

# TEMA III MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

1

Miguel Irán Alcérreca Sánchez



# Contenido

1. Introducción
2. Sistema Internacional de Unidades
3. Unidades de Medición de la Radiación
4. Dosimetría



# 1. Introducción

- La realización de mediciones ha sido un factor importante en la evolución de la humanidad.
- Sin las mediciones no habría sido posible lograr el avance y desarrollo de las ciencias y de la tecnología, de la industria y la agricultura, etc.

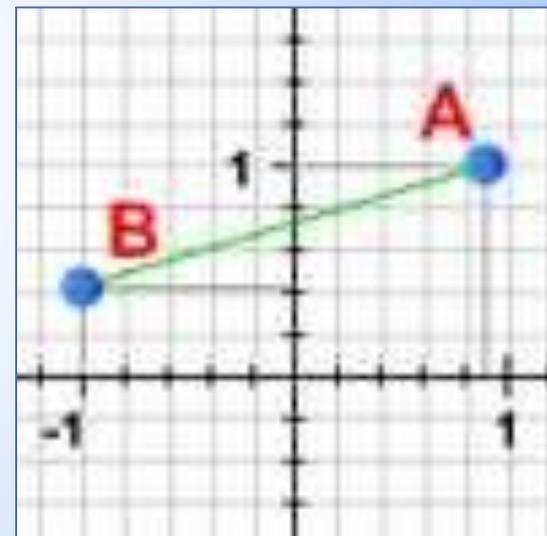


- ▶ El desarrollo científico y tecnológico requiere cada vez mayor exactitud y precisión en su cuantificación.
- ▶ Es necesario medir magnitudes tales como tiempo, longitud, masa, presión, dureza, energía, potencia, concentración, voltaje, etc.
- ▶ El resultado de una medición constará de un número y una unidad; esta nos indica la referencia contra la cual se comparó la magnitud física, mientras que el número indica cuántas veces es ésta mayor, menor o igual que la unidad.



# Ejemplo

- ▶ El resultado de medir la distancia entre dos puntos dados, podría escribirse como 0.95 metros o como 1.0389 yardas.
- ▶ En el primer caso la unidad de referencia es el metro y en el segundo es la yarda.
- ▶ Para transformar una unidad en la otra es necesario conocer la relación entre ambas, como en este caso,  
donde se sabe que  $1 \text{ yarda} = 0.9144 \text{ metros}$ .



## 2.1 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

- A lo largo de la historia se han implementado diversas unidades y sistemas de unidades. Entre estos últimos puede mencionarse el cgs, el mks y el inglés.
- Por acuerdo internacional y con el propósito de estructurar un sistema lo más universal y adecuado posible para las diferentes mediciones, fue creado el Sistema Internacional de Unidades (SI).



# SI (Unidades base)

7

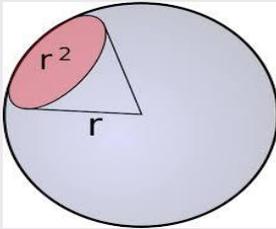
- Está formado a partir de 7 unidades denominadas básicas.

MAGNITUD	UNIDAD	PATRON PRIMARIO	SIMBOLO
Longitud	metro	Basado en la longitud de onda de la luz emitida por una lámpara de criptón especial.	m
Masa	kilogramo	Un cilindro de aleación de platino que se conserva en el laboratorio Nacional de Patrones en Francia.	kg
Tiempo	segundo	Basado en la frecuencia de la radiación de un oscilador de cesio especial.	s
Intensidad de Corriente Eléctrica	Ampere	Con base en la de fuerza magnética entre dos alambres que transportan la misma corriente	A
Temperatura Termodinámica	Kelvin	Definido por la temperatura a la que hierve el agua y se congela simultáneamente si la presión es adecuada	K
Intensidad Luminosa	Candela	Basado en la radiación de una muestra de platino fundido preparada especialmente	cd
Cantidad de Sustancia	mol	Con base en las propiedades del carbono 12.	mol

# SI (Unidades suplementarias)

8

- Son unidades que se definen geoméricamente y pueden tener el carácter de unidad base o de unidad derivada. Estas unidades son el radián y el ester-radián

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICION
Angulo plano	radián	rad	Es el ángulo plano comprendido entre dos radios de un círculo y que interceptan sobre la circunferencia de este círculo un arco de longitud igual a la del radio (ISO-R-31/1)
Angulo sólido	estereorradián	sr 	Haciendo referencia a una <a href="#">esfera</a> de radio $r$ . Si el área de una porción de esta esfera es $r^2$ , un estereorradián es el <a href="#">ángulo sólido</a> comprendido entre esta porción y el centro de la <a href="#">esfera</a> .(ISO-R-31/1)

# SI (Unidades derivadas)

- Son unidades que se forman combinando entre sí las unidades base, o bien, combinando las unidades base, con las unidades suplementarias según expresiones algebraicas que relacionan las magnitudes correspondientes de acuerdo a leyes simples de la física.



# SI (Unidades derivadas)

10

## Unidades derivadas que tienen nombre propio

Magnitud	Unidad		
	Nombre	Símbolo	Expresión
Actividad de un radionúclido	Becquerel	Bq	$s^{-1}$
Carga eléctrica, cantidad de electricidad	Coulomb	C	$s \cdot A$
Capacidad eléctrica	Farad	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Índice de dosis absorbida	Gray	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
Inductancia	Henry	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Frecuencia	Hertz	Hz	$s^{-1}$
Energía, trabajo	Joule	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Flujo luminoso	Lumen	lm	$cd \cdot sr$
Iluminancia	Lux	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Fuerza	Newton	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Resistencia eléctrica	Ohm	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Presión	Pascal	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Conductancia eléctrica	Siemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Dosis equivalente	Sievert	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$
Densidad de flujo magnético	Tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Potencial eléctrico, fuerza electromotriz	Volt	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Potencia, flujo radiante	Watt	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Flujo magnético	Weber	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$

## 2.2 Prefijos para unidades del SI



- Expresar unidades tan grandes o tan pequeñas es usual en las áreas de ciencia y tecnología.
- Se logra indicar estas cantidades en una forma más simple mediante el uso de prefijos.



# Prefijos para unidades del SI

- Los símbolos de las unidades pueden verse afectados de prefijos que actúan como múltiplos y submúltiplos decimales.
- Los prefijos se colocan delante del símbolo de la unidad correspondiente sin espacio intermedio.
- El conjunto del símbolo más el prefijo equivale a una nueva unidad que puede combinarse con otras unidades y elevarse a cualquier exponente (positivo o negativo).
- Los prefijos decimales se muestran en las tablas siguientes:



# Prefijos

Múltiplos		
Prefijo	Símbolo	Factor
kilo	k	$10^3$
mega	M	$10^6$
giga	G	$10^9$
tera	T	$10^{12}$

Submúltiplos		
Prefijo	Símbolo	Factor
Mili	m	$10^{-3}$
Micro	μ	$10^{-6}$
Nano	n	$10^{-9}$
Pico	p	$10^{-12}$



# Ejemplo:

- ▶ Una planta nucleoelectrica es capaz de generar mil millones de watts de potencia eléctrica ( $10^9$  W).
- ▶ Durante la fisión de un átomo de  $^{235}\text{U}$  se liberan aproximadamente  $3.2 \times 10^{-11}$  Joules (J) de energía.
- ▶ Utilizando los prefijos quedaría:

$$1 \times 10^9 = 1 \text{ GW}$$

y

$$3.2 \times 10^{-11} \text{ Joules} = 32 \times 10^{-12} \text{ J} = 32 \text{ pJ}$$



## 2.3 Otras unidades de utilidad

- ➔ Aún en la actualidad y por diferentes razones, entre ellas históricas o de comodidad, se continúa utilizando un gran número de unidades que no forman parte del SI.

# Unidades usuales fuera del sistema

Magnitud física	Unidad	Equivalencia SI
Tiempo	Minuto (min)	1 min = 60 s
Tiempo	Hora (h)	1 h = 3600 s
Tiempo	Día (d)	1 d = 86 400 s
Tiempo	Año (a)	1 a = $3.1536 \times 10^7$ s
Energía	Ergio	1 ergio = $1 \times 10^{-7}$ J
Potencia	Caballo de potencia (hp)	1 hp = 746 W
Temperatura	Grado Celsius (°C)	$T(K) = T(°C) + 273.15$ 1°C = 1 K
Cantidad de sustancia	Kilogramo-mol (kgmol)	1 kgmol = 1000 mol



# UNIDADES UTILIZADAS EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

17



### 3. Unidades de Medición de la Radiación

- ▶ Las unidades radiológicas se pueden expresar en unidades internacionales, pero los factores numéricos implicados, dificultan su adopción como unidades derivadas del SI.

## 3.1 Las unidades comunes de los E.E.U.U.

19

- **Curie (Ci):** El Curie es una unidad utilizada para medir la radiactividad.

Un Curie (curio) es la cantidad de un material radiactivo que tiene 37,000,000,000 de transformaciones (desintegraciones) en un segundo.

A menudo, la radiactividad se expresa en unidades más pequeñas, como milésimas (mCi), una millonésima ( $\mu$  Ci), o incluso billonésimas (nCi) de un curio.

Las relaciones entre Becquerelios y los Curie es la siguiente:

$$3.7 \times (10) \text{ E}10 \text{ Bq} = \text{un curio.}$$

- **Roentgen (R):** El Roentgen es una unidad utilizada para medir una cantidad llamada "la exposición".

Esto puede ser usado para describir sólo una cantidad de rayos gamma y rayos X, y sólo en el aire.

Un Roentgen es igual a depositar en aire la energía suficiente para generar  $2.58E-4$  Culombios por kilogramo en condiciones estándar (presión y temperatura) .

El Roentgen es una medida de la ionización de las moléculas en una masa de aire.

La ventaja principal de esta unidad es que es fácil de medir directamente, pero es limitada porque es sólo para la deposición en el aire, y sólo para los rayos gamma y rayos-X (radiografías).

- **rad (dosis de radiación absorbida):** Es la unidad básica de la dosis de radiación absorbida. Es una medida de la cantidad de energía absorbida por el cuerpo.

Un rad se define como la absorción de 100 ergios por gramo de material.

El rad como unidad puede ser utilizada para cualquier tipo de radiación, pero no describe los efectos biológicos de las diferentes radiaciones.

El rad es la unidad tradicional de la dosis absorbida y ha sido sustituida por el Gray (Gy), que es equivalente a 100 rad.

- ▶ **rem (Roentgen Equivalent Man):** El **rem** es una unidad utilizada para obtener "la dosis de una radiación ionizante que causa el mismo efecto biológico que un Roentgen de una exposición a los rayos X o los rayos gamma".
- ▶ El Rem es una unidad usada para derivar una cantidad llamada "**el equivalente de dosis**". Esto relaciona la dosis absorbida en el tejido humano con el daño biológico efectivo de la radiación.

No toda la radiación tiene el mismo efecto biológico, incluso para la misma cantidad de dosis absorbida. El equivalente de dosis se expresa a menudo en términos de **milésimas de rem, o mrem**.

Para determinar el equivalente de dosis (rem), se multiplican la dosis absorbida (rad) por un factor de calidad (Q) que es único para el tipo de radiación incidente. El **rem** está siendo reemplazado por el Sievert (se define en el Sistema Internacional de Unidades, SIU").



- ▶ En el periodo de 1953 a 1962, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación, desarrolló y presentó sus definiciones para las cantidades de actividad, exposición, dosis absorbida y equivalente de dosis, así como las correspondientes unidades especiales:

Curie, Roentgen, rad, rem

## Terminología:

- Rapidez de Exposición = cantidad de radiación que se puede recibir por unidad de tiempo.
- Dosis = cantidad total de radiación recibida.

## 3.2 Exposición y Rapidez de exposición

- Exposición (X): es la cantidad de carga eléctrica que la radiación electromagnética produce en una unidad de masa de aire.

$$X = \frac{dQ}{dm} (\text{C} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$dQ$  = valor absoluto de la carga total de iones de un signo producido en aire, cuando todos los electrones y positrones, liberados por los fotones incidentes, se frenan completamente en una masa de aire ( $dm$ ).

# Exposición y rapidez de exposición

- ▶ Rapidez de exposición: es la rapidez con la que la radiación electromagnética produce cargas eléctricas en el aire.

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

$$C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$$

## Unidades comunes de rapidez de exposición

- R/h (Roentgen por hora)
- mR/h (miliRoentgen por hora)
- mR/min (miliRoentgen por minuto)

# Unidades utilizadas en protección radiológica.

MAGNITUD	UNIDADES DEL SIU	UNIDAD ESPECIAL
Actividad	$s^{-1}$ (Becquerel, Bq)	Curie, Ci
Exposición	$C \cdot kg^{-1}$	Roentgen, R
Rapidez de exposición	$C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1} = A \cdot kg^{-1}$	$Rh^{-1}$
Dosis absorbida	$J \cdot kg^{-1}$ (Gray, Gy)	Rad, rad
Rapidez de dosis absorbida	$J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1} = W \cdot kg^{-1}$	$Rad h^{-1}$
Equivalente de dosis	$J \cdot kg^{-1}$ (sievert, Sv)	Rem, rem
Rapidez de equivalente de dosis	$J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1} = W \cdot kg^{-1}$	$remh^{-1}$

# 4. DOSIMETRÍA

## 4.1 Unidades en Dosimetría

- Debido a que la radiación puede dañar nuestra salud es muy importante poder cuantificar la cantidad de radiación que recibe nuestro cuerpo , es decir la Dosis.
- El estudio de esto se llama dosimetría y es una parte muy importante en la Física Médica.
- La Dosimetría se refiere con mayor frecuencia a los cantidades de **rads** ó **milirads** de radiación recibida.

- rad: es la unidad especial del S.I.U. para medir la dosis absorbida. Definida como la absorción de 100 ergios de energía depositada por la radiación en 1 gramo de cualquier material.
- La relación entre el Gray y el rad es:

$$1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$$

# Dosis de radiación absorbida - el Gray

31



**Louis Harold Gray**

A Una dosis de 1 Gray  
corresponde a la deposición  
de 1 joule de energía por  
kilogramo de materia (por  
ejemplo tejido vivo)

## 4.2 Dosis absorbida y rapidez de dosis absorbida.



- Dosis absorbida ( $D$ ): es la cantidad de energía que absorbe un material al ser expuesto a la radiación de cualquier tipo

$$D = \frac{dE}{dm}$$

$$(Gy, 1 Gy = 1J \cdot kg^{-1})$$

$dE$  = energía promedio depositada por la radiación ionizante en una masa  $dm$

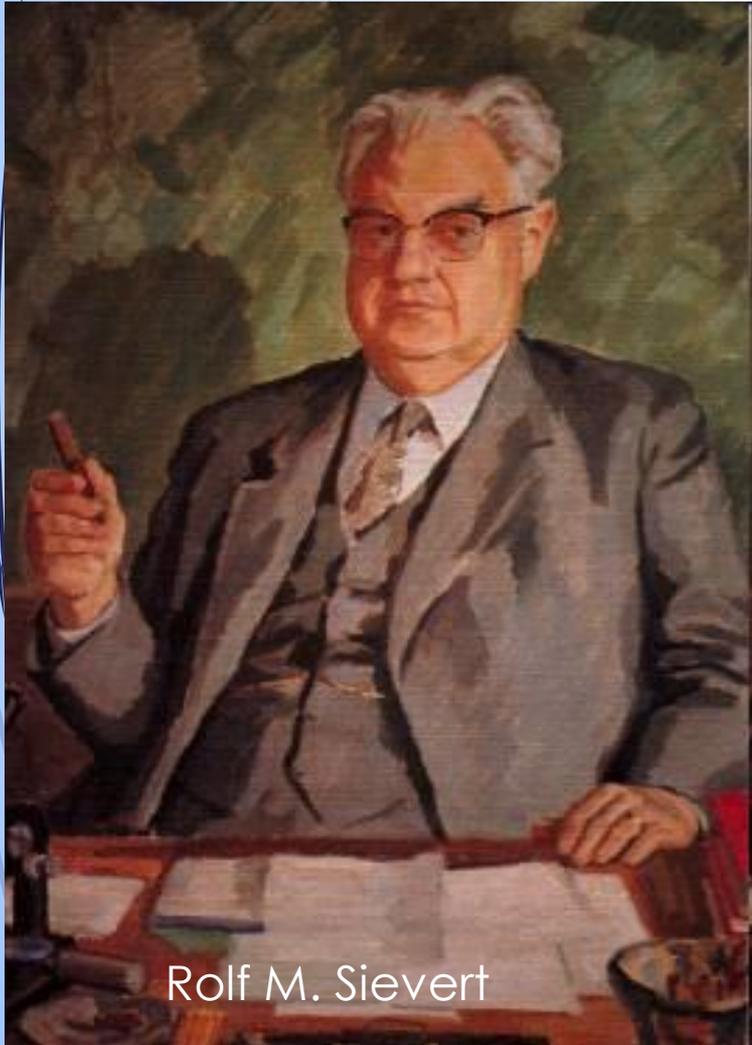
# Qué dosis obtenemos al beber una taza de café?

- 150 ml de café bebidos a 60°C
- El café se enfría 23°C a la temperatura del cuerpo (37°C) transfiriéndose :  
150 x 23, o 3500 calorías, de energía calorífica
- 3500 calorías son  $3500 \times 4.2 = 14,700$  Joules
- Si peso alrededor de 83 kilos, entonces  $14,700 / 83$ , son aproximadamente 180 Grays
- O no.....?

**5 Grays de las radiaciones ionizantes** en todo el cuerpo es probable que conduzcan a la muerte en 10 a 30 días por los efectos sobre la médula ósea;

- 50 Grays es probable que conduzca a la muerte dentro de los 3 a 5 días por los efectos sobre el tracto gastrointestinal;
- 100 Grays o más es probable que conduzca a la muerte en 48 horas a través de efectos sobre el sistema nervioso central.
- Así que el Gray es la medida específica de energía depositada en el tejido por la "radiación ionizante" - pero ¿por qué ese tipo de energía es especial?

## 4.3 Dosis Equivalente - el Sievert



Rolf M. Sievert

**Sieverts = Grays x "factor de peso de la radiación"**

Factor de Gammas = 1

Factor de Betas = 1

Factor de Alfas = 20

# El equivalente de dosis

- ▶ Aunque el daño producido por un tipo determinado de radiación ionizante depende de la energía impartida a la materia, algunos tipos de partículas producen efectos mayores que otros con la misma cantidad de energía impartida. Por ejemplo para dosis absorbidas iguales :
- ▶ Las alfas producen mas daño que los protones
- ▶ Los protones producen mas daño que las beta
- ▶ El daño se incrementa conforme la distancia a la cual se está impartiendo la dosis disminuye.

- La efectividad de una partícula ionizante en relación a otra puede variar considerablemente dependiendo de muchas otras circunstancias:
- Material biológico particular que se está irradiando
- El intervalo de tiempo en el que se está entregando la dosis
- El tipo de efecto considerado, y el retardo antes de que el efecto aparece
- La habilidad del cuerpo para reparar el daño

- ▶ Si se conociera la dosis en rads requerida para producir un grado de daño determinado para cada clase de partícula ionizante, se tendría entonces información clave suficiente para el control de la radiación.
- ▶ Obviamente esta información no existe, ni es probable que se pueda desarrollar completamente
- ▶ Solo existes estimaciones gruesas sobre los daños relativos causados por las diferentes partículas
- ▶ Experimentos en animales de laboratorio hay ayudado a conocer algo al respecto

Unidad de la dosis equivalente SI:

**Sievert (Sv)**

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / 1 \text{ Kg}$$

Unidad antigua: rem

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Equivalencias

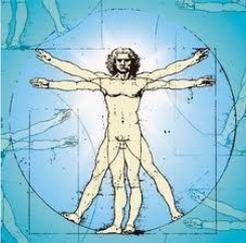
$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$
$$1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$$
$$1 \mu \text{ Sv} = 0.1 \text{ mrem}$$

En México, de acuerdo al reglamento *General de Seguridad Radiológica* de la Comisión nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), los límites de dosis anuales de radiación que pueden recibir:

- ▶ **Trabajadores expuestos 50 mSv/año**
- ▶ **Público en general 5 mSv/año**

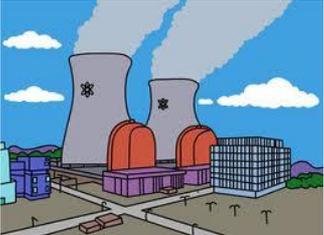


# Fuentes Naturales de Radiación

	FUENTE	mrem/año
	Sol	28
	Tierra	26
	Radón	200
	Cuerpo humano	25
	Materiales para construcción	4

# Fuentes artificiales de radiación

42

	FUENTE	mrem/año
	Medica	90
	Radiactiva	5
	Productos electrónicos	1
	Energía nuclear	0.3

# Dosis absorbida y rapidez de dosis absorbida

- **Dosis absorbida en tejidos:** ya que la mayoría de los emisores gamma tienen energías entre 0.2 y 3 MeV, se tiene la relación:

$$D = 0.94X$$

Ya que la relación entre Roentgen y rad es:

$$1R = 0.94 \text{ rad}$$



# Dosis absorbida y rapidez de dosis absorbida

- **Dosis absorbida en aire:** para radiación electromagnética de las mismas características anteriores

$$D = 0.87 X$$

Ya que la relación entre Roentgen y rad es:

$$1R = 0.87 \text{ rad}$$

# Dosis absorbida y rapidez de dosis absorbida

- ▶ Rapidez de dosis absorbida: es la rapidez con la que la radiación de cualquier tipo deposita su energía en cualquier material expuesto.

$$D = \frac{dD}{dt}, \quad (\text{Gy/s})$$

Donde:

$dD$  = incremento de dosis absorbida en el intervalo  $dt$

► Unidades comunes de rapidez de dosis

$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  (rad por segundo)

$\text{mrad}\cdot\text{s}^{-1}$  (milirad por segundo)

$\text{mrad}\cdot\text{min}^{-1}$  (milirad por minuto)

## 4.4 FACTOR DE PESO DE LA RADIACIÓN

El factor de peso de la radiación es una medida de los efectos biológicos producidos por las distintas radiaciones, comparados con los producidos por los rayos X y gamma para una dosis absorbida dada.

**El FACTOR DE PESO refleja la efectividad biológica relativa (RBE) de las radiaciones en la producción de efectos estocásticos a bajas dosis.**

- La Dosis absorbida  $D$ , o la dosis absorbida media en un órgano  $D_T$ , no son magnitudes suficientes en si mismas para caracterizar un daño.
- El riesgo de efecto biológico no depende solo de la energía depositada por unidad de masa de tejido irradiado sino también del modo en que esta energía es distribuida.



## DOSIS EQUIVALENTE

En un tejido T la dosis equivalente  $H_T$  es :

$$H_T = \sum_R w_R D_{TR}$$

$D_{TR}$  es la dosis absorbida promediada sobre el tejido T debida a la radiación R

$w_R$  es el factor de Peso de la radiación . Depende del tipo y energía de la radiación, pero no del tejido irradiado.





# Dosis Efectiva (también el Sievert)

Dosis Efectiva (Sv) = Suma sobre todos los órganos y tipos de radiación de:

Dosis Absorbida (Gy)

x factor de peso de la radiación

x factor de peso del tejido

Table B.2. Tissue weighting factors,  $w_T$ , in the 2007 Recommendations.

Organ/Tissue	Number of tissues	$w_T$	Total Contribution
Lung, stomach, colon, bone marrow, breast, remainder	6	0.12	0.72
Gonads	1	0.08	0.08
Thyroid, oesophagus, bladder, liver	4	0.04	0.16
Bone surface, skin, brain, salivary glands	4	0.01	0.04

## 4.5 Equivalente de dosis y rapidez de equivalente de dosis

- ▶ Equivalente de dosis (H): es una magnitud que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular con los efectos estocásticos tardíos.
- ▶ En otras palabras, nos indica el daño ocasionado por la radiación ionizante.

$$H = DQ \text{ (Sv)}$$

Donde:  $Q$  = factor de calidad    y     $D$  = dosis absorbida, en Gy

# Equivalente de dosis y rapidez de equivalente de dosis

- Factor de calidad: generalmente el efecto biológico de una dosis absorbida  $D$ , depende del tipo de radiación y de las condiciones de irradiación. No todos los tipos de radiación (alfa, beta, gamma, neutrones, etc.) ocasionan el mismo daño biológico, por lo tanto es necesario definir lo que llamamos **Factor de Calidad**.

# Equivalente de dosis y rapidez de equivalente de dosis

- ▶ Factor de calidad: representa el daño que cualquier tipo de radiación causa en relación al daño causado por la radiación gamma.

# Factor de calidad

- ▶ El factor que expresa la efectividad relativa de una partícula dada con ase en su "transferencia lineal de energía (LET)" es conocido como "factor de calidad"
- ▶ Estos factores en función del LET se asignan con bases experimentales en animales de laboratorio
- ▶ En una situación de exposición también pueden presentarse otros factores que modifican el efecto de la energía impartida a la materia, por ejemplo la distribución de la dosis
- ▶ Si estos factores son conocidos se incluyen en la evaluación junto con el factor de calidad, como factores modificadores.

## Valores de Q establecidos en la NOM-001-NUCL-1994

Tipo de radiación	Q
Fotones (rayos X y radiación gamma) con energías mayores a 30 KeV.	1
Electrones con energías mayores a 30 KeV.	1
Partículas $\beta$ del tritio	2
Partículas $\alpha$ , protones y iones pesados	20
Neutrones:	
Con energías menores a 10 KeV.	5
entre 10 KeV y 100 KeV.	10
entre 100 KeV y 2 MeV.	20
entre 2 MeV y 20 MeV.	10
mayores a 20 MeV.	5

# Equivalente de dosis y rapidez de equivalente de dosis

- ▶ Rapidez de equivalencia de dosis: es la rapidez con la que la radiación deposita energía en el tejido, dañándolo.

$$H = \frac{dH}{dt} \quad (\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1})$$

Unidades comunes de rapidez de equivalencia de dosis

$\text{mSv} \cdot \text{s}^{-1}$  (milisieverts por segundo)

$\text{mrem} \cdot \text{s}^{-1}$  (milirem por segundo)

$\text{mrem} \cdot \text{min}^{-1}$  (milirem por minuto)

## Referencias y agradecimientos

- ▶ E.B. Podgorsak, Radiation Oncology Physics , IAEA, Vienna ,2005
- ▶ Nordion Inc., CIC, Irradiation Facility Management Course, session 2
- ▶ ININ, Curso de protección radiológica, 2010. [www.inin.gob.mx](http://www.inin.gob.mx)
- ▶ Jacob Shapiro, Radiation Protection, A Guide for Scientists and Physicians, Harvard University Press Third Edition, 1990