

Guía de Seguridad del CSN

GS-11.04

Sobre “Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo”

12 de diciembre de 2012

ÍNDICE

PREÁMBULO.....	3
1. OBJETO	4
2. ÁMBITO DE APLICACIÓN	4
3. DEFINICIONES	5
4. ESTRUCTURA DEL ESTUDIO	5
4.1. Fase de planificación.....	6
4.1.1. Variaciones temporales en la concentración de radón	8
4.1.2. Factor de equilibrio (F).....	10
4.2. Exposición y análisis de los dispositivos de medida.....	12
4.3. Expresión de los resultados y toma de decisiones.....	12
4.4. Diseño e implantación de medidas para reducir las exposiciones al radón	14
5. DOCUMENTACIÓN	16
6. REFERENCIAS	16
ANEXO I	19
Casos particulares. Establecimientos termales	19
ANEXO II	21
Casos particulares. Cuevas turísticas	21
ANEXO III	22
Fórmulas y comprobaciones estadísticas	22

Preámbulo

Las exposiciones a la radiación ionizante de origen natural debidas a actividades laborales no relacionadas con el ciclo del combustible nuclear se incorporaron por primera vez a la legislación española mediante el Real Decreto 783/2001 de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (RPSRI), que transpuso la Directiva Europea 96/29/EURATOM. El Título VII del RPSRI establece que los Titulares de dichas actividades tienen la obligación de realizar los estudios necesarios para determinar si, como consecuencia de su actividad, existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o del público que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Entre las actividades a las que atañe el Título VII se encuentran aquellas en las que haya un considerable riesgo potencial de exposición al radón y a sus descendientes de vida corta. La importancia de proteger la salud de los trabajadores más expuestos a este gas se hace cada vez más patente. Los últimos estudios epidemiológicos (pooled studies) sobre radón llevados a cabo en Europa (Darby et al., 2005), China (Lubin al., 2005) y Norteamérica (Krewski et al., 2005) confirman una relación dosis – respuesta lineal; y, al menos por encima de los 100 Bq/m³, la inexistencia de una concentración umbral por debajo de la cual el riesgo ligado a la exposición al radón sea despreciable. Sobre la base de estas evidencias científicas, el coeficiente de riesgo para el radón se ha incrementado en un factor de aproximadamente 1,8 con respecto al propuesto en la Publicación 65 (ICRP Publication 115).

La presente Guía se ha concebido como una orientación para llevar a cabo los estudios radiológicos sobre radón requeridos por el título VII del RPSRI. Esta Guía debe utilizarse conjuntamente con la Guía de Seguridad GS-11.01 del CSN *“Directrices sobre la competencia de los laboratorios o servicios de medida de radón en aire”*.

1. Objeto

El objetivo de esta Guía es establecer una serie de criterios metodológicos para los estudios que, en virtud del título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (RPSRI), deben realizar los titulares de las actividades laborales en las que exista un considerable riesgo potencial de exposición al radón (^{222}Rn) y a sus descendientes de vida corta.

La finalidad principal de los estudios es determinar si la concentración media anual de radón a la que están expuestos los trabajadores o el público supera el nivel de referencia correspondiente. En el caso de los trabajadores, este nivel (600 Bq/m^3 – Instrucción IS-33 del CSN) define cuáles son las exposiciones laborales al radón que deben considerarse dentro del sistema de protección radiológica ocupacional. Para los establecimientos de uso público de larga estancia (entre los que se incluyen asimismo centros de educación infantil, primaria y secundaria) se aplica un nivel de referencia inferior (300 Bq/m^3 – Instrucción del CSN, IS-33, sobre Criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural), igual al recomendado para las viviendas (GS-11.02).

Dado que el nuevo concepto de nivel de referencia pone especial énfasis en la optimización, los estudios podrán servir, además, para recopilar información que permita identificar o diseñar actuaciones técnicas o administrativas encaminadas a reducir las exposiciones al radón en el ambiente laboral. Estas actuaciones deberían llevarse a cabo siempre que sea razonablemente posible, aún cuando la concentración de radón en aire sea inferior al nivel de referencia (NR) establecido.

1. Ámbito de aplicación

Esta Guía es aplicable a las prácticas y actividades laborales en las que haya trabajadores por cuenta ajena o miembros del público que se encuentren potencialmente expuestos a un riesgo significativo de inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta. Estas son, en concreto, las que se desarrollan en:

- Lugares de trabajo subterráneos, incluyendo aparcamientos públicos y privados de uso público, metro, minas en explotación, minas-museo, cuevas turísticas, etc.
- Lugares de trabajo en los que se exploten o traten aguas de origen subterráneo, como las plantas potabilizadoras de aguas de este origen o los establecimientos termales.
- Todos los lugares de trabajo situados en “áreas identificadas” (IS-33). Estas, *a priori*, son aquellas cuya geología pueda generar o favorecer el transporte al interior de lugares cerrados de grandes cantidades de radón (como zonas graníticas, zonas volcánicas o zonas de fallas activas).

Los puestos de trabajo al aire libre quedan excluidos de esta relación ya que no se espera encontrar en ellos valores elevados de concentración de radón. Esto se refiere, por ejemplo, a los trabajadores de canteras y minas de superficie (salvo a los que desempeñen su actividad en recintos cerrados, como zonas de oficinas o plantas de tratamiento del mineral anexas).

La exposición al radón de los trabajadores de industrias NORM (en las que además de al radón existe un riesgo significativo de exposición a otros radionúclidos) se trata en la Guía de Seguridad GS-11.03 del CSN.

2. Definiciones

Las definiciones de los términos y conceptos utilizados en la presente Guía se corresponden con las contenidas en el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes y en la Guía de Seguridad GS-11.01 del CSN.

Además, se aplican las siguientes definiciones:

Balneario o establecimiento termal. Centro en el que se aprovechan las propiedades de un agua mineral natural para fines terapéuticos, de prevención de dolencias, de rehabilitación o de mantenimiento de la salud o bienestar.

Establecimientos de uso público de larga estancia. Aquellos centros dedicados al servicio del público que, independientemente de su finalidad, tengan además un uso residencial (como hospitales, residencias, centros de acogida de menores, etc.). Se incluyen en esta categoría todos los centros de educación infantil, primaria y secundaria, aunque solo cuenten con alumnos en régimen externo, puesto que se considera prioritario proteger a este grupo de la población.

Zona homogénea de concentración de radón. Área de un edificio o instalación tal que sus características relativas a la entrada y propagación del radón (tipo de muros, cimientos, suelo y subsuelo, régimen de ventilación, temperatura...) hagan que la concentración de este gas en todo su volumen sea idéntica o muy poco variable.

3. Estructura del estudio

Los estudios del riesgo radiológico ligado al radón deben ser representativos de la exposición anual de los trabajadores y, en su caso, del público. Para ello, los resultados deben basarse en

medidas con detectores pasivos expuestos durante un periodo mínimo de tres meses. Se recomienda estructurar los estudios atendiendo a un protocolo en cuatro fases:

1. Planificación del estudio
2. Realización de las exposiciones y análisis de los dispositivos de medida
3. Expresión de los resultados y toma de decisiones
4. Diseño e implantación, si procede, de medidas para reducir las exposiciones al radón de los trabajadores y del público

Este esquema en fases no es necesariamente secuencial; por ejemplo, es posible que durante la fase de planificación del estudio se identifiquen medidas de remedio que puedan ejecutarse antes de proceder a la fase de exposición y análisis de los detectores o bien que, en vista de los resultados obtenidos, la decisión adoptada sea revisar la planificación del estudio.

4.1. Fase de planificación

El primer paso del estudio es el análisis del edificio o instalación, con vistas a: *i)* definir las zonas homogéneas de concentración de radón (en adelante, zonas homogéneas); *ii)* elegir los puntos donde se colocarán los dispositivos de medida y; *iii)* determinar los correspondientes periodos de exposición.

A tal fin debe recopilarse toda la información que pueda influir en la delimitación de las zonas homogéneas (sistemas de ventilación, elementos de compartimentación, penetraciones completas o parciales en el cerramiento del edificio, gradientes térmicos, etc.). Si en el lugar de trabajo se han llevado ya a cabo estudios sobre la calidad del aire interior, sus resultados pueden ser asimismo de gran utilidad. Los Anexos I y II dan indicaciones más detalladas al respecto para los casos particulares de los establecimientos termales y de las cuevas turísticas.

Deben tenerse en cuenta, además, la ubicación de cada puesto y los factores de ocupación de todas las zonas del lugar de trabajo. En algunos casos (cuando las concentraciones de radón en alguna zona del edificio superen el nivel de referencia) será necesario obtener los tiempos de permanencia de los trabajadores en cada zona homogénea. Estos tiempos puede facilitarlos el titular de la actividad laboral, de manera consensuada con los trabajadores, o bien puede estimarlos el laboratorio o servicio responsable del estudio mediante entrevistas al personal implicado.

También es relevante la información sobre los horarios, especialmente si hay trabajo a turnos, y sobre los periodos durante los cuales se interrumpe la actividad laboral (noches, fines de semana, periodos vacacionales...).

Salvo en los casos sencillos (como puede ser el de un local comercial o un despacho profesional), para que el diseño del estudio sea óptimo es conveniente llevar a cabo una campaña de medida previa con el fin de localizar focos de radón, confirmar la validez de las zonas homogéneas y hacer una estimación inicial de las concentraciones que pueden esperarse. Para ello son muy útiles los sistemas de medida en continuo o con periodos cortos de exposición (del orden de unos pocos días o inferior).

En general, la principal fuente de aporte del radón es el terreno subyacente, por lo que las concentraciones de radón suelen ser más bajas en los pisos superiores que en los inferiores. En base a ello, en los edificios de varias plantas las medidas deberán hacerse, como regla general, en las dos plantas inferiores ocupadas, y en función de los resultados se decidirá si es necesario medir en los pisos superiores (si se ha llevado a cabo la campaña de medida preliminar, la decisión puede tomarse en función de los resultados de esta). Cuando algunas de las medidas efectuadas en pisos bajos superen el nivel de referencia es recomendable caracterizar también las concentraciones en los pisos altos. En las zonas geográficas en las que sea más probable encontrar valores de radón elevados ($>NR$), puede ser conveniente, en todo caso, distribuir al menos un detector en cada una de las plantas¹.

En cada zona homogénea se implantará al menos un dispositivo de medida, con un mínimo de dos detectores por cada edificio o local. A título orientativo pueden tenerse en cuenta las indicaciones de la Tabla 1.

Tabla 1. Densidad de detectores recomendada para los estudios de exposición al radón en lugares de trabajo no subterráneos. Adaptada de *RPII* (2008).

Lugar de trabajo	N.º de detectores
Oficinas compartimentadas tradicionales	Un detector por despacho o habitación
Sótanos	Un detector por cada habitación o sección

¹ En ocasiones, por efecto chimenea, pueden registrarse valores de radón elevados en las últimas plantas de un edificio.

Áreas de hasta 1000 m ² (oficinas de planta abierta, superficies de atención al público, almacenes...)	Un detector por cada 200 m ²
Áreas de hasta 5000 m ²	Un detector por cada 400 m ²
Áreas muy extensas (varios miles de m ²)	Un detector por cada 500 m ²

Los puntos elegidos para colocar de los detectores dentro de cada zona deben ser representativos de los puestos de trabajo emplazados en ella.

En cuanto al diseño temporal, por defecto, las exposiciones de los detectores serán de al menos tres meses, evitando el periodo estival (entendido como el intervalo que comprende los meses de junio a septiembre), excepto para instalaciones que permanezcan cerradas durante el otoño-invierno.

En lugares de trabajo subterráneos se recomienda que las exposiciones abarquen un año completo, si bien es preferible realizar las estimaciones de la concentración de radón a partir de dispositivos expuestos en cuatro periodos consecutivos de tres meses de duración cada uno.

Cuando se desee obtener una estimación más exacta del riesgo asociado a la actividad laboral pueden llevarse a cabo, además, las dos caracterizaciones siguientes, ambas opcionales:

- Variaciones temporales en la concentración de radón: ver sección 4.1.1.
- Factor de equilibrio (F): ver sección 4.1.2.

Se recomienda especialmente emprender estas caracterizaciones cuando los resultados del estudio no permitan concluir que, una vez ejecutadas las acciones de remedio pertinentes, los niveles de radón sean inferiores al nivel de referencia aplicable.

4.1.1. Variaciones temporales en la concentración de radón

El nivel de referencia (NR) viene expresado como una concentración media anual de radón en el lugar de trabajo. No obstante, la estimación del nivel medio anual al que se haya expuesto un

individuo está sujeta a una incertidumbre elevada, debido no solo a la incertidumbre de medida sino fundamentalmente a la alta variabilidad temporal que habitualmente presentan los niveles de radón.

Las fluctuaciones temporales en las concentraciones de este gas pueden llegar a ser de varios órdenes de magnitud. El radón presenta ciclos diarios y estacionales, así como variaciones interanuales, todos ellos influenciados por la compleja interrelación de una serie de factores, como los gradientes de presión entre el exterior y el subsuelo de los edificios, los hábitos de los ocupantes o las condiciones de la meteorología y del suelo.

Los valores medios nocturnos en los edificios suelen ser más altos que los diurnos² pudiendo alcanzar en algunos casos extremos diferencias de más de un factor 30 (Rydock et al., 2001). También en los periodos en los que el lugar de trabajo permanece cerrado (fines de semana, vacaciones) es frecuente encontrar diferencias respecto a los niveles de radón habituales, debido al efecto de edificio cerrado y, en su caso, a la parada de los sistemas de calefacción o aire acondicionado.

Para obtener una estimación más exacta de la concentración de radón a la que están expuestos los trabajadores se puede aplicar un factor de corrección (C_T) – ver Fig. 1 – que cuantifique las diferencias entre la concentración de radón efectiva, $\overline{Rn}_{efectiva}$ (es decir, la media anual de los niveles de radón existentes durante el horario laboral), y la concentración media global, $\overline{Rn}_{medida}$ (es decir, la media anual de los valores registrados a lo largo de todo el periodo completo).

Mientras que $\overline{Rn}_{medida}$ se obtiene a partir de los detectores pasivos expuestos durante un mínimo de tres meses, el factor C_T puede determinarse a partir de medidas con sistemas de medida en continuo o con detectores de periodo corto de exposición (~8 h), en ambos casos, tomadas al menos durante cinco días no consecutivos. Se aconseja hacer siempre esta corrección cuando haya trabajadores que desempeñen un turno nocturno (esto es, cuya jornada laboral se realice entre las 22:00 h y las 6:00 h o comprenda al menos un tercio de tal horario).

Respecto a las variaciones estacionales, suele haber un factor 1,5 de diferencia (Arvela, 1995; Papaefthymiou, 2003; Bochicchio et al., 2005) entre los mínimos del verano y los máximos del invierno, aunque se han descrito todo tipo de desviaciones de este comportamiento general.

² La temperatura más alta en interior que en el exterior durante la noche da lugar a una depresión y por tanto a una acumulación de radón.

En consecuencia, las medidas tomadas durante un periodo de tres meses evitando los meses de verano darán en la mayoría de los casos una estimación conservadora de la media anual, lo que garantiza un nivel de protección adecuado de los trabajadores. No obstante, en los lugares de trabajo subterráneos, para los que es prácticamente imposible describir tendencias generales, se recomienda que las exposiciones cubran un año completo (como se indica en la sección 4.1).

En cualquier caso, si se desea corregir el posible efecto estacional, las exposiciones deberán cubrir un año completo en lugar de tres meses.

La influencia de variabilidad interanual no se tiene en cuenta en las estimaciones, pero queda ya contemplada por el requisito de repetir los estudios con determinada periodicidad (ver IS-33). Este tipo de variabilidad se debe a factores como las variaciones meteorológicas interanuales o los cambios en la cimentación del edificio que pueden producirse por lesiones (grietas, desplomes) o por alteraciones de importancia en los terrenos próximos (nuevas construcciones, realización de túneles, carreteras, etc.).

4.1.2. Factor de equilibrio (F)

Si bien el riesgo radiológico ligado a la exposición al radón en aire no es consecuencia directa de la inhalación del propio gas sino de sus productos de desintegración de vida corta, la mayoría de los sistemas de medida existentes determinan, por motivos prácticos, la concentración de ^{222}Rn en aire en lugar de medir sus descendientes.

Las recomendaciones de protección radiológica internacionales suelen estar expresadas en términos de la concentración de radón en aire, que se relaciona con la concentración de sus descendientes de vida corta por un factor de equilibrio F . Al disminuir F , disminuye también la dosis efectiva recibida y, por tanto, el riesgo asociado a una misma concentración de radón. Estudios en viviendas demuestran que el valor de F aumenta con la presencia de nuevas fuentes de aerosoles en suspensión, como el humo del tabaco y de las velas (Porstendörfer, 1987), y disminuye al aumentar la tasa de ventilación (Swedjemark, 1983). No obstante, los estudios teóricos (Jacobi, 1972) indican que la concentración de aerosoles tiene un efecto limitado y que es la distribución de tamaño de aerosoles el factor que ejerce una mayor influencia sobre F .

Por defecto, se supone que F toma un valor de 0,4 (ICRP 65) aunque en la bibliografía aparecen datos muy variables. En España, en distintos lugares de trabajo (laboratorios y oficinas) se han medido valores entre 0,28 y 0,78 (Baixeras et al., 1999). Quindos et al. (2004) han encontrado

factores de equilibrio entre 0,4 y 0,6 en cuevas turísticas españolas y en la literatura aparecen medidas en cuevas cársticas que van desde 0,04 a 0,95, con un valor medio de 0,5 (ISRN, 2009).

La medida de F puede llevarse a cabo con equipos de medida en continuo. En este caso, las medidas deben tomarse al menos durante cinco jornadas no consecutivas y, considerando la importante variabilidad de F , en situaciones lo más representativas posibles de las condiciones de trabajo.

También se han desarrollado métodos para medir el factor de equilibrio utilizando detectores pasivos, con periodo largo de exposición (ver por ejemplo los métodos propuestos por Amgarou et al., 2003 o por Yu et al., 2005). En estos casos debe tenerse en cuenta que algunos detectores de tipo abierto no son fiables en ambientes con una humedad elevada (como puede ocurrir, por ejemplo, en los balnearios o en determinados lugares de trabajo subterráneos).

Si en un lugar de trabajo se determina experimentalmente el valor de F , puede obtenerse un valor de concentración efectiva ($\overline{Rn}_{efectiva}$) multiplicando la concentración de radón medida ($\overline{Rn}_{medida}$) por un factor de corrección C_F – ver Fig. 1 – obtenido como el valor medido de F dividido por 0,4 (valor teórico implícito en el nivel de referencia de la legislación).

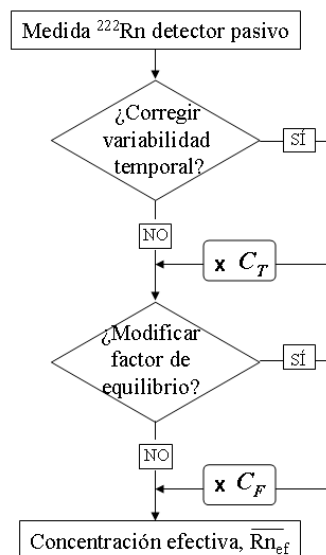


Fig. 1: Esquema de actuación en caso de que se haya llevado a cabo la determinación del factor de corrección C_T , asociado a las variaciones temporales en la concentración de radón o la del factor de corrección C_F que cuantifica la desviación respecto al valor de 0,4 asignado por defecto a F .

4.2. Exposición y análisis de los dispositivos de medida

Para realizar las exposiciones y los análisis de los dispositivos de medida se seguirán las indicaciones de la Guía de Seguridad 11.01 del CSN y los protocolos de medida específicos que correspondan.

4.3. Expresión de los resultados y toma de decisiones

Los valores medidos deben expresarse como concentraciones medias de ^{222}Rn (Bq/m^3) durante el periodo de exposición de los detectores, junto con el valor de la incertidumbre expandida y el factor de cobertura k utilizado, asignando a cada valor el lugar específico de medida e incorporando a los resultados la información pertinente recopilada de acuerdo con lo indicado en el apartado 5.6.4 de la Guía de Seguridad GS-11.01 del CSN.

La incertidumbre asociada a cada medida puede calcularse de acuerdo con los criterios de la *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM)*, siendo necesario tener en cuenta las contribuciones especificadas en la Guía de Seguridad GS-11.01 del CSN. Otra posibilidad para estimar las incertidumbres es el enfoque empírico (*top-down*) de la GUM. En este caso podrán utilizarse las estimaciones de la precisión hechas a partir de medidas duplicadas (como se detalla en la GS-11.01) y de resultados de ejercicios de intercomparación.

Para cada zona homogénea debe darse un valor representativo de la concentración media anual de ^{222}Rn junto con el límite superior de una cola de ese parámetro, para un nivel del 90% de confianza.

Si la zona homogénea i se caracterizó a partir de un único dispositivo de medida, el límite superior (LS_i) se obtendrá como el valor medido de concentración de radón en i ($\overline{Rn}_i$) referido a un periodo de exposición de un año más el valor de la incertidumbre combinada ($u_{c,i}$) multiplicada el valor de la t de Student correspondiente al número de grados de libertad asociados con $u_{c,i}$ para un nivel de confianza del 90%:

$$LS_i = \overline{Rn}_i + t_{0.9, n-1} u_{c,i}$$

Si se colocaron n dispositivos en la zona homogénea i , el valor representativo se obtendrá como la media aritmética ($\overline{Rn}_i$) de las n medidas referidas a un tiempo de exposición de un año, y el límite

superior de la media (LS_i) como $\overline{Rn}_i$ más la desviación estándar correspondiente multiplicada por el valor de la t de Student, obtenido como en el caso anterior, y dividida por $\sqrt{n}$:

$$LS_i = \overline{Rn}_i + t_{0.9, n-1} \frac{s_i}{\sqrt{n}}$$

En caso de disponer de más de una medida por zona homogénea, se recomienda utilizar las comprobaciones estadísticas del Anexo III para verificar que la zona se ha delimitado correctamente y que las incertidumbres asociadas a las medidas individuales son coherentes con la dispersión que éstas presentan.

A continuación debe determinarse, para cada zona homogénea i , si se supera el nivel de referencia (NR) aplicable. A tal fin, se comparará NR con el valor de LS_i , calculado como se describe en párrafos anteriores.

Puesto que el nivel de referencia para trabajadores presupone una ocupación del lugar de trabajo de 2000 h, cuando el tiempo de permanencia en este sea inferior, podrá multiplicarse LS_i por un factor de corrección obtenido como el número de horas anuales de permanencia en el lugar de trabajo dividido entre 2000 y este valor ajustado será el que se compare con NR .

En los establecimientos de uso público de larga estancia las exposiciones al radón no pueden superar el nivel de referencia para viviendas en ninguna de las zonas homogéneas dónde se encuentren miembros del público.

Para el resto de los lugares de trabajo, a fin de que la actividad quede exenta de más controles reguladores, el nivel de referencia para trabajadores no podrá superarse en ninguna de las zonas homogéneas en las que algún trabajador desempeñe de manera continuada su actividad.

Si los trabajadores reparten su tiempo entre m zonas homogéneas del lugar de trabajo puede procederse del siguiente modo:

1. Obtener los factores de permanencia (fp) en cada zona i (estos factores deben ser lo suficientemente conservadores; es decir, cuando no queden registrados exactamente los tiempos que un trabajador permanece en cada zona debe tenderse a sobreestimar el tiempo pasado en las zonas con mayores concentraciones de radón),
2. Calcular para cada trabajador la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^m fp_i LS_i$$

3. Comparar el resultado de esta fórmula con NR para determinar si se cumplen los requisitos de exención.

La opción anterior es la más sencilla pero la más conservadora. Como alternativa, puede calcularse el límite superior con un 90% de confianza para la media de la distribución que describe el nivel de radón al que está expuesto el trabajador. Esta distribución también será normal (por tratarse de una suma de distribuciones normales, correspondientes a los niveles de radón en cada

zona multiplicados por los factores de permanencia); su media viene dada por $\sum_{i=1}^m f p_i \overline{R n_i}$, su

desviación estándar por $\sqrt{\sum_{i=1}^m (f p_i \overline{R n_i})^2}$ y el número de grados de libertad asociados se obtiene

mediante la ecuación de Welch-Satterwhite.

Por otro lado, cuando se hayan calculado los factores de corrección, C_T o C_F , la concentración de radón efectiva es la magnitud que debe compararse con el nivel de referencia. Tanto C_T como C_F deben llevar asociado un valor de incertidumbre obtenido según la *GUM*. La incertidumbre combinada asociada al resultado de concentración efectiva se calculará siguiendo la ley de propagación de incertidumbres. La estimación de un límite superior para la media en este caso es más complicada, porque las distribuciones de C_T o C_F no son necesariamente normales. Por tanto, se recomienda utilizar una simulación numérica de Monte Carlo para evaluar dicho límite (ver por ejemplo el Suplemento 1 a la *GUM*).

Finalmente, una vez efectuadas las comparaciones oportunas, cuando se supere el nivel de referencia se optará por alguna de las siguientes alternativas:

- Mejorar la estimación de las concentraciones de radón, puesto que puede darse el caso de que la concentración de radón verdadera no supere el nivel de referencia, pero no haya sido posible demostrarlo estadísticamente. Para ello, o bien pueden prolongarse las medidas de radón a lo largo de un año completo, o bien, si no se ha hecho ya, pueden abordarse la caracterizaciones indicadas en los apartados 4.1.1 y 4.1.2.
- Llevar a cabo acciones de remedio según se describe en el apartado 4.4.

4.4. Diseño e implantación de medidas para reducir las exposiciones al radón

En primer lugar hay que recalcar que en la protección frente al radón debe primar el principio de optimización, lo cual implica mantener las exposiciones de los trabajadores y el público tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores de la organización del trabajo,

técnicos, sociales y económicos. Por tanto, si durante el estudio se identifican medidas de remedio que consigan reducir las exposiciones a un coste asumible para la instalación, estas deberán implementarse aún cuando los niveles medios de radón se encuentren por debajo del nivel de referencia.

En general, las medidas de remedio pueden clasificarse en:

- Soluciones constructivas, que incluyen la puesta en marcha de sistemas de extracción. En la publicación del CSN *“Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios se analiza la capacidad de distintas medidas correctoras de este tipo para atenuar la inmisión de radón”*.
- Controles administrativos, dirigidos fundamentalmente a controlar los tiempos de permanencia o a restringir el acceso a las zonas con concentraciones de radón más elevadas.

Siempre es preferible implantar medidas del primer tipo, aunque en los lugares de trabajo subterráneos esto suele ser más difícil o incluso inviable, como ocurre en las cuevas turísticas. Una vez se lleve a cabo cualquier solución constructiva deberán emprenderse nuevas mediciones que evalúen su efectividad. En el caso de que ésta no sea la esperada, deberán analizarse las causas del fallo y plantearse, si es necesario, soluciones alternativas.

Cuando se establezcan controles de tipo administrativo, siguiendo el principio de optimización, deberán tomarse especialmente en cuenta los trabajadores más sensibles (trabajadoras gestantes, menores de edad, trabajadores con enfermedad pulmonar...).

En aquellos casos en los que no sea posible reducir las concentraciones de radón por debajo de un valor unas cinco veces superior al nivel de referencia establecido, se recomienda controlar la exposición de los trabajadores mediante el uso de dosímetros personales. Estos dosímetros, cuando no estén en uso, deberán almacenarse en un lugar con un fondo de radón lo más bajo posible y conocido (consultar con el laboratorio de análisis).

Es importante asimismo dar a los trabajadores la información necesaria para garantizar que su percepción del riesgo es adecuada y, sobre todo en aquellos casos en los que sea necesario establecer controles administrativos, proporcionarles una formación básica en protección radiológica y específica sobre fuentes naturales de radiación.

5. Documentación

Los resultados del estudio se recogerán en un informe final de carácter técnico, que debe contener, además, un resumen con las conclusiones más importantes. El informe debe estar fechado y firmado por la persona responsable de su elaboración.

En este informe debe incluirse la información especificada en la Guía de Seguridad GS-11.02 del CSN, así como los resultados de todas las medidas experimentales que se hayan hecho y la descripción de los métodos y materiales utilizados en la obtención de estas, y la de los modelos y las hipótesis empleados en los cálculos.

Si se ha subcontratado parte de la realización del estudio o de las medidas a otro laboratorio, servicio o Unidad Técnica de Protección Radiológica, esta circunstancia debe hacerse constar, y los informes remitidos por estos deben incluirse en un anexo.

El informe y toda la documentación relevante relacionada con el estudio deben archivar y guardarse durante toda la vida operativa de la instalación.

6. Referencias

- [1] Amgarou, K., Font, L., Baixeras, C., 2003. A novel approach for long-term determination of indoor ^{222}Rn progeny equilibrium factor using nuclear track detectors. Nucl. Inst. Methods A 506, 186-198.
- [2] Arvela, H., 1995. Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwellings with model comparisons. Radiation Protection Dosimetry, 59 (1), 33-42.
- [3] Baixeras, C., Amgarou, K., Font, L., Domingo, C., 1999. Long-term radon levels and equilibrium factor in some Spanish workplaces measured with a passive integrating detector. Radiation Protection Dosimetry 85 (1-4), 233-236.
- [4] Bevington, P.R., 1969. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. McGraw-Hill. New York.
- [5] Bochicchio, F., Campos-Venuti, G., Piermattei, S., Nuccetelli, C., Risica, S., 2005 Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. Radiation Measurements, 40, 686–694.

- [6] CSN. Guía de Seguridad GS-11.01, Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Madrid (2010).
- [7] CSN. Guía de Seguridad GS-11.02, Control de la exposición a fuentes naturales de radiación. Madrid (2011).
- [8] CSN. Guía de Seguridad GS-11.03, Metodología para la evaluación del impacto radiológico de las industrias NORM.
- [9] CSN. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. Colección informes técnicos. 2010.
- [10] Darby S et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, 330(7485), 223-227.
- [11] ICRP Publication 65. Protection against radon-222 at home and at work. Oxford Pergamon Press, 1993.
- [12] ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford Pergamon Press, 2007.
- [13] ISRN, 2009 a. Guide méthodologique de mesure de l'activité volumique du radon dans les établissements thermaux.
- [14] ISRN, 2009 b. Guide méthodologique de mesure de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains.
- [15] Jacobi, W., 1972. Activity and potential α -energy of ^{222}Rn and ^{220}Rn daughters in different air atmosphere. *Health Phys.* 22, 441.
- [16] JCGM 100 (2008) Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections).
- [17] JCGM 101 (2008). Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method.
- [18] Krewski D et al., 2005. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*, 16,137-145.

- [19] Lubin JH et al., 2005. Adjusting lung cancer risks for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu Province, China. *Radiation Research*, 163, 571-579.
- [20] Papaefthymiou, H., 2003. Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece. *J. Environ. Radioactivity*, 66, 247–260.
- [21] Pörstendorfer, J., Reineking, A., Becker, K.H., 1987. Free fractions, attachment rates and plate-out rates of radon daughters in houses. Pp. 285-300 in *Radon and its Decay Products: Occurrence, Properties and Health Effects*. P. K. Hopke ed. Symposium Series 331. Washington D.C.
- [22] Quindos, L., Fernández, P., Sainz, C., Gómez-Arozamena, J., Bordonaba, M., 2004. Radon exposure in uranium mining industry vs. exposure in tourist caves. *Radiation Protection Dosimetry*, 111, 41-44.
- [23] RPII, 2008. Guidance notes to assist with the planning of radon surveys in workplaces.
- [24] Rydock, J.P., Næss-Rolstad, A., Brunsell, J.T., 2001. Diurnal variations in radon concentrations in a school and office: implications for determining radon exposure in day-use buildings. *Atmospheric Environment* 35(2), 2921-2926.
- [25] Swedjemark G. A., 1983. The equilibrium factor F. *Health Physics* 54, 553-462.
- [26] Yu, K.N., Nikezic, D., Ng, F.M., Leung, J.K.C., 2005. Long-term measurements of radon progeny concentrations with solid state nuclear track detectors. *Rad. Meas.* 40, 560-568.

Anexo I

Casos particulares. Establecimientos termales

En estos establecimientos podemos encontrarnos con distintos tipos de edificios de acuerdo a su uso:

- Los edificios o dependencias no directamente relacionados con la actividad termal (como zonas administrativas y hoteleras) y en los que la fuente principal de entrada de radón sea el terreno subyacente.
- Los edificios o dependencias terapéuticos y técnicos (como salas de bombas y de sistemas de distribución) relacionados con la actividad termal y en los que haya dos fuentes de radón: el agua y el suelo.

En edificios terapéuticos y técnicos deberán caracterizarse los niveles de radón en todas las plantas en las que se utilice agua termal. En la práctica, las zonas homogéneas se definen en estos casos de acuerdo con los siguientes criterios (ISRN, 2009 a):

- Mismo tipo de interfaz suelo-edificio.
- Mismo modo de alimentación en agua termal (directo, indirecto, continuo, reciclado).
- Mismo tipo de utilización del agua termal.
- Mismo régimen de ventilación.
- Mismo nivel de temperatura.

El impacto del uso del agua termal no solo dependerá de la riqueza de radón del agua termal del acuífero sino también del tipo de alimentación de cada zona del establecimiento. En primer lugar, la transferencia de radón del agua al aire puede depender de cómo se lleve a cabo la explotación de la fuente termal. Esta puede hacerse mediante aprovechamiento de una surgencia natural o por extracción mediante bombeo (captaciones), o bien combinarse o alternarse a lo largo del año ambos tipos de alimentación.

Además para la alimentación de agua fría en ocasiones se utilizan intercambiadores térmicos lo cual afecta también a los procesos de transferencia agua-aire. El transporte del agua a los diferentes puntos de uso puede producir, por desgasificación, una disminución de su contenido inicial de radón. El proceso de desgasificación se favorece al añadir aire comprimido en los chorros de agua para llenar las bañeras o por la nebulización del agua termal. Por el contrario, la utilización del agua termal en la fabricación de lodos apenas tendrá impacto en el enriquecimiento de la atmósfera en radón.

Especialmente en este tipo de establecimientos debe prestarse atención a que las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa sean las indicadas para los distintos sistemas de medida.

Anexo II

Casos particulares. Cuevas turísticas

La mayoría de las cuevas se encuentran en terrenos sedimentarios (calizas y dolomías) donde se han formado por disolución de la roca en agua ligeramente ácida, aunque España cuenta además con numerosas y variadas cavidades de origen volcánico en las islas Canarias.

La actividad volúmica de radón en una cueva depende de la interrelación compleja de diferentes factores externos (el gradiente térmico entre el interior y el exterior, la velocidad del viento, las variaciones de presión atmosférica, etc.). En general las concentraciones de radón son más altas en verano que en invierno, aunque también se ha descrito en algún caso el comportamiento contrario (Lario, 2005). Dadas las marcadas variaciones estacionales que se han descrito en algunas cuevas, se recomienda que cuando el promedio anual sea elevado se lleven a cabo caracterizaciones mes a mes.

Las variaciones espaciales de radón en las cuevas se deben principalmente a las variaciones propias de sus paredes (contenido en radio, porosidad, permeabilidad) a las tasas de ventilación variables en las distintas zonas de la cueva y a los grandes movimientos convectivos que suelen producirse a través de las bocas de acceso.

En principio, el estudio de las concentraciones de radón puede limitarse exclusivamente a las zonas de la cueva en las que hay presencia humana, dando prioridad a los puntos donde pueda haber personas que, durante periodos de tiempo considerables, desarrollen su actividad profesional (guías, espeleólogos, arqueólogos...).

En la práctica, para definir las zonas homogéneas se seguirán los siguientes criterios (ISRN, 2009 b):

- Misma fuente potencial de radón.
- Mismo grado de intercambio con la atmosfera exterior.
- Mismo volumen aparente.

Anexo III

Fórmulas y comprobaciones estadísticas

Media ponderada

Cuando los valores medidos x_i ($i=1, 2 \dots n$) de una determinada variable X tienen incertidumbres asociadas s_i distintas, se define la media ponderada x_p como:

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i},$$

donde los factores de ponderación p_i se calculan como $p_i=1/s_i^2$.

La incertidumbre asociada a la media ponderada (s) se define como el máximo entre la desviación estándar externa y la interna.

Desviación estándar externa

Cuantifica la dispersión de los valores medidos respecto a la media ponderada. Se obtiene de la siguiente forma:

$$s_{ex} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i (x_i - x_p)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n p_i}}$$

Desviación estándar interna

Depende solo de las incertidumbres individuales asociadas a cada medida. Se obtiene como:

$$s_{in} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i}}$$

Comprobación sobre las varianzas

Una medida de la coherencia de los datos es el siguiente cociente:

$$\frac{s_{ex}}{s_{in}} = \sqrt{\frac{\chi^2}{(n-1)}}$$

La magnitud del estadístico $\chi^2/(n-1)$, que debe estar en torno a la unidad, permite extraer conclusiones sobre la calidad de los datos. Definiendo $\chi_R^2 = \chi^2/(n-1)$ puede consultarse la Tabla III-1 de valores críticos de χ_R^2 .

Tabla III-1. Valores críticos de χ_R^2 – P=0,01 (tomados de Bevington, 1969).

$v=n-1$		$v=n-1$	
1	6.64	8	2.51
2	4.60	9	2.41
3	3.78	10	2.32
4	3.32	15	2.04
5	3.02	20	1.88
6	2.80	30	1.70
7	2.64	50	1.52

Si χ_R^2 es mayor que el valor crítico tabulado debería revisarse la delimitación de la zona homogénea (puesto que solo hay un 1% de probabilidades de que se esta situación sea debida al azar). Desviaciones estadísticamente significativas de χ_R^2 respecto a la unidad pueden también indicar que las incertidumbres asociadas a las medidas individuales no han sido correctamente estimadas, por lo que deberían investigarse.