones generales	2
1.1 Magnitudes y unidades	2
1.2 Radiación ionizante.....	3
1.3 Magnitudes estocásticas y no estocásticas.....	4
1.4 Convencionalismos matemáticos	4
2. Radiometría	5
2.1 Magnitudes radiométricas escalares	5
2.1.1 Número de Partículas, Energía Radiante.....	5
2.1.2 Flujo, Flujo Energético	5
2.1.3 Fluencia, Fluencia Energética	6
2.1.4 Tasa de Fluencia, Tasa de Fluencia Energética	6
2.1.5 Radiancia de Partículas, Radiancia Energética	7
2.2 Magnitudes radiométricas vectoriales	7
2.2.1 Radiancia Vectorial de Partículas, Radiancia Vectorial Energética.....	7
2.2.2 Tasa de Fluencia Vectorial, Tasa de Fluencia Energética Vectorial.....	8
2.2.3 Fluencia Vectorial, Fluencia Energética Vectorial.....	8
3. Coeficientes de Interacción y Magnitudes Asociadas	11
3.1 Sección Eficaz.....	11
3.2 Coeficiente Másico de Atenuación	11
3.3 Coeficiente Másico de Transferencia de Energía.....	12
3.4 Poder de Frenado Másico.....	12
3.5 Transferencia Lineal de Energía [LET]	13
3.6 Rendimiento Químico de la Radiación	14
3.7 Energía Media para Crear un Par Iónico en un Gas	14
4. Dosimetría	15
4.1 Conversión de Energía	15
4.1.1 Kerma	15
4.1.2 Tasa de Kerma	16
4.1.3 Exposición.....	16
4.1.4 Tasa de Exposición	16
4.1.5 Cema	16
4.1.6 Tasa de Cema	17
4.2 Deposición de Energía	17
4.2.1 Depósito de Energía	17
4.2.2 Energía Impartida	17
4.2.3 Energía Lineal.....	18
4.2.4 Energía Específica.....	18
4.2.5 Dosis Absorbida.....	19
4.2.6 Tasa de Dosis Absorbida	19
5. Radiactividad	20
5.1 Constante de Desintegración.....	20
5.2 Actividad.....	20
5.3 Constante de Tasa de Kerma en Aire	20
Referencias	22
Informes ICRU	23
Índice de Tablas	26

Magnitudes y Unidades Fundamentales para la Radiación Ionizante

Introducción

Este informe sustituye a la parte A del Informe 33 de ICRU (ICRU, 1980), que trata de las magnitudes y unidades de uso general. La parte B del informe 33 de ICRU, que cubre las magnitudes y unidades utilizadas en protección radiológica, también ha sido reemplazada por el informe 51 de ICRU (ICRU, 1993 a) titulado *Magnitudes y Unidades de Dosimetría en Protección Radiológica*.

El presente informe trata de las magnitudes y unidades fundamentales para la radiación ionizante. El borrador de sus secciones, denominadas radiometría, coeficientes de interacción y dosimetría, han sido publicadas en ICRU News para ser comentadas. ICRU agradece la ayuda aportada por la corporación científica y los individuos a través de sus comentarios, y espera que este proceso facilitará la aceptación del informe.

El informe se estructura en cinco secciones principales, cada una seguida por tablas que resumen, para cada magnitud, su símbolo, unidad y la ecuación usada para su definición.

La Sección 1 trata de términos y convencionalismos matemáticos usados en el informe.

La Sección 2, denominada Radiometría, presenta las magnitudes requeridas para la especificación de campos de radiación. Se usan dos clases de magnitudes referentes ya sea al número de partículas o a la energía transportada por ellas. En consecuencia, la definición de magnitudes radiométricas se agrupan en dos magnitudes, escalares y vectoriales.

La Sección 3 cubre las magnitudes relacionadas con los coeficientes de interacción. El coeficiente de interacción fundamental es la sección eficaz. Todos los demás coeficientes definidos en esta sección pueden ser expresados en términos de la sección eficaz o de la sección eficaz diferencial. La definición de la transferencia lineal de energía (LET) presentada en este informe difiere de la proporcionada previamente (ICRU, 1980) por la inclusión de la energía de ligadura en todas las colisiones.

La Sección 4 trata de las magnitudes dosimétricas que describen los procesos por los cuales la energía de las partículas se convierte y finalmente se deposita en la materia. En consecuencia, las definiciones de las magnitudes dosimétricas se presentan en dos partes

denominadas Conversión de Energía y Deposición de Energía, respectivamente. La primera parte incluye una nueva magnitud, la cema (energía convertida por unidad de masa) para partículas cargadas, paralelamente a la kerma (energía cinética liberada por unidad de masa) para partículas no cargadas. La cema difiere de la kerma en que la cema tiene en cuenta la energía perdida en colisiones electrónicas ocasionadas por las partículas cargadas entrantes mientras que la kerma considera la energía impartida a las partículas cargadas salientes. En la segunda parte de la deposición de energía se introduce una nueva magnitud, denominada depósito de energía. El depósito de energía, en otras palabras, la energía depositada en una única interacción, es la magnitud fundamental en términos de la cual se definen todas las demás magnitudes presentes en esta sección. Estas son las magnitudes estocásticas tradicionales: energía impartida, energía lineal y energía específica, que luego conducen a la magnitud no estocástica dosis absorbida.

Las magnitudes relacionadas con la radiactividad se definen en la Sección 5.

Se ha dedicado mucho trabajo al presente documento para asegurar que es científicamente riguroso y tan consistente como sea posible con otras publicaciones similares usadas en otros campos de la física. Esperamos que el informe represente un modesto paso hacia un lenguaje científico universal.

1. Consideraciones generales

Esta sección trata de los términos y convencionalismos matemáticos utilizados en el informe.

1.1 Magnitudes y unidades

Las *magnitudes*, cuando se usan para la descripción matemática de fenómenos físicos u objetos, son denominadas generalmente magnitudes físicas. Una unidad es una muestra seleccionada como referencia de una magnitud con la cual se comparan otras magnitudes de la misma clase. Cada magnitud puede ser expresada como el producto de un *valor numérico* y una unidad. Puesto que una magnitud permanece inalterada cuando cambia la unidad en la que se expresa, su valor numérico se modificará de acuerdo a ello.

Las magnitudes pueden ser multiplicadas o divididas por otra resultando otra magnitud. Así, todas las magnitudes pueden derivarse de un grupo de *magnitudes básicas*. Las magnitudes resultantes se denominan *magnitudes derivadas*.

Un *sistema de unidades* se obtiene de la misma forma, primero definiendo unidades para las magnitudes básicas, las *unidades básicas*, y luego formando *unidades derivadas*. Se dice que un sistema es *coherente* si no hay otros factores más que el número 1 en las expresiones de las unidades derivadas.

ICRU recomienda el uso del *Sistema Internacional de Unidades* (SI) (BIPM, 1998). En este sistema, las unidades básicas son el metro, el kilogramo, el segundo, el amperio, el kelvin, el mol y la candela, para las magnitudes básicas longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa, respectivamente.

Algunas unidades derivadas en el SI reciben nombres especiales, como el culombio para el amperio por segundo. Otras unidades derivadas reciben nombres especiales sólo cuando son usadas con ciertas magnitudes derivadas. Los nombres especiales actualmente utilizados en esta categoría restringida son el becquerelio (igual a la inversa del segundo para la actividad de un radionucleido) y el gray (igual a un julio por kilogramo para la dosis absorbida, kerma, cema y energía específica). Algunos ejemplos de unidades del SI se muestran en la Tabla 1.1.

También hay unas pocas unidades fuera del sistema internacional que pueden ser usadas con el SI. Para algunas de ellas sus valores, en términos de unidades del SI, se obtienen experimentalmente. Dos de ellas son usadas actualmente en documentos ICRU – el electrónvoltio (de símbolo eV) y la unidad de masa atómica (unificada) (de símbolo u) –. Otras, como el día, hora y minuto, no son coherentes con el sistema pero se permite su utilización en el SI, debido a su amplio uso (ver Tabla 1.2).

Los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI se pueden formar usando los prefijos del SI (ver Tabla 1.3).

Tabla 1.1 Unidades del SI usadas en este informe

Categoría de la unidad	Magnitud	Nombre	Símbolo
Unidades fundamentales del SI	longitud masa tiempo cantidad de sustancia	metro kilogramo segundo mol	m kg s mol
Unidades derivadas del SI con nombre especial (uso general)	carga eléctrica energía ángulo sólido potencia	culombio julio estereoradian vatio	C J sr W
Unidades derivadas del SI con nombre especial (uso restringido)	actividad dosis absorbida, kerma, cema, energía específica	becquerel gray	Bq Gy

1.2 Radiación ionizante

La ionización producida por las partículas es el proceso por el cual uno o más electrones son liberados en las colisiones de las partículas con los átomos o las moléculas. Este proceso se debe diferenciar de la excitación, que es la promoción de los electrones atómicos o moleculares a niveles más energéticos y que generalmente requiere menos energía.

Cuando las partículas cargadas han disminuido su velocidad suficientemente, la ionización es considerablemente menor o inexistente y las partículas aumentan la dispersión de su energía remanente en otros procesos como la excitación o la dispersión elástica. Así, cerca del final de su recorrido, las partículas cargadas ionizantes se convierten en no ionizantes.

El término radiación ionizante se refiere a partículas cargadas (por ejemplo, electrones o protones) y partículas no cargadas (por ejemplo, fotones y neutrones) que pueden producir ionización en un medio. En una situación conjunta, la diferencia entre ionización y excitación puede llegar a ser poco clara. Una aproximación pragmática para solucionar la ambigüedad es adoptar un umbral para la energía que puede ser transferida al medio en localizaciones llamadas puntos de transferencia de energía (ver Sección 4.2.1). Esto implica restricciones de energía, por debajo de las que las partículas cargadas no se consideran ionizantes. Por debajo de estas energías sus recorridos son mínimos. Por lo tanto, la elección de las restricciones energéticas no afectan materialmente a la distribución espacial de deposición de energía, excepto a pequeñas distancias, que pueden ser tema de la microdosimetría. La elección del valor umbral depende de la aplicación, por ejemplo, para la radiobiología puede ser apropiado un valor de 10 eV.

Tabla 1.2 Algunas unidades usadas con el SI

Categoría de la unidad	Magnitud	Nombre	Símbolo
Unidades usadas normalmente	tiempo	minuto hora día	min h d
Unidades cuyos valores en el SI se obtienen experimentalmente	energía masa	electrón voltio ^a unidad de masa atómica (unificada) ^a	eV u

^a 1 eV = 1.602 177 33(49) · 10⁻¹⁹ J. 1 u = 1.660 540 2(10) · 10⁻²⁷ kg. Los dígitos entre paréntesis son la incertidumbre (k=1) (CODATA, 1986).

Tabla 1.3 Prefijos del SI

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻¹	deci	d
10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²	centi	c
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻³	mili	m
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ¹²	tera	T	10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁹	giga	G	10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁶	mega	M	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ³	kilo	k	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²	hecto	h	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ¹	deca	dc	10 ⁻²⁴	yocto	y

^a El símbolo del prefijo junto al símbolo de la unidad constituye un nuevo símbolo, p.ej., 1 fm² = (10⁻¹⁵ m)² = 10⁻³⁰ m².

1.3 Magnitudes estocásticas y no estocásticas

En física es usual que haya diferencias entre los resultados de una observación cuando se repite ésta. Pueden aparecer como resultado de sistemas imperfectos de medida o por el hecho de que muchos fenómenos físicos están sujetos a fluctuaciones inherentes. Así, se puede distinguir entre magnitudes *no estocásticas*, con un único valor, y magnitudes *estocásticas*, cuyo valor sigue una distribución de probabilidad. En muchos casos esta distinción no es significativa porque la distribución de probabilidad es muy estrecha. Por ejemplo, en la medida de la corriente eléctrica intervienen usualmente tantos electrones que las fluctuaciones contribuyen inapreciablemente a la imprecisión de la medida. Aunque a menudo se pueden aplicar consideraciones similares para la radiación, las fluctuaciones pueden jugar un importante papel y es posible que deban ser consideradas explícitamente.

Ciertos procesos estocásticos siguen la distribución de Poisson, una distribución determinada unívocamente por su valor medio. Un ejemplo típico de este proceso es el decaimiento radiactivo. Sin embargo, en la deposición energética se ven involucradas distribuciones más complejas. En este informe, debido a su importancia, se definen explícitamente cuatro magnitudes estocásticas, denominadas depósito de energía, ε_i (ver Sección 4.2.1), *energía impartida*, ε (ver Sección 4.2.2), *energía lineal*, y (ver Sección 4.2.3) y *energía específica*, z (ver Sección 4.2.4).

Por ejemplo, la energía específica, z , se define como el cociente de la energía impartida, ε , entre la masa, m . Repetidas mediciones podrían proporcionar una estimación de la distribución de probabilidad de z y de su primer momento, \bar{z} , el cual se aproxima a la dosis absorbida, D (ver Sección 4.2.5) cuando la masa se hace pequeña. El conocimiento de la distribución de z puede no ser necesario para la determinación de la dosis absorbida, D . Sin embargo, el conocimiento de la distribución de z correspondiente a una D conocida puede ser importante porque en el elemento de masa irradiado, m , los efectos de la radiación se aproximan más a z que a D , y los valores de z pueden ser muy diferentes de los de D para pequeños valores de m (p.ej., células biológicas).

1.4 Convencionalismos matemáticos

Para permitir la caracterización de un campo de radiación y sus interacciones con la materia, muchas de las magnitudes definidas en este informe se consideran funciones de otras magnitudes. Para simplificar la notación, el argumento del que depende una magnitud puede a menudo no ser indicado explícitamente. En algunos casos, la *distribución* de una magnitud respecto a otra magnitud puede ser definida. La función de distribución de una magnitud

discreta, tal como el número de partículas N (ver Sección 2.1.1) puede ser tratada como si fuera continua, dado que N es usualmente un número muy grande. Las distribuciones de energía son a menudo necesarias. Por ejemplo, la distribución de *fluencia* (ver Sección 2.1.3) respecto a la energía de las partículas viene dada por (ver Ec. 2.1.6a)

$$\Phi_E = d\Phi/dE, \quad (1.4.1)$$

donde $d\Phi$ es la fluencia de partículas con energías entre E y $E+dE$. Tal distribución energética se expresa en este informe añadiendo el subíndice E al símbolo de la magnitud correspondiente. Esto lleva a un cambio dimensional; así, la unidad de Φ es m^{-2} , mientras que la unidad de Φ_E es $m^{-2} J^{-1}$ (ver la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2).

Las magnitudes relacionadas con la interacción, tales como el coeficiente másico de atenuación, μ/ρ (ver Sección 3.2) o el poder de frenado másico, S/ρ (ver Sección 3.4), son funciones de la energía de las partículas y se puede utilizar, si fuera necesario, una notación más explícita, como $\mu(E)/\rho$ o $S(E)/\rho$. Para un campo de radiación con un espectro de energía, es útil usar valores medios tales como $\bar{\mu}/\rho$ y \bar{S}/ρ , ponderados de acuerdo con la distribución de la magnitud considerada. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} \bar{\mu}/\rho &= \left\{ \int [\mu(E)/\rho] \Phi_E dE \right\} / \int \Phi_E dE = \\ &= \frac{1}{\Phi} \int [\mu(E)/\rho] \Phi_E dE \end{aligned} \quad (1.4.2)$$

es el valor medio de μ/ρ ponderado por la fluencia.

Las magnitudes estocásticas están asociadas a distribuciones de probabilidad. En este informe se consideran dos tipos de estas distribuciones, denominadas la *función de distribución* (de símbolo F) y *densidad de probabilidad* (de símbolo f). Por ejemplo, $F(y)$ es la probabilidad de que la energía lineal sea igual o inferior a $F(y)$. La densidad de probabilidad $f(y)$ es la derivada de $F(y)$ y la probabilidad de que la energía lineal esté entre y e $y+dy$.

2. Radiometría

La medida de la radiación y la investigación de los efectos de la misma requieren varios grados de especificación del campo de radiación en el punto de interés. Los campos de radiación están formados por varios tipos de partículas, tales como fotones, electrones, neutrones o protones, caracterizados por magnitudes radiométricas que se utilizan en el espacio libre y en la materia.

Se usan dos clases de magnitudes en la caracterización de un campo de radiación, referentes ya sea al número de partículas o a la energía transportada por ellas. Consecuentemente, muchas de las definiciones de magnitudes radiométricas dadas en este informe se pueden agrupar en parejas.

En radiometría se emplean tanto magnitudes escalares como vectoriales y aquí son tratadas separadamente. La definición formal de las magnitudes consideradas de particular relevancia se presentan enmarcadas. Las definiciones equivalentes que son usadas en aplicaciones particulares se dan en el texto. Las distribuciones de algunas magnitudes radiométricas referentes a la energía se dan cuando se necesitan posteriormente en el informe. En la Tabla 2.1 y en la Tabla 2.2 se presenta un amplio grupo de magnitudes importantes en radiometría.

2.1 Magnitudes radiométricas escalares

Las consideraciones sobre las magnitudes radiométricas empiezan con la definición de las magnitudes más generales asociadas con el campo de radiación, denominada *número de partículas*, N y la *energía radiante*, R (ver Sección 2.1.1). No obstante, la descripción completa del campo de radiación necesita información del tipo y de la energía de las partículas así como de sus distribuciones espaciales, direccionales y temporales. En el presente informe, la especificación del campo de radiación se consigue cada vez con más detalle, definiendo las magnitudes radiométricas con sucesivas diferenciaciones de N y R respecto al tiempo, área, volumen, dirección o energía. Así, estas magnitudes se refieren a un valor particular de cada variable de diferenciación. Este procedimiento proporciona definiciones más simples de magnitudes como la fluencia y la fluencia energética (ver Sección 2.1.3), a menudo usadas en situaciones frecuentes donde las interacciones de la radiación son independientes de la dirección y de la distribución temporal de las partículas entrantes.

Las magnitudes radiométricas escalares definidas en este informe también se usan para campos de radiación óptica y ultravioleta, a veces con nombres diferentes. En las definiciones importantes se indica la terminología equivalente.

2.1.1 Número de Partículas, Energía Radiante

El **número de partículas**, N , es el número de partículas emitidas, transferidas o recibidas.

Unidad: 1

La **energía radiante**, R , es la energía (excluida la energía en reposo) de las partículas que son emitidas, transferidas o recibidas.

Unidad: J

Para partículas de energía E (excluida la energía en reposo) la energía radiante, R , es igual al producto NE .

Las distribuciones, N_E y R_E , del número de partículas y la energía radiante respecto a la energía vienen dadas por

$$N_E = dN/dE \quad (2.1.1a)$$

y

$$R_E = dR/dE, \quad (2.1.1b)$$

donde dN es el número de partículas con energías entre E y $E + dE$ y dR es su energía radiante.

Las dos distribuciones se relacionan por

$$R_E = E N_E. \quad (2.1.2)$$

El *número volúmico de partículas*, n , viene dado por

$$n = dN/dV, \quad (2.1.3)$$

donde dN es el número de partículas en el volumen dV . También n se denomina densidad numérica de partículas (ISO, 1993).

2.1.2 Flujo, Flujo Energético

El **flujo**, \dot{N} , es el cociente de dN entre dt , donde dN es el incremento del número de partículas en el intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt}.$$

Unidad: s^{-1}

El **flujo energético**, \dot{R} , es el cociente de dR entre dt , donde dR es el incremento de energía radiante en el intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt}.$$

Unidad: W

Estas magnitudes se refieren frecuentemente a regiones limitadas del espacio, p.ej., el flujo de partículas emergentes de un colimador. Para fuentes emisoras, el flujo se considera generalmente en todas las direcciones.

Para la luz visible y la radiación electromagnética relacionada, el flujo energético se define como la potencia emitida, transmitida o recibida en forma de radiación y denominada flujo radiante o potencia radiante (CIE, 1987).

El término flujo ha sido empleado para una magnitud denominada en este informe tasa de fluencia (ver Sección 2.1.4). Se desaconseja su uso por la posible confusión con la definición de flujo dada anteriormente.

2.1.3 Fluencia, Fluencia Energética

La **fluencia**, Φ , es el cociente de dN entre da , donde dN es el número de partículas incidentes en una esfera con área de sección transversal da , así

$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

Unidad: m^{-2}

La **fluencia energética**, Ψ , es el cociente de dR entre da , donde dR es la energía radiante incidente en una esfera con área de sección transversal da , así

$$\Psi = \frac{dR}{da}.$$

Unidad: $J m^{-2}$

La forma más sencilla de expresar el hecho de considerar un área da perpendicular a la dirección de cada partícula es usar una esfera con una sección transversal de área da . Las magnitudes fluencia y fluencia energética son aplicables en situaciones frecuentes en las que las interacciones de la radiación son independientes de la dirección de las partículas incidentes. En determinadas situaciones, son necesarias las magnitudes (definidas posteriormente) que dependen del ángulo sólido diferencial, $d\Omega$, para especificar una dirección.

En cálculos dosimétricos la fluencia es frecuentemente expresada en términos de la longitud de la trayectoria de las partículas. Se puede demostrar que la fluencia, Φ , viene dada por

$$\Phi = dl/dV, \quad (2.1.4)$$

donde dl es la suma de las longitudes de las trayectorias de las partículas en el volumen dV .

Para un campo de radiación que no varíe sobre un intervalo de tiempo, t , y que esté compuesto de partículas con velocidad v , la fluencia, Φ , viene dada por

$$\Phi = nvt, \quad (2.1.5)$$

donde n es el número volúmico de partículas.

Las distribuciones Φ_E y Ψ_E de fluencia y fluencia energética con respecto a la energía vienen dadas por

$$\Phi_E = d\Phi/dE, \quad (2.1.6a)$$

y

$$\Psi_E = d\Psi/dE, \quad (2.1.6b)$$

donde $d\Phi$ es la fluencia de partículas de energía entre E y $E + dE$ y $d\Psi$ es su fluencia energética.

La relación entre las dos distribuciones viene dada por

$$\Psi_E = E \Phi_E, \quad (2.1.7)$$

La fluencia energética se relaciona con la magnitud exposición radiante definida, para campos de luz visible, como el cociente de la energía radiante incidente en un elemento de superficie entre el área de este elemento (CIE, 1987). Cuando un haz paralelo incide formando un ángulo θ con la dirección normal de un elemento de superficie dado, la exposición radiante es igual a $\Psi \cos \theta$.

2.1.4 Tasa de Fluencia, Tasa de Fluencia Energética

La **tasa de fluencia**, $\dot{\Phi}$, es el cociente de $d\Phi$ entre dt , donde $d\Phi$ es el incremento de la fluencia en el intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt}.$$

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

La **tasa de fluencia energética**, $\dot{\Psi}$, es el cociente de $d\Psi$ entre dt , donde $d\Psi$ es el incremento de la fluencia energética en el intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}.$$

Unidad: $W m^{-2}$

Estas magnitudes también se han denominado densidad de flujo de partículas y densidad de flujo energético, respectivamente. Debido a las múltiples connotaciones de la palabra densidad, se prefiere

utilizar el término tasa de fluencia. Los símbolos $\dot{\Phi}$ y $\dot{\Psi}$ sustituyen a los símbolos ϕ y ψ usados previamente (ICRU, 1980).

Para un campo de radiación compuesto de partículas de velocidad v , la tasa de fluencia, $\dot{\Phi}$, viene dada por

$$\dot{\Phi} = nv, \quad (2.1.8)$$

donde n es el número volúmico de partículas.

2.1.5 Radiancia de Partículas, Radiancia Energética

La **radiancia de partículas**, $\dot{\Phi}_\Omega$, es el cociente de $d\dot{\Phi}$ entre $d\Omega$, donde $d\dot{\Phi}$ es la tasa de fluencia de partículas que se propagan en un ángulo sólido $d\Omega$ alrededor de una dirección específica, así

$$\dot{\Phi}_\Omega = \frac{d\dot{\Phi}}{d\Omega}.$$

Unidad: $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$

La **radiancia energética**, $\dot{\Psi}_\Omega$, es el cociente de $d\dot{\Psi}$ entre $d\Omega$, donde $d\dot{\Psi}$ es la tasa de fluencia energética de partículas que se propagan en un ángulo sólido $d\Omega$ alrededor de una dirección específica, así

$$\dot{\Psi}_\Omega = \frac{d\dot{\Psi}}{d\Omega}.$$

Unidad: $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$

Los símbolos $\dot{\Phi}_\Omega$ y $\dot{\Psi}_\Omega$ sustituyen a los símbolos p y r usados anteriormente (ICRU, 1980).

Para especificar una dirección se necesitan dos variables. En un sistema de coordenadas esféricas con ángulo polar, θ , y ángulo acimutal, ϕ , $d\Omega$ es igual a $\sin\theta d\theta d\phi$.

Para luz visible y radiación electromagnética relacionada, la radiancia de partículas y la radiancia energética se denominan radiancia de fotones y radiancia, respectivamente (CIE, 1987).

La distribución de radiancia de partículas y radiancia energética respecto a la energía vienen dadas por

$$\dot{\Phi}_{\Omega,E} = \frac{d\dot{\Phi}_\Omega}{dE}, \quad (2.1.9a)$$

y

$$\dot{\Psi}_{\Omega,E} = \frac{d\dot{\Psi}_\Omega}{dE}, \quad (2.1.9b)$$

donde $d\dot{\Phi}_\Omega$ es la radiancia de partículas para partículas con energía entre E y $E + dE$ y $d\dot{\Psi}_\Omega$ es su radiancia energética.

Las dos distribuciones están relacionadas por

$$\dot{\Psi}_{\Omega,E} = E \dot{\Phi}_{\Omega,E}, \quad (2.1.10)$$

La magnitud $\dot{\Phi}_{\Omega,E}$ es a veces denominada flujo angular o flujo de fase en la teoría de transporte de radiación.

Además de aspectos de menor importancia en el presente texto (p.ej., la polarización), cualquier campo de radiación de un tipo dado de partículas está completamente definido por la distribución, $\dot{\Phi}_{\Omega,E}$, de la radiancia de partículas con respecto a la energía de las partículas, debido a que ésta define números, energías, densidades locales y tasas de llegada de partículas que se propagan en una determinada dirección. Esta magnitud, así como la distribución de la radiancia energética respecto de la energía, puede ser considerada como básica en radiometría.

2.2 Magnitudes radiométricas vectoriales

Dado que las magnitudes radiométricas se refieren ante todo al flujo de radiación, es apropiado considerar algunas de ellas como magnitudes vectoriales. Las magnitudes vectoriales no son necesarias en los casos donde es apropiada la correspondiente magnitud escalar, p.ej., en magnitudes dosimétricas derivadas que son independientes de la dirección de las partículas. En otros casos, las magnitudes vectoriales son útiles e importantes en consideraciones teóricas referidas a campos de radiación y magnitudes dosimétricas. En general, no hay una relación simple entre el valor numérico de una magnitud escalar y el módulo de la correspondiente magnitud vectorial. Sin embargo, en el caso de un campo unidireccional son iguales.

Las magnitudes vectoriales, definidas en esta sección, se obtienen por integraciones sucesivas de las magnitudes radiancia vectorial de partículas y radiancia vectorial energética (ver Sección 2.2.1). Las magnitudes vectoriales se usan extensamente en la teoría de transporte de radiación, pero a menudo con una terminología distinta. Las equivalencias se indican para la comodidad del lector.

2.2.1 Radiancia Vectorial de Partículas, Radiancia Vectorial Energética

La **radiancia vectorial de partículas**, $\dot{\Phi}_\Omega$, es el producto de Ω por $\dot{\Phi}_\Omega$, donde Ω es el vector

unitario en la dirección especificada por la radiancia de partículas $\dot{\Phi}_{\Omega}$, así

$$\dot{\Phi}_{\Omega} = \Omega \dot{\Phi}_{\Omega}.$$

Unidad: $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$

La **radiancia vectorial energética**, $\dot{\Psi}_{\Omega}$, es el producto de Ω por $\dot{\Psi}_{\Omega}$, donde Ω es el vector unitario especificado por la radiancia energética $\dot{\Psi}_{\Omega}$, así

$$\dot{\Psi}_{\Omega} = \Omega \dot{\Psi}_{\Omega}.$$

Unidad: $\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$

Los módulos $|\dot{\Phi}_{\Omega}|$ y $|\dot{\Psi}_{\Omega}|$ son iguales a $\dot{\Phi}_{\Omega}$ y $\dot{\Psi}_{\Omega}$, respectivamente.

Las distribuciones $\dot{\Phi}_{\Omega}$ y $\dot{\Psi}_{\Omega}$ de la radiancia vectorial de partículas y la radiancia vectorial energética, con respecto a la energía vienen dadas por

$$\dot{\Phi}_{\Omega,E} = \Omega \dot{\Phi}_{\Omega,E}, \quad (2.2.1a)$$

y

$$\dot{\Psi}_{\Omega,E} = \Omega \dot{\Psi}_{\Omega,E}, \quad (2.2.1b)$$

donde $\dot{\Phi}_{\Omega,E}$ y $\dot{\Psi}_{\Omega,E}$ son las distribuciones de radiancia de partículas y radiancia energética respecto a la energía.

En la teoría de transporte de radiación, $\dot{\Phi}_{\Omega,E}$ es en ocasiones denominada densidad de corriente angular, densidad de corriente fase-espacio o flujo direccional.

2.2.2 Tasa de Fluencia Vectorial, Tasa de Fluencia Energética Vectorial

La **tasa de fluencia vectorial**, $\dot{\Phi}$, es la integral de $\dot{\Phi}_{\Omega}$ respecto al ángulo sólido, donde $\dot{\Phi}_{\Omega}$ es la radiancia vectorial de partículas en la dirección especificada por el vector unitario Ω , así

$$\dot{\Phi} = \int \dot{\Phi}_{\Omega} d\Omega.$$

Unidad: $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

La **tasa de fluencia energética vectorial**, $\dot{\Psi}$, es la integral de $\dot{\Psi}_{\Omega}$ respecto al ángulo sólido, donde $\dot{\Psi}_{\Omega}$ es la radiancia vectorial energética en la dirección especificada por el vector unitario Ω , así

$$\dot{\Psi} = \int \dot{\Psi}_{\Omega} d\Omega.$$

Unidad: W m^{-2}

La integración vectorial determina el modulo y la dirección de la tasa de fluencia vectorial y de la tasa de fluencia energética vectorial. Las magnitudes escalares tasa de fluencia y tasa de fluencia energética se pueden obtener de forma similar según

$$\dot{\Phi} = \int \dot{\Phi}_{\Omega} d\Omega, \quad (2.2.2a)$$

y

$$\dot{\Psi} = \int \dot{\Psi}_{\Omega} d\Omega, \quad (2.2.2b)$$

Es importante que estas magnitudes no se confundan con las vectoriales. En particular, es necesario reconocer que el módulo de la tasa de fluencia vectorial y de la tasa de fluencia energética vectorial varía desde cero en un campo isotrópico hasta $\dot{\Phi}$ y $\dot{\Psi}$ en un campo unidireccional.

La tasa de fluencia vectorial es a menudo denominada corriente de densidad en la teoría del transporte de radiación.

2.2.3 Fluencia Vectorial, Fluencia Energética Vectorial

La **fluencia vectorial**, Φ , es la integral de $\dot{\Phi}$, respecto al tiempo, t , donde $\dot{\Phi}$ es la tasa vectorial de fluencia, así

$$\Phi = \int \dot{\Phi} dt.$$

Unidad: m^{-2}

La fluencia energética vectorial, Ψ , es la integral de $\dot{\Psi}$ respecto al tiempo, t , donde $\dot{\Psi}$ es la tasa de fluencia energética vectorial, así

$$\Psi = \int \dot{\Psi} dt .$$

Unidad: $J m^{-1}$

Las distribuciones Φ_E y Ψ_E de la fluencia vectorial y la fluencia energética vectorial con respecto a la energía vienen dadas por

$$\Phi_E = d\Phi/dE = \int \dot{\Phi}_E dt , \quad (2.2.3a)$$

y

$$\Psi_E = d\Psi/dE = \int \dot{\Psi}_E dt , \quad (2.2.3b)$$

donde $d\Phi$ es la fluencia vectorial de partículas con energía entre E y $E+dE$, y $d\Psi$ es su fluencia energética vectorial.

La fluencia energética vectorial, Ψ , puede ser obtenida de la distribución $\Phi_{\Omega, E}$ según

$$\Psi = \iiint \Omega E \dot{\Phi}_{\Omega, E} dt d\Omega dE , \quad (2.2.4)$$

Debe notarse que la integración (vectorial) de $\dot{\Phi}_{\Omega, E}$ respecto al tiempo, la energía y el ángulo sólido proporciona una función puntual en el espacio, pero este no es el caso cuando la integración es sobre un área. Por ejemplo, tiene sentido integrar el producto escalar $\Psi \cdot d\mathbf{a}$ sobre un área dada a para obtener el flujo neto de energía radiante a través de esa área. En la integración con respecto a una superficie particular debe tenerse en cuenta la forma (tridimensional) de la superficie y su orientación, porque el número de partículas en una dirección dada, interceptada por una superficie, depende del ángulo de incidencia.

Tabla 2.1 Magnitudes radiométricas escalares

Nombre ^a	Símbolo	Unidad	Definición	Lugar
número de partículas radiancia vectorial de partículas	\dot{N}_Ω	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$	$\Omega \dot{\Phi}_\Omega$	Sec. 2.1.1
energía radiante radiancia vectorial de energía	$\dot{\Psi}_\Omega$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	$\Omega \dot{\Psi}_\Omega$	Sec. 2.1.1
distribución energética del número de partículas distribución energética de radiancia vectorial de partículas	$\dot{\Phi}_{\Omega,E}^N$	$\text{J}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{J}^{-1}$	dN/dE $\Omega \dot{\Phi}_{\Omega,E}^N$	Ec. 2.1.1a Ec. 2.2.1a
distribución energética de la energía radiante distribución energética de radiancia vectorial de energía	$\dot{\Psi}_{\Omega,E}^R$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$	dR/dE $\Omega \dot{\Psi}_{\Omega,E}^R$	Ec. 2.1.1b Ec. 2.2.1b
número volúmico de partículas	n	m^{-3}	dN/dV	Ec. 2.1.3
tasa de fluencia vectorial energía radiante volúmica	$\dot{\Phi}_w$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ J m^{-3}	$\int \dot{\Phi}_\Omega d\Omega$ $\int R/dV$	Sec. 2.2.2
tasa de fluencia energética vectorial distribución energética de número volúmico de partículas	$\dot{\Psi}_E$	W m^{-2} $\text{m}^{-3} \text{J}^{-1}$	$\int \dot{\Psi}_\Omega d\Omega$ $d n/dE$	Sec. 2.2.2
distribución energética de la tasa de fluencia vectorial distribución energética de la energía radiante volúmica	$\dot{\Phi}_E^w$	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{J}^{-1}$	$\int \dot{\Phi}_w/dE d\Omega$	—
tasa de fluencia energética vectorial	$\dot{\Psi}_E$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\int \dot{\Psi}_\Omega/dE d\Omega$	Sec. 2.1.2
flujo energético	$\dot{\Phi}$	W m^{-2}	$\int \dot{\Phi}_\Omega dt$	Sec. 2.2.3
distribución energética del flujo fluencia energética vectorial	$\dot{\Psi}_E$	$\text{J}^{-1} \text{m}^{-2}$	$\int \dot{\Psi}_\Omega/dE dt$	Sec. 2.2.3
distribución energética del flujo energético distribución energética de fluencia vectorial	$\dot{\Phi}_E^R$	$\text{s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{J}^{-1}$	$\int \dot{R}_\Omega/dE dt$	Ec. 2.2.3a
fluencia distribución energética de fluencia energética vectorial	Φ_E	m^{-2} m^{-2}	dN/da $\int \dot{\Psi}_E dt$	Sec. 2.1.3 Ec. 2.2.3b
fluencia energética	Ψ_E	J m^{-2}	$\int R/da$	Sec. 2.1.3
^a La expresión "distribución de una magnitud con respecto a la energía" se ha sustituido en esta tabla por la expresión más breve "distribución energética de una magnitud".				
distribución energética de fluencia	Φ_E	$\text{m}^{-2} \text{J}^{-1}$	$d\Phi/dE$	Ec. 2.1.6a
distribución energética de fluencia energética	Ψ_E	m^{-2}	$d\Psi/dE$	Ec. 2.1.6b
tasa de fluencia	$\dot{\Phi}$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$d\Phi/dt$	Sec. 2.1.4
tasa de fluencia energética	$\dot{\Psi}$	W m^{-2}	$d\Psi/dt$	Sec. 2.1.4
distribución energética de tasa de fluencia	$\dot{\Phi}_E$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{J}^{-1}$	$d\dot{\Phi}/dE$	—
distribución energética de tasa de fluencia energética	$\dot{\Psi}_E$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$d\dot{\Psi}/dE$	—
radiancia de partículas	$\dot{\Phi}_\Omega$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$	$d\dot{\Phi}/d\Omega$	Sec. 2.1.5
radiancia de energía	$\dot{\Psi}_\Omega$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	$d\dot{\Psi}/d\Omega$	Sec. 2.1.5
distribución energética de radiancia de partículas	$\dot{\Phi}_{\Omega,E}$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{J}^{-1}$	$d\dot{\Phi}_\Omega/dE$	Ec. 2.1.9a
distribución energética de radiancia de energía	$\dot{\Psi}_{\Omega,E}$	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$	$d\dot{\Psi}_\Omega/dE$	Ec. 2.1.9b

^a La expresión "distribución de una magnitud con respecto a la energía" se ha sustituido en esta tabla por la expresión más breve "distribución energética de una magnitud"

3. Coeficientes de Interacción y Magnitudes Asociadas

Los procesos de interacción tienen lugar entre la radiación y la materia. En una interacción, la energía o la dirección (o ambas) de la partícula incidente es modificada o la partícula es absorbida. La interacción puede ocasionar la emisión de una o más partículas secundarias. Las probabilidades de tales interacciones vienen caracterizadas por los *coeficientes de interacción*. Estos definen un proceso de interacción específico, para un tipo y energía de la radiación, en un blanco o material.

El coeficiente de interacción fundamental es la *sección eficaz* (ver Sección 3.1). Todos los demás coeficientes de interacción definidos en este informe se pueden expresar en función de la sección eficaz o de la sección eficaz diferencial.

Los coeficientes de interacción y magnitudes asociadas discutidas en esta sección se muestran en la Tabla 3.1.

3.1 Sección Eficaz

La **sección eficaz**, σ , de un blanco, para una interacción dada producida por partículas incidentes cargadas o no cargadas, es el cociente de P entre Φ , donde P es la probabilidad de que ocurra esa interacción en un solo blanco sometida a una fluencia de partículas, Φ , así

$$\sigma = \frac{P}{\Phi}.$$

Unidad: m^2

Una unidad especial para la sección eficaz usada a menudo es el barn, b , definido como

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2.$$

La descripción completa de un proceso de interacción requiere, entre otras cosas, el conocimiento de las distribuciones de secciones eficaces en función de la energía y dirección de todas las partículas emergentes resultantes de la interacción. Tales distribuciones, algunas veces llamadas secciones eficaces diferenciales, se obtienen por la diferenciación de σ con respecto a la energía y al ángulo sólido (ver Ec. 3.4.2).

Si las partículas incidentes de un determinado tipo y energía pueden sufrir distintos e independientes tipos de interacción con un blanco, la sección eficaz resultante, algunas veces denominada sección eficaz total, σ , se expresa como la suma de sus secciones eficaces parciales, σ_J , esto es

$$\sigma = \sum_J \sigma_J = \frac{1}{\Phi} \sum_J P_J, \quad (3.1.1)$$

donde P_J es la probabilidad de una interacción de tipo J para un único blanco sometida a una fluencia de partículas Φ y σ_J es la sección eficaz parcial referente a la interacción de tipo J .

3.2 Coeficiente Másico de Atenuación

El **coeficiente másico de atenuación**, μ/ρ , de un material para partículas sin carga, es el cociente de dN/N entre ρdl , donde dN/N es la fracción de partículas que experimentan interacciones al atravesar una distancia dl en un material de densidad ρ , esto es

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \frac{dN}{N}.$$

Unidad: $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$

μ es el *coeficiente de atenuación lineal*. La probabilidad de que experimente una interacción una partícula, que incida de forma perpendicular a una lámina de material de grosor dl , es μdl .

La inversa de μ es el *recorrido libre medio* de la partícula sin carga.

El coeficiente de atenuación lineal, μ , depende de la densidad, ρ , del absorbente. Esta dependencia se elimina en gran medida usando el coeficiente másico de atenuación, μ/ρ .

El coeficiente másico de atenuación puede expresarse en función de la sección eficaz total, σ . El coeficiente másico de atenuación es el producto de σ y N_A/M , donde N_A es que el número de Avogadro y M es la masa molar del material blanco, así

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma = \frac{N_A}{M} \sum_J \sigma_J, \quad (3.2.1)$$

dónde σ_J es la componente de la sección eficaz referente a la interacción de tipo J .

La ecuación 3.2.1 puede ser escrita como

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{n_t}{\rho} \sigma, \quad (3.2.2)$$

donde n_t es el *número volúmico de blancos*, esto es, el número de blancos en un elemento de volumen dividido por dicho volumen.

El coeficiente másico de atenuación de un material compuesto, generalmente se define, como si éste estuviera constituido por átomos independientes. Así,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L \sigma_L = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L \sum_J \sigma_{L,J}, \quad (3.2.3)$$

donde $(n_t)_L$ es el número volúmico de blancos de tipo L , σ_L la sección eficaz total para los blancos L , y $\sigma_{L,J}$ la sección eficaz de una interacción del tipo J para un solo blanco de tipo L . La ecuación 3.2.3, que no tiene en cuenta los cambios en el entorno molecular, químico o cristalino de un átomo, se justifica en la mayoría de los casos, pero puede conducir a errores en algunas ocasiones, por ejemplo en la interacción de fotones de baja energía con moléculas (Hubbell, 1969).

3.3 Coeficiente Másico de Transferencia de Energía

El **coeficiente másico de transferencia de energía**, μ_{tr}/ρ de un material, para partículas sin carga, es el cociente de dR_{tr}/R entre ρdl , donde dR_{tr}/R es la fracción de energía radiante incidente que al atravesar una distancia dl en un material de densidad ρ es transformada, por las interacciones, en energía cinética de partículas cargadas, así

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \frac{dR_{tr}}{R}.$$

Unidad: $m^2 kg^{-1}$

En los cálculos relacionados con fotones, la energía de enlace esta generalmente incluida en el coeficiente másico de transferencia de energía. En materiales constituidos por elementos de pequeño número atómico, esto es en general importante para fotones de energía por debajo de 1 keV.

Si partículas incidentes sin carga, de un determinado tipo y energía pueden producir diferentes tipos de interacciones independientes en una partícula blanco, el coeficiente másico de transferencia de energía se puede expresar en función de las secciones eficaces parciales, σ_J , por la ecuación

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sum_J f_J \sigma_J, \quad (3.3.1)$$

donde f_J es la fracción promedio de energía de la partícula incidente que se transforma, por las interacciones de tipo J , en energía cinética de las partículas cargadas, N_A es número de Avogadro y M es la masa molar del material blanco.

El coeficiente másico de transferencia de energía está relacionado con el coeficiente másico de atenuación, μ/ρ , por la ecuación

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} f, \quad (3.3.2)$$

donde

$$f = \frac{\sum_J f_J \sigma_J}{\sum_J \sigma_J}.$$

El coeficiente másico de transferencia de energía de un material compuesto, generalmente se define, como si éste estuviera constituido por átomos independientes. Así,

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sum_L (n_t)_L \sum_J f_{L,J} \sigma_{L,J}, \quad (3.3.3)$$

donde $(n_t)_L$ y $\sigma_{L,J}$ tienen el mismo significado que en la Ec. 3.2.3 y $f_{L,J}$ es la fracción promedio de la energía de la partícula incidente que se transfiere, por medio de las interacciones de tipo J y para los blancos de tipo L , a las partículas cargadas como energía cinética. La Ec. 3.3.3 implica las mismas aproximaciones que la Ec. 3.2.3.

El producto de μ_{tr}/ρ de un material por $(1-g)$, donde g es la fracción de energía de las partículas cargadas liberadas que se pierde por procesos radiativos en el material, se denomina **coeficiente másico de absorción de energía**, μ_{en}/ρ , de un material para partículas sin carga.

El coeficiente másico de absorción de energía de un material compuesto depende del poder de frenado (ver Sección 3.4) del material. Por lo tanto, su evaluación no puede, en principio, reducirse a una simple suma de los coeficientes másicos de absorción de energía de sus componentes atómicos (Seltzer, 1993). De todas formas la suma nos da una aproximación adecuada cuando el valor de g es suficientemente pequeño.

3.4 Poder de Frenado Másico

El **poder de frenado másico**, S/ρ de un material, para partículas cargadas, es el cociente de dE entre ρdl , donde dE es la energía perdida por las partículas cargadas al atravesar una distancia dl en un material de densidad ρ , así

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}.$$

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

E puede expresarse en eV y, por lo tanto, S/ρ se puede expresar en eV $m^2 kg^{-1}$ o algún múltiplo o submúltiplo conveniente, como MeV $cm^2 g^{-1}$.

$S = dE/dl$ define el poder de frenado lineal.

El poder de frenado másico se puede expresar como suma de componentes independientes mediante

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{el} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad}$$

donde

$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{el} = \frac{1}{\rho} S_{el}$ es el *poder de frenado másico electrónico (o de colisión)* debido a colisiones con electrones,

$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad} = \frac{1}{\rho} S_{rad}$ es el *poder de frenado másico radiativo* debido a la emisión por bremsstrahlung en los campos eléctricos del núcleo atómico o de los electrones atómicos,

$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{nuc} = \frac{1}{\rho} S_{nuc}$ es el *poder de frenado másico nuclear*¹ debido a colisiones elásticas coulombianas en las cuales la energía de retroceso se transfiere a los átomos.

Además, se pueden considerar las pérdidas de energía debido a procesos nucleares inelásticos.

Los componentes aislados del poder de frenado másico se pueden expresar en función de la sección eficaz. Por ejemplo, el poder de frenado másico electrónico (o de colisión) para un átomo se puede expresar como

$$\frac{1}{\rho} S_{el} = \frac{N_A}{M} Z \int \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega, \quad (3.4.2)$$

donde N_A es la número de Avogadro y M es la masa molar del átomo, Z es el número atómico, $d\sigma/d\omega$ la sección eficaz diferencial (por electrones atómicos) para colisiones y ω es la pérdida de energía.

Definiendo el cociente S_{el}/ρ se reduce enormemente, pero no se elimina, la dependencia con la densidad del material (ver ICRU, 1984, 1993b, donde se trata el efecto de la densidad y el poder de frenado en los compuestos).

3.5 Transferencia Lineal de Energía [LET]

La **transferencia lineal de energía o poder de frenado lineal electrónico restringido**, L_{Δ} , de un material, para partículas cargadas, es el cociente de dE_{Δ} entre dl , donde dE_{Δ} es la energía perdida por las partículas cargadas debido a las colisiones electrónicas al atravesar una distancia dl , menos la suma de las energías cinéticas de todos los electrones liberados con energías cinéticas que excedan de Δ , así

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dl}.$$

Unidad: $J m^{-1}$

E_{Δ} puede expresarse en eV y por lo tanto L_{Δ} puede expresarse en $eV m^{-1}$, o cualquier múltiplo o submúltiplo conveniente, como $keV \mu m^{-1}$.

La transferencia de energía lineal, L_{Δ} , también se puede expresar como

$$L_{\Delta} = S_{el} - \frac{dE_{ke,\Delta}}{dl}, \quad (3.5.1)$$

donde S_{el} es el poder de frenado lineal electrónico y $dE_{ke,\Delta}$, es la suma de las energías cinéticas, mayores que Δ , de todos los electrones liberados por la partícula cargada al atravesar la distancia dl .

La definición muestra el siguiente balance energético la energía perdida por la partícula cargada primaria en las colisiones con los electrones, a lo largo de un segmento dl , menos la energía transportada por los electrones secundarios que tengan una energía cinética mayor que Δ , es igual a la energía considerada como "localmente transferida", en cualquier caso, la definición especifica una energía de corte, Δ , y no un alcance de corte.

Esta definición difiere de la que se dio previamente (ICRU, 1980) en dos aspectos. Primero, L_{Δ} incluye ahora la energía de enlace para todas las colisiones. Como consecuencia, L_0 se refiere a la pérdida de energía que no reaparece como energía cinética de los electrones liberados. Segundo, el umbral para la energía cinética de los electrones liberados es ahora Δ y no Δ menos la energía de enlace.

Para simplificar la notación, Δ puede expresarse en eV. Entonces L_{100} se entiende como la como la transferencia lineal de energía para una energía de corte de 100 eV. L_{∞} , que es igual a S_{el} , se puede

¹ El término "poder de frenado másico nuclear" no es del todo correcto por que no se trata de interacciones nucleares.

sustituir por L y algunas veces es denominada *transferencia lineal de energía sin restricción*.

3.6 Rendimiento Químico de la Radiación

El **rendimiento químico de la radiación**, $G(x)$, de una entidad, x , es el cociente de $n(x)$ entre ε , donde $n(x)$ es la cantidad promedio de sustancia de esa entidad producida, destruida o transformada en un sistema debido a la energía impartida, ε , a la materia de ese sistema, así

$$G(x) = \frac{n(x)}{\varepsilon}$$

Unidad: mol J⁻¹

El mol es la cantidad de materia de un sistema que contenga tantas entidades elementales como átomos hay en 0.012 kg de carbono-12. Las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas o grupos específicos de partículas (BIPM, 1998).

Una magnitud relacionada, denominada *valor G*, ha sido definida como el número medio de entidades producidas, destruidas o transformadas al impartir 100 eV de energía. La unidad en la que se expresa

3.7 Energía Media para Crear un Par Iónico en un Gas

La **energía media para crear un par iónico en un gas**, W , es el cociente de E entre N , donde N es el número medio de pares iónicos creados cuando la energía cinética inicial E de una partícula cargada se disipa completamente en el gas, así

$$W = \frac{E}{N}$$

Unidad: J

W puede expresarse también en eV.

Podemos inferir de la definición de W que los iones generados por la radiación de frenado u otra radiación secundaria emitida por las partículas cargadas están incluidos en N .

En algunos casos, puede ser necesario centrar nuestra atención en la variación de la energía media empleada en crear un par iónico a lo largo de la trayectoria de la partícula; de esta forma el concepto de W diferencial es necesario, como se define en el Informe ICRU 31 (ICRU, 1979).

En la teoría del estado sólido, un concepto similar a W es la energía media necesaria para la formación de un par electrón-hueco.

Tabla 3.1 Coeficientes de interacción y magnitudes relacionadas

Nombre ^a	Símbolo	Unidad	Definición	Sección
sección eficaz	σ	m ²	P/Φ	Sec. 3.1
coeficiente másico de atenuación	$\mu\rho$	m ² kg ⁻¹	$dN/\rho dl N$	Sec. 3.2
coeficiente de atenuación lineal	μ	m ⁻¹	$dN/N dl$	Sec. 3.2
recorrido libre medio	$1/\mu$	m	$N dl/d N$	Sec. 3.2
coeficiente másico de transferencia de energía	μ_{tr}/ρ	m ² kg ⁻¹	$dR_{tr}/\rho dl R$	Sec. 3.3
coeficiente de absorción de energía másico	μ_{en}/ρ	m ² kg ⁻¹	$(\mu_{tr}/\rho)(1-g)$	Sec. 3.3
poder de frenado másico	S/ρ	J m ² kg ⁻¹	$dE/\rho dl$	Sec. 3.4
poder de frenado lineal	S	J m ⁻¹	dE/dl	Sec. 3.4
transferencia lineal de energía	L_{Δ}	J m ⁻¹	dE_{Δ}/dl	Sec. 3.5
rendimiento químico de la radiación	$G(x)$	mol J ⁻¹	$n(x)/\varepsilon$	Sec. 3.6
energía media para crear un par iónico en un gas	W	J	E/N	Sec. 3.7

el valor G es (100 eV)⁻¹. Un valor G de 1 (100 eV)⁻¹ equivale a un rendimiento químico de la radiación de 0.104 μmol J⁻¹.

4. Dosimetría

Los efectos de la radiación sobre la materia dependen del campo de radiación, determinado por las magnitudes radiométricas definidas en las Secciones 2.1 y 2.2, y de la interacción entre la radiación y la materia, caracterizada por las magnitudes de interacción definidas en las Secciones 3.1 a 3.5. Las magnitudes dosimétricas, que han sido concebidas para proporcionar medidas físicas que se puedan correlacionar con efectos reales o potenciales, son, básicamente, producto de las magnitudes radiométricas y los coeficientes de interacción. Cuando se hacen cálculos, los valores de las magnitudes relevantes de cada tipo deben conocerse, mientras que, para realizar medidas a menudo no es necesaria dicha información.

La radiación interactúa con la materia según una serie de procesos en los cuales la energía de la partícula se transforma y queda depositada finalmente en la materia. Las magnitudes dosimétricas que describen este proceso se definen más adelante en dos secciones que tratan sobre la conversión y la deposición de energía.

4.1 Conversión de Energía

El término de conversión de energía se refiere a la transferencia de energía desde las partículas ionizantes a las partículas ionizantes secundarias. La magnitud *kerma* se relaciona con la energía cinética de las partículas cargadas liberadas por partículas sin carga; la energía empleada en romper los enlaces, generalmente una componente muy pequeña, no está incluida por definición. Además de *kerma*, se define una magnitud llamada *cema* la cual se relaciona con la energía perdida por las partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa) en las colisiones con los electrones atómicos. Por definición se incluyen las energías de enlace. La *cema* se diferencia de la *kerma* en que la *cema* tiene en cuenta la energía perdida en las colisiones electrónicas por las partículas cargadas entrantes mientras que la *kerma* considera la energía transferida a las partículas cargadas salientes.

4.1.1 Kerma²

La **kerma**, K , es el cociente de dE_{tr} entre dm , donde dE_{tr} es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas cargadas liberadas por partículas sin carga en una masa dm de material, así

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

Unidad: $J\ kg^{-1}$

El nombre especial de la unidad de *kerma* es el gray (Gy).

La magnitud dE_{tr} incluye la energía cinética de los electrones Auger.

Para una fluencia, Φ , de partículas sin carga de energía E , la *kerma*, K , en un material dado se expresa

$$K = \Phi E \mu_{tr} / \rho, \quad (4.1.1)$$

donde μ_{tr}/ρ es el coeficiente másico de transferencia de energía del material para esas partículas.

La *kerma* por unidad de fluencia, K/Φ , es denominada *coeficiente de kerma* para partículas sin carga de energía E en un material dado. Es mejor usar el término coeficiente de *kerma* que el término factor de *kerma* (usado anteriormente), porque la palabra coeficiente implica unas dimensiones físicas mientras que la palabra factor no.

En cálculos dosimétricos, la *kerma*, K , se expresa generalmente en función de la distribución de fluencia de partículas sin carga con respecto a la energía, Φ_E (ver Ec. 2.1.6a). La *kerma*, K , viene dado por

$$K = \int \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho} dE, \quad (4.1.2)$$

donde μ_{tr}/ρ es el coeficiente másico de transferencia de energía del material para partículas sin carga de energía E .

La expresión de la *kerma* en función de la fluencia implica que se puede hablar de un valor de la *kerma* o tasa de *kerma* de un material dado en un punto del espacio, o en el seno de un material diferente. Así, se puede hablar, por ejemplo, de *kerma* del aire en un punto en el seno de un maniquí de agua.

A pesar de que, la *kerma* es una magnitud que concierne a la transferencia inicial de energía a la materia, es algunas veces usada como aproximación de la dosis absorbida. La igualdad entre dosis absorbida y *kerma* es tanto más aproximada cuando existe *equilibrio de partículas cargadas* de tal forma que las perdidas por radiación son despreciables, y la energía de las partículas sin carga es grande comparada con la energía de enlace de las partículas cargadas liberadas. Existe equilibrio de partículas cargadas en un punto si la distribución de radiancia de partículas cargadas con respecto a la energía (ver

² Kinetic energy released per unit mass.

Ec. 2.1.9a) es constante en una distancia igual al alcance máximo de la partícula cargada.

4.1.2 Tasa de Kerma

La **tasa de kerma**, \dot{K} es el cociente de dK entre dt , donde dK es el incremento de kerma en un intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}.$$

Unidad: $J\ kg^{-1}\ s^{-1}$

Si se usa el nombre especial gray, la unidad de tasa de kerma es el gray por segundo ($Gy\ s^{-1}$).

4.1.3 Exposición

La **exposición**, X , es el cociente de dQ entre dm , donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones y positrones liberados o creados por los fotones en una unidad de masa de aire dm , son frenados completamente en aire, así

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

Unidad: $C\ kg^{-1}$

La ionización producida por los electrones Auger está incluida en dQ . La ionización debida a los fotones emitidos por procesos radiativos (esto es, frenado y fotones de fluorescencia) no se incluyen en dQ . Excepto por esta diferencia, significativa a altas energías, la exposición, tal como está definida antes, es el análogo en ionización a la kerma del aire. La exposición puede expresarse como función de la distribución, Φ_E , de la fluencia con respecto a la energía de los fotones, E , y del coeficiente másico de transferencia de energía, μ_{tr}/ρ , para aire y para esa energía como sigue

$$X = \frac{e}{W} \int \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g) dE, \quad (4.1.3)$$

donde e es la carga del electrón, W la energía media empleada en crear un par electrón-ión en aire y g la fracción de energía de los electrones liberados por los fotones que se pierde en procesos radiativos en aire.

Para energías fotónicas del orden de 1 MeV o menores, donde el valor de g es pequeño, la Ec. 4.1.3 se puede aproximar a $X = e/W K(1-\bar{g})$, donde

K es la kerma en aire para fotones primarios y \bar{g} es el valor medio de g promediado sobre la distribución de kerma en aire con respecto a la energía de los electrones.

Como en el caso de la kerma, puede ser conveniente referirse a un valor de la exposición o de la tasa de exposición en el espacio vacío o en un punto en el seno de un material diferente del aire; se puede hablar, por ejemplo, de exposición en un punto en el seno de un maniquí de agua.

4.1.4 Tasa de Exposición

La **tasa de exposición**, \dot{X} es el cociente de dX entre dt , donde dX es el incremento de exposición en un intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}.$$

Unidad: $C\ kg^{-1}\ s^{-1}$

4.1.5 Cema³

La **cema**, C , es el cociente de dE_c entre dm , donde dE_c es la energía perdida por las partículas cargadas, excepto electrones secundarios, debido a las colisiones electrónicas en una masa dm , así

$$C = \frac{dE_c}{dm}.$$

Unidad: $J\ kg^{-1}$

El nombre especial de la unidad de cema es el gray (Gy).

La energía perdida por las partículas cargadas en colisiones electrónicas incluye la energía empleada en romper los enlaces y la energía cinética de los electrones liberados, definidos como electrones secundarios. Por tanto, la subsecuente pérdida de energía de todos los electrones secundarios es excluida de dE_c .

La cema, C , se puede expresar en función de la distribución Φ_E , de la fluencia de partículas cargadas con respecto a la energía (ver Ec. 2.1.6a). De acuerdo con la definición de cema, la distribución Φ_E no incluye la contribución de electrones secundarios a la fluencia. La cema, C , viene así dado como

$$C = \int \Phi_E \frac{S_{el}}{\rho} dE = \int \Phi_E \frac{L_{\infty}}{\rho} dE, \quad (4.1.4)$$

³ Converted energy per unit mass.

donde S_{e1}/ρ es el poder de frenado electrónico másico de un material dado para partículas cargadas de energía E , y L_∞ es la transferencia lineal de energía sin restricción correspondiente.

Para partículas cargadas de alta energía, puede ser inadecuado despreciar el transporte de energía por los electrones secundarios de todas las energías. Un concepto modificado, *la cema restringido*, C_Δ , (Kellerer *et al.*, 1992) se define entonces como la integral

$$C_\Delta = \int \Phi'_E \frac{L_\Delta}{\rho} dE, \quad (4.1.5)$$

Esta se diferencia de la integral de la Ec. 4.1.4 en que L_∞ es reemplazado por L_Δ y la distribución Φ'_E ahora incluye a los electrones secundarios con energías cinéticas mayores que Δ . Para $\Delta = \infty$, la cema restringido es idéntico a la cema.

La expresión de la cema y la cema restringido en función de la fluencia implica que podemos hablar de sus valores para un material dado en un punto en el espacio vacío o en el seno de un material diferente. Así, se puede hablar, por ejemplo, de la cema de tejido en aire (Kellerer *et al.*, 1992).

Las magnitudes denominadas cema y cema restringido pueden usarse como aproximaciones de la dosis absorbida de partículas cargadas. La igualdad entre dosis absorbida y cema es tanto más aproximada cuando existe *equilibrio de electrones secundarios* y las pérdidas por radiación y por colisiones nucleares elásticas son despreciables. Tal equilibrio se alcanza en un punto si la fluencia de electrones secundarios es constante en una distancia igual a su alcance máximo. Para la cema restringido, solamente es necesario alcanzar un equilibrio parcial con los electrones secundarios que tienen una energía cinética como máximo de Δ .

4.1.6 Tasa de Cema

La **tasa de cema**, \dot{C} es el cociente de dC entre dt , donde dC es el incremento de cema en un intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{C} = \frac{dC}{dt}.$$

Unidad: $J\ kg^{-1}\ s^{-1}$

Si se usa el nombre especial gray, la unidad de tasa de cema es el gray por segundo ($Gy\ s^{-1}$).

4.2 Deposición de Energía

En esta sección se introducen algunas magnitudes estocásticas. El *depósito de energía* es la magnitud fundamental en términos de la cual se

pueden definir todas las demás magnitudes que se presentan aquí.

4.2.1 Depósito de Energía

El **depósito de energía**, ε_i , es la energía depositada en una sola interacción, i , así

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q,$$

donde ε_{in} es la energía de la partícula ionizante incidente (excluyendo la energía en reposo), ε_{out} es la suma de las energías de todas las partículas ionizantes que hay tras la interacción (excluyendo las energías en reposo), Q es el cambio en las energías en reposo de los núcleos y de todas las partículas involucradas en la interacción ($Q > 0$: disminución de la energía en reposo; $Q < 0$: incremento de la energía en reposo).

Unidad: J

ε_i puede expresarse también en eV.

ε_i , puede considerarse como la energía depositada en el punto de interacción, que se denomina *punto de transferencia*, esto es, el sitio donde una partícula ionizante pierde energía cinética. No se tiene en cuenta la incertidumbre mecano-cuántica de la ubicación de ésta.

Los depósitos de energía y los puntos de transferencia, sin más detalles de las interacciones que los producen, son suficientes para describir la distribución espacial de la deposición de energía por partículas ionizantes.

4.2.2 Energía Impartida

La **energía impartida**, ε , a la materia en un volumen dado es la suma de todos los depósitos de energía en dicho volumen, así

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i,$$

donde la suma se extiende a todos los depósitos de energía, ε_i , en dicho volumen.

Unidad: J

ε puede expresarse también en eV.

Los depósitos de energía sobre los que se hace la suma pueden pertenecer a uno o más *eventos (de deposición de energía)*; por ejemplo, pueden pertenecer a una o a varias trayectorias de partículas estadísticamente independientes. El término evento denota la transmisión de energía a la materia por partículas correlacionadas estadísticamente. Algunos ejemplos son un protón y sus electrones

secundarios, un par electrón positrón o las partículas primarias y secundarias en reacciones nucleares.

Si la energía impartida a la materia en un volumen dado se debe a un solo evento, ésta es igual a la suma de los depósitos de energía en el volumen asociado con el evento. Si la energía impartida a la materia en un volumen dado se debe a varios eventos, ésta es igual a la suma de las energías individuales impartidas a la materia en el volumen correspondientes a cada evento.

La energía promedio impartida, $\bar{\varepsilon}$, a la materia en un volumen dado es igual a la energía radiante, R_{in} , de todas las partículas ionizantes (cargadas y no cargadas) que entran en el volumen menos la energía radiante, R_{out} , de todas las partículas ionizantes (cargadas y no cargadas) que salen del volumen, más la suma, $\sum Q$, de todos los cambios de energía en reposo de los núcleos y partículas elementales que tienen lugar en el volumen ($Q > 0$: disminución de la energía en reposo; $Q < 0$: incremento de la energía en reposo), así

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q. \quad (4.2.1)$$

4.2.3 Energía Lineal

La **energía lineal**, y , es el cociente de ε_s entre \bar{l} , donde ε_s es la energía impartida a la materia en un volumen dado por un solo evento (de deposición de energía) y \bar{l} es la longitud promedio de la cuerda de dicho volumen, así

$$y = \frac{\varepsilon_s}{\bar{l}}.$$

Unidad: $J m^{-1}$

ε_s es la suma de los depósitos de energía ε_i en un volumen procedentes de un solo evento y puede expresarse en eV. Por lo tanto y puede expresarse en múltiplos y submúltiplos de eV y m, por ejemplo, en $keV \cdot \mu m^{-1}$.

El promedio de la longitud de la cuerda de un volumen es la longitud promedio de una distribución de cuerdas a través del volumen orientadas al azar (*distribución isotrópica uniforme*). Para un cuerpo convexo, se puede demostrar que el promedio de la longitud de la cuerdas, \bar{l} , es igual a $4V/A$, donde V es el volumen y A es el área de la superficie (Cauchy, 1850; Sëller, 1980).

Es útil considerar la distribución de probabilidad de y . El valor de la *función de distribución*, $F(y)$, es la probabilidad de que la energía lineal debida a un solo evento (de deposición de energía) sea igual o menor que y . La *densidad de probabilidad*, $f(y)$, es la derivada de $F(y)$, así

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy}, \quad (4.2.2)$$

$F(y)$ y $f(y)$ son independientes de la dosis absorbida y de la tasa de dosis absorbida.

4.2.4 Energía Específica

La **energía específica (impartida)**, z , es el cociente de ε entre m , donde ε es la energía impartida a un material de masa m , así

$$z = \frac{\varepsilon}{m}.$$

Unidad: $J kg^{-1}$

El nombre especial para la unidad de energía específica es el gray (Gy).

La energía específica puede deberse a uno o más eventos (de deposición de energía). La función de distribución, $F(z)$, es la probabilidad de que la energía específica sea igual o menor que z . La densidad de probabilidad, $f(z)$, es la derivada de $F(z)$, así

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz}, \quad (4.2.3)$$

$F(z)$ y $f(z)$ dependen de la dosis absorbida. La densidad de probabilidad, $f(z)$ incluye una componente discreta (una función delta de Dirac) en $z = 0$ para la probabilidad de que no se deposite energía.

La función de distribución de la energía específica depositada en un solo evento, $F_1(z)$, es la probabilidad condicionada de que una energía específica menor o igual que z sea depositada si tiene lugar un evento. La densidad de probabilidad, $f_1(z)$, es la derivada de $F_1(z)$, así

$$f_1(z) = \frac{dF_1(z)}{dz}, \quad (4.2.4)$$

Para volúmenes convexos, y y el incremento de energía específica, z , debido a un solo evento (de deposición de energía) están relacionados mediante

$$y = \frac{\rho A}{4} z, \quad (4.2.5)$$

donde A es el área de la superficie del volumen, y ρ es la densidad de materia en el volumen.

4.2.5 Dosis Absorbida

La **dosis absorbida**, D , es el cociente de $d\bar{\epsilon}$ entre dm , donde $d\bar{\epsilon}$ es la energía media impartida a un material de masa dm , así

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Unidad: J kg^{-1}

El nombre especial para la unidad de dosis absorbida es el gray (Gy).

4.2.6 Tasa de Dosis Absorbida

La **tasa de dosis absorbida**, \dot{D} , es el cociente de dD entre dt , donde dD es el incremento de dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt , así

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Unidad: $\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Si se usa el nombre especial gray, la unidad de tasa de dosis absorbida es el gray por segundo (Gy s^{-1}).

En el límite de dominios pequeños la energía

Tabla 4.1 Magnitudes Dosimétricas – Conversión de energía

Nombre	Símbolo	Unidades		Definición	Lugar
kerma	K	J kg^{-1}	Gy	dE_{tr}/dm	Sec. 4.1.1
coeficiente kerma	—	$\text{J m}^2 \text{ kg}^{-1}$	Gy m^2	K/Φ	Sec. 4.1.1
tasa de kerma	\dot{K}	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Gy s^{-1}	dK/dt	Sec. 4.1.2
exposición	X	C kg^{-1}		dQ/dm	Sec. 4.1.3
tasa de exposición	\dot{X}	$\text{C kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$		dX/dt	Sec. 4.1.4
cema	C	J kg^{-1}	Gy	dE_c/dm	Sec. 4.1.5
cema restringido	C_{Δ}	J kg^{-1}	Gy	—	Sec. 4.1.5
tasa de cema	\dot{C}	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Gy s^{-1}	dC/dt	Sec. 4.1.6

Tabla 4.2 Magnitudes Dosimétricas – Deposición de energía

Nombre	Símbolo	Unidades		Definición	Lugar
depósito de energía	ϵ_i	J		$\epsilon_{in} - \epsilon_{out} + Q$	Sec. 4.2.1
energía impartida	ϵ	J		$\sum \epsilon_i$	Sec. 4.2.2
energía lineal	y	J m^{-1}		ϵ/l	Sec. 4.2.3
energía específica	z	J kg^{-1}	Gy	ϵ/m	Sec. 4.2.4
dosis absorbida	D	J kg^{-1}	Gy	$d\epsilon/dm$	Sec. 4.2.5
tasa de dosis absorbida	\dot{D}	$\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Gy s^{-1}	dD/dt	Sec. 4.2.6

específica media, \bar{z} , es igual a la dosis absorbida D .

5. Radiactividad

El término *radiactividad* se refiere a todas aquellas transformaciones espontáneas que tienen como consecuencia cambios en el núcleo de los átomos. La energía liberada en dichas transformaciones es emitida en forma de fotones u otros tipos de radiación.

La radiactividad es un proceso estocástico. El átomo completo está involucrado en el proceso ya que las transformaciones nucleares también pueden afectar a la estructura atómica de capas y provocar la emisión de electrones, fotones o ambos.

Los átomos se subdividen en *nucleidos*. Un nucleido es una especie atómica que tiene un número determinado de protones y neutrones en su núcleo. Los nucleidos inestables, que se transforman en nucleidos estables o en una progenie inestable, se denominan *radionucleidos*. La transformación da lugar a otro nucleido o a una transición a un estado de menor energía del mismo nucleido.

5.1 Constante de Desintegración

La **constante de desintegración**, λ , de un radionucleido en un estado particular de energía es el cociente de dP entre dt donde dP es la probabilidad de que un núcleo dado sufra una transformación nuclear espontánea desde dicho estado de energía en el intervalo de tiempo dt , así

$$\lambda = \frac{dP}{dt}.$$

Unidad: s^{-1}

La magnitud $(\ln 2)/\lambda$, denominada habitualmente periodo de semidesintegración, $T_{1/2}$, de un radionucleido, es el tiempo promedio necesario para que los radionucleidos en un estado particular de energía reduzcan su número inicial a la mitad.

5.2 Actividad

La actividad, A , de una cantidad de un radionucleido en un estado particular de energía en un instante dado, es el cociente de dN entre dt donde dN es el número de transformaciones nucleares espontáneas desde dicho estado de energía en el intervalo de tiempo dt , así

$$A = \frac{dN}{dt}.$$

Unidad s^{-1}

El nombre especial de la unidad de actividad es el becquerel (Bq).

El "estado particular de energía" es el estado fundamental del radionucleido a no ser que se especifique otra cosa.

La actividad, A , de una cantidad de un radionucleido en un estado particular de energía es igual al producto de la constante de desintegración, λ , para ese estado, y el número N de núcleos en dicho estado, así

$$A = \lambda N, \quad (5.2.1)$$

5.3 Constante de Tasa de Kerma en Aire

La **constante de tasa de kerma en aire**, Γ_{δ} , de un radionucleido emisor de fotones, es el cociente de $l^2 \dot{K}_{\delta}$ entre A donde \dot{K}_{δ} es la tasa de kerma en aire debido a fotones con energía mayor que δ , a una distancia l en el vacío de una fuente puntual de ese nucleido con una actividad A , así

$$\Gamma_{\delta} = \frac{l^2 \dot{K}_{\delta}}{A}$$

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

Si se usan los nombres especiales gray (Gy) y becquerel (Bq), la unidad de la constante de tasa de kerma en aire es $m^2 Gy Bq^{-1} s^{-1}$.

Los fotones a los que se refiere la definición incluyen los rayos gamma, los rayos X característicos y la radiación de frenado interna.

La constante de tasa de kerma en aire, característica de cada radionucleido, se define para una fuente puntual ideal. En una fuente de dimensiones finitas tienen lugar fenómenos de atenuación y dispersión, y puede producirse radiación de aniquilación y radiación de frenado externo. En algunos casos estos procesos requieren correcciones significativas.

Cualquier medio entre la fuente y el punto de medida dará lugar a fenómenos de absorción y dispersión por lo cual sería necesario hacer correcciones.

La elección del valor de δ depende de la aplicación. Para simplificar la notación y asegurar uniformidad, se recomienda expresar δ en keV. Por ejemplo, Γ_5 se entiende que es la constante tasa de kerma en aire con una energía fotónica de corte de 5 keV.

Tabla 5.1 Magnitudes relacionadas con la radiactividad

Nombre	Símbolo	Unidades		Definición	Lugar
constante de desintegración	λ	s^{-1}		dP/dt	Sec. 5.1
Periodo de semidesintegración	$T_{1/2}$	s		$(\ln 2)/\lambda$	Sec. 5.1
actividad	A	s^{-1}	Bq	dN/dt	Sec. 5.2
constante de tasa de kerma en aire	Γ_{δ}	$m^2 J kg^{-1}$	$m^2 Gy Bq^{-1} s^{-1}$	$l^2 \dot{K}_{\delta} / A$	Sec. 5.3

Referencias

- BIPM (1998). Bureau International des Poids et Mesures, *Le Système International d'Unités (SI)*, 7th edition (Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres).
- CAUCHY, A. (1850). "Mémoire sur la rectification des courbes et la quadrature des surfaces courbes," *Mémoires de l'Académie des Sciences*, **XXII**, 3.
- CIE (1987). Commission Internationale de l'Éclairage, *Vocabulaire Electrotechnique International*, CIE Publication 50 (845) (Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève).
- CODATA (1986). Committee on Data for Science and Technology, *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants*, Codata Bulletin Number 63 (Pergamon Press, Oxford).
- HUBBELL, J.H.(1969). *Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV*, NSRDS-NBS 29 (National Bureau of Standards, Washington, DC).
- ICRU (1979). International Commission on Radiation Units and Measurements, *Average Energy Required to Produce an Ion Pair*, ICRU Report 31 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1980). International Commission on Radiation Units and Measurements, *Radiation Quantities and Units*, ICRU Report 33 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1984). International Commission on Radiation Units and Measurements, *Stopping Powers for Electrons and Positrons*, ICRU Report 37 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1993a). International Commission on Radiation Units and Measurements, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, ICRU Report 51 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1993b). International Commission on Radiation Units and Measurements, *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles*, ICRU Report 49 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ISO (1993). International Organization for Standardization, *ISO Standards Handbook*, *Quantities and Units*, 3rd edition (International Organization for Standardization, Geneva).
- KELLERER, A.M. (1980). "Concepts of geometrical probability relevant to microdosimetry and dosimetry," p. 1049 in *Proceedings Seventh Symposium on Microdosimetry*, Booz, J., Ebert, H.G. and Hartfiel, H.D., Eds. (Harwood Academic Publishers, Chur, Switzerland).
- KELLERER, A.M., HAHN, K. and ROSSI, H.H. (1992). "Intermediate dosimetric quantities," *Rad. Res.* **130**, 15-25.
- SELTZER, S.M. (1993). "Calculation of photon mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients," *Rad. Res.* **136**, 147-170.

Informes ICRU

Los Informes ICRU son distribuidos por su oficina de publicaciones. Se puede obtener información acerca de los precios y de la forma de pago en:

ICRU Publications
7910 Woodmont Avenue, Suite 800
Bethesda, Maryland 20814
U.S.A.
Teléfono: (301) 657-2652
FAX: (301)907-8768
Email: icru@icru.org
Web: <http://www.icru.org>

También se pueden obtener copias de los informes de:

Mrs. Brigitte Harder
Konrad Adenauer-Straße 26
D-3400 Göttingen
Federal Republic of Germany
Phone (0551) 22612

Dr. Minoru Takada
Japan Radioisotope Association
28-45, Honkomagome 2-chome
Bunkyo-ku, Tokyo 113
Japan

Kazuya Yamashita, Ph. D.
The Japanes Society of Radiological Technology
Nijyo Plaza, 88 Nishinokyo,
Kitatsuboi-cho
Nakagyo-ku, Kyoto 604
Japan

Prof. Torgil Möller
Regional Tumor Registry
University Hospital
S-22185 Lund
Sweden

Prof. André Wambersie
Unité de Radiobiologie et Radioprotection
UCL-Cliniques St. Luc
Avenue Hipocrate, 54.69
B-1200 Brussels, Belgium
Phone (02) 764.54.68

A continuación se enumeran los informes ICRU disponibles actualmente.

Informe ICRU Nº	Título
10b	<i>Physical Aspects of Irradiation</i> (1964)
10f	<i>Methods of Evaluating Radiological Equipment and Materials</i> (1963)
12	<i>Certification of Standarized Radioactive Sources</i> (1968)
13	<i>Neutron Fluence, Neutron Spectra and Kerma</i> (1969)
15	<i>Cameras for Image Intensifier Fluorography</i> (1969)
16	<i>Linear Energy Transfer</i> (1970)
17	<i>Radiation Dosimetry: X Rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV</i> (1970)
18	<i>Specification of High Activity Gamma-Ray Sources</i> (1970)
20	<i>Radiation Protection Instrumentation and Its Aplication</i> (1970)
22	<i>Measurement of Low-Level Radioactivity</i> (1972)
23	<i>Measurement of Absorbed Dose in a Phantom Irradiated by a Single Beam of X or Gamma Rays</i> (1973)
24	<i>Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures</i> (1976)
25	<i>Conceptual Basis for determination of Dose Equivalent</i> (1976)

Informe ICRU N°	Título
26	<i>Neutron Dosimetry for Biology and Medicine (1977)</i>
27	<i>An International Neutron Dosimetry Intercomparison (1978)</i>
28	<i>Basic Aspects of High Energy Particle Interactions and Radiations Dosimetry (1978)</i>
30	<i>Quantitative Concepts and Dosimetry in Radiobiology (1979)</i>
31	<i>Average Energie Required to Produce an Ion Pair (1979)</i>
32	<i>Methods of Assessments of Absorbed Dose in Clinical Use of Radionuclides (1979)</i>
34	<i>The Dosimetry of Pulsed Radiation (1982)</i>
36	<i>Microdosimetry (1983)</i>
37	<i>Stopping Powers for Electrons and Positrons (1984)</i>
38	<i>Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology (1985)</i>
39	<i>Determination of Dose Equivalents Resulting for External Radiation Sources (1985)</i>
40	<i>The Quality Factor in Radiation Protection (1986)</i>
41	<i>Modulation Transfer Function of Screen-Film Systems (1986)</i>
42	<i>Use of Computers in External Beam Radiotherapy Procedures with High –Energy Photons and Electrons (1987)</i>
43	<i>Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources–Part 2 (1988)</i>
44	<i>Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement (1989)</i>
45	<i>Clinical Neutron Dosimetry–Part I: Determination of absorbed Dose in a Patient Treated by External Beams of Fast Neutrons (1989)</i>
46	<i>Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues (1992)</i>
46D	<i>Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues, with Data Disk (1992)</i>
47	<i>Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations (1992)</i>
48	<i>Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection (1992)</i>
49	<i>Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles (1993)</i>
49D	<i>Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles, with Data Disk (1993)</i>
50	<i>Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy (1993)</i>
51	<i>Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry (1993)</i>
52	<i>Particle Counting in Radioactivity Measurement (1994)</i>
53	<i>Gamma-Ray Spectrometry in the Environment (1994)</i>
54	<i>Medical Imaging – The Assessment of Image Quality (1995)</i>
55	<i>Secondary Electron Spectra from Charged Particle Interactions (1995)</i>
56	<i>Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection (1997)</i>
57	<i>Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation (1998)</i>
58	<i>Dose and Volume Specification for Reporting Interstitial Therapy (1997)</i>
59	<i>Clinical Proton Dosimetry – Part I: Beam Production, Beam Delivery and Measurement of Absorbed Dose (1998)</i>
60	<i>Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (1998)</i>

Hay disponibles carpetas para los Informes ICRU. Cada carpeta puede contener de seis a ocho informes. Las carpetas llevan impresas la identificación “ICRU Reports”, y disponen de porta-etiquetas que permiten al usuario identificar los informes contenidos en cada carpeta.

También están disponibles los siguientes informes ICRU encuadernados:

- Volumen I. Informes ICRU 10b, 10c, 10f
- Volumen II. Informes ICRU 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20
- Volumen III. Informes ICRU 22, 23, 24, 25, 26
- Volumen IV. Informes ICRU 27, 28, 30, 31, 32
- Volumen V. Informes ICRU 33, 34, 35, 36
- Volumen VI. Informes ICRU 37, 38, 39, 40, 41
- Volumen VII. Informes ICRU 42, 43, 44
- Volumen VIII. Informes ICRU 45, 46, 47
- Volumen IX. Informes ICRU 48, 49, 50, 51
- Volumen X. Informes ICRU 52, 53, 54, 55

(Los títulos de los Informes contenidos en cada tomo se dan en el listado de Informes anterior).
 Los siguientes informes ICRU fueron sustituidos por informes posteriores y han dejado de editarse:

Informe ICRU N°	Título y Referencia*
1	<i>Discussion on International Units and Standard for X-ray work</i> , Br. J. Radiol. 23 , 64 (1927).
2	<i>International X-ray Unit of Intensity</i> , Br. J. Radiol. (new series) 1 , 363 (1928).
3	<i>Report of Comittee on Standarization of X-ray Measurements</i> , Radiology 22 , 289 (1934).
4	<i>Recommendations of the International Committee for Radiological Units</i> , Radiology 23 , 580 (1934).
5	<i>Recommendations of the International Committee for Radiological Units</i> , Radiology 29 , 634 (1937).
6	<i>Recommendations of the International Commission on Radiological Protection and of the International Commission on Radiological Units</i> , National Bureau of Standards Handbook 47 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1951).
7	<i>Recommendations of the International Committee for Radiological Units</i> , Radiology 62 , 106 (1954).
8	<i>Report of the International Commission on Radiological Units and Measurement (ICRU) 1956</i> , National Bureau of Standards Handbook 62 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1957).
9	<i>Report of the International Commission on Radiological Units and Measurement (ICRU) 1959</i> , National Bureau of Standards Handbook 78 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1961).
10a	<i>Radiation Quantities and Units</i> , National Bureau of Standards Handbook 84 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1962).
10c	<i>Radioactivity</i> , National Bureau of Standards Handbook 88 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1963).
10d	<i>Clinical Dosimetry</i> , National Bureau of Standards Handbook 87 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1963).
10e	<i>Radiobiological Dosimetry</i> , National Bureau of Standards Handbook 88 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1963).
11	<i>Radiation Quantities and Units</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1968).
14	<i>Radiation Dosimetry: X Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0.6 and 50 MeV</i> (1969).
19	<i>Radiation Quantities and Units</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1971).
19S	<i>Dose Equivalent</i> [Supplement to ICRU Report 19] (International Commision on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1973).
21	<i>Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies Between 1 and 50 MeV</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1972).
29	<i>Dose Specification for Reporting External Bean Therapy with Photons and Electrons</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1978).
33	<i>Radiation Quantities and Units</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, 1980).
35	<i>Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV</i> (International Commision on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, 1984).

* Las referencias dadas están en inglés. Algunos Informes están publicados también en otros idiomas.

Índice de Tablas

Las Tablas 2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 4.2 y 5.1 proporcionan una guía de donde aparecen en el texto las definiciones de las magnitudes. También proporcionan información de los símbolos y unidades. Las podemos encontrar en las páginas que se indican a continuación:

Tabla 2.1	Magnitudes radiométricas escalares	10
Tabla 2.2	Magnitudes radiométricas vectoriales	10
Tabla 3.1	Coefficientes de interacción y magnitudes relacionadas	14
Tabla 4.1	Magnitudes Dosimétricas – Conversión de energía	19
Tabla 4.2	Magnitudes Dosimétricas – Deposición de energía.....	19
Tabla 5.1	Magnitudes relacionadas con la radiactividad.....	21