



Radón, conocer el problema y prevenir sus efectos

Radón, conocer el problema y prevenir sus efectos

© Asepeyo. Mutua Colaboradora con la Seguridad Social nº 151.
Autor: JAVIER ANIES ESCARTIN - Dirección de Prevención de Asepeyo
Reservados todos los derechos en todas las lenguas y países

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Información general | 4 |
| 1.1 ¿Qué es el radón? | |
| 1.2 ¿Cómo se genera el problema causado por radón? | |
| 1.3 ¿Se encuentra en todos los suelos? | |
| 1.4 ¿A qué puestos de trabajo afecta? | |
| 2. Metodología para valorar el potencial riesgo | 9 |
| 2.1 ¿Cómo se mide? | |
| 2.2 Valores límites de exposición establecidos | |
| 3. Estudios del riesgo y efectos | 10 |
| 3.1 Exposición a radón en puestos de trabajo | |
| 3.2 Incidencia de efectos adversos en puestos de trabajo en los que hay radón | |
| 4. Medidas de control | 21 |
| 4.1 Código técnico de la edificación | |
| 5. Bibliografía | 24 |

1. Información general

1.1 ¿Qué es el radón?

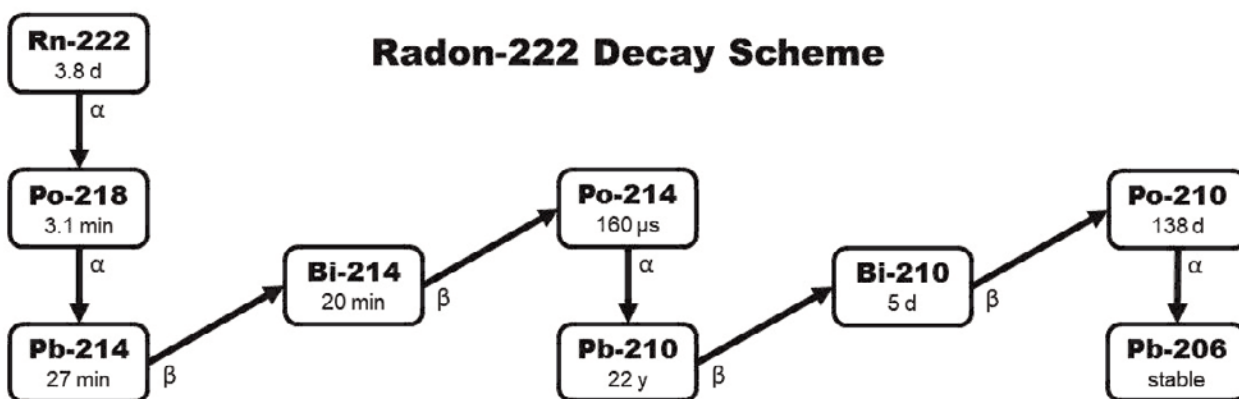
El radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo que puede estar presente en el aire que respiramos en pequeñas cantidades. Procede de la cadena de desintegración del uranio-238, que se encuentra, de forma natural, en la composición de algunos suelos. Determinadas actividades laborales (como la minería subterránea o la explotación de las aguas termales) pueden conllevar también un riesgo significativo al incorporar este gas al respirar.



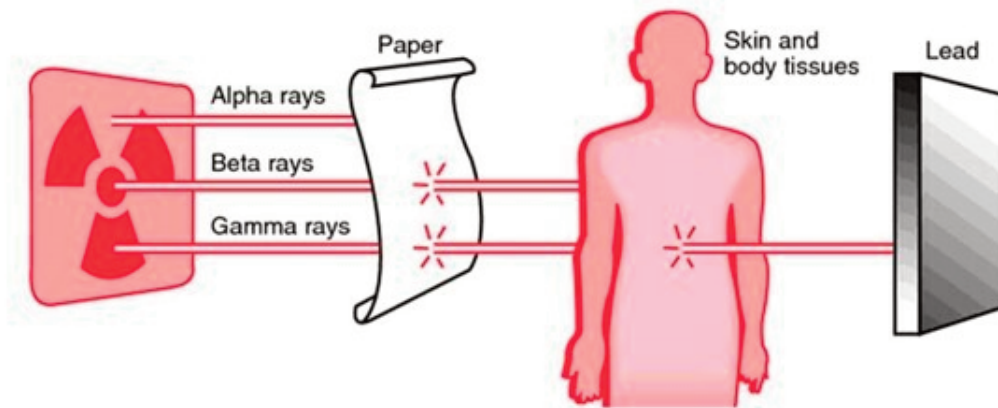
Propiedades físicas

El radón (Rn) es incoloro, inodoro, insípido y muy soluble, tanto en agua como en otros líquidos, sobre todo orgánicos. Además, su densidad es bastante mayor que la del aire, por lo que tiende a concentrarse en zonas bajas².

Es un elemento radiactivo perteneciente a la familia de los gases nobles, por eso no está relacionado con reacciones químicas. A pesar de ello, tiene una extrema movilidad pudiendo infiltrarse a través de los poros y grietas de materiales como la roca, plástico, la madera o demás materiales de construcción. Este gas tiene un tiempo de vida largo comparado con el de residencia en los pulmones, de 3,8 días en la atmósfera. Es decir, por sí mismo, el radón no es una fuente significativa de exposición. No obstante, esa radiactividad supone que se transforma en otros elementos, que son sus descendientes en la cadena de desintegración (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po), y cuyas vidas medias son inferiores a 30 minutos; es decir, que a su vez se desintegran con cierta rapidez emitiendo partículas alfa, que son las radiaciones características y que causan daño.

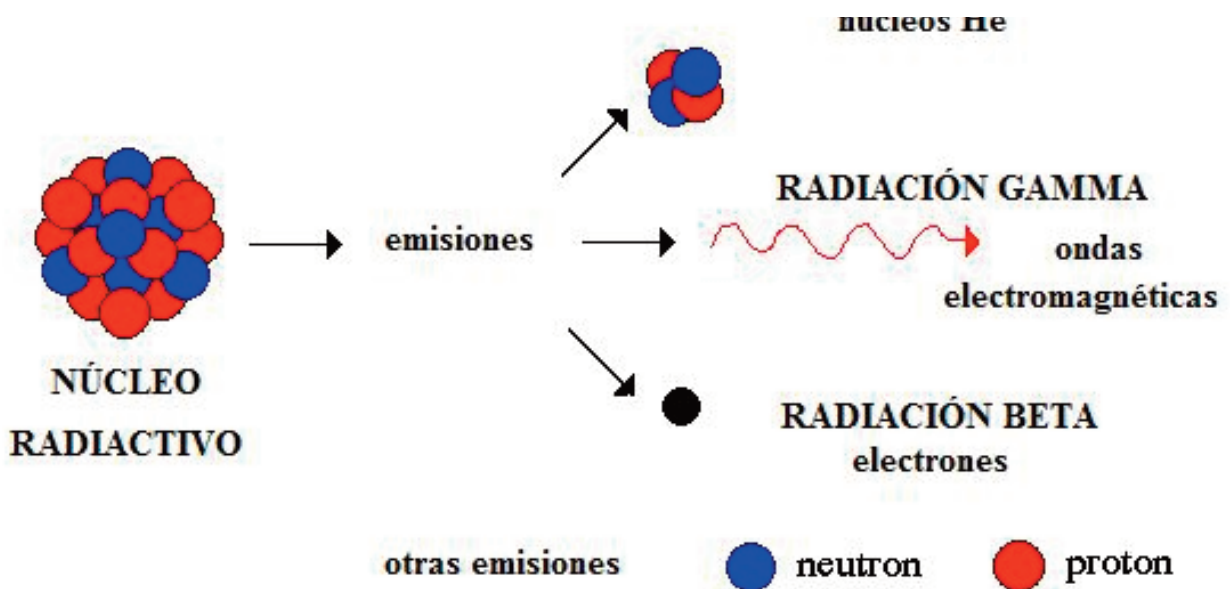


Las radiaciones ionizantes son una forma de energía liberada en forma de ondas electromagnéticas o partículas. Las radiaciones alfa liberadas en el núcleo del átomo no tienen gran capacidad de penetración debido a su elevada masa; por eso no pueden atravesar una hoja de papel ni tampoco la piel humana. Las partículas beta son mucho más ligeras que las partículas alfa; por eso son más penetrantes, pero no llegan a atravesar la piel humana. En cambio, las emisiones gamma son un tipo de radiación electromagnética capaz de penetrar el tejido humano. Por lo tanto, si dentro del cuerpo se generan emisiones alfa o beta (por el material radiactivo respirado con el aire, que se ha depositado en el sistema respiratorio), éstas radiarán sobre nuestros órganos produciendo efectos adversos.



Desintegración del uranio

Estas emisiones surgen de la desintegración de un núcleo atómico radiactivo, como es el uranio 238 y sus descendientes, que se convierte en un núcleo estable de otras sustancias más ligeras por emisión de partículas o por su división mediante un proceso de reacciones en cadena. A medida que una sustancia radiactiva se va consumiendo, emite menos radiación porque va quedando menos cantidad de material radiactivo.



El uranio a partir del cual se genera radón se encuentra de forma natural en la composición de los suelos y rocas en suficiente cantidad para que pueda emanar ⁴. Cuando se desintegra da lugar al Th-234, que también se desintegra en otro elemento radiactivo, y así sucesivamente hasta que se llega al Ra-226, un mineral sólido que se desintegra formando el radón (Rn-222). Todos estos elementos en su desintegración emiten partículas alfa, beta y radiación gamma⁵. Esta cadena de decaimiento termina con la formación de plomo estable⁶.

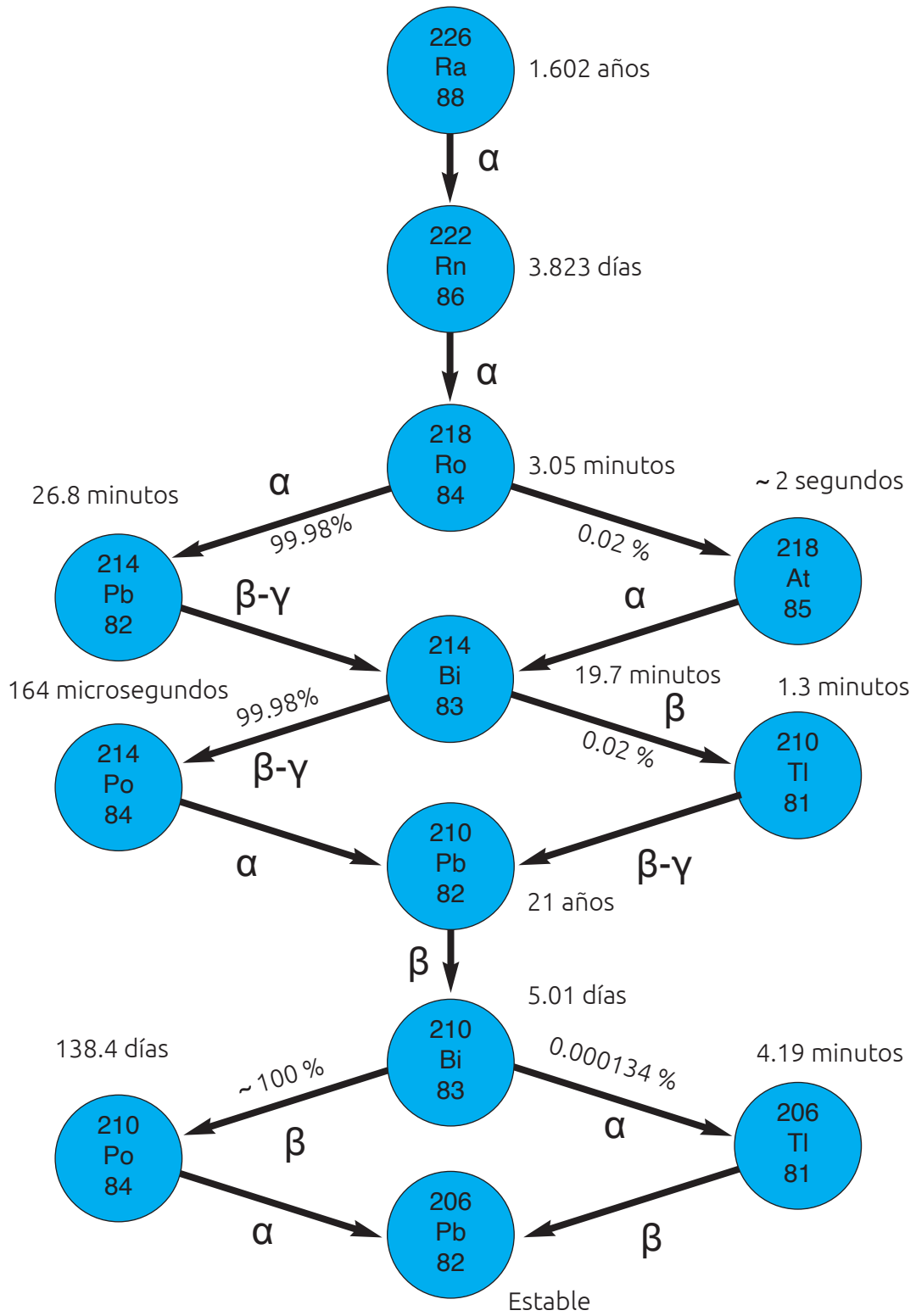


Table 1. Decay properties of radon-222 and short lived progeny

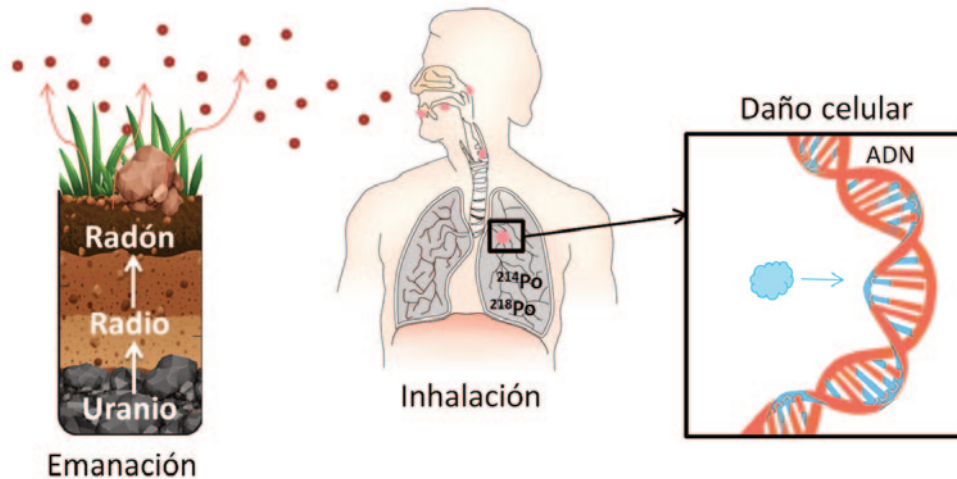
| Radionuclide | Half-life | Main radiation energies and yields (y) | | | | | |
|-------------------|-------------------|--|-------|--------------------|-------|--------------|-------|
| | | Alpha | | Beta | | Gamma | |
| | | Energy (MeV) | y (%) | Energy (max) (MeV) | y (%) | Energy (MeV) | y (%) |
| ^{222}Rn | 3.824 days | 5.49 | 100 | — | — | — | — |
| ^{218}Po | 3.05 min | 6.00 | 100 | — | — | — | — |
| ^{214}Pb | 26.8 min | — | — | 1.02 | 6 | 0.35 | 37 |
| | | | | 0.70 | 42 | 0.30 | 19 |
| | | | | 0.65 | 48 | 0.24 | 8 |
| ^{214}Bi | 19.9 min | — | — | 3.27 | 18 | 0.61 | 46 |
| | | | | 1.54 | 18 | 1.77 | 16 |
| ^{214}Po | 164 μs | 7.69 | 100 | 1.51 | 18 | 1.12 | 15 |
| | | | | — | — | — | — |

Sources: Browne and Firestone (1986) and ICRP (1983).

https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_2

1.2 ¿Cómo se genera el problema causado por radón?

El uranio se encuentra de forma natural en la composición de los suelos y rocas³. El radón, al ser un gas noble, puede escapar de la matriz de la roca y el suelo en el que se forma⁴ hasta alcanzar la superficie, donde podrá diluirse entre los gases de la atmósfera, incluso diluirse en el agua⁷. **Cuando una persona inhala el radón, la mayor parte se vuelve a exhalar, una parte se desintegra dentro de los pulmones en descendientes sólidos radiactivos que quedan atrapados en el sistema respiratorio y pueden liberar radiaciones ionizantes mientras se desintegran durante un tiempo continuado.** Estas emisiones son capaces de alterar el ADN de los tejidos pulmonares^{7,9} y, con el tiempo, aumenta el riesgo de cáncer de pulmón. Pueden pasar años antes de que se presenten los problemas de salud.



El radón es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) (que lo declaró el año 1987⁵) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU, que lo clasifican como cancerígeno del grupo 1. Se señala que el principal efecto adverso derivado de la inhalación de radón y, en especial de sus productos de desintegración, es el riesgo de contraer cáncer de pulmón, siendo la segunda causa detrás del tabaco⁷. Se estima que el radón podría causar entre el 3 y el 14 % de todos los cánceres de pulmón en un país, según el nivel promedio de radón y la prevalencia de tabaquismo en un país. El riesgo de cáncer de pulmón aumenta con el aumento de la exposición al radón⁴.

La relación entre la dosis y la respuesta es lineal; esto significa que cuanto menor sea la concentración en el aire de gas radón, menor será la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón. Los estudios más recientes señalan que el riesgo de contraer cáncer de pulmón debido al radón aumenta en un 16 % por cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón a largo plazo⁵.

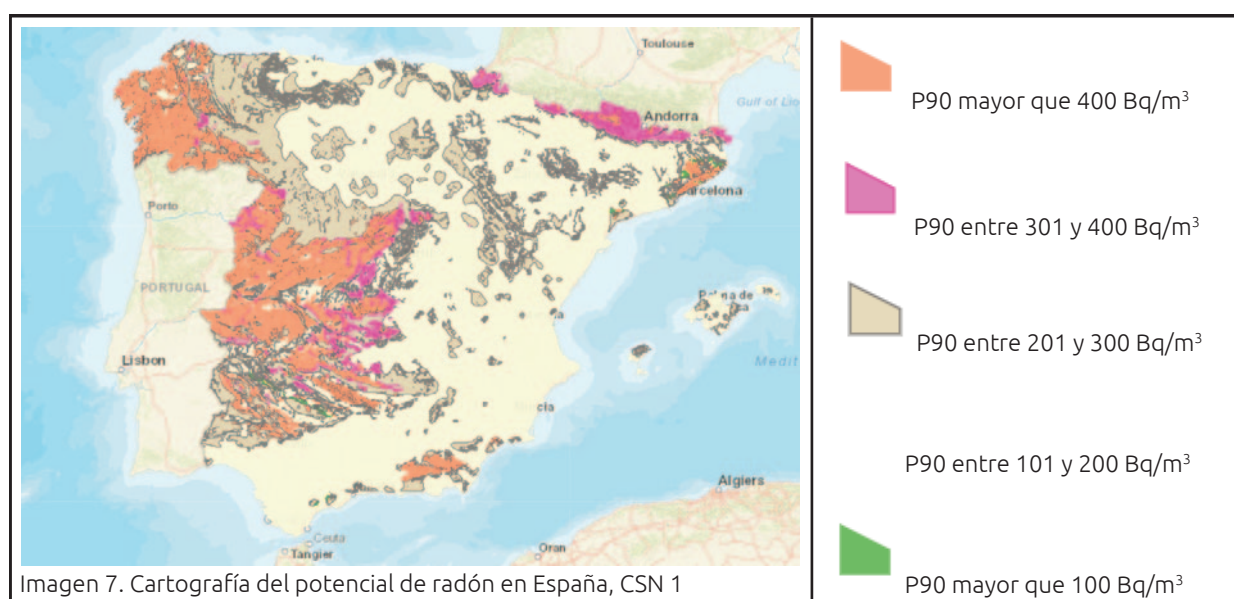
1.3 ¿Se encuentra en todos los suelos?

Sustancias radiactivas se pueden encontrar de forma natural en suelos terrestres, en mayor o menor proporción en función del tipo de roca, aunque es más frecuente en tierras de tipo **granítico y volcánico**⁵. También se puede encontrar en el agua subterránea al disolverse dicha sustancia en ella, o en materiales de construcción al usarse materias primas con contenidos de radio en el proceso de fabricación⁷.

La fuente principal es el terreno, que según el contenido de uranio o radio que posea la roca, será potencialmente activo en la generación de radón. El gas radón, tras haber emanado de las rocas, puede disolverse en corrientes de agua subterráneas y transportarse. Una vez liberado al aire, puede contribuir al incremento de la concentración en locales cerrados. También, muchos materiales de construcción están formados a partir de materias que presentan contenidos, más o menos elevados, de radio ²²⁶Ra, como son los ladrillos cerámicos, los hormigones, los morteros de albañilería, los yesos, los cementos, y adiciones tales como las cenizas volantes. Se estima que el porcentaje de radón debido a los materiales empleados en la construcción puede ser del orden de un 20 % del total registrado en una habitación⁷.

Todos los edificios contienen radón en concentraciones habitualmente bajas. No obstante, existen zonas geográficas en las que, debido a su geología, es más probable encontrar edificios con niveles elevados.

La cartografía del potencial de radón en España, desarrollada por el Consejo de Seguridad Nuclear, categoriza las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón y, en particular, identifica aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presenta concentraciones superiores a 300 Bq/m³.¹



1.4 ¿A qué puestos de trabajo afecta?

La exposición laboral al radón se considera como una exposición a un agente cancerígeno en el puesto de trabajo. Una aportación importante a la concentración de radón en interiores, se cree que entre un 20-30 %, es la que se produce por los propios materiales de la construcción, ya que estos pueden provenir de zonas con tierras con un alto contenido en radón.

Dos grupos de trabajadores son los más significativos por el riesgo que el radón supone en su actividad:

- Trabajadores de superficie: son los que trabajan en el interior de edificios o instalaciones de empresas ubicadas en zonas con un nivel alto de radón. Habría que incluir dentro de este grupo a los que desarrollen su actividad en la planta baja o aquella que se encuentra a nivel del sol, ya que en principio en alturas superiores del edificio la concentración de radón correspondiente al terreno disminuye.
- Trabajadores en áreas subterráneas y/o en contacto con aguas subterráneas: los que desarrollan su actividad laboral en instalaciones o recintos debajo de la superficie del suelo, y todos los que están en contacto con aguas subterráneas.

Más minoritaria es el tercer grupo de trabajadores:

- Otros colectivos: los que, por su actividad laboral, están en contacto o manipulan isótopos de radón (centros de investigación, laboratorios de investigación, etc.).

La lista de actividades que se pueden corresponder con el segundo grupo de la clasificación anterior, que se considera no exhaustiva, y en las que puede haber exposición laboral no menospreciable al gas radón está publicada:

- plantas de tratamiento de aguas
- plantas de explotaciones geotérmicas
- piscifactorías con uso de aguas subterráneas
- minas en explotación
- cuevas/minas museo
- extracción de gas natural y petróleo
- plantas de producción de energía a partir de combustibles fósiles (carbón-petróleo)
- refinerías de petróleo
- túneles, estaciones y cocheras subterráneas
- trabajos de excavación
- aparcamientos subterráneos
- balnearios y establecimientos termales ⁵

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. Éstas 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 planta baja o sobre el suelo, ubicados 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. ⁸

2. Metodología para valorar el potencial riesgo

2.1 ¿Cómo se mide?

Los equipos de medida de radón pueden dividirse en dos tipos en función del tiempo de exposición necesario para obtener medidas fiables.

Por un lado están los sistemas de medida en continuo, con tiempos de integración cortos, que van de algunos minutos a varias horas. Suelen utilizarse para determinaciones a corto plazo, del orden de horas o pocos días, aunque también son aptos para efectuar medidas más largas, de algunos meses. Disponen de un sistema de lectura directa en pantalla y de almacenamiento electrónico.

Para garantizar su correcto funcionamiento, estos equipos deben ser verificados y calibrados periódicamente, conforme recoge la Guía de Seguridad 11.1 del CSN de directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire.

Por otro lado, se encuentran los sistemas integradores, que suelen usarse para medir largos periodos de exposición, de algunos días a varios meses. Son sistemas de medida indirecta, que deben ser sometidos a un proceso de lectura posterior para obtener la concentración integrada de radón. Dentro de este tipo, los más utilizados son los detectores de trazas nucleares, por su bajo coste y robustez.

De acuerdo con la Guía de Seguridad 11.4 del CSN, para obtener un valor del promedio anual de la concentración de radón, debe realizarse a partir de detectores expuestos, como mínimo, durante un periodo de tres meses.

Los sistemas de medida en continuo no son tan exactos como los sistemas integradores, pero son muy efectivos para identificar el riesgo de exposición, midiendo la concentración de la zona deseada en un periodo de tiempo corto, para poder valorar si se trata de concentraciones elevadas o bajas, y si es necesario un control más exhaustivo.

2.2 Valores límites de exposición establecidos

La magnitud con la que medimos la actividad de la radiación producida por la desintegración del núcleo de cualquier elemento radiactivo es el Becquerel (Bq), que indica el número de desintegraciones por segundo del núcleo atómico, en este caso del radón¹¹. La unidad de Bq es por consiguiente inversa al segundo. Para aplicaciones relacionadas con la salud humana, esta es una cantidad pequeña¹².

Para el caso de la concentración de la actividad en un espacio cerrado, usamos el bequerelio por metro cúbico (Bq/m^3), que expresa el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire. Esta magnitud aparece definiendo los niveles máximos aconsejables, según recomendaciones normativas, que no deben sobrepasarse en los espacios cerrados y habitados con el fin de proteger la salud de los habitantes⁶.

El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, establece la obligación de establecer medidas de protección cuando se determinan concentraciones promedio anual superiores a 300 Bq/m^3 . Superar este nivel conlleva, siempre que sea razonablemente posible (atendiendo a consideraciones técnicas y económicas), ejecutar medidas con el objetivo de reducir las concentraciones de radón. Si no puede reducirse la concentración de radón a niveles inferiores al de referencia, se establecen otras medidas de protección radiológica que se establecen en el capítulo quinto de la instrucción IS-33, en el sentido de limitar la exposición y controlar la dosis de radiación que ello supone para no superar los valores de dosis límite establecidos (20 mSv de dosis efectiva anual).



El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes establece criterio para valorar riesgo. Estas normas básicas están dirigidas a señalar las dosis máximas admisibles que sean compatibles con una seguridad adecuada, los niveles de actividad radiactiva máximos admisibles y los principios fundamentales de la vigilancia médica de los trabajadores. Así, la exposición ocupacional al radón en el lugar de trabajo cuando la concentración de este gas en alguna de las zonas de actividad laboral exceda el nivel de referencia establecido en el artículo 72, de 300 Bq/m³. En relación con la protección frente al radón, se establece que el Gobierno impulsará y aprobará un Plan Nacional contra el Radón, con el objetivo de reducir el riesgo que la exposición a largo plazo a este gas supone para la salud de la población. Adicionalmente, y en casos específicos, para exposiciones ocupacionales al radón, se valorará el nivel de dosis anual para poder asegurar que no se superan valores límite expresados en la magnitud de dosis, que es la referencia en protección radiológica. Atendiendo a los principios de protección radiológica de referencia en el marco legal, una elevada exposición de los trabajadores deberá gestionarse como una situación de exposición planificada, pero teniendo en cuenta la excepcionalidad que eso representaría si se relaciona con el riesgo generado por radón.

3. Estudios del riesgo y efectos

En cuanto a la exposición laboral de radón, hay diferentes estudios que concluyen que existe la necesidad de tomar medidas de mitigación. Los estudios analizados muestran que en la mayoría de los lugares de trabajo la concentración de radón está por debajo de 300 Bq/m³ y, por lo tanto, atendiendo al artículo 72 del RD 1029/2022, no es necesario intervenir. Sin embargo, hay casos donde se supera ese valor límite y, como hace referencia al artículo 75 de esa disposición, se deberán tomar las medidas oportunas para reducir las concentraciones y/o la exposición al radón. En estas situaciones se establece que puede haber una causalidad entre la aparición de efectos adversos, como podría ser el cáncer de pulmón, y la exposición a este gas. Cuando, a pesar de las medidas tomadas, continúe habiendo concentraciones de radón en aire que, en promedio anual, sean superiores al nivel de referencia de 300 Bq/m³, el titular de la actividad laboral queda sujeto al cumplimiento del artículo 19 y demás artículos de aplicación para una adecuada protección radiológica²².

A valores de exposición bajos no se puede concluir que haya una relación causa-efecto, debido a la exposición, laboral o no, a otros agentes químicos que también podría atribuirse la causa. Pero eso no significa que bajas concentraciones de radón no sean nocivas, porque la relación entre la dosis y la respuesta es lineal. Esto significa que cuanto menor sea la concentración en el aire de gas radón, menor será la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón. Los estudios más recientes muestran que el riesgo de contraer cáncer de pulmón debido al radón aumenta en un 16 % por cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón a largo plazo⁵.

La normativa española clasifica como lugares de especial preocupación para la exposición a balnearios y centros de bienestar urbanos, cuevas y galerías, minas (distintas de las de uranio, que tienen su regulación específica), instalaciones donde se almacenan o tratan aguas subterráneas, y lugares de trabajo subterráneos o superficiales donde se los niveles de radón deben sospecharse¹⁶.

3.1 Exposición a radón en puestos de trabajo

Análisis de publicaciones que se han seleccionado por estar relacionados con el ámbito laboral, por el ámbito geográfico del estudio, y por la relevancia de los datos, entre otros.

El trabajo en lugares cerrados o subterráneos implica también un elevado riesgo de exposición de radón cuando existen concentraciones elevadas de este gas en interiores. En el ámbito laboral, al igual que en el domicilio, la exposición puede extenderse durante toda la jornada laboral y a lo largo de años, lo que supone un riesgo relevante. Cada actividad laboral lleva asociado un protocolo de medición específico en función de sus características particulares.

En España el riesgo para la salud pública que entraña la exposición a radón interior es desconocido para la mayoría, y este desconocimiento se acentúa aún más sobre el posible efecto del radón en el ámbito laboral¹³.

1. Exposición de radón en viviendas por comunidad autónoma¹⁴

En esta tabla se recogen los valores de las concentraciones de radón en viviendas por comunidad autónoma corregida y sin corregir por altura de la vivienda para mostrar, tal y como se puede ver en la cartografía del apartado anterior, las zonas con más riesgo de exposición de radón. También se pueden tener en cuenta como lugar de trabajo para esas personas que ejercen teletrabajo desde sus casas.

| Comunidad Autónoma | Prevalencias sin corregir (%) | | | Prevalencias corregidas (%) | | |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | <100 Bq/m ³ | 101 - 300 Bq/m ³ | >300 Bq/m ³ | <100 Bq/m ³ | 101 - 300 Bq/m ³ | >300 Bq/m ³ |
| 1 Andalucía | 80,48 | 17,24 | 2,28 | 88,19 | 10,52 | 1,30 |
| 2 Aragón | 80,29 | 17,41 | 2,31 | 90,86 | 8,18 | 0,96 |
| 3 Asturias, Principado de | 79,02 | 18,08 | 2,89 | 91,19 | 7,71 | 1,10 |
| 4 Balears, Illes | 80,68 | 17,19 | 2,14 | 88,52 | 10,30 | 1,17 |
| 5 Canarias | 73,46 | 18,42 | 8,12 | 82,43 | 12,30 | 5,27 |
| 6 Cantabria | 77,35 | 19,00 | 3,65 | 89,17 | 9,23 | 1,60 |
| 7 Castilla y León | 76,05 | 19,21 | 4,74 | 85,09 | 12,05 | 2,86 |
| 8 Castilla-La Mancha | 77,84 | 18,56 | 3,60 | 83,42 | 13,95 | 2,62 |
| 9 Cataluña | 75,46 | 19,67 | 4,87 | 88,78 | 9,17 | 2,05 |
| 10 Comunitat Valenciana | 81,46 | 16,76 | 1,78 | 91,72 | 7,58 | 0,71 |
| 11 Extremadura | 71,32 | 20,69 | 7,99 | 77,63 | 16,26 | 6,12 |
| 12 Galicia | 62,14 | 23,78 | 14,08 | 77,08 | 14,70 | 8,22 |
| 13 Madrid, Comunidad de | 78,65 | 18,12 | 3,23 | 92,75 | 6,26 | 0,99 |
| 14 Murcia, Región de | 81,14 | 16,93 | 1,93 | 88,26 | 10,62 | 1,12 |
| 15 Navarra, CF | 80,48 | 17,31 | 2,20 | 91,06 | 8,05 | 0,90 |
| 16 País Vasco | 79,47 | 17,84 | 2,69 | 94,32 | 5,06 | 0,62 |
| 17 Rioja, La | 80,09 | 17,51 | 2,40 | 91,36 | 7,71 | 0,92 |
| 18 Ceuta | 80,51 | 17,08 | 2,41 | 92,05 | 7,05 | 0,91 |
| 19 Melilla | 81,48 | 16,75 | 1,77 | 91,35 | 7,94 | 0,71 |

Tabla 1. Prevalencia de exposición a radón interior por comunidad autónoma corregida y sin corregir por altura de la vivienda

El impacto de la corrección por altura en la población expuesta es muy importante en algunas comunidades autónomas, lo cual se reflejará en las estimaciones de mortalidad atribuible. Donde más se observa este impacto es la Comunidad de Madrid, que pasa de un 78 % de la población expuesta a menos de 100 Bq/m³ a un 92 % tras aplicar la corrección por altura utilizada. Galicia, Extremadura y Canarias obtienen más del 5 % de viviendas por encima de los 300 Bq/m³. Pero, en general, la mayoría de las viviendas del país se encuentran a concentraciones por debajo de los 100 Bq/m³, considerando que hay un riesgo bajo de exposición.

2. Estudio del radón interior en los lugares de trabajo españoles¹⁵

En este apartado se sintetizan algunos de los datos relevantes extraídos de publicaciones científicas que aportan datos y conclusiones relacionadas con situaciones que puedan ser asimilables a otras que se puedan encontrar en España. De 248 lugares de trabajo medidos, el 27 % ha demostrado tener concentraciones de radón por encima de los umbrales internacionales (OMS, UE), y un porcentaje notable ubicado en áreas con bajo nivel de radón tenía concentraciones altas. La concentración media de radón fue de 123,5 Bq/m³, con un rango de 16-3.039 Bq/m³. En Galicia se obtuvo una concentración media de 251 Bq/m³, seguida de Madrid con 61,5 Bq/m³. El 46 % de los puestos de trabajo en Galicia, en los puntos medidos, tenían concentraciones mayores de 300 Bq/m³, y el 10,6 % en Madrid. El 19 % de los trabajadores estuvieron expuestos a más de 300 Bq/m³ y el 6,3 % a más de 500 Bq/m³. Se ha de valorar que se ha ido a medir en ubicaciones en las que se puede estimar a priori cierta criticidad.

Un estudio realizado en centros de trabajo de Extremadura (aproximadamente 150 medidas) obtuvo una media de 130 Bq/m³. De los lugares de trabajo, el 31 % tenía mediciones superiores a 200 Bq/m³ y el 13 % tenía concentraciones de radón en interiores superiores a 400 Bq/m³. Las concentraciones más altas de radón se observaron en balnearios y en una cueva turística.

La Tabla 2 muestra el número de medidas por sector y las concentraciones de radón en interiores. Se puede observar que el sector salud es el que presenta mayor concentración de radón, seguido de la administración pública. Mientras que el sector turístico es el que presenta menores concentraciones de radón.

| Work sector | Number of radon measurements (%) | Median concentration (Bq/m ³) | Radon measurements above 300 Bq/m ³ , % |
|-----------------------|----------------------------------|---|--|
| Tourist | 29 (11.7) | 47 | 6.9 |
| Education | 62 (25.0) | 109 | 22.6 |
| Public administration | 107 (43.1) | 60 | 23.5 |
| Health | 17 (6.9) | 176 | 37.4 |
| Others/private sector | 22 (8.9) | 129 | 22.7 |
| Unknown | 11 (4.4) | 91 | 0 |
| Total | 248 (100.0) | 129.5 | 27.4 |

Tabla 2. Concentración de radón por sector de trabajo

Table 2

Radon concentration broken down by radon-prone area classification of Spanish Municipalities (based on the Nuclear Safety Council maps).

| Radon-prone area | Number of radon measurements (%) ^a | Median concentration (Bq/m ³) | Radon measurements above 300 Bq/m ³ , % |
|------------------|---|---|--|
| Low | 56 (23.0) | 80 | 7.1 |
| Medium | 125 (51.2) | 210 | 44.8 |
| High | 63 (25.8) | 126 | 9.5 |
| Total | 244 (100.0) | 129.5 | 27.4 |

Tabla 3. Concentración de radón clasificada por los municipios españoles (basado en los mapas del Consejo de Seguridad Nuclear)

En este estudio concluyeron que la exposición a radón podría ser un problema de salud relevante en los lugares de trabajo en España debido al elevado número de trabajadores expuestos. La prevalencia de trabajadores afectados depende del área geográfica.

3. Estudio del radón en puestos de trabajo en Extremadura¹⁶

Se realizó un estudio sobre los niveles de radón en los lugares de trabajo de Extremadura. Se realizaron más de 200 mediciones en unas 130 empresas y organizaciones de diferentes sectores (centros de bienestar urbano, spas, cuevas, minas, instalaciones de gestión de agua, aparcamientos subterráneos, bodegas, museos, etc.). Los resultados indicaron la importancia de realizar este tipo de medición debido a que la exposición de los trabajadores puede alcanzar valores elevados en algunos casos.

Las leyes españolas clasifican como lugares de especial preocupación para la exposición balnearios y centros de bienestar urbanos, cuevas y galerías, minas (distintas de las de uranio, que tienen su regulación específica), instalaciones donde se almacenan o tratan aguas subterráneas, y lugares de trabajo subterráneos o superficiales donde se los niveles de radón deben sospecharse.

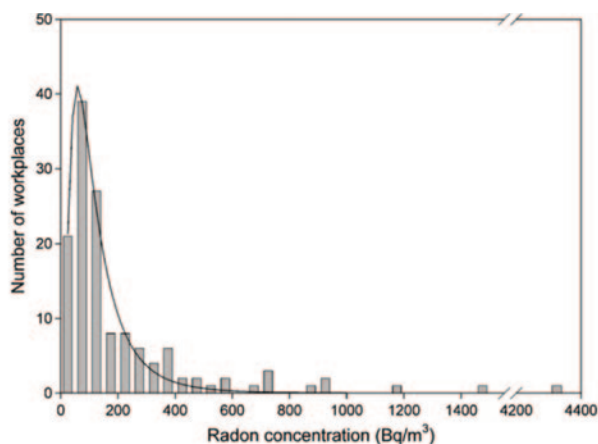


Fig 1. Distribución del número de puestos de trabajo medidos en las distintas empresas.

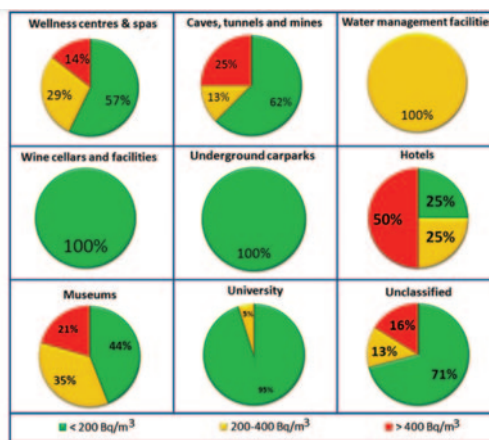


Fig 2. Distribución por sectores de los resultados de las encuestas obtenidas mediante detectores de huellas.

La Fig. 1 muestra los valores medidos que variaron en un amplio rango. El valor máximo fue de aproximadamente 40 kBq/m³, que se midió en una cueva turística. En general, el 69 % de los lugares de trabajo presentaban concentraciones de radón inferiores a 200 Bq/m³, el 18 % tenían concentraciones de radón entre 200 y 400 Bq/m³ y el otro 13 % tenían valores superiores a 400 Bq/m³.

La Fig. 2 muestra los resultados del detector de rastros clasificados por sector. Se observa en la figura que las distribuciones difieren ampliamente entre sectores. Aunque, en general, se imponen las concentraciones por debajo de 200 Bq/m³. El sector hotelero presenta el mayor porcentaje de concentraciones superiores a 400 Bq/m³, considerando esto un riesgo de exposición a radón elevado. Casi todos los sectores tienen un porcentaje no despreciable de concentraciones alrededor del valor límite.

| Sector | Rango de concentraciones (Bq/m ³) | Concentración media (Bq/m ³) |
|----------------------|---|--|
| Centros de bienestar | 41 - 124 | 83 |
| Balnearios | 48 - 905 | 301 |
| Museos subterráneos | 507 - 4337 | < 200 (en la 2ª planta) |
| Bodegas | 28 - 136 | 68 |

Tabla 4. Concentraciones de radón por sectores en Extremadura

Los balnearios y los centros de bienestar urbanos se consideraron juntos en el estudio porque están en la misma categoría en las normas legislativas, pero presentan distribuciones de concentraciones de radón muy diferentes. En los balnearios, el 60 % de los valores fueron superiores a 200 Bq/m³, siendo el 20 % superiores a 400 Bq/m³. Los mayores valores se midieron en dos balnearios (905 y 696 Bq/m³).

En un museo se llegó a medir una concentración de radón de 4337 Bq/m³. Este valor se obtuvo para una sala semi subterránea utilizada como sala de exposiciones (probablemente había sido una antigua mazmorra), mientras que el nivel medido del segundo piso, donde habitualmente trabajan sus empleados, fue inferior a 200 Bq/m³.

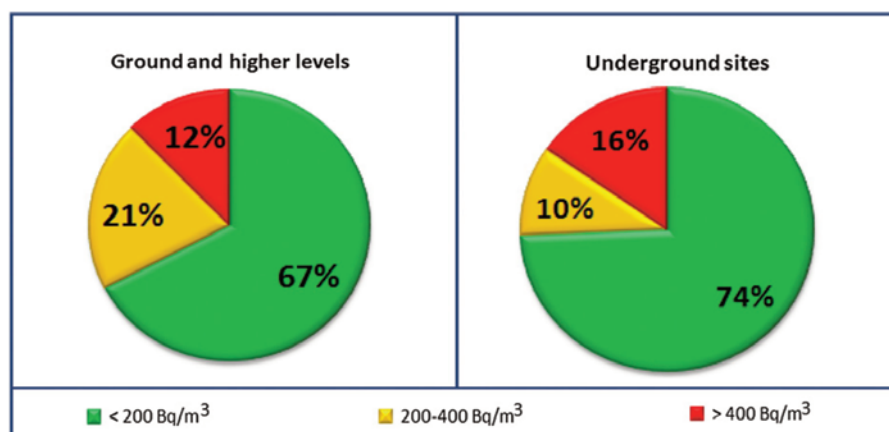


Fig 3. Resultados de las concentraciones medidas entre los lugares de trabajo de superficie y subterráneos

Los resultados entre los sitios de superficie y los subterráneos (Fig. 3) no muestran una gran diferencia como la que se podría esperar, dado que el radón se encuentra, principalmente, en el suelo y, por eso, los lugares subterráneos se considerarían naturalmente más propensos a altas concentraciones de radón.

Una de las características más destacadas de los resultados del estudio fue la fuerte dependencia encontrada de las altas concentraciones de radón en la situación geográfica del sitio. Una de las principales causas de las altas concentraciones de radón son las características del suelo sobre el que se han construido los edificios.

En general, las concentraciones más altas de radón medidas en el interior de los lugares de trabajo están directamente relacionadas con aquellas áreas que presentan los valores más altos de radiación gamma natural.

4. Análisis de los principales factores que inciden en la evaluación de la dosis de radón en los lugares de trabajo: El caso de las cuevas turísticas¹⁷

Las cuevas turísticas representan un caso de lugar de trabajo con condiciones ambientales particulares, que pueden verse afectadas por altas concentraciones de radón. Hay casos en que se debe tener mucho cuidado para tomar acciones correctivas con respecto al radón, ya que en algunas circunstancias la ventilación forzada puede alterar la humedad dentro de la cueva afectando algunas de las formaciones o pinturas que atraen a los turistas. Los guías turísticos pueden trabajar unas 1900 h al año, según se indica en alguna publicación. Así, la única opción para protegerlos a ellos y a otros trabajadores de las cuevas de la exposición al radón es aplicar un sistema adecuado de protección radiológica basado, principalmente, en la limitación de la exposición restringiendo la cantidad de tiempo que

pasan en la cueva. En este trabajo se presentan los resultados de los dos primeros programas de medidas de radón llevados a cabo en 10 cuevas situadas en la región de Cantabria (España).

| Summary parameters | Dwellings | Workplaces |
|---------------------------------------|-----------|------------|
| N | 1541 | 1159 |
| Min (Bq m ⁻³) | 4 | 4 |
| First quartile (Bq m ⁻³) | 19 | 21 |
| Median (Bq m ⁻³) | 32 | 43 |
| Third quartile (Bq m ⁻³) | 65 | 102 |
| 90th percentile (Bq m ⁻³) | 137 | 260 |
| Max (Bq m ⁻³) | 4828 | 9417 |

Tabla 5. Distribución de datos para viviendas y lugares de trabajo

La concentración máxima medida en puestos de trabajo es el doble que en las viviendas de Cantabria. Aunque en ambos casos se trata de un elevado riesgo de exposición de radón, porque está muy por encima del valor límite de 300 Bq/m³. Sin embargo, llevado a una concentración promedio en distintas ubicaciones, tanto considerando las viviendas como de los lugares de trabajo, se estima que son inferiores a 100 Bq/m³ y, por lo tanto, no se considera un gran riesgo de exposición.

5. Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife¹⁸

En las islas Canarias se puede encontrar un amplio espectro de rocas volcánicas, desde basaltos a riolitas, pasando por traquitas y fonolitas, lo que significa que existen rocas con contenidos significativos de uranio. El Consejo de Seguridad Nuclear, en su Guía de Seguridad 11.04, indica que existen zonas del país donde la población se encuentra potencialmente expuesta a un riesgo significativo de inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta¹⁹.

Este trabajo se planteó centrado en el proyecto de medir radón en los diferentes institutos de Tenerife. El proyecto cuenta con 18 centros repartidos por toda la isla, aunque no de forma equitativa. Se han conseguido muestras en varios puntos, sobre todo en la zona más al norte y densamente poblada y en el sur de la isla. Hay que tener en cuenta que en el centro de la isla no se dispone de ciudades o pueblos con centros educativos, de forma que no se han tomado muestras en esta área.

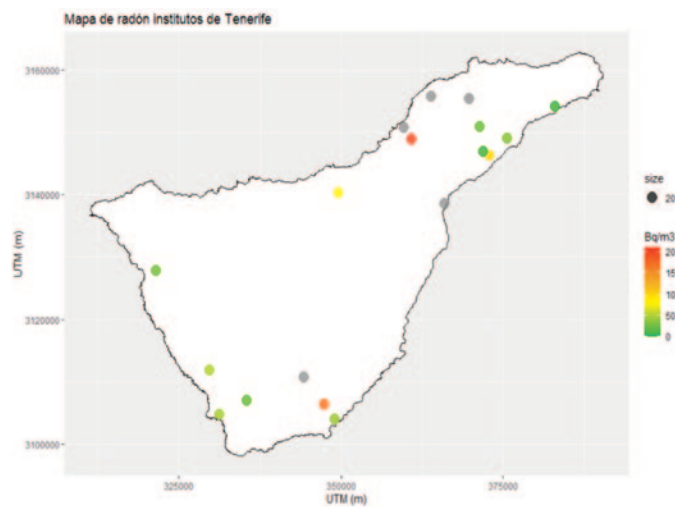


Fig 4. Mapa de Tenerife donde los puntos en color indican la concentración media en los centros con datos. En los puntos grises no se obtuvieron datos.

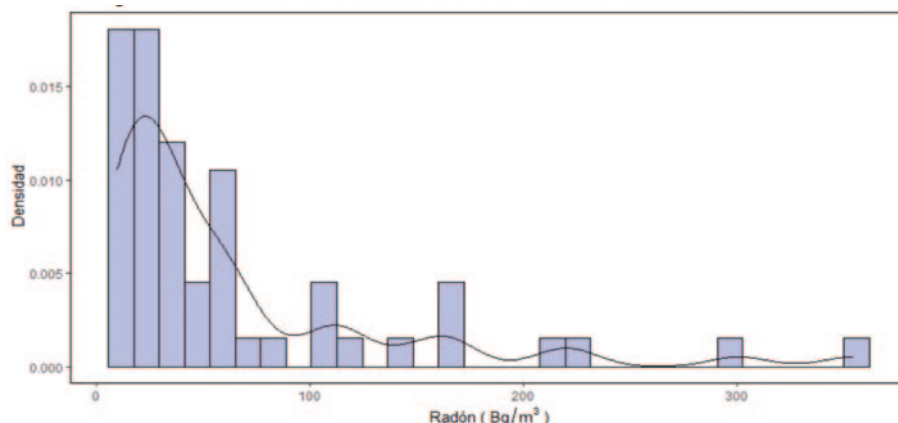


Fig 5. Histograma de los valores de radón obtenidos en los centros

En el histograma se muestra cómo la mayoría de los detectores han dado valores inferiores a 50 Bq/m³. Sin embargo, hay valores que destacan bastante alejándose de lo más probable con valores mucho más altos a los 100 Bq/m³. En la mayoría de los centros se encuentran valores muy cercanos al límite de detección (10- 15 Bq/m³), posiblemente debido a que los detectores han estado cerca de corrientes de aire y, por tanto, impidiendo que el radón se acumule en el área y se detectara.

| Centro | Concentración media de radón (Bq/m ³) | Dosis media anual (mSv/año) |
|---|---|-----------------------------|
| Adeje | 51 | 0,225 |
| Los Cristianos (Adeje) | 47 | 0,207 |
| Manuel Gonzales (La Orotava) | 85,6 | 0,377 |
| El Medáno (Granadilla de Abona) | 42,4 | 0,187 |
| Sabino Berthelot (El sauzal) | 202,2 | 0,892 |
| San Matías (Santa Cruz de Tenerife) | 104,25 | 0,460 |
| Luis Diego Cuscoy (Arona) | 23,5 | 0,103 |
| Magallanes (Granadilla de Abona) | 177 | 0,781 |
| Los Gladiolos (Santa Cruz de Tenerife) | 34,75 | 0,153 |
| La Laboral (San Cristóbal de La Laguna) | 25,67 | 0,113 |
| Tamaimo (Santiago del Teide) | 28 | 0,123 |
| San Andrés (Santa Cruz de Tenerife) | 11,6 | 0,051 |
| Las Veredillas (Santa Cruz de Tenerife) | 12 | 0,052 |

Tabla 6. Valores de concentraciones y dosis medias para cada centro

Los resultados obtenidos muestran que todos los institutos están en un rango de valores medios de concentración entre 12 y 202 Bq/m³, no superando el límite legal de 300 Bq/m³ y considerando que la mayoría de los centros poseen un bajo riesgo de exposición, teniendo en cuenta lo establecido en la legislación europea y española. Las diferencias obtenidas entre diferentes centros pueden venir determinadas por las características geológicas del entorno, métodos de construcción de los edificios y materiales empleados, antigüedad de la edificación y desperfectos estructurales y quizás, como dato más relevante este año, por diferentes criterios de ventilación empleados por cada uno de los centros.

| Country | Type of Study | Average (AM) Radon Level Bq/m ³ | Average (GM) Radon Level Bq/m ³ |
|--|------------------------------------|---|---|
| Finland (this study) | Daycare centers and schools | 82 (Schools), 86 (Daycare centers) | 42 (Schools), 39 (Daycare centers) |
| Portugal (Porto and Bragança district) [7] | Nurseries, primary, and preschools | 62 (Porto), 193 (Bragança) | 47 (Porto), 147 (Bragança) |
| Turkey [8] | Primary schools | 49 | 42 |
| Serbia [9] | Primary schools | 119 | - |
| Bulgaria [10] | Kindergartens | 132 | 101 |
| Republic of Macedonia [11] | Schools | 88 | 76 |
| Czech Republic [12] | Schools | 204 (reconstruction), 149 (non-reconstruction) | - |
| Hungary, Poland and Slovakia [13] | Kindergartens | 233 (Hungary), 90 (Poland), 317 (Slovakia) | 231 (Hungary), 78 (Poland), 214 (Slovakia) |
| Russia [14] | Kindergartens | 59 | 42 |
| South Italy [15] | Schools | 215 | - |
| Italy [16] | Schools | - | 92 (median only reported) |
| Korea [17] | Schools | 97 (spring semester), 158 (autumn semester) | - |
| Bosnia and Herzegovina [18] | Schools | 128 | 99 |
| Kosovo [19] | Schools | 198 | - |
| Saudi Arabia (Riyadh) [20] | Schools | 17 | 17 |
| Serbia (Kragujevac city) [21] | Schools and kindergartens | 60 | - |
| Sudan [22] | Schools | 59 | - |
| Switzerland [23] | Schools | 158 | - |
| Portugal [24] | Schools | 197 | 197 |

Tabla 7. Resumen de los principales resultados de estudios realizados en escuelas o guarderías con respecto a las mediciones de radón en interiores.

AM = Media aritmética, GM = Media geométrica

3.2 Incidencia de efectos adversos en puestos de trabajo en los que hay radón

En este apartado se exponen los resultados de diferentes estudios que abordan los efectos adversos del radón, y que se centran en situaciones compatibles con las de la población laboral española.

Las estimaciones de las consecuencias para la salud de la exposición a la radiación ionizante se basan mejor en estudios epidemiológicos de poblaciones humanas. En el contexto de la radiación, la epidemiología se ocupa del establecimiento de asociaciones estadísticas entre exposiciones y efectos sobre la salud. Estos estudios han establecido que la radiación es un agente causante de cáncer en muchos órganos y tejidos del cuerpo, incluido el pulmón. El establecimiento de una asociación cuantitativa es más difícil.

La evidencia epidemiológica de la inducción de cáncer de pulmón después de la inhalación de radón proviene de varios estudios de controles de mineros subterráneos, particularmente mineros de uranio. Estos estudios epidemiológicos han demostrado una correlación entre la exposición a la radiación y el aumento de casos de cáncer de pulmón. Muchos de ellos son consistentes con una relación proporcional (lineal, sin umbral) entre el exceso de riesgo y la exposición acumulada. Algunos, sin embargo, muestran evidencia de un mayor exceso de riesgo relativo por unidad de exposición en exposiciones bajas en comparación con el valor medio para todo el grupo expuesto. La relación exposición-riesgo también puede verse distorsionada por la presencia de otros carcinógenos, como el arsénico²⁰.

1. Mortalidad por cáncer de pulmón en España y Prevalencia de exposición a radón por Comunidades Autónomas¹⁴

En España, el 5,1 % de las defunciones que se produjeron en el 2017 se clasificaron como cáncer de tráquea, pulmón y bronquios. La mayoría de ellas sucedieron en población de 35 años o más y ocurrieron más fallecimientos de varones que de mujeres.

| Comunidad Autónoma | Total | Hombres | | Mujeres | |
|--------------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Nº | % | Nº | % |
| 1 Andalucía | 3.582 | 2.939 | 82,0 | 643 | 18,0 |
| 2 Aragón | 774 | 625 | 80,7 | 149 | 19,3 |
| 3 Asturias, Principado de | 706 | 531 | 75,2 | 175 | 24,8 |
| 4 Balears, Illes | 529 | 396 | 74,9 | 133 | 25,1 |
| 5 Canarias | 907 | 667 | 73,5 | 240 | 26,5 |
| 6 Cantabria | 355 | 266 | 74,9 | 89 | 25,1 |
| 7 Castilla y León | 1.330 | 1.048 | 78,8 | 282 | 21,2 |
| 8 Castilla-La Mancha | 1.004 | 842 | 83,9 | 162 | 16,1 |
| 9 Cataluña | 3.366 | 2.585 | 76,8 | 781 | 23,2 |
| 10 Comunitat Valenciana | 2.464 | 1.932 | 78,4 | 532 | 21,6 |
| 11 Extremadura | 636 | 544 | 85,5 | 92 | 14,5 |
| 12 Galicia | 1.561 | 1.224 | 78,4 | 337 | 21,6 |
| 13 Madrid, Comunidad de | 2.555 | 1.864 | 73,0 | 691 | 27,0 |
| 14 Murcia, Región de | 580 | 466 | 80,3 | 114 | 19,7 |
| 15 Navarra, Comunidad Foral de | 314 | 249 | 79,3 | 65 | 20,7 |
| 16 País Vasco | 1.214 | 906 | 74,6 | 308 | 25,4 |
| 17 Rioja, La | 123 | 96 | 78,0 | 27 | 22,0 |
| 18 Ceuta | 30 | 26 | 86,7 | 4 | 13,3 |
| 19 Melilla | 33 | 28 | 84,8 | 5 | 15,2 |
| ESPAÑA | 22.063 | 17.234 | 78,1 | 4.829 | 21,9 |

Tabla 8. Mortalidad por cáncer de tráquea, pulmón y bronquios en España en 2017 por comunidades autónomas y sexo. Población de 35 años y más

| Comunidad Autónoma | FAP(%) | Hombres | | | | | | Mujeres | | | | |
|--------------------------------|--------|---------|---------|----------|--------|----------------------|----|---------|----------|--------|----------------------|--|
| | | MA | MA - NF | MA - ExF | MA - F | Tasax10 ⁵ | MA | MA - NF | MA - ExF | MA - F | Tasax10 ⁵ | |
| 1 Andalucía | 6,1 | 178 | 7 | 76 | 95 | 7,21 | 39 | 12 | 7 | 20 | 1,47 | |
| 2 Aragón | 6,1 | 38 | 2 | 19 | 18 | 9,11 | 9 | 3 | 2 | 4 | 2,04 | |
| 3 Asturias, Principado de | 6,5 | 34 | 2 | 15 | 17 | 9,99 | 11 | 4 | 3 | 5 | 2,87 | |
| 4 Balears, Illes | 6,0 | 24 | 1 | 10 | 13 | 6,77 | 8 | 2 | 2 | 4 | 2,22 | |
| 5 Canarias | 8,0 | 54 | 2 | 23 | 29 | 8,02 | 19 | 5 | 4 | 11 | 2,79 | |
| 6 Cantabria | 7,0 | 18 | 1 | 9 | 8 | 9,88 | 6 | 2 | 1 | 3 | 3,00 | |
| 7 Castilla y León | 7,3 | 77 | 3 | 40 | 34 | 9,43 | 21 | 8 | 4 | 9 | 2,39 | |
| 8 Castilla-La Mancha | 6,8 | 57 | 3 | 26 | 28 | 9,15 | 11 | 5 | 1 | 5 | 1,72 | |
| 9 Cataluña | 7,5 | 194 | 8 | 91 | 94 | 8,62 | 58 | 21 | 15 | 23 | 2,38 | |
| 10 Comunitat Valenciana | 5,8 | 111 | 5 | 44 | 62 | 7,31 | 31 | 9 | 6 | 16 | 1,88 | |
| 11 Extremadura | 8,6 | 47 | 1 | 21 | 24 | 14,13 | 8 | 3 | 1 | 3 | 2,27 | |
| 12 Galicia | 11,1 | 136 | 8 | 63 | 65 | 15,32 | 37 | 15 | 8 | 15 | 3,75 | |
| 13 Madrid, Comunidad de | 6,6 | 123 | 5 | 62 | 56 | 6,48 | 45 | 9 | 11 | 25 | 2,09 | |
| 14 Murcia, Región de | 5,9 | 27 | 1 | 11 | 15 | 6,35 | 7 | 3 | 1 | 3 | 1,51 | |
| 15 Navarra, Comunidad Foral de | 6,1 | 15 | 1 | 6 | 8 | 7,59 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1,88 | |
| 16 País Vasco | 6,3 | 58 | 3 | 28 | 27 | 8,33 | 20 | 5 | 4 | 11 | 2,54 | |
| 17 Rioja, La | 6,2 | 6 | 0 | 3 | 3 | 5,97 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1,59 | |

NF: nunca fumadores; ExF: exfumadores; F: fumadores.

Tabla 9. Fracciones atribuidas poblacionales (FAP) en porcentaje, mortalidad atribuida (MA) a radón por cáncer de pulmón para cada comunidad autónoma y sexo en el año 2017, en global y en función del consumo de tabaco, en población ≥ 35 años y tasa de mortalidad atribuida por 100.000 habitantes. Datos sin corregir por altura de la vivienda

Sin corregir por la altura de la vivienda, en 2017 se atribuyeron el 6,9 % de todos los fallecimientos por cáncer de pulmón. Hay que tener en cuenta que la fracción atribuible poblacional a radón por sexo es la misma ya que no hay diferencias en la prevalencia de exposición ni en el riesgo de muerte entre hombres y mujeres. Por comunidades autónomas, Galicia es la que presenta un mayor porcentaje de fallecimientos, seguida de Extremadura y Canarias. Galicia y Canarias son las que presentan mayores tasas de mortalidad por exposición a radón en varones. Hay que destacar que el grueso de la mortalidad atribuida a radón residencial ocurre entre personas fumadoras y exfumadoras (95,6 % en los varones y el 68,8 % en las mujeres).

| Comunidad Autónoma | FAP(%) | Hombres | | | | | Mujeres | | | | |
|--------------------------------|--------|---------|---------|----------|--------|----------------------|---------|---------|----------|--------|----------------------|
| | | MA | MA - NF | MA - ExF | MA - F | Tasax10 ⁵ | MA | MA - NF | MA - ExF | MA - F | Tasax10 ⁵ |
| 1 Andalucía | 3,8 | 110 | 4 | 47 | 59 | 4,47 | 24 | 7 | 5 | 12 | 0,91 |
| 2 Aragón | 2,9 | 18 | 1 | 9 | 9 | 4,37 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0,98 |
| 3 Asturias, Principado de | 2,8 | 15 | 1 | 7 | 8 | 4,36 | 5 | 2 | 1 | 2 | 1,25 |
| 4 Balears, Illes | 3,7 | 14 | 1 | 6 | 8 | 4,12 | 5 | 1 | 1 | 2 | 1,35 |
| 5 Canarias | 5,5 | 36 | 1 | 15 | 20 | 5,46 | 13 | 3 | 3 | 7 | 1,90 |
| 6 Cantabria | 3,4 | 9 | 0 | 5 | 4 | 4,90 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1,49 |
| 7 Castilla y León | 4,7 | 49 | 2 | 25 | 22 | 6,04 | 13 | 5 | 2 | 6 | 1,53 |
| 8 Castilla-La Mancha | 5,2 | 44 | 2 | 20 | 21 | 6,96 | 8 | 3 | 1 | 4 | 1,31 |
| 9 Cataluña | 3,6 | 92 | 4 | 43 | 45 | 4,11 | 28 | 10 | 7 | 11 | 1,14 |
| 10 Comunitat Valenciana | 2,7 | 51 | 2 | 21 | 29 | 3,38 | 14 | 4 | 3 | 7 | 0,87 |
| 11 Extremadura | 6,9 | 37 | 1 | 17 | 19 | 11,24 | 6 | 3 | 1 | 3 | 1,80 |
| 12 Galicia | 7,0 | 86 | 5 | 40 | 41 | 9,70 | 24 | 9 | 5 | 9 | 2,37 |
| 13 Madrid, Comunidad de | 2,3 | 44 | 2 | 22 | 20 | 2,30 | 16 | 3 | 4 | 9 | 0,74 |
| 14 Murcia, Región de | 3,7 | 17 | 1 | 7 | 9 | 4,04 | 4 | 2 | 0 | 2 | 0,96 |
| 15 Navarra, Comunidad Foral de | 2,9 | 7 | 0 | 3 | 4 | 3,60 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0,89 |
| 16 País Vasco | 1,8 | 17 | 1 | 8 | 8 | 2,42 | 6 | 1 | 1 | 3 | 0,74 |
| 17 Rioja, La | 2,8 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2,68 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,71 |

NF: nunca fumadores; ExF: exfumadores; F: fumadores.

Tabla 10. Fracciones atribuidas poblacionales (FAP) en porcentaje, mortalidad atribuida (MA) a radón por cáncer de pulmón para cada comunidad autónoma y sexo en el año 2017, en global y en función del consumo de tabaco, en población ≥ 35 años y tasa de mortalidad atribuida por 100.000 habitantes. Datos corregidos por la altura de la vivienda

Tras corregir por la altura de la vivienda, en España en 2017 se atribuyeron a la exposición a radón 838 muertes (3,8 % del total). En hombres, la comunidad autónoma con la tasa de mortalidad más alta es Extremadura (11,24 casos por 100.000 habitantes), seguida de Galicia, y la más baja es la Comunidad de Madrid (2,30 casos por 100.000 habitantes). En mujeres, la comunidad autónoma con la tasa más alta es Galicia (2,37 casos por 100.000 habitantes) y la más baja La Rioja (0,7 casos por 100.000 habitantes). Las FAP varían entre el 7,0 % y el 1,8 % (Galicia y País Vasco, respectivamente) (Tabla 10). De nuevo se puede observar que la mayor parte de la mortalidad atribuible ocurre en fumadores y exfumadores, tanto en hombres como en mujeres (95,5 % y 74,2 % del total, respectivamente). La mortalidad atribuible en Ceuta y Melilla por cáncer de pulmón debido a la exposición a radón residencial fue de una persona en cada ciudad autónoma (sumando hombres y mujeres).

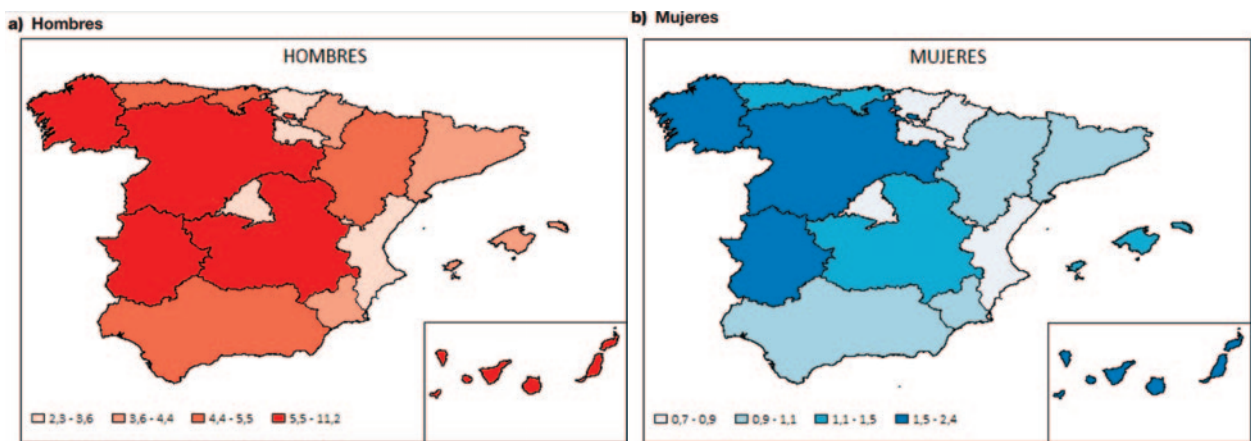


Fig 6. Mapa por cuartiles de la tasa de mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a radón en hombres (a) y en mujeres (b). Tasas por cada 100.000 habitantes

A partir del análisis de datos de prevalencia de exposición a radón, la mortalidad atribuible tiene un patrón espacial claro y se observa cómo en Andalucía (especialmente en mujeres) y en el área mediterránea la carga de MA por radón es más baja. En las dos Castillas, Galicia, Extremadura e Islas Canarias la carga es alta (Figura 6). Se observa este mismo patrón geográfico tanto para hombres como para mujeres.

2. Relación entre exposición a radón y cáncer de pulmón²¹

Los siguientes estudios analizan la incidencia y/o mortalidad de cáncer pulmonar en trabajadores de minas de uranio expuestos a radón y su progenie. En estos estudios usan como unidad de análisis un *working level month* (WLM), que se define como la exposición acumulativa al respirar una atmósfera en una concentración de un nivel de trabajo por un mes de trabajo de 170 horas. Mientras que la dosis del radón se expresa en milisieverts (mSv), lo cual expresa la radiación absorbida por un tejido.

En el primer caso realizan uno de los estudios de los trabajadores de minas de uranio de la compañía Wismut en Alemania, contratados desde 1948 hasta 1989 y seguidos en periodos de 5 años hasta la actualidad, encontrando un aumento significativo de cáncer de pulmón^a.

En el siguiente, llevan a cabo un estudio conjunto de casos y controles realizado en 3 países europeos (Francia, República Checa y Alemania), de trabajadores de minas de uranio en el que encuentran una incidencia observada más alta a la esperada. Este estudio también analizó el riesgo en poblaciones expuestas a dosis bajas (50 WLM y 300 WLM), encontrando una asociación significativa también con estos niveles^b.

Rachel S. D. realizan un estudio de trabajadores de minas de uranio en Eldorado, Canadá, comparando la mortalidad entre la población general y minera. Estos autores encontraron una incidencia siete veces mayor de cáncer pulmonar en los mineros que en la población general^c.

B. Vacquier realizaron un estudio en Francia, en el 2007, donde encontraron que en muertes sólo por cáncer pulmonar, todos estuvieron expuestos al radón y sus derivados^e.

| Autor | Año | Diseño | Lugar | Periodo de seguimiento | Muestra | Medida de asociación | IC 95% |
|--------------|------|---------|-----------|------------------------|---------|----------------------|---------------|
| L. Walsh* | 2014 | COHORTE | ALEMANIA | 1946-2008 | 59000 | EER/WLM 0.19 | 0.16-0.22 |
| Tomasek, L. | 2012 | COHORTE | REP CHECA | 1948-2010 | 9978 | EER/WLM 0.0097 | 0.0074-0.0127 |
| Rachel S. D. | 2010 | COHORTE | CANADÁ | 1932-1999 | 17660 | EER/WLM 0.55 | 0.37-0.78 |
| Kreuzer, M. | 2010 | COHORTE | ALEMANIA | 1946-2003 | 58987 | EER/WLM 0.19 | 0.17-0.22 |
| B. Vacquier | 2007 | COHORTE | FRANCIA | 1946-1999 | 5086 | EER/WLM 0.71 | 0.29-1.35 |

Tabla 11. Incidencia de cáncer de pulmón en expuestos a radón. ERR = exceso de riesgo relativo

| Autor | Año | Diseño | Lugar | Periodo de seguimiento | Muestra | Medida de asociación | IC 95% |
|--------------|------|---------|------------|------------------------|---------|----------------------|-------------|
| L. Walsh* | 2014 | COHORTE | ALEMANIA | 1946-2008 | 59000 | SMR 2.03 | 1.96-2.10 |
| Tomasek, L. | 2012 | COHORTE | REP CHECA | 1948-2010 | 9978 | SMR 3.47 | |
| M. Coggiola | 2011 | COHORTE | ITALIA | 1946-1995 | 1795 | SMR 106.7 | 73.4 -149.9 |
| Rachel S. D. | 2010 | COHORTE | CANADÁ | 1932-1999 | 17660 | SMR 1,31 | 1.21-1.42 |
| Taeger, D | 2008 | COHORTE | ALEMANIA | 1957-1990 | 8066 | SMR 2.86 | 2.72-3.01 |
| Boice, Jr | 2008 | COHORTE | NEW MÉXICO | 1955-2005 | 5660 | SMR 1.65 | 1.36-1.97 |
| B. Vacquier | 2007 | COHORTE | FRANCIA | 1946-1999 | 5086 | SMR 1.43 | 1.22-3.09 |

Tabla 12. Mortalidad en expuestos a radón por cáncer de pulmón. SMR: razón de mortalidad estandarizada

3. Relación entre exposición a radón y cáncer extra-pulmonar

Kulich, mediante el estudio de una cohorte de 22.816 trabajadores de minas de uranio, describe la aparición de diferentes tipos de cánceres, encontrando una incidencia general, con un ligero aumento, aunque no significativo, de melanoma maligno y de cáncer de vesícula biliar^f.

Zablotska midieron la incidencia de leucemia, linfoma y mieloma múltiple mediante un estudio de cohorte de 16.770 mineros de uranio, en Canadá, encontrando una mortalidad significativamente mayor para la leucemia que en las demás. Sin embargo, el mieloma múltiple mostró mayor incidencia. Este estudio demostró una incidencia de cáncer hematológico menor a la de la población general canadiense^g.

Kreuzer, en una cohorte realizada en base al estudio Wismut, seguidos desde 1960 hasta 2003, encontraron 24 tipos diferentes de cánceres no pulmonares, destacando la incidencia de neoplasias digestivas y hepáticas. La incidencia global de neoplasias fue significativamente mayor con respecto a la población general^h.

| Autor | Año | Diseño | Lugar | Periodo de seguimiento | Muestra | Tipo de cancer | Medida de asociación | IC 95% |
|-----------------|------|-------------------|------------|------------------------|---------|------------------|----------------------|---------------------|
| Zablotska | 2014 | COHORTE | CANADÁ | 1969-1999 | 16770 | LEUCEMIA | RIS 0.79 | (0.59- 1.03) |
| | | | | | | LINFOMA HODGKIN | RIS 0.93 | (0.51- 1.57) |
| | | | | | | LNH | RIS 0.89 | (0.70-1.11) |
| | | | | | | MIELOMA MÚLTIPLE | RIS 0.65 | (0.40- 1.01) |
| Kulich M | 2011 | COHORTE ANIDADA | REP CHECA | 1977-1996 | 22816 | EXTRAPULMONAR | RR 0.88 | (0,73 -1,04) |
| | | | | | | GÁSTRICO | RR 0.87 | (0,69 -1,09) |
| | | | | | | VESÍCULA BILIAR | RR 2.39 | (0,52-10,98) |
| | | | | | | LARINGE | RR 0.79 | (0,38 -1,64) |
| | | | | | | MELANOMA | RR 2.92 | (0,91- 9,42) |
| Matthias Möhner | 2010 | CASOS Y CONTROLES | ALEMANIA | 1950-1989 | 1357 | LEUCEMIA | OR1.78 | (1.09 -2.91) 90% |
| Möhner, M. | 2008 | CASOS Y CONTROLES | ALEMANIA | | 1483 | LARINGE | OR1.13 | (0.75-1.70) |
| Kreuzer M. | 2008 | COHORTE | ALEMANIA | 1960-2003 | 57199 | EXTRAPULMONAR | RR 1.02 | (0.98-1.05) |
| | | | | | | GÁSTRICO | RR 1.15 | (1.06-1.25) |
| | | | | | | HEPÁTICO | RR 1.26 | (1.07-1.48) |
| Boice, Jr | 2008 | COHORTE | NEW MÉXICO | 1955-2001 | 5660 | GÁSTRICO | SMR 0.99 | (0.32-2.30) |
| | | | | | | RENAL | SMR 1.11 | (0.41-2.42) |
| | | | | | | HÍGADO | SMR 1.7 | (0.78-3.23) |
| | | | | | | LNH | SMR 0.75 | (0.28-1.64) |
| | | | | | | LEUCEMIA, LLC | SMR 1.36 | (0.59-2.68) |
| B. Vacquier | 2007 | COHORTE | FRANCIA | 1946-1999 | 5086 | GÁSTRICO | SMR 1.16 | 0.76-1.70 |
| | | | | | | LEUCEMIA | SMR 1.20 | 0.67-1.98 |
| | | | | | | LARINGEO | SMR 1.24 | 0.83-1.78 |
| | | | | | | RIÑÓN | SMR 1.09 | 0.98-1.22 |

Tabla 13. Asociación entre radón y cáncer extra-pulmonar

Cierta evidencia de un riesgo muy pequeño relacionado con el radón se encontraron cánceres, compatibles con los cálculos dosimétricos para dosis en órganos. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de resultados no causales debido al azar y la confusión.

4. Medidas de control

Para evitar las consecuencias de la exposición a radón es necesario un diseño de medidas preventivas que elimine o reduzca al mínimo la presencia de este gas en los lugares de trabajo. Existe cierta exposición al radón en lugares de trabajo muy variados y por distintas causas. Por eso, es importante un conocimiento y juicio considerables para definir un sistema formal de decisiones separadas para cada lugar de trabajo.

Además, se recomienda informar a estos trabajadores de los riesgos a los que están expuestos durante los trabajos subterráneos con respecto al radón, así como de las medidas de protección a aplicar²³.

Debido al origen de este agente radiactivo, su presencia suele ser inevitable en distintos puestos de trabajo. Por eso, se deben implantar soluciones de protección. Éstas se pueden agrupar según su forma de actuación en cuatro grandes grupos:

- Soluciones de aislamiento del edificio. Por ejemplo, empleando barreras de protección frente al radón o sellando las fisuras, las grietas, los encuentros y las juntas por las que pueda emanar el gas.
- Soluciones de reducción del radón antes de que penetre en el edificio. Por ejemplo, instalando sistemas de despresurización del terreno o sistemas de ventilación del espacio de contención.
- Soluciones de reducción del radón cuando ya ha penetrado en el edificio. Mejorando la ventilación de los locales, fundamentalmente mediante mecanismos de dilución, ya que los sistemas de extracción pueden favorecer una mayor emanación del radón.
- Soluciones destinadas a la selección de materiales con baja exhalación de radón. Por ejemplo, consultando el origen geológico y geográfico de los materiales empleados en la construcción o rehabilitación del edificio².

En cualquier caso, es recomendable —siempre que sea posible técnicamente y efectivo en términos de reducción de dosis— disponer de ventilación forzada (extracción mecánica) en las galerías de agua y los pozos, a fin de minimizar la concentración de radón en estas instalaciones²². Hay estudios que han comprobado la gran efectividad que tiene la ventilación en la disminución de la concentración de gas radón¹⁷.

Se ha observado que las instalaciones que presentan un gunitado en sus paredes contienen niveles de concentración de radón más bajos, al aislar el terreno natural del espacio de trabajo, por lo que, en las instalaciones que no dispongan de éste, ésta sería otra posible medida de mitigación a valorar. En este sentido, hay hormigones especiales que pueden utilizarse como barrera contra el radón²³.

Si los niveles de gas radón en el puesto de trabajo superan el valor establecido en la normativa, aún habiendo aplicado las medidas anteriores, se debe garantizar a los trabajadores un servicio de vigilancia periódica de su estado de salud en función de los riesgos inherentes al trabajo (sólo podrá llevarse a cabo cuando el trabajador preste su consentimiento). En los supuestos en que la naturaleza de los riesgos inherentes al trabajo lo haga necesario, el derecho de los trabajadores a la vigilancia periódica de su estado de salud deberá ser prolongado más allá de la finalización de la relación laboral, en los términos que reglamentariamente se determinen²⁴.

4.1 Código técnico de la edificación

Uno de los documentos básicos del código técnico de la edificación, aprobado por Artículo único. Modificación del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE), queda modificado como sigue, para introducir al final el siguiente texto:

Exigencia básica HS 6: Protección frente a la exposición al radón. Es aplicable a edificios situados en los términos municipales de la lista que publica el CSN en los que se determina la presencia significativa de radón.

a) Edificios de nueva construcción

Se señalan en dicho código estas medidas preventivas:

1. Un espacio de contención ventilado entre el terreno y los locales a proteger, para mitigar la entrada de radón proveniente del terreno a los locales habitables mediante ventilación natural o mecánica.
2. Un sistema de despresurización del terreno, que permita extraer los gases contenidos en el terreno colindante al edificio.
3. Cuando existan locales habitables situados en grandes áreas que no están protegidas, tales como cabinas de vigilante en garajes, podrá emplearse para la protección de dichos locales, como solución alternativa a las establecidas en los párrafos anteriores, la creación de una sobrepresión en el interior del local habitable mediante la introducción de aire del exterior.

b) Intervenciones en edificios existentes

1. En el caso de intervenciones en edificios existentes, la aplicación de las soluciones anteriores podrá ajustarse mediante la utilización de soluciones alternativas que, en conjunto, permitan limitar adecuadamente la entrada de radón. En todo caso, es necesario que los locales habitables dispongan de un nivel de ventilación interior que cumpla con la reglamentación en vigor de calidad del aire.

2. En el caso de intervenciones en edificios existentes, cuando se disponga de valores medidos del promedio anual de concentración de radón, obtenidos según el apéndice C del código, y alguna de las zonas de muestreo establecidas conforme a dicho apéndice supere el nivel de referencia, se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Si se presentan valores comprendidos entre 1 y 2 veces el nivel de referencia, se adoptarán las soluciones correspondientes a municipios de zona I.
- Si se presentan valores que superen 2 veces el nivel de referencia, se adoptarán las soluciones correspondientes a municipios de zona II.

3. Barrera de protección

Características de la barrera:

- La barrera de protección será todo aquel elemento que limite el paso de los gases provenientes del terreno y cuya efectividad pueda demostrarse.
- La barrera podrá dimensionarse según lo descrito en el apartado 3.1.2, si bien, se consideran válidas (y no es necesario proceder a su cálculo) las barreras tipo lámina con un coeficiente de difusión frente al radón menor que 10^{-11} m²/s y un espesor mínimo de 2 mm.
- La barrera de protección presentará, además, las siguientes características:
 - tener continuidad: juntas y encuentros sellados;
 - tener sellados los encuentros con los elementos que la interrumpen, como pasos de conducciones o similares;
 - las puertas de comunicación que interrumpen la continuidad de la barrera deberán ser estancas y estar dotadas de un mecanismo de cierre automático;
 - no presentar fisuras que permitan el paso por convección del radón del terreno;
 - tener una durabilidad adecuada a la vida útil del edificio, sus condiciones y el mantenimiento previsto.
- En intervenciones en edificios existentes, si no es posible la colocación de una barrera con las características indicadas en este apartado, los cerramientos situados entre el terreno y los locales habitables deberán funcionar como una barrera. Para ello se sellarán cuidadosamente las grietas y juntas de estos cerramientos y se cumplirá, al menos, con lo establecido en las letras b) y c) del párrafo anterior.

4. Productos de construcción

Para los productos de construcción se indican los siguientes condicionantes:

4.1 Características exigibles a los productos

- De forma general, todos los materiales que se vayan a utilizar en los sistemas de protección frente al radón deben cumplir las siguientes condiciones:
 - lo especificado en los apartados anteriores;
 - lo especificado en la legislación vigente;
 - que sean capaces de funcionar eficazmente en las condiciones previstas de servicio.

4.2 Control de recepción en obra de productos

- En el pliego de condiciones del proyecto deben indicarse las condiciones particulares de control para la recepción de los productos, incluyendo los ensayos necesarios para comprobar que los mismos reúnen las características exigidas en los apartados anteriores. Se comprobará que los productos recibidos, estableciendo en las condiciones del proyecto características que garanticen la no presencia de elementos radiactivos en concentraciones significativas, y acreditación documental al respecto.
 - corresponden a los especificados en el pliego de condiciones del proyecto;
 - disponen de la documentación exigida;
 - están caracterizados por las propiedades exigidas;
 - han sido ensayados, cuando así se establezca en el pliego de condiciones o lo determine el director de la ejecución de la obra con el visto bueno del director de obra, con la frecuencia establecida.
- En el control deben seguirse los criterios indicados en el artículo 7.2 de la Parte I del CTE.

Así, en obra nueva en zonas en las que el mapa determina riesgo alto, se establecen las siguientes medidas preventivas a tener en cuenta:

- Barreras de protección
- Cámara de aire ventilada
- Despresurización del terreno

Siendo la opción a prioritaria, y en zonas clasificadas de riesgo superior contar con una de las otras dos opciones añadidas a la primera.

En edificios ya construidos se indican estas opciones:

- Sellado del cerramiento que está en contacto con el terreno.
- Mejora de la ventilación de esas zonas inmediatas al terreno.

5. Bibliografía

1. Radón. CSN. <https://www.csn.es/radon>
2. Segura, B. D. Radón en los lugares de trabajo, ¿cómo abordarlo? *Seguridad y Salud en el trabajo* **2022**, n° 109, 17–23.
<http://www.cigsaudelaboral.org/files/documentos/INSST.%20Radon%20nos%20lugares%20de%20trabajo.%20Como%20abordalo.pdf>
3. L.S. Quindós, J. Soto, P.L. Fernández, E. Villar, G. Newton, J.J. Peña, M. Gálvez, J. Arteché. Radón, principal fuente de radiación natural. *Revista Española de Física* **1989**, 3 (22), 22–26. <http://elradon.com/wp-content/uploads/2018/10/38.pdf>
4. *General Information on Radon*. ICRPaedia. http://icrpaedia.org/General_Information_on_Radon.
5. Radó en els llocs de treball. Gencat Treball
https://treball.gencat.cat/ca/ambits/seguretat_i_salut_laboral/riscos_i_condicions_treball/mesures_per_risc/rado/
6. Quindós, L. S. *Radón. Un gas radiactivo de origen natural en su casa*; CSN, Servicio de Publicaciones Universidad de Cantabria. http://elradon.com/wp-content/uploads/2018/10/LibroRADON_low.pdf
7. Vázquez, B. F.; Adán, M. O. *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios*; 2018.
<https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protecci%C3%B3n+frente+a+la+inmisi%C3%B3n+de+gas+rad%C3%B3n+en+edificios>.
8. *Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo*; 2012.
[https://www.csn.es/documents/10182/896572/GS%2011-04%20Metodolog%C3%ADa%20para%20la%20evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20exposici%C3%B3n%20al%20rad%C3%B3n%20en%20los%20lugares%20de%20trabajo%20\(Diciembre%202012\)](https://www.csn.es/documents/10182/896572/GS%2011-04%20Metodolog%C3%ADa%20para%20la%20evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20exposici%C3%B3n%20al%20rad%C3%B3n%20en%20los%20lugares%20de%20trabajo%20(Diciembre%202012))
9. Tunyagi, A.; Dicu, T.; Cucos, A.; Burghel, B. D.; Lupulescu, A.; Moldovan, M.; Nită, D.; Papp, B.; Pap, I.; Szacsvai, K.; Tenter, A.; Beldean-Galea, M. S.; Anton, M.; Grecu, Ș.; Cioloca, L.; Milos, R.; Botos, M. L.; Chiorean, C. G.; Catalina, T.; Istrate, M. A.; Sainz, C. An Innovative System For Monitoring Radon And Indoor Air Quality. *Romanian Journal of Physics* **2020**, 65, 803. <http://elradon.com/wp-content/uploads/2021/03/RomJPhys.-Innovative-System-2020.pdf>
10. Preguntas frecuentes sobre radón en lugares de trabajo. CSN
<https://www.csn.es/documents/10182/989198/Preguntas%20frecuentes%20sobre%20el%20rad%C3%B3n%20en%20lugares%20de%20trabajo>
11. Jorquera, A. *Gas Radón: Qué es, dónde se encuentra y cómo protegernos*. BIMserver.center.
<https://blog.bimserver.center/es/gas-radon-que-es-donde-se-encuentra-y-como-protegernos/>
12. Bequerelio <https://es.wikipedia.org/wiki/Bequerelio>
13. Ruano-Ravina, A.; Barros-Dios, J. M. Radón interior. Un carcinógeno laboral olvidado. *Arch Prev Riesgos Labor* **2013**, 16 (1), 5-6. https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Ruano-Ravina/publication/237070307_Indoor_radon_A_neglected_carcinogen_at_work/links/5732143008ae9f741b23533f/Indoor-radon-A-neglected-carcinogen-at-work.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail
14. Ríos, M. P.; Talavera, M. G.; Gómez, M. G.; Muñoz, S. G.; Rey-Brandariz, J.; Dios, J. M. B.; Raviña, A. R. *Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España*; 2021.
https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/04_Mortalidad_radon.pdf
15. Ruano-Ravina, A.; Narocki, C.; López-Jacob, M. J.; Oliver, A. G.; de la Cruz Calle Tierno, M.; Peón-González, J.; Barros-Dios, J. M. Radón interior en puestos de trabajo en España. Un estudio piloto antes de la introducción de la Directiva Europea 2013/59/Euratom. *Gaceta Sanitaria* **2020**, 33 (6), 563-567.
<https://www.scielosp.org/article/gs/2019.v33n6/563-567/en/>
16. De la Torre Pérez A. B.; Ruano Sánchez F. L.; Naranjo Correa A.; Martín Sánchez, J. Radon in workplaces in Extremadura (Spain). *Journal of Environmental Radioactivity* **2012**, 107, 86-91. Martín, C. C.; Rey, R. D.; Gil, L.

- G. Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo: determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la ENM; Universidad de Vigo, Pontevedra, España, 2021.
17. Sainz, C.; Quindós, L. S.; Fuente, I.; Nicolás, J.; Quindós, L. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: the case of tourist caves. *Journal of hazard* 2007, 145 (3), 368-371
 18. De La Nuez Hernández, N. Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, 2021.
<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/25021/Determinacion%20y%20dinamica%20de%20los%20niveles%20de%20exposicion%20al%20radon%20en%20Tenerife.pdf?sequence=1>
 19. Gutiérrez, L. E. H.; Cerezal, J. C. S.; Villanueva, J. L. G. *Gas radón y salud laboral en Canarias*; INGENIA, Grupo de investigación de la Universidad de La Laguna, Ed.; Universidad de la Laguna, 2019.
<https://doi.org/10.25145/b.Gasradon.2020>.
 20. Clarke (Chairman), R. H.; Dunster, H. J.; Jacobi, W.; Osborne, R. V. Protection against Radon-222 at Home and at Work. *International Commission on Radiological Protection* 1993, 65.
https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_2
 21. Aicardi-Carrillo, G.; Asmat-Inostrosa, M.; Barboza-Rangel, Y. Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio. *Med Segur Trab* 2015, 61 (238), 86-98.
<https://scielo.isciii.es/pdf/mesetra/v61n238/revision1.pdf>
 - a. Walsh L, Tschense A, Schnelzer M, Dufey F, Grosche B, Kreuzer M. The influence of radon exposures on lung cancer mortality in German uranium miners, 1946-2003. *Radiat Res.* 2010 Jan;173(1):79-90.
 - b. Hunter N, Muirhead CR, Tomasek L, Kreuzer M, Laurier D, Leuraud K, et al. Joint analysis of three European nested case-control studies of lung cancer among radon exposed miners: exposure restricted to below 300 WLM. *Health Phys.* 2013 Mar;104(3):282-92.
 - c. Rachel S. D. Lane, Stanley E. Frost, Geoffrey R. Howe, and Lydia B. Zablotska. Mortality (1950-1999) and Cancer Incidence (1969-1999) in the Cohort of Eldorado Uranium Workers. *Radiat Res* 1746a773-785 2010.
 - d. Kreuzer M, Grosche B, Schnelzer M, Tschense A, Dufey F, Walsh L. Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946-2003. *Radiat Environ Biophys.* 2010 May;49(2):177-85.
 - e. Vacquier B, Caer S, Rogel A, Feurprier M, Tirmarche M, Luccioni C, et al. Mortality risk in the French cohort of uranium miners: Extended follow-up 1946-1999. *Occup Environ Med.* 2008; 65(9):597-604.
 - f. Kulich M, Reřicha V, Reřicha R, Shore DL, Sandler DP. Incidence of non-lung solid cancers in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Res.* 2011 Apr;111(3):400-5.
 - g. Zablotska LB, Lane RSD, Frost SE, Thompson PA. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma mortality (1950-1999) and incidence (1969-1999) in the Eldorado uranium workers cohort. *Environ Res.* 2014 Apr;130:43-50.
 - h. Kreuzer M, Walsh L, Schnelzer M, Tschense A, Grosche B. Radon and risk of extrapulmonary cancers: results of the German uranium miners' cohort study, 1960-2003. *Br J Cancer.* 2008 Dec 2;99(11):1946-53.
 22. <https://www.boe.es/boe/dias/2022/12/21/pdfs/BOE-A-2022-21682.pdf>
 23. Santamarta, J.C., et al. (2020). Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias. Tenerife: Gobierno de Canarias y Universidad de La Laguna, doi: <https://doi.org/10.25145/b.GuiahidraulicasCanarias.2020>
 24. Poncela, L. S. Q.; Fernández, C. S.; Merino, I. F.; Villar, A. F.; González, S. C.; Gómez, D. R.; López, L. Q.; López, E. F.; Abascal, D. L.; López, J. Q.; Sánchez, M. G. *Cuestiones que Delegados/as de Prevención han de conocer sobre el gas Radón*; de Salud Laboral y Medio Ambiente UGT-CEC, S., Ed.; 2019.
<http://elradon.com/wp-content/uploads/2020/10/2019-Cuestiones-que-Delegados-as-de-Prevenci%C3%B3n-han-de-conocer-sobre-el-gas-Rad%C3%B3n.pdf>.

Otros enlaces de interés

<https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/398413-Mediciones-exposicion-riesgo-gas-radon-tuneles-carreteros-ejecucion-Islas-Canarias.html>

[https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/319292-Mediciones-exposicion-riesgo-gas-radon-tuneles-galerias-\(minas\)-agua-cuevas-turisticas.html](https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/319292-Mediciones-exposicion-riesgo-gas-radon-tuneles-galerias-(minas)-agua-cuevas-turisticas.html)

<http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/handle/123456789/353/Garc%c3%ada%20Denia%2c%20%c3%81lvaro%20%20Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<https://www.scielo.org/pdf/gs/2019.v33n6/563-567/en>

Jones, B.A. The social costs of uranium mining in the US Colorado Plateau cohort, 1960–2005. *Int J Public Health* 62, 471–478 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00038-017-0943-z>

Radiation Protection Dosimetry, Volume 177, Issue 4, December 2017, Pages 466–474, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx065>

Radiation Protection Dosimetry, Volume 130, Issue 1, June 2008, Pages 101–106, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn119>

Well water radioactivity and risk of cancers of the urinary organs, *Environmental Research*, Volume 102, Issue 3, 2006, Pages 333–338, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.12.010>.

L Tomášek, E Kunz, S.C Darby, A.J Swerdlow, V Placek, Radon exposure and cancers other than lung cancer among uranium miners in West Bohemia, *The Lancet*, Volume 341, Issue 8850, 1993, Pages 919–923, ISSN 0140-6736, [https://doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)91212-5](https://doi.org/10.1016/0140-6736(93)91212-5).

Vacquier B, Caer S, Rogel A, *et al* Mortality risk in the French cohort of uranium miners: extended follow-up 1946–1999 *Occupational and Environmental Medicine* 2008;**65**:597–604. <http://dx.doi.org/10.1136/oem.2007.034959>

<https://www.nature.com/articles/6604776>

<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2065>

Health Protection Agency. Radon in the Workplace [citado 14 nov 2012]. 10.12961/apr.2013.16.1.01

<https://www.asn.fr/l-asn-informe/dossiers-pedagogiques/le-radon-et-les-professionnels/guides-sur-la-gestion-du-risque-du-radon/guide-de-recommandations-pour-la-protection-des-batiments-neufs-et-existants-vis-a-vis-du-radon>



