

# Metrología y Dosimetría del Radón

A. Vargas

Instituto de Técnicas Energéticas (INTE), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

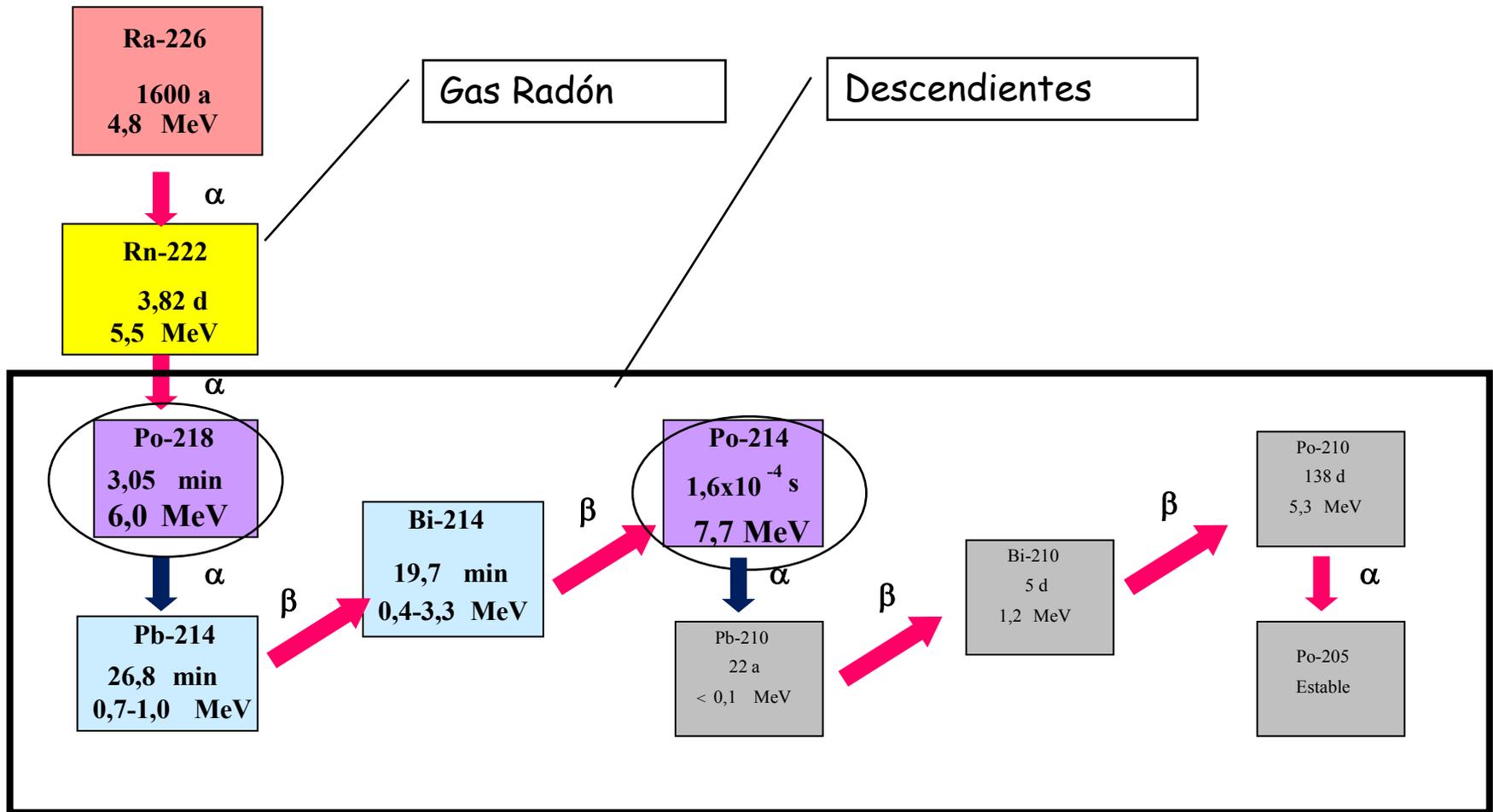


Jornada Técnica sobre el Radón:  
'Desde el marco legal a la calidad en las medidas',  
Barcelona 19 de Marzo de 2018.

# Índice

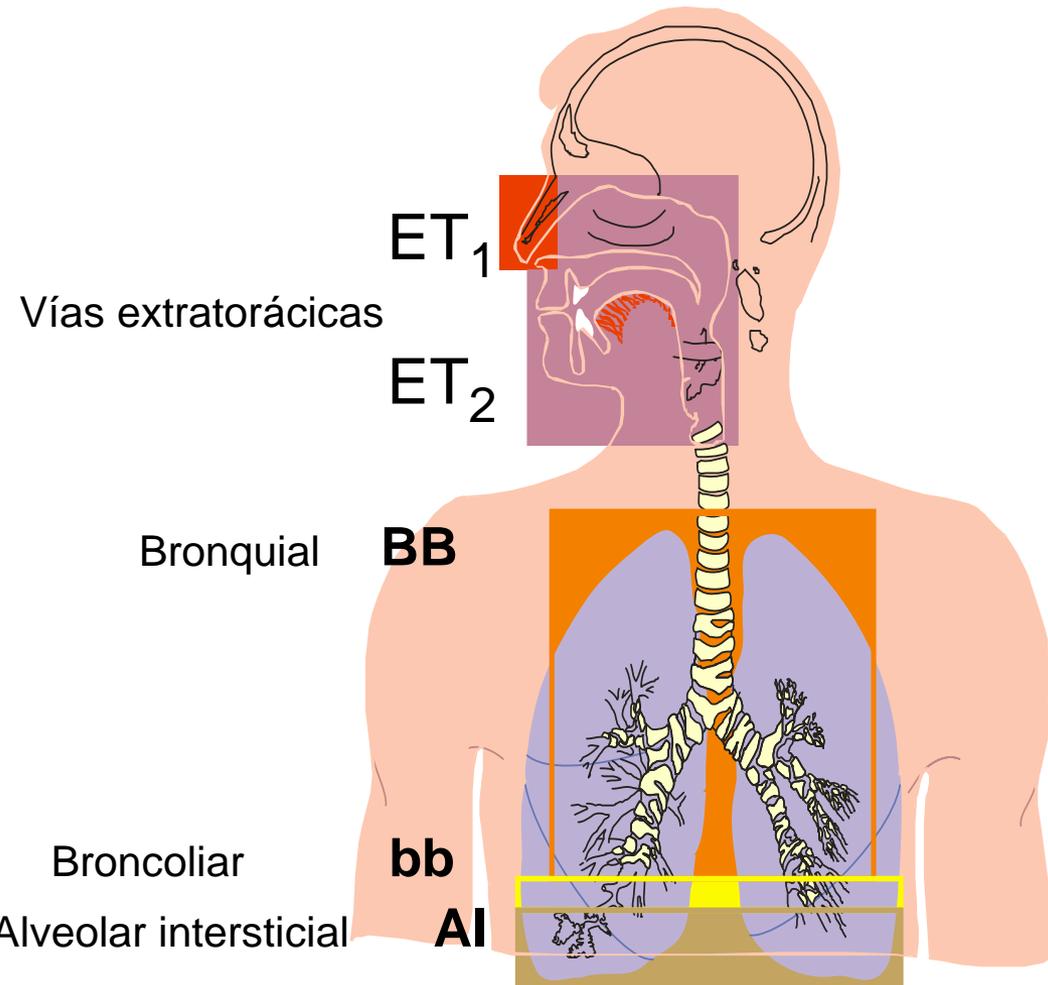
- Introducción.
- Cantidades y unidades utilizadas en la dosimetría del radón.
- Cálculo de la dosis efectiva según ICRP 137. Fundamento y ejemplo de cálculo.
- Metrología del radón. Procedimientos y equipos de medida.

# CADENA DE DESINTEGRACIÓ U-238



# Inhalación de descendientes del radón

## Modelo del tracto respiratorio (ICRP Publication 66)



**1 átomo de  $^{218}\text{Po}$  tiene una energía alpha potencial de 6 MeV (desintegración  $^{218}\text{Po}$ ) + 7.69 MeV (desintegración  $^{214}\text{Po}$ )**

**1 átomo  $^{218}\text{Po} \rightarrow 13.69 \text{ MeV}$**

**1 Bq de  $^{218}\text{Po}$  tiene una energía alfa potencial de**

$$N_{\text{at}} = 1 \text{ Bq} / \lambda_{218} = 264 \text{ átomos/Bq}$$

**1 átomo  $^{218}\text{Po} \rightarrow 13.69 \text{ MeV/at}$**

$$13.69 \cdot 264 = 3615 \text{ MeV/Bq}$$

$$(\lambda_{218} = 0.003788 \text{ s}^{-1})$$

**1 Bq  $^{218}\text{Po} \rightarrow 3615 \text{ MeV}$**

# Cantidades y Unidades especiales: PAE, PAEC y EEC

➤ **Energía alfa potencial ( $\epsilon_p$ ) (PAE):** es la energía alfa total emitida en la desintegración de los descendiente de vida corta del radón en su cadena de desintegración.

$$\epsilon_p \text{ (MeV)} = \sum_i \epsilon_{p,i} N_i = 13.69 N_{\text{Po-218}} + 7.69 (N_{\text{Pb-214}} + N_{\text{Bi-214}}) + 7.69 N_{\text{Po-214}}$$

1 MeV = 1.602 10<sup>-13</sup> J

PAE<sub>i</sub> (MeV/átomo)

➤ **Concentración de energía alfa potencial  $C_p$  (PAEC)**

$$C_p \left( \frac{\text{MeV}}{\text{m}^3} \right) = \sum_i \left( \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} \right) C_i = 3615 C_{\text{Po-218}} + 17840 C_{\text{Pb-214}} + 13250 C_{\text{Bi-214}}$$

PAE<sub>i</sub> (MeV/Bq)

➤ **Concentración de radón equivalente en equilibrio  $C_{\text{eq}}$  (EEC) :** es aquella concentración de gas radón que estando en equilibrio radiactivo con sus descendientes tiene la misma energía alfa potencial que los descendientes en el aire.

$$EEC \left( \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\sum_i C_i \left( \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} \right)}{\sum_i \left( \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} \right)} = 0.104 C_{\text{Po-218}} + 0.514 C_{\text{Pb-214}} + 0.382 C_{\text{Bi-214}}$$

$$\sum_i \left( \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_i} \right) = 3615 + 17840 + 13250 = 34710 \text{ MeV/Bq}$$

## Unidad histórica utilizada comúnmente

➤ **PAEC:** la unidad histórica para para el PAEC que se utilizaba en la industria minera es el working level (**WL**). Se define una concentración de 1 WL como aquella combinación de descendientes de radón en 1 m<sup>3</sup> de aire que resultan en una emisión de 1.300 10<sup>8</sup> MeV de energía alfa

$$1 \text{ WL} = 1.300 \cdot 10^8 \text{ MeV} / \text{m}^3 = 0.020826 \text{ mJ} / \text{m}^3$$

$$1 \text{ WL} = 3750 \text{ Bq} / \text{m}^3 \text{ de concentración equivalente en equilibrio (EEC)}$$

➤ **Exposición:** la exposición de PAE se define como la el PAEC integrado en el tiempo.

$$\text{Exposición de PAE} = \text{PAEC} * T \quad \text{unidad: J h m}^{-3} \text{ históricamente Working Level Month (WLM)}$$

Se define el WLM como la exposición a una atmósfera de 1 WL durante un periodo de trabajo de 1 mes (170 h)

$$1 \text{ WLM} = 0.020826 \text{ mJ} / \text{m}^3 * 170 \text{ h} = 3.54 \text{ mJ h m}^{-3}$$

$$1 \text{ WLM} = 3750 \text{ Bq} / \text{m}^3 * 170 \text{ h} = 6.37 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h de EEC}$$

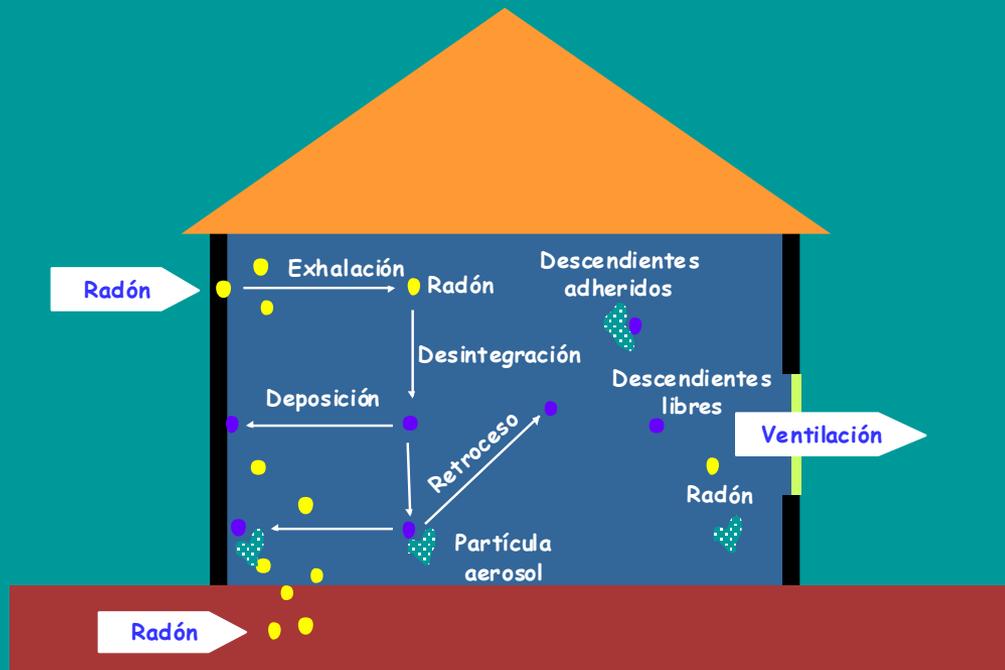
$$\text{Exposición (Bq m}^{-3} \text{ h)} = \text{EEC} * t$$

## Factor de equilibrio.

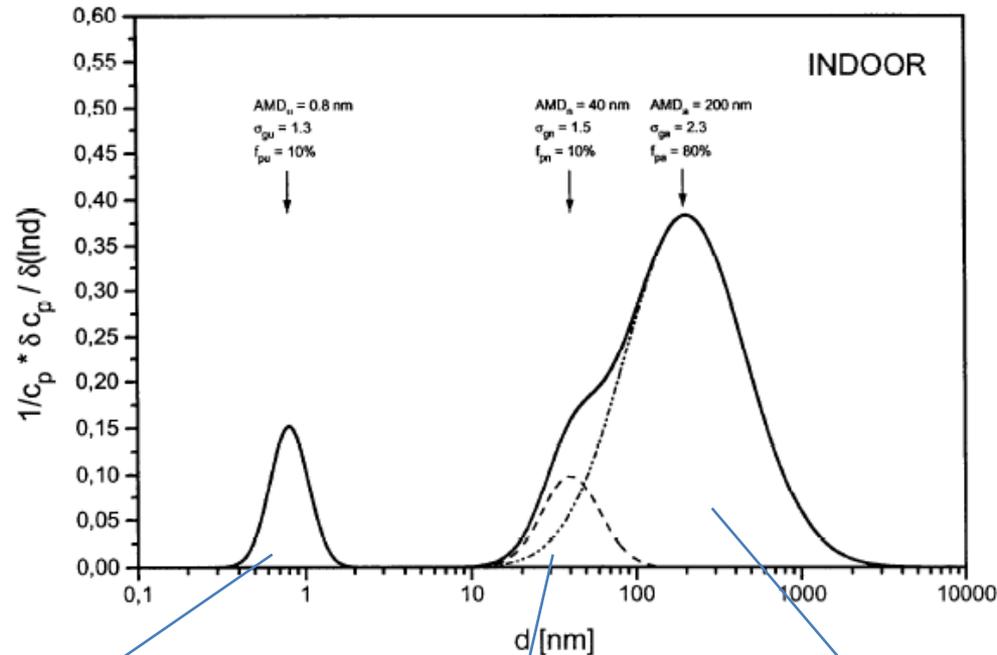
La exposición puede cuantificarse en términos de **concentración de radón**, considerando la definición del factor de equilibrio, **F**:

$$F = \frac{EEC}{C_{Rn-222}}$$

### COMPORTAMIENTO DE LOS DESCENDIENTES DEL RADÓN EN EL INTERIOR DE UNA VIVIENDA



# Fracción libre y tamaño de las partículas de aerosol.



Unattached (1)  
(libre)

Nucleación (2)

Acumulación (3)

$$f_{pu} = \frac{EEC_u}{EEC}$$

$$f_{pn} = \frac{EEC_n}{EEC}$$

$$f_{pa} = \frac{EEC_a}{EEC}$$

## Cálculo dosis efectiva de acuerdo con ICRP 137

$$E(\text{Sv per WLM}) = \sum_j f_{pj} \left( \sum_{i=1}^3 I_{j,i} e_{i,j} \right)$$

mSv/WLM para el tamaño de la moda  $j$  (Tabla A.13)

$f_{pj}$  → es la fracción de la moda del aerosol  $j$  (=1 libre, =2 nucleación, =3 acumulación)

$I_{j,i}$  → es la incorporación del descendiente  $i$  en Bq debido a una exposición de 1WLM de la moda  $j$

$e_{j,i}$  → es la conversión en Sv por Bq para el radionucleido  $i$  en la moda  $j$  (tabla A.10)

El procedimiento para el cálculo de dosis es:

- El tamaño y fracción de cada una de las modas de los aerosoles → mSv/WLM

Tabulado (A.3 + A.13)

### Medida concentración de descendientes del radón

- La exposición de PAE (WLM) → mSv

### Medida concentración gas radón

- El factor de equilibrio → mSv/WLM de exposición a radón
- La exposición de radón (WLM) → mSv

Tabulado (Tabla A.3)

Medida

## Ejemplo: ‘Lugar de trabajo interior’

$$E(Sv \text{ per WLM}) = \sum_j f_{pj} \sum_{i=1}^3 I_{j,i} e_{i,j}$$

**Tabla A.3.** Valores de referencia para diferentes escenarios de exposición:

Ejemplo: Lugar de trabajo interior

En la tabla A3  $\rightarrow f_{p1} = 0.08$ ;  $F=0.4$ ;  $f_{p2} = 0.2$ , AMTD=30 nm;  $f_{p3} = 0.8$ , AMTD=250 nm

Para la **fracción libre** el tamaño siempre se considera **de 1 nm**

Para las modas de nucleación y acumulación la **higroscopicidad es 2**. Por tanto, el tamaño de las partículas del aerosol es el doble para el cálculo de la dosis.

**Tabla A.13.** Dosis efectiva por WLM para distintos tamaños de partículas (1.2 m<sup>3</sup>/h) respiración  
 $j=1$  (1 nm)  $\rightarrow$  86 mSv/WLM;  $j=2$  (60nm)  $\rightarrow$  28 mS/WLM;  $j=3$  (500 nm)  $\rightarrow$  10 mSv/WLM

$$E(mSv \text{ per WLM}) = 86 \cdot f_{p1} + (1 - f_{p1}) \cdot (0.2 \cdot 28 + 0.8 \cdot 10) =$$

$$= 86 \cdot f_{p1} + (1 - f_{p1}) \cdot 14 = 20 \text{ mSv por WLM}$$

$$= 5.6 \text{ mSv por MJ h m}^{-3}$$

$$= 3.1 \cdot 10^{-5} \text{ mSv por Bq h m}^{-3} \text{ EEC} \rightarrow 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ mSv por Bq h m}^{-3} \text{ Rn-222}$$

$$F=0.4$$

## ICRP Coeficientes de dosis – OIR Part 3 (Tablas A.11 y A.12)

|                           | fracción libre, $f_p$ | Dosis efectiva <sup>(a)</sup> (mSv per WLM) |           |
|---------------------------|-----------------------|---|-----------|
| Mina                      | 0.01                  | $[86 f_p + (1 - f_p) 10]$                   | <b>11</b> |
| Lugar de trabajo interior | 0.08                  | $[86 f_p + (1 - f_p) 14]$                   | <b>20</b> |
|                           |                       | Baja tasa de respiración <sup>(b)</sup>     | <b>14</b> |

(a) ICRP tasa de respiración de referencia es  $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $\frac{1}{3}$  sentado,  $\frac{2}{3}$  ejercicio ligero)

(b) Baja tasa de respiración of  $0.86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $\frac{2}{3}$  sentado,  $\frac{1}{3}$  light ejercicio ligero)

Cuevas turísticas



0.15

$[86 f_p + (1 - f_p) 12]$

**23**

# Recomendaciones

## Occupational Intakes of Radionuclides (OIR), Part 3; ICRP Publication 137

- Para el cálculo de la dosis a trabajadores debido a una exposición a radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y descendientes del radón en **minas y la mayoría de lugares de trabajo interiores**, la Comisión recomienda un valor de coeficiente de dosis redondeado de:
  - **3 mSv per  $\text{mJ h m}^{-3}$**  (11 mSv per WLM)  
**(17 nSv per  $\text{Bq h m}^{-3}$  EEC)**
- Para **trabajadores en cuevas turísticas y en lugares de trabajo dónde el trabajador realice una cierta actividad física**, la Comisión recomienda un valor de coeficiente de dosis recomendado de:
  - **6 mSv per  $\text{mJ h m}^{-3}$**  (21 mSv per WLM)  
**(33 nSv per  $\text{Bq h m}^{-3}$  EEC)**

Los ajustes **por otros tipos de aerosoles** en el lugar de trabajo sólo se realizaran si se tiene **información suficiente** y si lo **aprueba el organismo regulador**

## Ejemplo: cálculo dosimétrico

**Lugar de trabajo: recinto interior estándar, no requiere de actividad física**

**Se ha medido una concentración media anual de  $300 \text{ Bq m}^{-3}$**

**El tiempo de exposición de los trabajadores es de 2000 horas al año**

$$\text{Exposición radón} = 300 \text{ Bq m}^{-3} \cdot 2000 \text{ h} = 6.0 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$$

$$F=0.4 \text{ (tabla A.11)} \longrightarrow \text{Exposición EEC} = 6.0 \cdot 10^5 \cdot 0.4 = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$$

$$\text{Exposición PAE} = 2.4 \cdot 10^5 / 6.37 \cdot 10^5 = 0.38 \text{ WLM}$$

Dosis efectiva E (mSv/año):

$$E = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h} \cdot 17 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3}) \approx \mathbf{4 \text{ mSv /año}}$$

$$E = 0.38 \text{ WLM} \cdot 11 \text{ mSv/WLM} \approx \mathbf{4 \text{ mSv /año}}$$

**Vivienda. El tiempo de exposición es de 7000 horas año**

$$\text{Exposición radón} = 300 \text{ Bq m}^{-3} \cdot 7000 \text{ h} = 2.1 \cdot 10^6 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$$

$$\text{Exposición (WLM)} = 2.1 \cdot 10^6 \cdot 0.4 / 6.37 \cdot 10^5 = 1.32 \text{ WLM}$$

$$E = 2.1 \cdot 10^6 \cdot 0.4 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h} \cdot 17 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3}) \approx \mathbf{14 \text{ mSv /año}}$$

# SISTEMAS DE DETECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE

## Sistemas de medida en continuo

- Periodo de integración: de minutos a horas
- Lectura directa
- Memoria de almacenamiento de datos
- Precio elevado
- Utilización en **estudios de impacto radiológico**, laboratorios de referencia, investigación, análisis medidas de remedio

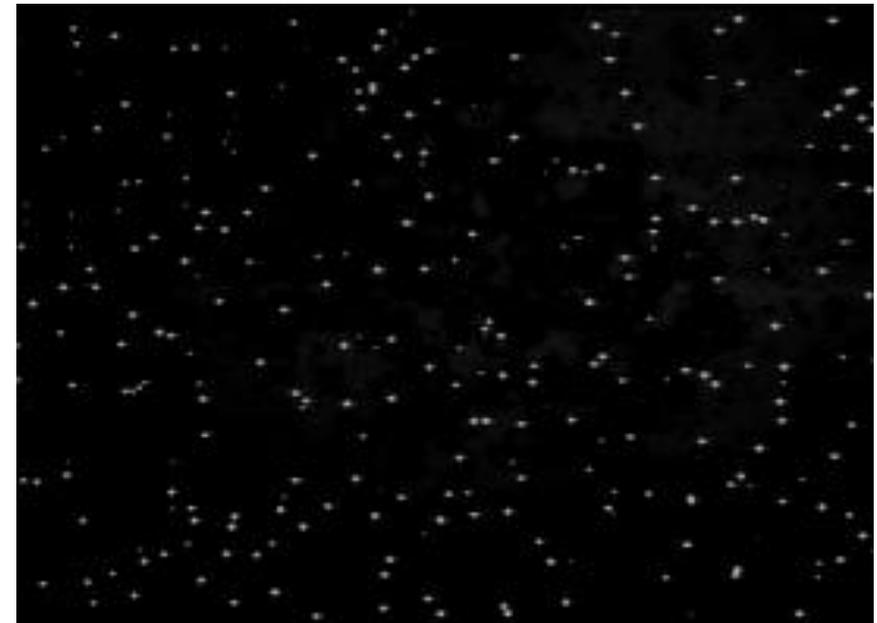
## Sistemas de medida integradores

- Periodo de integración:
  - Periodo corto: de 2 a 10 días
  - Periodo largo: de 1 mes a 1 año ( se recomienda un **mínimo 3 meses para una media anual**)
- Lectura indirecta
- Precio económico
- Utilización para la **comparación con el nivel de referencia**

## Monitores de medida integradores de periodo largo (trazas)



Detectores de trazas y electretes LST



Fotografía de las trazas en LR-115  
Aumentos: 40  
Tamaño : 2 x 2 mm

# Equipos de medida de radón en continuo



**Doseman (SARAD)**



**ALPHA E  
(Bertin Instruments)**



**RAD 7 (DurrIDGE)**



**Atmos 12x (Gammadata)**

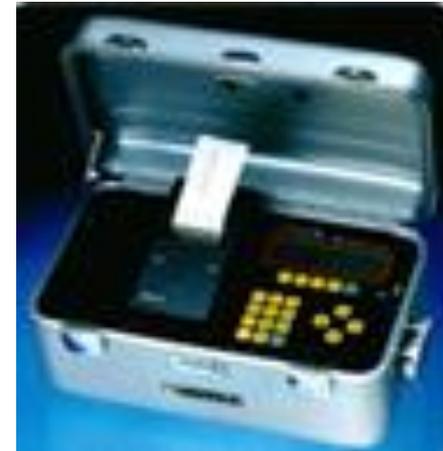


**Alphaguard DF2000  
(Bertin instruments)**

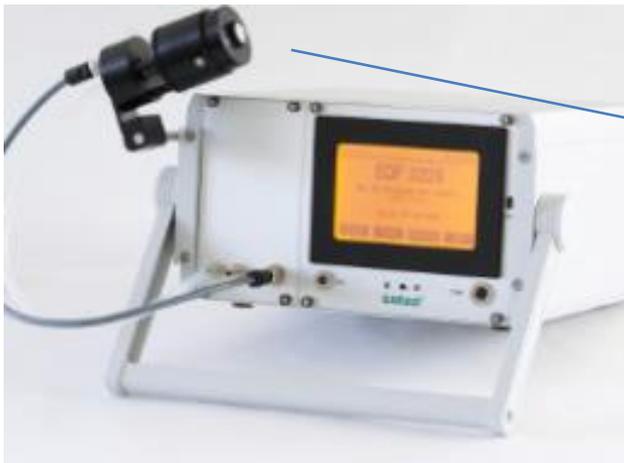
# Equipos de medida de descendientes de radón



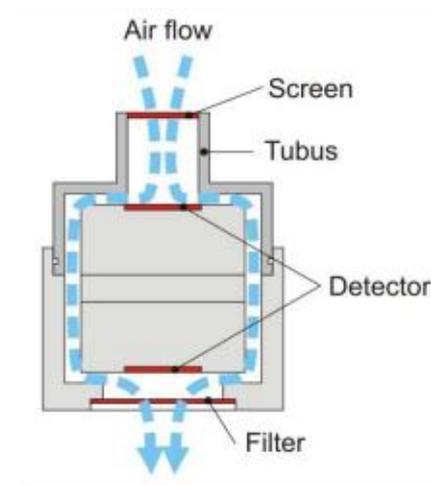
**Doseman-pro (SARAD)**



**WLx (Pylon)**



**EQF3220 (SARAD)**



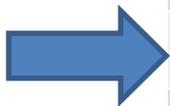
# Ejemplo: Monitor de medida integrador de periodo corto y largo. Electretes



Rad elec E-Perm cámara S

Lector de Voltaje

| Cámara | Electrete | Configuración | Periodo de exposición |
|--------|-----------|---------------|-----------------------|
| S      | ST        | SST           | 2-7 días              |
| S      | LT        | SLT           | 1-6 meses             |
| L      | ST        | LST           | 1-3 meses             |
| L      | LT        | LLT           | 6 meses – 1 año       |



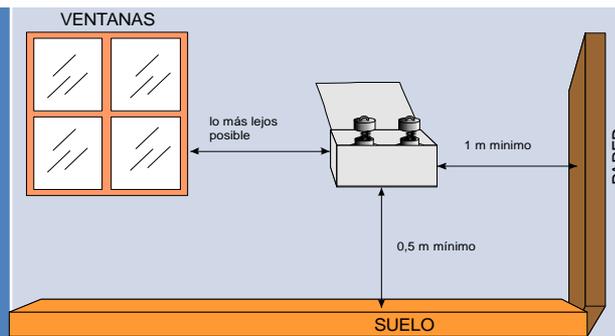
# HOJA DE INSTRUCCIONES SUMINISTRADA CON EL EQUIPO (1/2)

## MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN

Antes de iniciar las medidas, asegurarse de colocar el dispositivo de medida (la caja contenedora con los detectores) en un lugar en el que no haya corrientes de aire, alejado de paredes y objetos y a una altura del suelo mínima de 0,5 m.



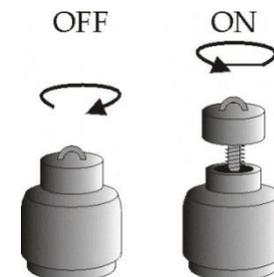
Una vez determinado el sitio de la medida, abrir la caja contenedora, tal como muestra la imagen.



Abrir a continuación, desenroscando, los tapones de los detectores, tal como indica la imagen.

### IMPORTANTE:

Anotar el día y la hora de apertura  
(Ver hoja en interior de la caja)



# HOJA DE INSTRUCCIONES SUMINISTRADA CON EL EQUIPO (2/2)

## MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN

Durante la exposición, cerrar la tapa de la caja, precintando para evitar manipulaciones.



Cerrar los tapones de los detectores

**IMPORTANTE:**  
Anotar el día y la hora de cierre  
(Ver hoja en interior de la caja)



Enviar la caja con los detectores lo antes posible a la dirección de envío.

### **Dirección de envío**

Att. XXXX

Institut de Tècniques Energètiques (INTE)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ETSEIB.

Diagonal, 647

08028 Barcelona

Tel. 93 401 XX XX

## PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS DEL SISTEMA CALIDAD (**GS-11.01/10**)

### 1. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS DE MEDIDA

- Almacenamiento, manipulación y transporte (ej. cajas para electretes)
- Realización de la exposición (representatividad, zonas homogéneas, corrientes de aire, paredes, ..) **GS-11.4/12**
- Detectores de tránsito (para electretes no es necesario)
- Determinación de la influencia de otros factores (e.j. la radiación gamma natural para los electretes o la altura)
- Determinación de la concentración (incertidumbre calculada de acuerdo con la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida GUM)

### 2. PROCEDIMIENTOS DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

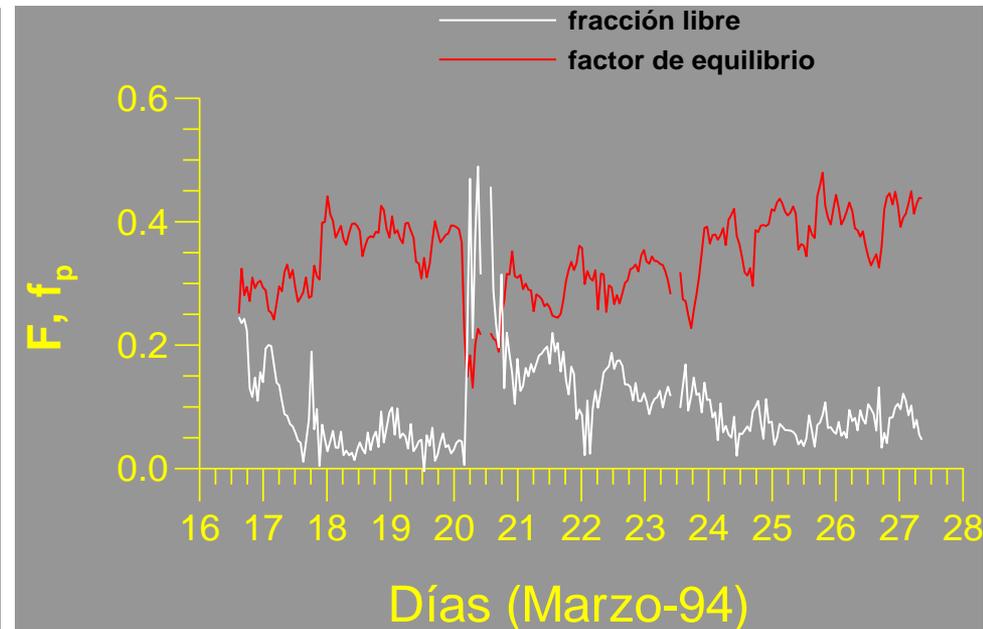
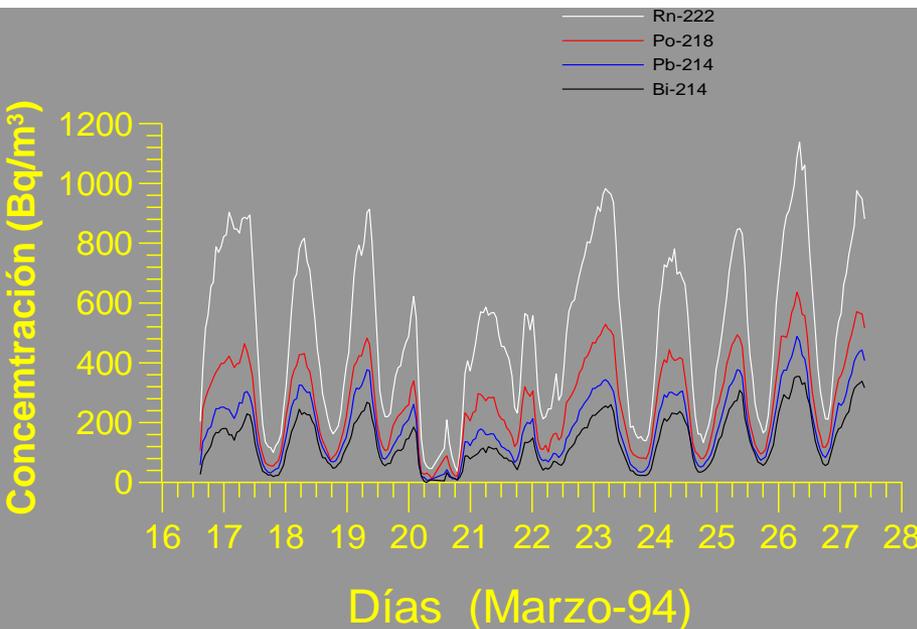
- Recepción e inspección (se comprueba la caída de tensión en un 5 % de electretes del lote)
- Calibración (valor determinado por el fabricante, calibraciones en cámara de radón de forma periódica)
- Verificación (electretes de referencia, intercomparaciones en cámara de radón)
- Control envejecimiento de los detectores
- Mantenimiento (programa según instrucciones fabricante)

# Otros factores que pueden afectar al resultado final de la medida de concentración media anual de radón y la evaluación de la dosis

**Fluctuaciones anuales:** Se controla realizando medidas periódicamente en diferentes años

**Fluctuaciones estacionales:** No realizar medidas en periodos de calor cuando el recinto suele tener mayor ventilación (atención a recintos subterráneos ,suele ser inverso)

**Fluctuaciones diarias:** el error podría ser significativo. Difícil de controlar si no se realizan medias en continuo. ¿Qué valor de incertidumbre o corrección se debería incluir ?



**CSN** <http://www.csn.es/>

**SCAR** [http://treball.gencat.cat/ca/ambits/seguretat i salut laboral/riscos i condicions treball/mesures per risc/rado/fontsdinformacio/](http://treball.gencat.cat/ca/ambits/seguretat_i_salut_laboral/riscos_i_condicions_treball/mesures_per_risc/rado/fontsdinformacio/)

**EPA** <http://www.epa.gov/radon/>

**HPA** <http://www.hpa.org.uk>

**Universitat Autònoma de Barcelona** <http://www.uab.cat/web/unitat-fisica-radiacions-1266823450377.html>

**Universitat Politècnica de Catalunya**

<https://inte.upc.edu/es/servicios/estudios-radon>

**Universidad de Cantabria** <http://www.elradon.com/web/>

**Rad-elec** <http://radelec.com/>

**Durridge** <http://www.durridge.com>

**Sarad** <http://www.sarad.de/>

**Gammadata** <http://www.gammadata.se/products/radiation-detection/radon/>

**Bertin (Saphymo)** <https://www.bertin-instruments.com/products-range/radon-professional-monitoring/>

**radonova (Landauer)** <https://radonovalaboratories.com/>

**Pylon** <https://pylonelectronics-radon.com/>