

# Revisión de evidencia y buenas prácticas sobre vigilancia sanitaria específica en personas expuestas a radón ocupacional





# Revisión de evidencia y buenas prácticas sobre vigilancia sanitaria específica en personas expuestas a radón ocupacional



Edita y distribuye:

© MINISTERIO DE SANIDAD  
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA  
CENTRO DE PUBLICACIONES  
PASEO DEL PRADO, 18 - 28014 Madrid

NIPO en línea: 133-24-110-3

Imprime: Gráficas Naciones, S.L.  
C/Guadiana, 8  
28110 ALGETE (Madrid)

<https://cpage.mpr.gob.es/>

# Revisión de evidencia y buenas prácticas sobre vigilancia sanitaria específica en personas expuestas a radón ocupacional



## Autores

**Lucía Martín-Gisbert.** Área de Medicina Preventiva y Salud Pública. CRETUS. Universidad de Santiago de Compostela (USC).

**Alberto Ruano Raviña.** Área de Medicina Preventiva y Salud Pública. CRETUS. Universidad de Santiago de Compostela (USC). CIBER de Epidemiología y Salud Pública (CIBERESP). Instituto de Investigación Sanitaria de Santiago de Compostela (IDIS).

**Marta García-Talavera San Miguel.** Subdirección de Protección Radiológica Ambiental. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

**Leonor Varela Lema.** Área de Medicina Preventiva y Salud Pública. Universidad de Santiago de Compostela (USC). CIBER de Epidemiología y Salud Pública (CIBERESP). Instituto de Investigación Sanitaria de Santiago de Compostela (IDIS).

**Fernando Sierra Díaz.** Servicio de Dosimetría y Radioprotección. Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR).

**Cristina Martínez González.** Área de Enfermedades Respiratorias Ocupacionales y Medioambientales. Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica (SEPAR).

**Mariano Provencio Pulla.** Servicio de Oncología Médica del Hospital Puerta de Hierro de Madrid. Grupo español de Cáncer de Pulmón (GECP).

**Montserrat García Gómez.** Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral. Dirección General de Salud Pública y Equidad en Salud. Ministerio de Sanidad.

# Índice

<b>1. Antecedentes</b>	9
1.1. Origen del gas radón	9
1.2. Efectos de la exposición a gas radón sobre la salud	11
1.2.1. Estudios sobre radón y cáncer de pulmón	12
1.2.2. Interacción entre radón, tabaco y riesgo de cáncer de pulmón	16
1.2.3. Exposición a radón y otras patologías	17
1.3. Distribución de radón en España	18
1.3.1. Mapas de potencial de radón	18
1.3.2. Radón en el ámbito laboral	20
1.4. Marco regulatorio de la exposición a radón ocupacional en España	23
1.4.1. Evaluación de dosis	26
1.5. Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica: Radiaciones Ionizantes	27
1.6. Cáncer de pulmón: prevención primaria y detección precoz	28
<b>2. Justificación y Alcance</b>	31
<b>3. Objetivos</b>	33
3.1. Objetivo principal	33
3.2. Objetivos secundarios	33
<b>4. Marco conceptual</b>	35
4.1. Persona trabajadora expuesta	35
4.2. Concentración de radón	35
4.3. Exposiciones a factores de riesgo que se deben considerar	35
<b>5. Metodología</b>	37
5.1. Revisión sistemática de evidencia científica	37
5.2. Revisión de material institucional	39
5.3. Consulta a expertos con responsabilidad institucional	40
<b>6. Resultados</b>	43
6.1. Revisión sistemática de evidencia científica	43
6.2. Revisión de material institucional	44
6.3. Consulta a expertos con responsabilidad institucional	44
6.3.1. Características generales de la respuesta a la consulta	44
6.3.2. Descripción y análisis del contenido de las respuestas a la consulta	44

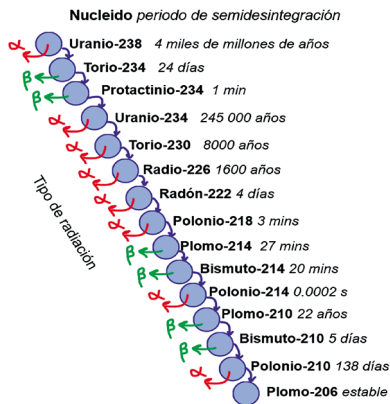
<b>7. Discusión</b>	47
7.1. Falta de evidencia científica	47
7.2. Falta de buenas prácticas	48
7.3. Balance de riesgos	48
7.4. Recomendaciones	50
<b>8. Conclusiones y propuestas finales</b>	55
<b>9. Referencias</b>	57

# 1. Antecedentes

## 1.1. Origen del gas radón

El gas radón es un gas radioactivo incoloro, inodoro e insípido, que procede de la cadena de desintegración radioactiva del Uranio 238 y, por tanto, es ubicuo en la naturaleza (1). Uno de los elementos de esta cadena es el Radio 226, que tiene un período de semidesintegración de 1.600 años y se transforma en Radón 222. Debido a que tiene un período de semidesintegración de 3,8 días, el Radón 222 no supone, en sí mismo, un peligro para la salud. Prácticamente la totalidad del Radón 222 que se inhala se exhala de la misma manera. Sin embargo, hay varios elementos de la cadena de desintegración que derivan del Radón 222 que tienen una vida media mucho más corta (ver figura 1). De éstos, por sus efectos para la salud, los más relevantes son el Polonio 218 (vida media de 3,05 minutos) y el Polonio 214 (vida media de 0,16 milisegundos), por ser emisores de partículas alfa. Estos elementos se adhieren con facilidad a materia en suspensión, que cuando son inhaladas se depositan en el árbol bronquial y la radiación alfa emitida somete a un bombardeo radioactivo constante a las células del epitelio pulmonar. Debemos destacar que la radiación alfa, si bien es muy poco penetrante (no es capaz de atravesar la piel), es muy energética, liberando mucha energía ionizante en un espacio de unos pocos micrómetros. Su alta transferencia lineal de energía (LET) determina que posea una eficiencia biológica relativa alta en los organismos vivos, es decir, que el efecto de la radiación alfa es potencialmente mayor que el de otros tipos de radiación de menor LET.

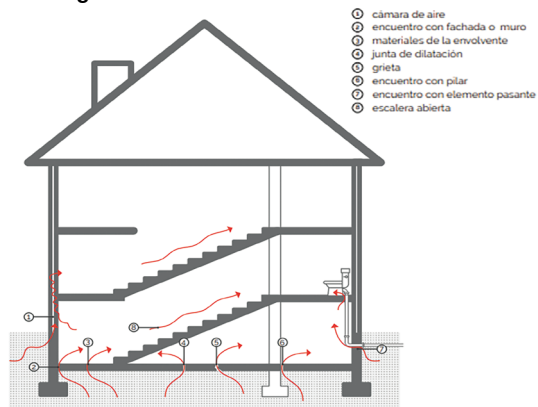
**Figura 1. Serie radiactiva del Uranio 238, donde se sitúa el radón 222 y sus descendientes de vida media corta.**



Fuente: Elaboración propia

El gas radón, procedente del Radio 226 que contiene la corteza terrestre, el suelo y otros materiales naturales, penetra en los edificios desde el subsuelo. Las vías de entrada más frecuentes son grietas y fisuras en los cimientos del edificio o en las paredes (2), pero, también, en ocasiones a través de las conducciones sanitarias o de servicios. El radón migra a través de las grietas por advección, debido a la diferencia de presiones entre el interior de la vivienda y el subsuelo. En la figura 2 se presenta un esquema con las vías de entrada del radón en un edificio. En los edificios con sótano es más fácil la entrada de radón ya que éste puede entrar por difusión no sólo desde el suelo, sino a través de las paredes.

**Figura 2. Vías de entrada de gas radón en un edificio**



Fuente: Extracto de la Guía de rehabilitación frente al radón (2)

Otras vías de penetración menos importantes son los materiales de construcción (con una contribución variable) o incluso el agua corriente, ya que el radón es muy soluble en agua (3). En cuanto al material de construcción, no llega a suponer más del 10-20% de la concentración total de radón en un edificio (4).

En ocasiones puede haber construcciones que tengan una elevada concentración de radón en aire debido a su antigüedad, por tener un peor aislamiento del subsuelo (incluso inexistente en algunos casos) y ventanas escasas y pequeñas, impidiendo una ventilación adecuada. Todos estos factores actúan de forma conjunta aumentando la probabilidad de tener concentraciones elevadas de radón en edificios antiguos (5). Existen también estudios recientes en el ámbito laboral (en Galicia) que señalan la especial relevancia que pueden tener edificios históricos como centros de trabajo que pueden alcanzar elevadas concentraciones de radón (6).

Sin embargo, la principal variable que influye en la concentración de radón interior es el sustrato geológico sobre el que se asienta el edificio y, concretamente, el contenido en Uranio 238. Esto determina el potencial geológico de radón, que es el principal predictor de la concentración de radón en espacios interiores en todo el mundo (7).

## 1.2. Efectos de la exposición a gas radón sobre la salud

El gas radón está asociado causalmente con el cáncer de pulmón, como avala una amplia evidencia científica. Los primeros estudios de cohortes fueron realizados en mineros en los años 70 del siglo pasado (8), aunque no fue hasta 2005 cuando se publicaron los grandes estudios colaborativos de casos y controles en población general (9,10); los estudios más recientes investigan los posibles mecanismos moleculares subyacentes (11).

El radón se considera la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco (1). En distintos países se ha cuantificado la mortalidad atribuida a la exposición a radón en el hogar, con resultados que indican que entre un 3 y un 25% de la mortalidad por cáncer de pulmón puede atribuirse a la exposición a radón (12). En España, se estima que el 4% de las muertes por cáncer de pulmón se deben a la exposición excesiva a radón. No obstante, existen amplias diferencias entre CC. AA., siendo Galicia la más afectada con un 7% de la mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a la exposición a radón (13).

## 1.2.1. Estudios sobre radón y cáncer de pulmón

### Estudios en mineros

Los primeros estudios realizados para valorar la asociación entre exposición a radón y riesgo de cáncer de pulmón se realizaron en mineros de diferentes materiales en diversos países. Muchos de estos estudios fueron publicados en la década de 1970-1980 del siglo pasado, aunque el seguimiento de muchos de los participantes continuó posteriormente, permitiendo añadir años de seguimiento. La mayoría de estas investigaciones encontró una asociación estadísticamente significativa entre la exposición a radón y el riesgo de cáncer de pulmón, pero no para otros tumores (14-17). Sin embargo, estas investigaciones presentan numerosas limitaciones-En primer lugar, se incluyen varones exclusivamente. En segundo lugar, la edad a la que finaliza el seguimiento de estos mineros suele ser una edad temprana, ya que los mineros se jubilaban o retiraban de la minería mucho más precozmente que en otras ocupaciones. Por otra parte, las condiciones de trabajo en las minas han mejorado mucho, con sistemas protectores y de ventilación forzada, haciendo que la exposición pueda no ser comparable en el tiempo incluso para una misma instalación minera. Otra dificultad adicional es la falta de ajuste del consumo de tabaco en muchos de estos estudios, al no haberse recogido información sobre este hábito o, en caso de hacerlo, hacerlo de forma deficiente. Solo algunas de las cohortes de mineros más recientes ajustan por consumo de tabaco, con un tamaño muestral limitado. Finalmente, y esta es una limitación relevante, muchas sustancias a las que están expuestos los mineros en entornos subterráneos son también carcinogénicas, lo que hace difícil la atribución de un determinado efecto. Éste es el caso de la exposición a polvo de sílice, a radiación gamma procedente del Uranio (en caso de la minería de uranio) y también todo tipo de exposiciones a polvos o rocas pulverizadas en el interior de las minas.

Estos estudios han servido de base para la modelización de la exposición a radón frente al cáncer de pulmón en el informe de la “*National Academy of Sciences*” de Estados Unidos denominado BEIR VI (Biological Effects of Ionizing Radiation) (8). Este informe concluyó, a la luz de los resultados observados en mineros, que existía una relación dosis-respuesta sin umbral mínimo entre la exposición a radón y el riesgo de cáncer de pulmón. Esto implicaba que también niveles relativamente bajos de radón aumentaban el riesgo de cáncer de pulmón.

Debido a la evidencia científica en mineros, el radón fue declarado carcinógeno humano en 1987 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) en 1988 (18,19). Por tanto, el radón ya lleva 35 años siendo reconocido como carcinógeno humano.

## Estudios internacionales en población general

Durante la década de los años 1990 y 2000 del siglo pasado se publicaron numerosos estudios en población general que investigaron la relación de la exposición a radón en las viviendas con el riesgo de cáncer de pulmón. Sin embargo, muchas de estas investigaciones tenían un bajo tamaño muestral o una metodología heterogénea. Eran estudios de casos y controles, en donde se colocaba un detector de radón en las viviendas de sujetos con cáncer pulmonar y un detector en sujetos sin cáncer de pulmón (controles), comparándose la concentración de radón entre ambos grupos. Estos estudios se realizaron en diversos países como Estados Unidos, Canadá, China, Alemania, Finlandia, Suecia, España y la mayoría de ellos observaron una asociación estadísticamente significativa con la exposición a radón (20-24).

Entre 2005 y 2006 se publicaron los resultados de dos estudios “*pooling*”, englobando estudios norteamericanos y europeos respectivamente (9,10,25). Cabe aquí destacar la enorme relevancia de un diseño de estudio “*pooling*” que, a diferencia de un meta-análisis, implica la fusión en un mismo estudio de todos los datos individuales de los participantes en los diferentes estudios que aglutina y por tanto los analiza conjuntamente. Además de la ventaja evidente de aumentar el tamaño muestral, se pueden realizar ajustes por otras covariables como el sexo, edad o, de forma muy destacada, el consumo de tabaco, que facilita realizar un análisis por subgrupos (nunca fumadores, exfumadores y fumadores).

El *pooling* europeo (9,25) es el de mayor tamaño muestral, con aproximadamente 7.000 casos de cáncer de pulmón y otros 14.000 controles procedentes de 13 estudios de casos y controles realizados en diversos países europeos, entre ellos un estudio español realizado en Galicia (21). Este estudio observó una clara relación dosis respuesta entre la exposición a radón residencial y el riesgo de cáncer de pulmón, de forma que por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> que aumenta la concentración de radón, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta en un 16%, de forma lineal y estadísticamente significativa. En la actualidad éste es el estudio más citado sobre radón y cáncer de pulmón, con más de 1.000 citas procedentes de artículos científicos.

El estudio “*pooling*” norteamericano (10), con un total de 7.000 participantes entre casos y controles, obtuvo resultados similares: una asociación lineal y estadísticamente significativa entre la exposición a radón y el cáncer de pulmón, por la que el riesgo aumenta un 11% por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> con la exposición a radón residencial.

Los resultados del estudio “*pooling*” europeo llevaron a la Organización Mundial de la Salud (OMS) a iniciar el

“*International Radon Project*”. El objetivo de este proyecto era desarrollar un manual sobre el radón, centrándose en sus efectos sobre la salud, cómo prevenirlo, medirlo y cómo comunicar el riesgo a la población a través también de la implicación de las administraciones públicas. Este manual se publicó en el año 2009 (1). Es de acceso online gratuito y dispone de una versión en castellano. Se estructura en diferentes capítulos dedicados al efecto del radón sobre la salud, comunicación de riesgos, remediación y medición de radón entre otros. Su principal implicación es el establecimiento de un nivel de acción o nivel de referencia, se trata de un nivel de concentración de radón en el hogar o lugar de trabajo, a partir del cual deben tomarse acciones de mitigación. El nivel de acción recomendado por la OMS es de 100 Bq/m<sup>3</sup> cuando sea posible, pero en cualquier caso nunca por encima de los 300 Bq/m<sup>3</sup>. En estas recomendaciones se basa la Directiva Europea (26) que insta a los países miembros a establecer niveles de referencia que no superen los 300 Bq/m<sup>3</sup>.

## Estudios en España

España es el país europeo que probablemente ha acumulado más evidencia científica sobre el efecto del radón sobre la salud (27). Se han realizado numerosos estudios sobre radón y cáncer de pulmón, muchos de ellos multicéntricos e incluyendo diferentes tipos de sujetos (fumadores o nunca fumadores) y diferentes tipos histológicos (como cáncer microcítico).

El primer estudio de casos y controles sobre radón y cáncer de pulmón en España se realizó entre 1992 y 1994 en el área sanitaria de Santiago de Compostela y reclutó 163 casos y 241 controles seleccionados aleatoriamente de entre la población general. Los resultados de este estudio indicaron que el radón podría producir cáncer de pulmón a concentraciones inferiores a las consideradas de riesgo (se observó un riesgo estadísticamente significativo a partir de los 37 Bq/m<sup>3</sup>) y además se observó una importante interacción entre la exposición a radón y el consumo de tabaco (21). Los sujetos fumadores expuestos a radón multiplicaban su riesgo de cáncer de pulmón frente a fumadores no expuestos a gas radón.

De este estudio se derivó uno de los escasísimos estudios de cohortes sobre radón y cáncer de pulmón, cuando se decidió analizar qué había ocurrido con los controles a los que se había medido radón entre 1992 y 1994 en el año 2007. Así, se pudo seguir a estos participantes durante 12 años de seguimiento postmedición por término medio, a lo que hay que añadir un tiempo de residencia mediano en la vivienda de unos 20 años. Se observó que se habían diagnosticado 25 tumores diferentes al cáncer de pulmón y 5 cánceres pulmonares. Los sujetos con un tumor diferente al cáncer de pulmón presentaban unos 50 Bq/m<sup>3</sup> mientras que los casos de cáncer de pulmón tenían por término medio 225 Bq/m<sup>3</sup> (28).

Hay que destacar que los estudios realizados en España y, concretamente en Galicia, presentan dos grandes ventajas. La primera, ya comentada, es que los sujetos residen durante un buen número de años en la misma vivienda, con muchos menos cambios de residencia que en el ámbito anglosajón. Esto facilita la atribución del efecto a la exposición a radón, ya que la concentración no suele cambiar mucho dentro de una misma vivienda a lo largo del tiempo. La segunda gran ventaja es que Galicia es una de las regiones europeas que presentan una concentración de radón más elevada, lo que facilita la obtención de un efecto y la modelización de un modelo dosis respuesta, ya que va a haber sujetos expuestos y sujetos muy expuestos.

Entre el año 2004 y 2008 se realizó un segundo estudio de casos y controles sobre la exposición a radón y cáncer de pulmón, en este caso incluyendo las áreas sanitarias de Santiago de Compostela y de Ourense. El estudio incluyó 450 casos y 550 controles (29). Los resultados corroboraron los del estudio anterior, pero con una muestra mucho mayor, observándose un efecto estadísticamente significativo a partir de los 50 Bq/m<sup>3</sup> y una interacción submultiplicativa entre radón y tabaco en cuanto al riesgo de cáncer de pulmón.

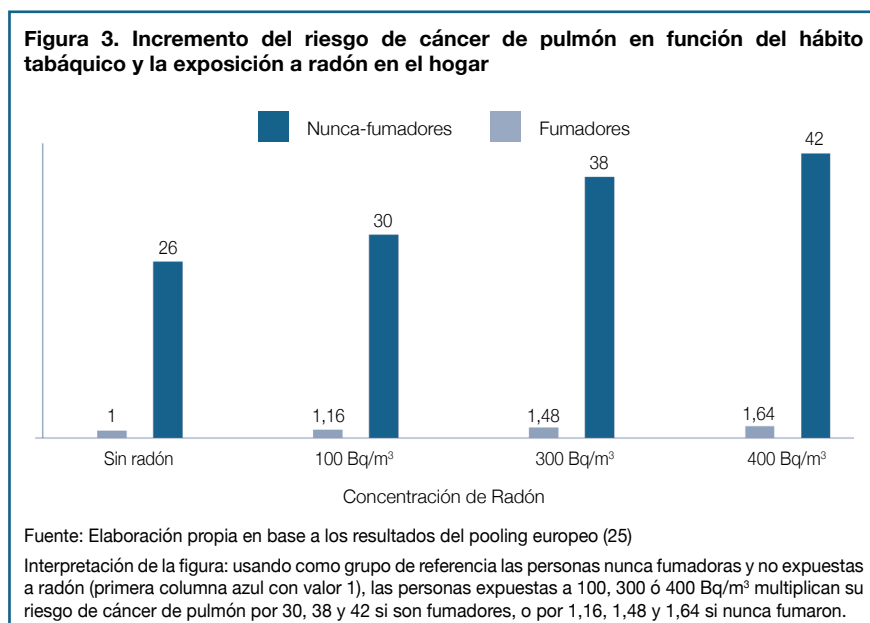
En el año 2010 se financió otro estudio dirigido exclusivamente a sujetos nunca fumadores. Para ello se diseñó un estudio de casos y controles multicéntrico en el que participaron 11 hospitales de 4 CC. AA. españolas (30). Los resultados indicaron que existe un efecto estadísticamente significativo a partir de los 200 Bq/m<sup>3</sup>, siendo ligeramente superior en hombres que en mujeres. Al analizar el radón como variable continua, los resultados indicaron que esta asociación es lineal (31).

En el año 2015 se inició un nuevo estudio dirigido específicamente al cáncer microcítico con un diseño multicéntrico, y de nuevo se observó un efecto estadísticamente significativo (32).

Finalmente, en el año 2020 se realizó un estudio pooling con todos los estudios de cáncer de pulmón realizados, incluyendo más de 3.700 participantes, la mitad casos y la mitad controles. Este es uno de los estudios europeos de mayor tamaño muestral (después del pooling europeo mencionado anteriormente) y se observa una asociación estadísticamente significativa a partir de los 100 Bq/m<sup>3</sup> y además la interacción con el consumo de tabaco (33). Todos los hallazgos anteriores indican que el radón es un factor de riesgo de cáncer de pulmón en España, tanto para fumadores como para nunca fumadores, y para todos los tipos histológicos de esta enfermedad.

## 1.2.2. Interacción entre radón, tabaco y riesgo de cáncer de pulmón

Se debe considerar que hay un porcentaje elevado de personas fumadoras y exfumadoras que pueden estar expuestas a radón, tanto en el ámbito de la población general como en el ámbito laboral. Por ello es importante reflexionar acerca de la posible asociación o interacción entre el consumo de tabaco y radón en el riesgo de cáncer de pulmón. Múltiples estudios indican que el riesgo de cáncer de pulmón en sujetos fumadores aumenta de forma importante cuando éstos están expuestos a radón. Este riesgo puede ser sinérgico según la evidencia existente (34). En la figura 3, con resultados del pooling europeo, se muestra cómo el riesgo de cáncer de pulmón se multiplica por 42 en fumadores expuestos a 400 Bq/m<sup>3</sup>. Esta información tiene implicaciones en la comunicación de riesgos y en los mensajes de salud pública que se deben transmitir a los ciudadanos y a los trabajadores expuestos a radón en el ámbito laboral. En este caso, la primera recomendación a un fumador expuesto a concentraciones altas de radón es que deje de fumar, pues va a reducir el riesgo de cáncer de pulmón de forma significativa. No hay estudios que indiquen que exista interacción entre la concentración de radón y la exposición al humo ambiental de tabaco, aunque desde un punto de vista de plausibilidad biológica y de analogía esta interacción también podría existir. El humo ambiental de tabaco también ha sido declarado carcinógeno humano (35).



La interacción entre exposición a radón en el ámbito laboral y el consumo de tabaco de los trabajadores es especialmente relevante, ya que el riesgo de cáncer de pulmón de estos trabajadores puede ser elevado, incluso por debajo de las concentraciones consideradas de riesgo. Por ello, puede tener implicaciones en la elaboración de recomendaciones para el seguimiento de los trabajadores expuestos, como se comentará más adelante.

### 1.2.3. Exposición a radón y otras patologías

En la actualidad no se puede afirmar que el radón produzca otras enfermedades diferentes al cáncer de pulmón, tal y como reconocen la Agencia de Protección Ambiental Norteamericana y la OMS. No obstante, existen múltiples estudios realizados sobre la influencia del radón en otros tumores diferentes al cáncer pulmonar y también sobre otras patologías.

En cuanto a la relación entre radón y otros tumores, los resultados existentes son discrepantes. Hay estudios con un diseño ecológico realizados en Galicia que sugieren que puede haber asociación con mortalidad por tumores cerebrales, mortalidad por cáncer de esófago en varones y también con mortalidad por cáncer de estómago. No obstante, el diseño epidemiológico de estas investigaciones hace que los resultados no se puedan calificar como concluyentes (36-40).

Existen otras investigaciones que sugieren que el radón podría estar implicado en el desarrollo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) en personas nunca fumadoras y modificar el efecto del consumo de tabaco en personas fumadoras (41). Se ha observado una asociación entre exposición a radón y mortalidad por EPOC en el estudio Cancer Prevention Study II (42). En la actualidad, un estudio español multicéntrico de casos y controles financiado por el Instituto de Salud Carlos III está analizando si la exposición a radón puede ser factor de riesgo de la EPOC en sujetos nunca fumadores. Los resultados preliminares indican que esta asociación podría existir si los sujetos permanecen más de 40 años en la misma vivienda (resultados enviados para publicación).

Otros estudios han indicado sugerencias de asociación con asma o con enfermedad de Alzheimer (43,44). Debe destacarse que muchas de estas investigaciones tienen una validez limitada ya que la mayoría de ellas no han colocado detectores de radón residencial en los domicilios de los participantes.

## 1.3. Distribución de radón en España

### 1.3.1. Mapas de potencial de radón

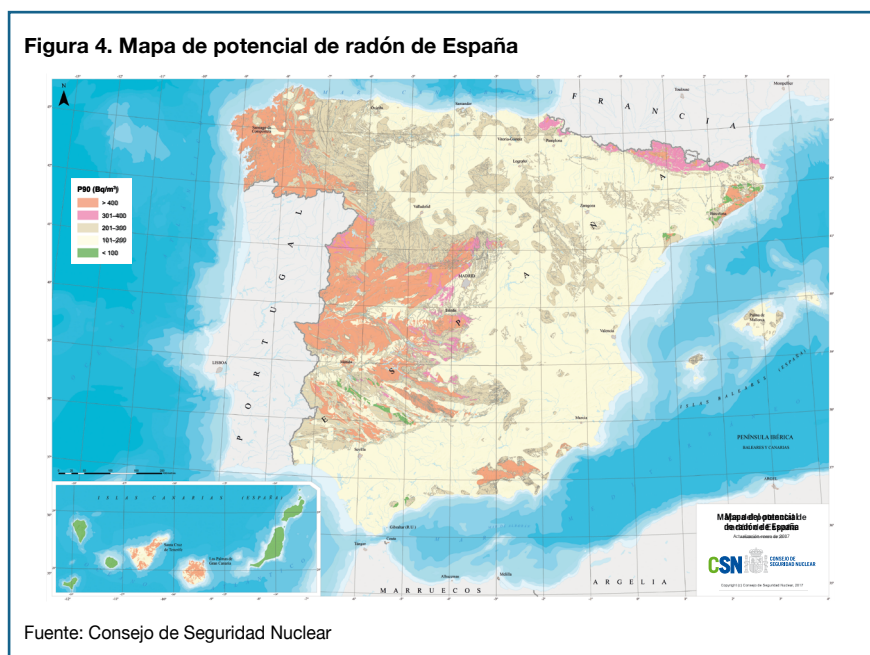
Muchos países disponen de mapas de radón residencial en donde se representa la concentración de radón en viviendas por agrupación geográfica (municipio e incluso códigos postales). Estos mapas sirven de orientación para la población y para las administraciones públicas y pueden ayudar a la toma de decisiones contextualizadas de promoción y prevención. Pueden también ser útiles para políticas relacionadas con el radón en el ámbito laboral. A través de la observación de los mapas de radón de diferentes países europeos puede comprobarse que, en general, la distribución de radón es muy heterogénea dentro de un mismo país, existiendo zonas donde la concentración de radón es elevada y otras donde dicha concentración es baja (45). En Europa, las zonas con alto potencial de radón están generalmente asociadas a la orogenia hercínica. Para ayudar a la clasificación adecuada de la concentración de radón se crean las denominadas “*radon-prone areas*”, definidas como áreas propensas a radón por su geología y habitualmente definidas como aquellas en las que más de un 10% de las viviendas tienen concentraciones superiores a los 300 Bq/m<sup>3</sup>. No obstante, esa definición puede variar de un país a otro.

En España, las zonas que presentan mayor exhalación de radón son Galicia, zona occidental de Castilla y León (Arribes del Duero), Sierras de Gredos y Guadarrama, Norte de Extremadura y Noroeste de la Comunidad de Madrid. Galicia es la zona que presenta mayores concentraciones de radón y la zona de España donde se han realizado más mediciones de radón residencial (46).

El mapa de potencial de radón de España integra 12.000 mediciones de radón en viviendas, junto con información geológica y de radiación gamma ambiental, y muestra de forma clara la concentración de radón por comunidades autónomas. Los datos del Consejo de Seguridad Nuclear, que es la autoridad en protección radiológica en España indican que, en Galicia, el 70% del territorio está afectado por concentraciones elevadas de radón (46). A continuación, se situaría Extremadura con un 47% y posteriormente la Comunidad de Madrid, con un 29%. Galicia tiene su propio Mapa de Radón residencial, iniciado por la Universidad de Santiago de Compostela (Laboratorio de Radón de Galicia, consulta en [www.radon.gal](http://www.radon.gal)) en el año 2001. En la actualidad, no hay otra comunidad autónoma que disponga de un Mapa de Radón propio. El Mapa de Radón de Galicia incluye 6.080 mediciones de radón, lo que sitúa a esta CC. AA. con mucha mayor resolución que la existente en el territorio nacional.

En el Mapa de Radón de Galicia se observa que el 20% de las viviendas de las provincias de Ourense y Pontevedra superan los 300 Bq/m<sup>3</sup>. En la actualidad, todos los municipios de Galicia tienen al menos dos mediciones de radón residencial. El municipio de Vigo tiene más de 600 mediciones de radón y es el municipio español que tiene un mayor número de mediciones. Se ha seguido avanzando en este campo, para lograr tener mediciones (al menos dos) en cada sección censal, y en la actualidad la provincia de Ourense tiene todos sus municipios con las suficientes mediciones por sección censal, alcanzando una resolución todavía mayor. Aunque pueda parecer que hay mucho realizado en este tema, es poco si se comparan con las más de 600.000 mediciones de radón que se han realizado en el Reino Unido. En las siguientes figuras se pueden ver los mapas de radón de España y Galicia, respectivamente, junto con prototipos de mapas por cuadrículas de 5 km<sup>2</sup> (para Galicia). Estos mapas pueden tener un importante valor para conocer la distribución de radón ocupacional.

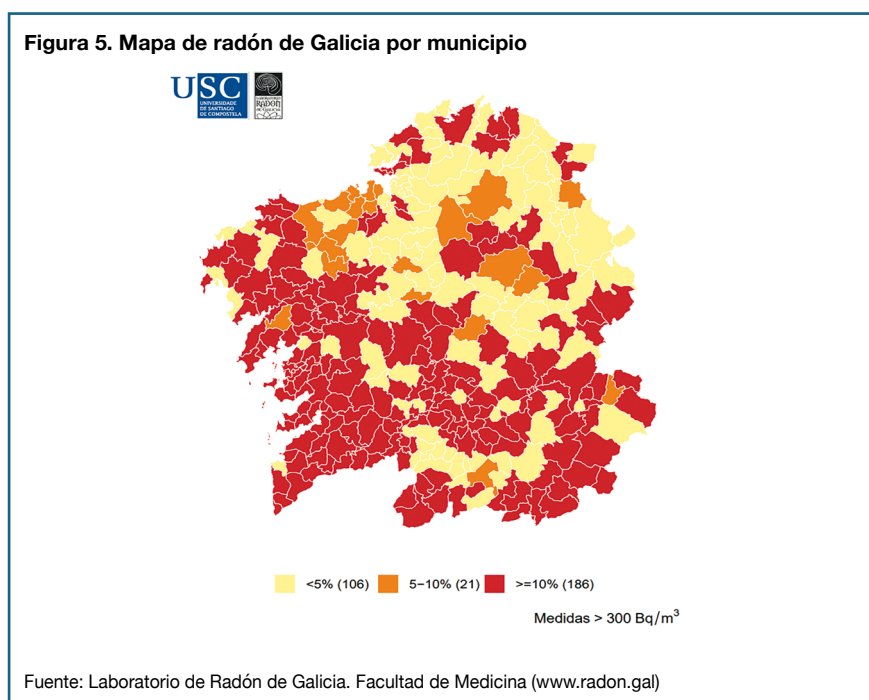
**Figura 4. Mapa de potencial de radón de España**



Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear

En la figura anterior se puede ver que hay una distribución de radón claramente asociada a zonas graníticas. No obstante, existen zonas con elevadas concentraciones de radón en prácticamente todas las comunidades autónomas.

A continuación, aparece el Mapa de Radón de Galicia, donde se puede observar que la concentración de radón residencial es superior en las provincias de Pontevedra y Ourense. En estas dos provincias, aproximadamente el 20% de todas las mediciones superan los 300 Bq/m<sup>3</sup>. Hay zonas de las provincias de A Coruña y de Lugo que presentan también concentraciones elevadas de radón. De hecho, 170 municipios gallegos, más de la mitad de los municipios, presentan el 10% de las viviendas con concentraciones que superan los 300 Bq/m<sup>3</sup>.

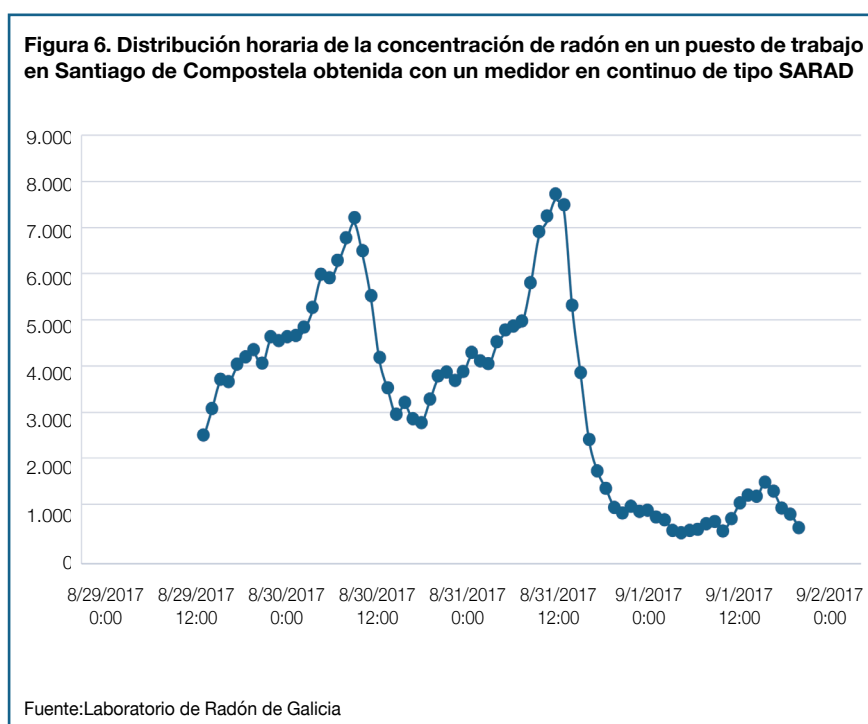


### 1.3.2. Radón en el ámbito laboral

Existen diversos estudios realizados a nivel internacional, pero también en España, sobre radón en el ámbito laboral. En las zonas con alto potencial de radón de España, se ha observado en un estudio reciente que el 20% de los lugares de trabajo medidos tienen niveles excesivos de radón (por encima de 300 Bq/m<sup>3</sup>)(47). Muchas comunidades autónomas tienen pequeñas zonas con alto potencial de radón donde también se localizan puestos de trabajo. No existen estimaciones del volumen de trabajadores que podrían

estar expuestos a concentraciones elevadas de radón en el entorno laboral. Otros estudios previos indican que la antigüedad de los edificios (48) y su material de construcción (49) influyen en los niveles de radón.

En ocasiones, la concentración de radón que se puede alcanzar en puestos de trabajo concretos puede ser extraordinariamente alta, como se puede ver en la figura inferior, procedente de un puesto de trabajo localizado en un sótano en Santiago de Compostela. Se puede comprobar que, en ningún caso, la medición de la concentración de radón horaria a lo largo de 3 días fue inferior a los 500 Bq/m<sup>3</sup> y que hay picos que superan los 7.000 Bq/m<sup>3</sup>.



Un estudio previo sobre radón en el ámbito laboral publicado en Gaceta Sanitaria en el año 2019, incluyó 248 mediciones en otros tantos puestos de trabajo localizados en diversas comunidades autónomas españolas, con predominio de mediciones realizadas en Galicia (50). En este estudio se observó que más de un 20% de todos los puestos de trabajo medidos superaba los 300 Bq/m<sup>3</sup> y que ese predominio era mayor en aquellas CC. AA. con mayor exposición a radón. Al analizar los resultados por

sectores, se observó que el sector sanitario y el sector educativo eran los que presentaban mayores concentraciones y que el sector turístico era el que presentaba concentraciones de radón más bajas. También se analizó el material de construcción del puesto de trabajo, observándose que aquellos localizados en edificios de piedra eran los que presentaban concentraciones más elevadas. En la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos.

**Tabla 1. Concentraciones de radón en puestos de trabajo españoles**

Sectores	Número de mediciones (%)	Mediana de la concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Mediciones por encima de 300 Bq/m <sup>3</sup> ; %
Turismo	29 (11.7)	47	6.9
Educación	62 (25.0)	109	22.6
Administración Pública	107 (43.1)	60	23.5
Salud	17 (6.9)	176	37.4
Otros/sector privado	22 (8.9)	129	22.7
Desconocido	11 (4.4)	91	0
<b>Total</b>	<b>248 (100.0)</b>	<b>129.5</b>	<b>27.4</b>

**Fuente:** Gaceta Sanitaria, 2019(50)

En un estudio posterior realizado por el Laboratorio de Radón de Galicia, financiado por la Fundación Prevent, se han incluido 3.140 mediciones de radón en toda España, en su mayoría en zonas clasificadas con alto potencial de radón. Los resultados han encontrado que el 20% de todas las mediciones realizadas superan los 300 Bq/m<sup>3</sup>, con importantes diferencias por sectores. En la siguiente tabla, se pueden observar los resultados de este estudio (47).

**Tabla 2. Concentración de radón por sectores en más de 3.000 puestos de trabajo localizados en España**

Sectores	#mediciones	>300 Bq/m <sup>3</sup>
Cultura	305	28%
Educación	1268	25%
Administración pública	543	22%
Finanzas	320	5%
Distribuidoras electricidad, agua, gas	518	12%
Otros: minas, turismo, retail	186	10%

**Fuente:** Environmental Research, 2023 (47)

## 1.4. Marco regulatorio de la exposición a radón ocupacional en España

Teniendo en cuenta el manual de la OMS sobre radón interior (1) y las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (51), la Comisión Europea estableció requisitos sobre la exposición de los trabajadores a radón mediante la Directiva 2013/59/Euratom (26). Esta directiva debía ser transpuesta a la regulación nacional de los distintos países miembros de la Unión antes de 2018. Sin embargo, en España hasta diciembre de 2022 no se completó su trasposición.

En lo relativo al radón, la Directiva 2013/59/Euratom ha dado lugar a la publicación de dos Reales Decretos, que trasponen su contenido relativo a la exposición a radón en España.

**Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación (CTE) (52)**, mediante el que se aprobó una nueva sección del Documento Básico HS Salubridad, relativa a la protección contra el radón. En ésta (DB-HS6) se incluye la protección frente al gas radón para edificios de nueva planta y rehabilitados. Para ello, se clasifican los municipios españoles en función de su potencial de radón, incluyendo un listado con aquellos municipios que tienen alto potencial de radón: municipios en zona I (alto potencial de radón) y en

zona II (muy alto potencial de radón). Los municipios que no están recogidos en dicho listado (ni en zona 1 ni 2) deben considerarse municipios con bajo potencial de radón. Las medidas a tomar en edificios de nueva construcción o con una reforma relevante, varían en función de la clasificación del municipio, y comprenden la instalación de una barrera de protección, una cámara de aire ventilada o la despresurización del terreno. Se fija también la obligación de medir radón con laboratorios acreditados.

Aunque el CTE también establece la obligatoriedad de las medidas protectoras en reformas, no es aplicable a los edificios ya construidos antes de esta modificación. La mayor parte del parque residencial español queda por tanto en el limbo, a expensas de que se desarrollen e estrategias específicas a través del ya aprobado Plan Nacional contra el Radón.

No obstante, en la página web del CTE puede encontrarse una Guía de Rehabilitación frente al Radón (2), elaborada por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. En dicha guía puede encontrarse información sobre posibles soluciones para reducir los niveles de radón en edificios ya construidos.

**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 (RPSI) (53)**, mediante el que se establece la regulación pertinente para proteger a los trabajadores de la exposición a radón. En particular, este real decreto introduce disposiciones mucho más exigentes que las que recogía el anterior reglamento de protección radiológica (54).

En su artículo 75, el RPSI establece un nivel de referencia de 300 Bq/m<sup>3</sup> para la concentración de radón en interiores, y obliga a realizar mediciones de radón para comprobar que no se supera dicho nivel de referencia en: lugares de trabajo subterráneos, lugares donde se realice manipulación de agua subterránea, y en todos los puestos de trabajo en planta bajo rasante o planta baja en los municipios que se definan como de actuación prioritaria. En el caso de superar los 300 Bq/m<sup>3</sup> el titular de la actividad laboral deberá mitigar la exposición a radón de los trabajadores con intervenciones constructivas u operativas.

En el caso de no conseguir reducir la concentración de radón por debajo del nivel de referencia, el artículo 19 establece para los empleadores la obligación de estimar las dosis efectivas de los trabajadores y clasificar como trabajadores expuestos a aquellos que puedan superar una dosis efectiva por año oficial de 6 mSv. En el caso haber trabajadores expuestos, el titular de la actividad laboral deberá establecer las **medidas de protección radiológica que se detallan en el artículo 19.3**. Éstas comprenden diversas responsabilidades, como llevar a cabo una vigilancia

dosimétrica, cumplir con el límite máximo legal de dosis efectiva por año oficial de 20 mSv, y la información y formación a los trabajadores. Tal y como figura en el artículo 40.2, *en el caso de los trabajadores expuestos al radón, en el historial dosimétrico se registrarán las dosis acumuladas por año oficial, así como los parámetros relevantes para la estimación de estas dosis*. Dicho historial dosimétrico individual debe mantenerse hasta los 75 años de edad y nunca menos 30 años desde que se clasificó como trabajador expuesto a radón (artículo 43.1). Además, en caso de cambio de empleador, debe facilitarse al nuevo empleador una copia del historial dosimétrico, y en caso de otro tipo de exposiciones a radiaciones ionizantes en el trabajo, éstas figurarán también en el historial dosimétrico (artículo 42).

Los resultados del control dosimétrico deben transmitirse para su valoración al Servicio de Prevención que desarrolle la función de vigilancia y control de la salud de los trabajadores (artículo 32.5). Es en este punto donde, a la luz del historial dosimétrico individual del trabajador, pueden valorarse acciones para proteger la salud del trabajador expuesto a radón. En el caso del resto de exposiciones a radiaciones ionizantes (aquellas que no se deben al radón) sí que se establece explícitamente la obligatoriedad de realizar un examen médico a trabajadores expuestos de categoría A, como aquellos que puedan recibir una dosis superior a más de 6 mSv (artículo 45). Sin embargo, no hay indicaciones directas para trabajadores expuestos a radón. De la misma forma, en la actualidad no existe un Protocolo de Vigilancia Sanitaria específica para la exposición a radón, aunque sí un Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica frente a Radiaciones Ionizantes que se comenta más adelante.

El RPSI establece, además, *“la obligación del Gobierno de impulsar y aprobar 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”*. El Consejo de ministros de 9 de enero de 2024, a propuesta del Ministerio de Sanidad, ha aprobado el Plan Nacional contra el Radón con el objetivo de proteger la salud del conjunto de la población, y las personas trabajadoras en particular, frente a los riesgos de la exposición a este elemento químico en forma gaseosa.

Este Plan se articula en torno a cinco ejes estratégicos:

1. Conocimiento e infraestructura básica.
2. Edificación.
3. Lugares de trabajo.
4. Zonas de actuación prioritaria.
5. Comunicación y concienciación.

Estos cinco ejes engloban, a su vez, actuaciones para conocer la magnitud del problema, como evaluar la exposición de la población al radón y estimar su incidencia sobre la salud de la población, reducir la concentración de radón en los edificios o impulsar programas de formación específicos para los distintos agentes que intervienen en el ámbito de la edificación.

Finalmente, en la actualidad está pendiente en España la revisión de la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear vigente, que desarrolla de forma efectiva la exposición laboral a radón (55), a fin de adaptarla a los nuevos requisitos que establece el RPSI.

Finalmente está redactado y pendiente de deliberación en el Consejo de Ministros y publicación en el BOE, el **Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes (RINR)**, transposición parcial de la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, en lo que se refiere a los procedimientos de autorización, tanto para las instalaciones nucleares y radiactivas como para otras actividades específicas relacionadas con las radiaciones ionizantes, incluida la exposición al radón en los lugares de trabajo.

### 1.4.1. Evaluación de dosis

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) estableció en su informe número 137 nuevos coeficientes de dosis por exposición al radón (56). Para calcular la dosis efectiva anual, en base a la publicación ICRP 137 Parte 3, puede usarse la siguiente fórmula (Fórmula 1). En ella se calcula la dosis efectiva en función de: el tiempo de permanencia en la zona de trabajo (por defecto 2.000 horas anuales), la concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup> de esta zona de trabajo y el coeficiente de dosis.

La **Resolución del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) por la que se establecen los coeficientes de dosis efectiva por exposición interna<sup>(1)</sup>**, publicada en 2024, establece usar por defecto los siguientes coeficientes de dosis de la ICRP 137:

- En la mayor parte de las situaciones:  $6,7 \cdot 10^{-6}$  mSv/Bq\*h\*m<sup>-3</sup>.
- Para un trabajo activo (con actividad física significativa: dos terceras partes del tiempo hay actividad física) o en cuevas turísticas:  $1,3 \cdot 10^{-5}$  mSv/Bq\*h\*m<sup>-3</sup>.

(1) <https://www.csn.es/documents/10182/1470017/II.3+propuesta+de+resolucion+COEFICIENTES+DOSIS+INTERNAS+firmado.pdf/181a1e37-ba67-ec6a-dff4-78be3356ad8c>

**Fórmula 1: Dosis efectiva esperada.**

Dosis Efectiva (mSv) = Tiempo (horas/año)\* coeficiente de dosis (mSv/Bq\*h\*m<sup>-3</sup>)\* concentración promedio anual de radón (Bq/m<sup>3</sup>)

Con esta fórmula, y en condiciones ambientales estándar, puede obtenerse la estimación de dosis efectiva anual para un trabajador a partir de la concentración de radón medida en aire. Una vez se conoce este valor se puede identificar al trabajador como expuesto si alcanza o supera los 6 mSv y es necesario cumplir los requisitos de vigilancia correspondientes.

## 1.5. Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica: Radiaciones Ionizantes

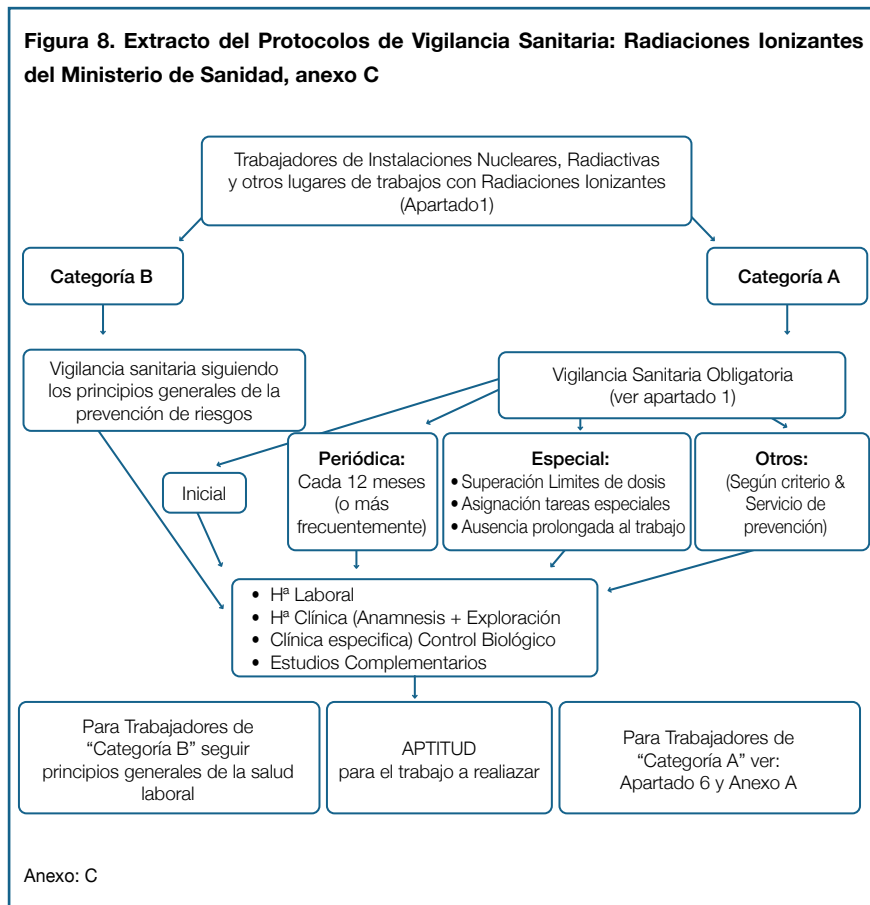
La protección radiológica de los trabajadores expuestos a radón está enfocada a nivel regulatorio en la reducción de la exposición, ya sea mediante la reducción del nivel de radón en el lugar de trabajo como en la vigilancia dosimétrica individual de los trabajadores. No existe un protocolo de vigilancia de la salud específico sobre radón, aunque sí sobre radiaciones ionizantes que le resultaría de aplicación. En el Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica de Radiaciones Ionizantes del Ministerio de Sanidad y Consumo<sup>(2)</sup>, se establece que resultan de aplicación “*Actividades laborales en que los trabajadores estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón (...) en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas*”.

Dentro de dicho protocolo, los trabajadores expuestos a radón que superaran los 6 mSv de dosis efectiva anual por radón serían trabajadores de categoría A y aquellos que queden por debajo de 6 mSv anuales serían trabajadores de categoría B. Así los trabajadores expuestos a radón tendrían los requisitos de vigilancia que apliquen a su categoría, y que vienen recogidos en dicho protocolo de Vigilancia, tal y como se visualiza en su anexo c (Figura 9).

No obstante, las referencias a la exposición a radón de este protocolo están obsoletas y se basan en la Instrucción IS-33 que está pendiente de actualización para dar cumplimiento al nuevo Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes y al futuro RINR. Además, el Plan Nacional contra el Radón, incluye elementos que afectan a un protocolo adecuado de vigilancia frente al radón.

(2) <https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/radiacio.pdf>

**Figura 8. Extracto del Protocolos de Vigilancia Sanitaria: Radiaciones Ionizantes del Ministerio de Sanidad, anexo C**



## 1.6. Cáncer de pulmón: prevención primaria y detección precoz

El cáncer de pulmón es el cáncer que más mata, en el mundo y en España. También es un cáncer altamente prevenible, ya que entre el 80 y el 90% de los casos se deben al hábito tabáquico que es su primer factor de riesgo (58). Otros factores de riesgo también son evitables en mayor o menor medida, tales como la exposición a radón, contaminantes atmosféricos, humo ambiental de tabaco, y diversos carcinógenos ocupacionales.

Debido al gran impacto que supone el consumo de tabaco sobre el cáncer pulmón, cabe destacar que las causas del cáncer de pulmón en nunca fumadores aún son poco conocidas. Además, las personas nunca

fumadoras no son incluidas en programas de detección precoz de cáncer de pulmón.

Es importante señalar que la supervivencia para el cáncer de pulmón es limitada. En Inglaterra, la supervivencia a los 10 años desde el diagnóstico es de 29%, 18%, 4%, y 0% para casos en estadios 1, 2, 3 y 4 respectivamente tal y como reflejan sus registros nacionales de cáncer disponibles en [http://www.ncin.org.uk/about\\_ncin/10yearsurvival](http://www.ncin.org.uk/about_ncin/10yearsurvival)

Por ello, la prevención del cáncer de pulmón se basa en evitar su incidencia, actuando sobre la exposición a sus factores de riesgo que son modificables: consumo de tabaco, exposición a radón en el hogar y el trabajo, así como a otros carcinógenos ocupacionales, y la contaminación ambiental (59). Eliminando o reduciendo estos factores de riesgo se reduce la incidencia de esta enfermedad.

Una vez se produce la enfermedad, puede realizarse un cribado para detectarla lo antes posible. La detección del cáncer de pulmón puede ser mediante exámenes radiológicos (la tomografía computarizada de baja dosis es el método preferente), citología de esputo, broncoscopia con o sin presencia de síntomas por parte del paciente (60).

En la actualidad no hay programas nacionales de cribado de cáncer de pulmón en prácticamente ningún país de la Unión Europea, aunque sí existe en EEUU, Corea del Sur, Japón y dos provincias de Canadá(61). Estos programas emplean tomografía computarizada de baja dosis (TCBD) para la detección precoz de esta enfermedad en fumadores. Estos programas de cribado están enfocados a personas fumadoras de alto riesgo por su edad y consumo acumulado de tabaco y no se consideran otros factores de riesgo. En Japón es la excepción, donde se realiza cribado a todas las personas trabajadoras, incluidas nunca fumadoras, mediante una radiografía de tórax que se acompaña de una citología de esputo en personas de alto riesgo (61). Por otro lado, en Francia y Suiza se han posicionado en contra de la implementación del cribado de cáncer de pulmón debido a las dudas sobre el balance beneficio-riesgo que supone una prueba con exposición a radiación ionizante y las dudas sobre su viabilidad (62,63).



## 2. Justificación y Alcance

Si bien la exposición a radiaciones ionizantes incluye la exposición a radón, su protocolo de vigilancia sanitaria está enfocado a la prevención de patologías relacionadas con la radiación ionizante en general, entre las que el cáncer de pulmón potencialmente inducido por exposición a radón en el trabajo adquiere una atención muy limitada. Sin embargo, a diferencia de otras radiaciones ionizantes, la exposición a radón es un factor de riesgo específico del cáncer de pulmón. Además, en España, los estudios disponibles indican que un 20% de los trabajadores en zonas con alto potencial de radón podrían estar expuestos a concentraciones de radón por encima del nivel de referencia europeo, incrementando así su riesgo de cáncer de pulmón, especialmente si fuman. Debido a la alta prevalencia de exposición a radón y a la extensa evidencia disponible sobre su relación causal con el cáncer de pulmón, es necesario valorar si es necesaria la creación de un protocolo específico para proteger a los trabajadores expuestos a radón frente al cáncer de pulmón.

Con la actualización del Reglamento de protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, los empleadores deberán mantener un control e historial dosimétrico de los trabajadores expuestos a radón, entendiendo como expuestos a aquellos trabajadores que puedan superar los 6 mSv, debido a que en su lugar de trabajo la concentración de radón supera los 300 Bq/m<sup>3</sup>. La información sobre la exposición a radón deberá transmitirse al Servicio de Prevención que será el responsable de valorar y decidir cómo debe ser la vigilancia sanitaria de los trabajadores expuestos a radón, por ejemplo, indicando la pertinencia de un examen médico o acciones de cualquier otro tipo destinadas a la prevención o detección precoz de cáncer de pulmón. Para esta tarea no se dispone de un protocolo específico, por lo que se plantean los objetivos descritos a continuación.



# 3. Objetivos

## 3.1. Objetivo principal

Valorar la pertinencia del desarrollo de una propuesta sobre cómo debe ser la vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos a radón.

## 3.2. Objetivos secundarios

1. Localizar y analizar buenas prácticas y evidencia científica existentes sobre la vigilancia sanitaria específica de trabajadores expuestos a radón.
2. Valorar y presentar las principales alternativas disponibles para la vigilancia de la salud específica de trabajadores expuestos a radón y su posible aplicación al contexto español.



## 4. Marco conceptual

### 4.1. Persona trabajadora expuesta

El Real Decreto por el que se modifica el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos de la exposición a Radiaciones Ionizantes de 2022 considera como trabajador expuesto aquel que supera la dosis efectiva anual de 6 mSv (artículo 19 c). Además, establece en 300 Bq/m<sup>3</sup> el nivel de referencia nacional de concentración de radón. Por ello, se considerarán personas trabajadoras expuestas aquellas con concentraciones de radón en el lugar o lugares de trabajo por encima de 300 Bq/m<sup>3</sup> y cuyo tiempo de trabajo en ese lugar o lugares sea el suficiente como para permitir superar los 6 mSv anuales.

### 4.2. Concentración de radón

Se considerará, a efectos del trabajo, la concentración de radón determinada a través de una medición basada en el método de trazas (de al menos dos meses) según el Código Técnico de Edificación actualmente vigente en España, aunque lo habitual es colocar el detector durante al menos tres meses para obtener una concentración anualizada. Esta concentración debe ser certificada a través de un Laboratorio acreditado, cumpliendo la legislación vigente.

### 4.3. Exposiciones a factores de riesgo que se deben considerar

La exposición a radón está asociada causalmente sólo con el cáncer de pulmón, por lo tanto, cualquier vigilancia sanitaria de trabajadores expuestos a radón tendrá como objetivo la prevención de la incidencia de cáncer de pulmón o, en su defecto, su posible detección precoz con el fin de reducir la mortalidad por cáncer de pulmón. Las medidas de prevención de la incidencia de cáncer de pulmón necesariamente se basan en la reducción o eliminación de sus factores de riesgo: hábito tabáquico, exposición al humo de tabaco, exposición a radón residencial y laboral, contaminación atmosférica y exposición a otros carcinógenos ocupacionales.



# 5. Metodología

Para localizar y analizar buenas prácticas y evidencia científica existentes sobre la vigilancia sanitaria específica de trabajadores expuestos a radón (objetivo 1), se realizó una revisión sistemática de la evidencia científica en las principales bases de registros biomédicos y una revisión de páginas web de organismos e instituciones oficiales. Tras estas dos revisiones, se realizó una consulta a expertos con responsabilidad institucional sobre las prácticas de vigilancia sanitaria de trabajadores con exposición laboral a radón en sus respectivos países.

## 5.1. Revisión sistemática de evidencia científica

Se realizó una revisión bibliográfica en las principales bases de publicaciones biomédicas (Pubmed Medline), (Web of Science, Scopus), para localizar evidencia sobre vigilancia sanitaria específica de trabajadores expuestos a radón. La selección de los estudios se llevó a cabo atendiendo a los siguientes criterios de inclusión/exclusión:

Criterios de Inclusión:

1. Estudios que aborden la prevención o detección temprana del cáncer de pulmón en individuos que hayan estado expuestos al radón.
2. Planes o protocolos dirigidos a la supervisión de la salud de trabajadores expuestos al radón.
3. Deben incluir resultados sobre los beneficios en reducción morbilidad y/o mortalidad y/o la mejora de la calidad de vida, y riesgos asociados, cuando apliquen.

Criterios de Exclusión:

1. Publicaciones centradas en otros tipos de cáncer que no sean el cáncer de pulmón, u otro tipo de exposiciones que no sean radón.

Idiomas: todos.

Estrategia de búsqueda: se realizaron tres búsquedas, en las bases de datos Pubmed, Web of Science (WOS) y Scopus. Para la estrategia de búsqueda se siguieron las recomendaciones y prácticas actualizadas de la

Biblioteca de la Universidad de Tampere (Finlandia) sobre cómo diseñar estrategias de búsqueda para revisiones sistemáticas (64) De esta forma, los términos elegidos para las búsquedas se estructuraron en cuatro categorías (cáncer de pulmón, radón, prevención y trabajadores o entorno de trabajo) que se combinaron en el algoritmo definitivo de búsqueda (ver tabla 3). Estas búsquedas se ejecutaron por última vez el 11 de septiembre de 2023.

**Tabla 3. Algoritmos de búsqueda literales utilizados en cada base de registros biomédicos**

Pubmed: (((lung\*[Title/Abstract] AND (cancer\*[Title] OR tumor\*[Title/Abstract] OR tumour\*[Title/Abstract] OR neoplasm\*[Title/Abstract])) OR lung neoplasms[MeSH Terms]) AND (radon[MeSH Terms] OR radon[All Fields] OR radon s[All Fields] OR radon daughters[MeSH Terms] OR radon[MeSH Terms]) AND (prevention[Title] OR control\*[Title] OR vigilance[Title] OR protocol\*[Title] OR program\*[Title] OR screen\*[Title] OR scan\*[Title] OR diagnos\*[Title] OR plan\*[Title] OR surveillance[Title] OR detect\*[Title] OR check\*[Title] OR test\*[Title] OR safety[Title] OR cessation[Title] OR counsel\*[Title] OR asses\*[Title] OR sputum[Title] OR quit\*[Title] OR stop[Title] AND (work\*[Title] OR occupation\*[Title] OR employ\*[Title] OR job[Title] OR job\*[Title] OR labor\*[Title] OR labour\*[Title] OR miner\*[Title] OR staff[Title] OR office\*[Title] OR industr\*[Title] OR occupational health[MeSH Major Topic]))

WOS: (((TS=(lung\* AND (cancer\* OR tumour\* OR tumor\* OR neoplasm\*))) AND ALL=(radon)) AND TI=(PREVENTION OR CONTROL\* OR VIGILANCE OR PROTOCOL\* OR PROGRAM\* OR DETECT\* OR SCREEN\* OR SCAN\* OR PLAN\* OR DIAGNOS\* OR SURVEILLANCE OR CHECK\* OR TEST\* OR SAFETY OR CESSATION\* OR COUNSEL\* OR ASSES\* OR SPUTUM OR QUIT\* OR STOP\* )) AND TI=(WORK\* OR OCCUPATION\* OR EMPLOY\* OR JOB OR JOB-\* OR LABOR\* OR LABOUR\* OR MINE\* OR STAFF OR OFFICE ORIndustr\*))

Scopus: (TITLE-ABS-KEY ( lung AND ( cancer\* OR tumor\* OR tumour\* OR neoplasm\* ) ) ) AND ( TITLE ( prevention OR vigilance OR protocol\* OR program\* OR detect\* OR screen\* OR scan\* OR plan\* OR diagnos\* OR surveillance OR check\* OR test\* OR control\* OR asses\* OR safety OR cessation\* OR counsel\* OR sputum OR quit\* OR stop\* ) ) AND ( TITLE ( work\* OR occupation\* OR employ\* OR job OR job-\* OR labor\* OR labour\* OR mine\* OR staff OR office OR industr\* ) ) AND ( ALL ( radon OR rn ) )

Se siguió la metodología PRISMA 2020 para esta revisión sistemática (65). Para ello, primero se identificaron los registros duplicados, se revisaron título y resumen de los registros únicos y se descartaron aquellos cuyo contenido era ajeno al objetivo. Después se realizó una lectura del texto completo de los registros restantes, y se consideraron también aquellas referencias relevantes incluidas en el texto. De acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión, a partir de la lectura del texto completo se incluyeron en el listado definitivo aquellas publicaciones que cumplían criterios de inclusión y para los artículos no incluidos se registró el motivo de exclusión.

Se utilizó el software Rayyan.ai para unir en un solo formato los registros obtenidos de las tres bases de registros (Pubmed, WOS, Scopus), para la identificación de duplicados, para revisión de títulos y resumen ya que aparecen en pantalla de forma intuitiva, y para registrar los motivos de exclusión y otras anotaciones de forma sistemática. Todas las revisiones de títulos, resumen y texto completo fueron realizadas por los autores.

## 5.2. Revisión de material institucional

Esta revisión se realizó como paso preliminar a la fase de consulta a instituciones, y nos permitió contextualizar y plantear el contenido de la consulta. Se realizó una búsqueda específica en páginas web y repositorios institucionales.

**Criterio de inclusión:** documentación específica sobre vigilancia sanitaria de los trabajadores expuestos a radón, es decir, documentación enfocada a la prevención y detección precoz del cáncer de pulmón en trabajadores expuestos a radón.

**Criterios de exclusión:** contenido redundante con el marco regulatorio ya indicado en la sección de antecedentes, basado en el control dosimétrico de las personas trabajadoras expuestas.

**Tipo de publicación:** manuales, protocolos, guías, instrucciones, comunicados, páginas web, artículos o cualquier tipo de documentación institucional que sirva para la vigilancia sanitaria de los trabajadores que han estado expuestos a radón.

**Fuentes:** webs instituciones gubernamentales a nivel regional (CC. AA. en España), instituciones nacionales de Irlanda, Reino Unido, Canadá y EEUU, e instituciones supranacionales (la Unión Europea y la OMS). Los países elegidos son aquellos con más recorrido en el estudio y regulación de la exposición a radón y además aquellos cuya documentación está disponible en inglés.

**Idioma:** español, inglés.

La búsqueda se llevó a cabo en marzo y en septiembre de 2023 utilizando el buscador de Google con distintas combinaciones de la palabra “radon” con términos relativos a la vigilancia sanitaria como “medical” “check” “lung cancer” “prevention” “screening” “physician” “surveillance” “clinical” “assessment”.

Asimismo, se realizaron directamente búsquedas navegando dentro de las siguientes páginas web gubernamentales pertinentes:

- En Reino Unido: UKRadon y Health Safety Executive: <https://www.ukradon.org/>, (<https://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/radon.htm>)
- En Irlanda: de su agencia de salud ambiental (EPA) y del Health and Safety Agency (<https://www.epa.ie/environment-and-you/radon/employers/>, <https://www.hsa.ie/eng/topics/radon/>)
- En Canadá: Canadian Center for Occupational Health and Safety y el gobierno de Canadá (<https://www.ccohs.ca/>, <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/health-risks-safety/radiation/radon/action-guides/provinces-territories/examples-frameworks-strategies-support.html>)
- En EEUU: el Center for Disease Control and Prevention (CDC) y su agencia de salud ambiental (EPA) (<https://www.cdc.gov/radon/radon-healthcareproviders.html>, <https://www.epa.gov/radon>)
- En la web de la OMS: [www.who.int](http://www.who.int)

### 5.3. Consulta a expertos con responsabilidad institucional

Se diseñó y ejecutó una consulta a las personas clave de las instituciones nacionales responsables de la protección frente a la exposición a radón. El objetivo fue conocer las prácticas existentes sobre la vigilancia sanitaria específica de trabajadores expuestos a radón preguntando directamente a las personas potencialmente involucradas. Se trata de una consulta a personas expertas que, dentro de la institución competente en esta materia en su país, tienen un rol relevante y que les hace necesariamente conocedoras de la existencia o falta de protocolos, guías o regulación relativa a la vigilancia sanitaria de los trabajadores expuestos a radón.

Se elaboró esta consulta denominada “call for expert advice” consistente en un texto con una serie de preguntas relevantes para conocer las buenas prácticas que se estén llevando a cabo en ese país con respecto a la vigilancia sanitaria de trabajadores expuestos a radón. El texto se editó para adecuar el tono y el lenguaje usando chat GPT. A continuación, incluimos el texto final enviado a los expertos (en inglés):

*“Subject: Seeking Expert Input on Medical Check Protocol for Workers who have been exposed to Radon concentrations above 300 Bq/m<sup>3</sup>*

*Dear experts,*

*We are writing to seek your expertise as respected professionals from competent authorities or as members of the European Radon Association.*

*Our objective is to gather best practices for the implementation (or not) in Spain of a medical check protocol specifically designed for workers who have been exposed to radon in their workplace (usually for more than 1 year). Regulations usually emphasize preventing exposure altogether, but we’re interested in the situation for those who’ve already been exposed. We would greatly appreciate your input on the following:*

***In your country, to your knowledge, is there a specific medical check protocol for workers who have been previously exposed to radon over an extended period?***

*If such a protocol exists, we would greatly appreciate any available references or guidelines.*

*If there is no specific protocol, we’d like to know if a generic medical check for ionizing radiation exposure is utilized or if no protocol is recommended at all.*

*If you’re unable to provide an answer, we’d really appreciate it if you could point us someone who might have the information we’re seeking.*

*We truly value your time and expertise. Your insights will help us develop informed strategies to address the medical needs of workers who’ve been previously exposed to radon. Don’t hesitate to reach out if you need more info or have any questions or comments.*

*Thank you for your kind cooperation. We eagerly await your response. Do not hesitate to share this email with any colleague you think have information on this topic”.*

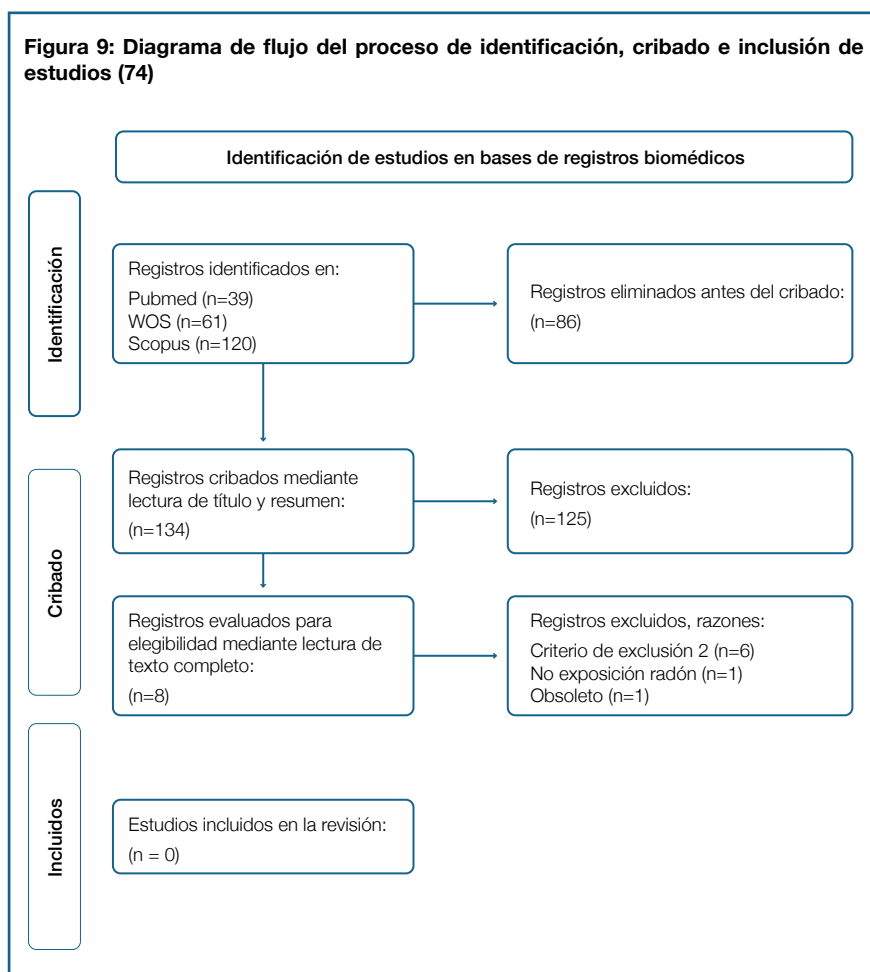
Se obtuvieron los contactos de los expertos a través de la Asociación Europea de Radón (ERA), que facilitó la difusión de la consulta vía email. La difusión por correo electrónico se realizó el día 10 de julio de 2023. Se registraron y contestaron todas las respuestas. En aquellos casos en los que nos derivaron a otra persona, se reenvió el email al nuevo contacto indicando quien nos había referido su contacto. El día 10 de septiembre de 2023 se realizó el análisis de todas las respuestas recibidas hasta el momento. Se realizó un análisis descriptivo de todas las respuestas, que fueron leídas en profundidad una a una para extraer la información relevante.



# 6. Resultados

## 6.1. Revisión sistemática de evidencia científica

Tal y como se observa en la Figura 9 se identificaron 134 registros (excluyendo duplicados), de los cuales se descartaron 125 en la fase de cribado por título y resumen, y se revisaron a texto completo 8 registros y sus referencias relevantes. Tras la lectura a texto completo, se excluyeron los ocho estudios: seis porque no aportaron resultados de beneficios (66-71), uno por estar obsoleto (72), y otro por no abordar la exposición a radón (73).



## 6.2. Revisión de material institucional

No se encontró material institucional sobre vigilancia sanitaria a trabajadores expuestos a radón, siguiendo los criterios de inclusión y exclusión. Todo el material institucional disponible resultó redundante con el marco regulatorio, insta a medir y mitigar los niveles elevados de radón.

## 6.3. Consulta a expertos con responsabilidad institucional

### 6.3.1. Características generales de la respuesta a la consulta

Contestaron a la consulta profesionales de instituciones competentes en el ámbito del radón de 5 países de la Unión Europea: Austria, República Checa, Finlandia, Francia e Irlanda. Todas las respuestas se recibieron entre el 12 de julio y el 1 de agosto, y no se han recibido respuestas adicionales posteriormente.

Todas las respuestas recibidas mostraron ser fundamentadas y claras, respondiendo directamente a la consulta realizada. Todas las respuestas provenían de personal de departamentos especialmente cualificados en materia de protección de la salud de los trabajadores expuestos a radón. Ninguna respuesta mostró confusión sobre la consulta ni precisó aclaraciones sobre la pertinencia de la misma.

### 6.3.2. Descripción y análisis del contenido de las respuestas a la consulta

Todos los informantes, de los 5 países, indicaron claramente y de forma objetiva que no existe un protocolo de vigilancia sanitaria obligatoria para personas trabajadoras que hayan estado expuestas a radón. Sin embargo, los informantes de dos países explicaron, acerca de los trabajadores expuestos a más de 6 mSv, que:

1. “No lo tenemos (un protocolo para trabajadores expuestos a radón), pero reconocemos la necesidad de crear uno, especialmente teniendo en cuenta que con el creciente uso del coeficiente de dosis ICRP

137 muchos trabajadores tendrán una dosis estimada de más de 6 mSv” (traducción libre de la autora).

2. “No debería aplicarse el protocolo de vigilancia médica de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes del campo nuclear a los expuestos a radón. Es inadecuado. Tampoco se debe aumentar la frecuencia de las radiografías pulmonares, excepto quizás si el trabajador es un gran fumador” (traducción libre de la autora).
3. Dos respuestas de dos países explicaban que los trabajadores expuestos a más de 6 mSv deben pasar un examen médico de aptitud en el que se determine si son o no aptos para continuar su trabajo. En uno de los casos directamente el informante indicaba que no se imaginaba a un facultativo/a declarando no apta a una persona trabajadora por exposición a radón.

Además, la respuesta procedente de Francia incluyó, ante la falta de un protocolo específico obligatorio, dos documentos con recomendaciones que consideraron de interés y cuyo contenido se describe a continuación:

1. Un documento que fue emitido por el Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear (IRSN) en 2014 para un caso especial, con recomendaciones para las personas expuestas a radón (75). Se trata de recomendaciones para personas que habían residido, o niños que habían sido cuidados, en una casa construida sobre residuos de procesamiento de uranio donde se alcanzaban los 18.000 Bq/m<sup>3</sup>.
  - Evitar fumar en cualquier circunstancia, teniendo en cuenta los efectos combinados del radón y el tabaco.
  - Evitar, en general, la exposición respiratoria a compuestos irritantes o tóxicos.
  - Evitar cualquier exposición excesiva al radón en el futuro, solicitando una prueba de detección de radón en su vivienda en caso de duda.

En este informe no se especifica el seguimiento médico a realizar, sino que se indica que se hará en función del riesgo: *“El grupo de expertos reunido por el Instituto Nacional del Cáncer ha recomendado un seguimiento médico adecuado, dependiendo del nivel de riesgo relativo de cáncer de pulmón a lo largo de la vida asociado a la exposición al radón”*.

2. Las recomendaciones que fueron emitidas en 2015 por la Alta Autoridad en Salud (HAS) y por el Instituto contra el Cáncer (INCA) para identificar personas de alto riesgo de cáncer de pulmón: aquellas personas de 55 a 74 años de edad que hayan estado

expuestas a radón en el trabajo durante 10 años o más y que sean fumadoras o exfumadoras (que hayan dejado de fumar hace menos de 15 años) con 30 paquetes-año acumulados de consumo de tabaco. Estas recomendaciones pueden ser utilizadas por los y las facultativas para tomar decisiones sobre la pertinencia de pruebas como una tomografía computarizada de baja dosis. Estas recomendaciones, originalmente en francés, se publicaron en inglés en 2017 en el estudio “Medical follow-up of workers exposed to lung carcinogens: French evidence-based and pragmatic recommendations” (76).

# 7. Discusión

## 7.1. Falta de evidencia científica

No se han identificado protocolos de seguimiento específicos para trabajadores que hayan estado expuestos a radón, ni en el ámbito nacional, ni en el internacional.

Del mismo modo, tampoco se han identificado estudios que evalúen beneficios y riesgos de ningún tipo de intervención preventiva frente al cáncer de pulmón en personas que hayan estado expuestas a radón en el trabajo.

Esta falta de evidencia ya fue reportada en el informe de evaluación realizado en el marco de la EUnetHTA sobre la efectividad del cribado de cáncer de pulmón en personas de alto riesgo que encargó la Comisión Europea y fue publicado en 2020, donde explícitamente se concluye que no existen estudios sobre su aplicación en personas expuestas ocupacionalmente a carcinógenos pulmonares como el radón (77). Asimismo, una revisión sistemática previa publicada en 2017 también hacía referencia a la falta de evidencia en este sentido (76).

Esta última revisión incluye recomendaciones basadas en el consenso de expertos sobre cómo identificar personas con alto riesgo de cáncer de pulmón en Francia, y cabe destacar que por la falta de evidencia *no* recomiendan el cribado con tomografía computarizada de baja dosis en personas expuestas en el presente o en el pasado a carcinógenos ocupacionales en este país. Al mismo tiempo, recomiendan la realización de un estudio que genere evidencia sobre la viabilidad de un cribado en trabajadores de alto riesgo en Francia, y proponen el criterio de la Alta Autoridad en Salud (HAS) para identificar personas con alto riesgo (76). En línea con estas recomendaciones, en 2018 se ha publicado el protocolo del primer estudio que evaluará la viabilidad del cribado de cáncer de pulmón con tomografía computarizada de baja dosis en personas trabajadoras fumadoras y con exposición a carcinógenos ocupacionales, el estudio LUCSO (78). Este estudio se llevará a cabo en Francia, y para la identificación de personas de alto riesgo se seguirán las recomendaciones de la HAS que combinan hábito tabáquico y exposiciones ocupacionales. Estas recomendaciones son las referenciadas también en la respuesta francesa a la consulta realizada a personas expertas, y en el caso de la exposición a radón la recomendación es considerar de **alto riesgo a personas de 55 a 74 años que hayan estado expuestas a radón en el trabajo durante 10 años o más y que sean fumadoras o exfumadores (que hayan dejado de fumar hace menos de 15 años) con 30 paquetes-año consumidos (76).**

## 7.2. Falta de buenas prácticas

Tampoco se identificó material institucional sobre vigilancia sanitaria de personas trabajadoras expuestas a radón. No obstante, existen limitaciones para esta revisión de material institucional a nivel internacional, como son el idioma, que ha limitado el número de países revisados o el acceso que puede ser incluso restringido, al tratarse de documentación normalmente destinada a profesionales sanitarios y no destinada al público general. Además, se trata de una búsqueda de material sin un formato o nombre concreto, y que se buscaron protocolos, guías, instrucciones, manuales..., esta diversidad también dificulta el proceso de revisión. Además, se trata de una búsqueda en webs y repositorios de las instituciones de distintos países cuyo funcionamiento, organización y sistema de publicación desconocemos. Por ello, consideramos esta revisión de material institucional preliminar, no sistemática e insuficiente por sí misma para poder identificar ejemplos de buenas prácticas en otros países.

No obstante, a pesar de estas limitaciones, consideramos que el hecho de que no hayamos conseguido identificar ningún material, es un resultado remarcable que debe necesariamente reflejar una falta real de material institucional accesible sobre vigilancia de personas trabajadoras expuesta a radón.

Los resultados de la consulta a personas expertas de instituciones competentes en Europa nos permiten concluir que no existen protocolos específicos de vigilancia sanitaria personas expuestas ocupacionalmente a radón, ni en Austria, Finlandia, Francia, Republica Checa ni Irlanda, y probablemente en ningún otro país de la Unión Europea. Esto corrobora la falta de evidencia científica y material institucional detectada en las revisiones realizadas en este estudio.

## 7.3. Balance de riesgos

Se está explorando en el estudio LUCSO la viabilidad de implementar un cribado de tomografía computarizada de baja dosis para la detección precoz de cáncer de pulmón en fumadores que han estado expuestos a radón (78). Aún ningún programa de cribado de cáncer de pulmón incluye la consideración de factores de riesgo diferentes al consumo de tabaco y la edad (79). No obstante, en los últimos años hay una creciente publicación de posicionamientos al respecto. Por un lado, existen diversos artículos que proponen la ampliación de los criterios de cribado con el objetivo de incluir a más personas con alto riesgo de cáncer de pulmón que actualmente quedan excluidas (73). Por otro lado, también hay publicaciones en contra de ampliar los criterios de cribado o directamente en contra de un sistema de cribado de cáncer de pulmón, debido principalmente, a las dudas sobre su balance riesgo-beneficio y viabilidad (63,76,77).

En el caso de la exposición a radón se da de forma muy explícita la paradoja de intentar reducir un riesgo provocado por radiación ionizante con exámenes que conllevan exposición a más radiación ionizante.

Los cribados existentes se basan en la realización periódica de pruebas de tomografía computarizada de baja dosis (TCBD) a fumadores o exfumadores, por lo que las propuestas de cribado por exposición ocupacional, como el estudio LUCSO, están enfocadas a personas con consumo de tabaco. De esta forma, hay que tener en cuenta que en dicha estrategia de cribado confluyen diversos riesgos de cáncer de pulmón: tabaco, radiación ionizante procedente del radón, y la radiación extra de la TCBD.

La radiación ionizante aumenta el riesgo de cáncer de pulmón. En un seguimiento a 10 años de personas cribadas con TCBD para la detección precoz de cáncer de pulmón, se identificó una dosis efectiva acumulada que variaba entre 8 y 34 mSv (mediana de 13,0 mSv) en mujeres y entre 6-43 mSv (mediana de 9 mSv) en hombres (80). Cabe recalcar que las mujeres acumularon con estas pruebas 23 mGy de dosis en el tejido mamario debido a estas pruebas de detección de cáncer de pulmón a lo que habría que sumar muy probablemente, la dosis recibida por mamografías ya que el cribado de cáncer de mama sí que está totalmente establecido en muchos países. La adición de radiación ionizante procedente de pruebas médicas a la radiación natural fundamentalmente de radón residencial está en aumento, y algo similar se puede aplicar a la radiación natural procedente de una fuente laboral. Esto ha sido recientemente revisado (81), y este contexto también es necesario tenerlo en cuenta cuando se establezca un protocolo de seguimiento de trabajadores expuestos ocupacionalmente a radón interior.

Las personas trabajadoras expuestas a radón son, tal y como se define en la Directiva Euratom 2013/59 de aplicación en todos los países de la Unión, aquellas expuestas a más de 6 mSv anuales. Según las recomendaciones de la HAS son de alto riesgo las personas expuestas a radón durante más de 10 años y fumadoras o exfumadoras (que hayan dejado de fumar hace menos de 15 años) de entre 55 y 74 años. Por lo tanto, a continuación, presentamos unas aproximaciones teóricas sobre la aplicación del cribado de cáncer de pulmón por TCBD a estas personas de alto riesgo. Teniendo en cuenta la definición legal europea de persona trabajadora expuesta a radón, encontramos que se recomienda cribado a partir de los 60 mSv de dosis efectiva acumuladas (10 años\* 6 mSv anuales (mínimo para ser considerada expuesta). A dichas personas, cuando tengan un histórico de consumo de tabaco de 30 paquetes-año, se le aplicaría una prueba anual de TCBD desde los 55 a los 74, lo que supone 20 años de cribado, que por extrapolación a partir del estudio de seguimiento a 10 años (80),

supondrían una dosis de entre 16 y 68 mSv (mediana 26 mSv) en mujeres y de 12 a 86 mSv (mediana 18 mSv) en hombres. Observando estos rangos, tanto en hombres como mujeres, algunas personas directamente recibirán más radiación debida al cribado que por su exposición laboral. Y si tomamos de referencia la mediana de dosis recibida, la exposición a radiaciones ionizantes aumentaría a causa de este cribado un 43% en mujeres y un 30% en hombres.

Además, hay que tener en cuenta que la exposición a radón tiene un importante componente geográfico ya que depende del potencial de radón la zona. Existe una proximidad geográfica obvia entre el lugar de residencia y lugar de trabajo, que hace muy posible que si se trabaja en una zona con alto potencial de radón se viva también en una zona con alto potencial de radón y por lo tanto podrían tener niveles elevados de radón también en el hogar.

No se ha identificado en ningún país la aplicación por protocolo de detección precoz de cáncer de pulmón en personas expuestas a radón con TCBD. Ante la falta de evidencia y buenas prácticas identificadas, proponemos una serie de recomendaciones a la espera de que se genere más evidencia sobre los beneficios y riesgos asociados al cribado de cáncer de pulmón.

## 7.4. Recomendaciones

Recomendamos reducir el riesgo de cáncer de pulmón con un enfoque holístico en el que se tenga en cuenta el balance de todos sus factores de riesgo, incluido el de las radiaciones ionizantes provenientes de pruebas de cribado. Las medidas de prevención primaria por parte de empleadores deben ser la prioridad. Esto implica priorizar la reducción del riesgo de cáncer de pulmón respecto a su detección precoz.

Prevención primaria. Actuar sobre el principal factor de riesgo:

- En fumadores: conseguir la cesación tabáquica dando a las personas trabajadoras que hayan estado expuestas toda la información sobre sus riesgos, y todas las facilidades necesarias para que dejen de fumar: informar del riesgo derivado de la exposición ocupacional y su interacción con el hábito tabaco, informar acerca del efecto pernicioso que tiene la exposición a humo de tabaco ambiental para terceras personas, particularmente en su domicilio, financiar tratamiento para cesación tabáquica y plantear incentivos para que dejen de fumar. En un estudio de cohortes reciente se cuantifica la reducción de riesgo de cáncer de pulmón en personas expuestas a radón ocupacional

debido a la cesación tabáquica espontánea (sin intervención conocida) (70). En este estudio se observa como el riesgo de cáncer de pulmón en fumadores se reduce casi a la mitad mediante cesación tabáquica durante 10 años o más. Estos resultados están en línea con estudios en población general que constatan como dejar de fumar reduce el riesgo de cáncer de pulmón (73).

- En nunca fumadores o ex fumadores: reforzar la importancia de no iniciar ni reiniciar el consumo de tabaco. El empleador puede además plantear medidas para evitar proactivamente el inicio del consumo de vapeadores ante el creciente consumo de los mismos.

Prevención primaria. Actuar sobre la exposición a radón y otras exposiciones de riesgo:

- Cumplir con el nuevo Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (53): cabe destacar dentro de este Reglamento, la obligación de reducir los niveles de radón por debajo de 300 Bq/m<sup>3</sup> en los lugares de trabajo y, en caso de no ser posible, mantener un historial dosimétrico individual de las personas trabajadoras. Además, debe haber una estrategia clara y transparente de comunicación de riesgos con las personas trabajadoras.
- Identificar y mitigar cualquier otro factor de riesgo: especialmente carcinógenos ocupacionales y ambientales, como pueden ser el humo de motores diésel, la exposición a polvo de sílice, o a polvo de madera, cumpliendo con las regulaciones vigentes al respecto.
- Identificar y mitigar la exposición a radón en el hogar: en el caso de que la vivienda se ubique en una zona con alto potencial de radón (46). Se debe de promover la medición y mitigación de radón en el domicilio de personas que vivan en zonas con potencial de radón.

Prevención secundaria. Detección precoz de cáncer de pulmón en personas de alto riesgo

Evaluar el riesgo de cáncer de pulmón para identificar personas de alto riesgo, teniendo en cuenta la edad, el consumo de tabaco, su exposición a radón y a otros carcinógenos, y otros factores de riesgo como padecer EPOC. La vigilancia de personas expuestas a radón deberá realizarla personal cualificado; neumólogos y neumólogas, que podrían tomar aspectos del protocolo de vigilancia de personas expuestas a amianto. Esta vigilancia debería ser aplicable en función del riesgo de cáncer de pulmón de la persona trabajadora, independientemente de su estatus laboral, es decir, también resultaría de aplicación a personas jubiladas o que

ya no están trabajando en un lugar con exposición a radón. Para evaluar el riesgo asociado a la exposición a radón debe de utilizarse el historial dosimétrico (cuando estos trabajadores deban ser considerados expuestos según el RD 1029/2022 y en consecuencia la vigilancia dosimétrica se obligatoria), o en su ausencia, concentraciones de radón previas de la persona trabajadora. Cabe destacar la obligación del empleador de mantener el historial dosimétrico individual hasta los 75 años de edad de la persona trabajadora y nunca menos de 30 años desde que se declara trabajador expuesto. Siguiendo las recomendaciones de la HAS podrían considerarse de alto riesgo personas fumadoras o exfumadoras recientes (que dejaron de fumar hace menos de 15 años) de entre 55 y 74 años y expuestos a más de 60 mSv de dosis durante su vida laboral.

Para las personas consideradas de alto riesgo, se recomienda una vigilancia específica anual en consulta donde se promueva su reducción de riesgo de cáncer de pulmón con las medidas expuestas de prevención primaria, y además una vigilancia específica de síntomas y signos precoces de cáncer de pulmón con personal facultativo convenientemente formado al respecto y, en caso de sospecha, su posterior confirmación o descarte del diagnóstico de cáncer de pulmón.

Adicionalmente, debería reflexionarse sobre la posible realización de una tomografía computarizada de baja dosis (TCBD) en el momento en el que se comprueba que las personas trabajadoras han estado expuestas a más de 60 mSv en los últimos 10 años y considerar adicionalmente la condición tabáquica del trabajador (ver tabla 3). La ventaja de realizar este procedimiento residiría en averiguar si puede existir un cáncer de pulmón subclínico que podría ser atribuible a la exposición a radón en ámbito laboral.

**Tabla 3. Identificación de personas trabajadoras expuestas a radón con alto riesgo de cáncer de pulmón**

Historial dosimétrico: superior a 60 mSv

Consumo de tabaco acumulado: igual o superior a 30 paquetes-año

Para exfumadores: que lleven menos de 15 años sin fumar

La TCBD no debería realizarse en todos los trabajadores sino sólo en aquellos que sean fumadores o exfumadores, basándose en la evidencia científica de la sinergia submultiplicativa entre radón y tabaco, por la que un sujeto fumador o exfumador multiplica su riesgo de cáncer de pulmón.

La TCBD no se justificaría en sujetos nunca fumadores debido a la diferencia importante en la magnitud de la asociación del tabaco frente al radón con el cáncer de pulmón (mucho más elevada en el caso del tabaco). Habría que dilucidar también si una única TCBD sería necesaria o serían adecuadas más pruebas en el tiempo.

La justificación de una prueba TCBD vendría dada porque la radiación ionizante adicional por la TCBD sería de poca magnitud (1-1,5 mSv) en comparación con la dosis recibida en el ámbito laboral (mayor a 60 mSv), tratando en este caso de maximizar la relación beneficio-riesgo al hacer la TCBD sólo en fumadores o exfumadores expuestos a radón (con mucho más riesgo de cáncer de pulmón y por tanto un hipotético mayor rendimiento de la prueba). La necesidad de realizar quizá una única prueba se basa en que, necesariamente, la exposición a radón en el trabajo debe reducirse tras haberse detectado el exceso de exposición y por tanto el riesgo de cáncer pulmonar debido al radón debería disminuir.

El uso del cribado por TCBD (pruebas de TCBD periódicos) solo puede ser pertinente en situaciones individuales donde el balance beneficio-riesgo sea positivo. Es necesario un análisis riguroso de los riesgos añadidos por la radiación ionizante debida a la prueba de TCBD desde un punto de vista individual, ya que valores de dosis promedio o medianas, pueden diferir mucho de algunos casos individuales específicos y pueden superar la dosis recibida por exposición a radón laboral (80). Asimismo, se deben tener en cuenta todos los factores de riesgo del cáncer de pulmón.



## 8. Conclusiones y propuestas finales

1. En España es obligatorio, de acuerdo con el *Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes* actualizado en diciembre de 2022, que los empleadores protejan a las personas trabajadoras de los riesgos asociados a la exposición a radón. Para ello, primero deben evitar o reducir su exposición cuando el promedio anual de concentración de radón en el lugar de trabajo supere un nivel de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Cuando esto no sea posible y haya trabajadores cuya dosis efectiva sea superior a 6 mSv/año, deben adoptar diversas medidas de protección radiológica, que incluyen, entre otras, registrar sus dosis anuales en el correspondiente historial dosimétrico individual.
2. En la actualidad no existen protocolos específicos de vigilancia de la salud en personas que ya hayan estado expuestas a radón en el ámbito laboral, ni a nivel nacional, ni a nivel europeo. Tampoco existe evidencia científica sobre el uso específico de un cribado por TCBD para estos trabajadores.
3. En caso de que en un futuro próximo las distintas administraciones sanitarias en España impulsaran la implantación de programas de cribado por TCBD para la población general, con determinados factores de riesgo, debería asegurarse la inclusión de exposición laboral al radón, y que dichos programas tengan en cuenta lo discutido en el presente documento en cuanto a una completa, rigurosa e individualizada estimación del balance riesgo-beneficio. Para ello deberá contarse con el historial dosimétrico individual por exposición a radón, o en su defecto, una estimación a posteriori de la dosis efectiva acumulada por exposición a radón.
4. Se ha detectado la necesidad de desarrollar un protocolo con estas características. Ante la limitación de evidencia científica concluyente, o de buenas prácticas previas, dicho protocolo se basará necesariamente en una valoración rigurosa y holística de los riesgos y beneficios derivados de la aplicación de dicho protocolo de vigilancia en las personas trabajadoras. Esta valoración debe ir más allá de una valoración por consenso entre personas expertas. Consideramos necesario que dicho protocolo sea fruto de un proceso de participación ciudadana, de organizaciones sindicales y de personas expertas de distintos ámbitos relacionados como la oncología, neumología, prevención de riesgos laborales y medicina del trabajo,

protección radiológica o promoción de la salud. La involucración de la ciudadanía puede realizarse más concretamente a través de la participación de personas trabajadoras expuestas ocupacionalmente a radón y fumadoras, exfumadoras y nunca fumadoras. La inclusión de la ciudadanía y profesionales para la creación del protocolo, garantizaría, ante la falta de evidencia científica concluyente, la rigurosidad de su contenido.

# 9. Referencias

1. Organización Mundial de la Salud. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective 2009. 2009.
2. Linares Alemparte P, García Ortega S. Código Técnico de la Edificación. 2020 [Citado el 29 de julio de 2022]. Guía de Rehabilitación frente al radón. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/Guias/GuiaRadon.html>
3. Hassan NM, Ishikawa T, Hosoda M, Iwaoka K, Sorimachi A, Sahoo SK, et al. The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan. *Radiat Meas.* Febrero de 2011;46(2):232-7.
4. Sahoo BK, Sapra BK, Gaware JJ, Kanse SD, Mayya YS. A model to predict radon exhalation from walls to indoor air based on the exhalation from building material samples. *Science of the Total Environment.* 1 de junio de 2011;409(13):2635-41.
5. Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A, Gastelu-Iturri J, Figueiras A. Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain. *Environ Res* [Internet]. 2007 Feb [citado el 10 de abril de 2023];103(2):185-90. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16729995/>
6. Frutos B, Martín-Consuegra F, Alonso C, Perez G, Peón J, Ruano-Ravina A, et al. Inner wall filler as a singular and significant source of indoor radon pollution in heritage buildings: An exhalation method-based approach. *Build Environ.* 15 de agosto de 2021;201:108005.
7. Bossew P, Cinelli G, Ciotoli G, Crowley QG, de Cort M, Medina JE, et al. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 1 de junio de 2020 [citado el 10 de abril de 2023];17(11):1-24. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32531923/>
8. NRC (National Research Council). Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI [Internet]. Washington (DC): National Academies Press; febrero de 1999 [citado el 28 de julio de 2021]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25121310/>
9. Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br Med J.* 2005;330(7485):223-6.
10. Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, et al. Residential radon and risk of lung cancer: A combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology.* 2005;16(2):137-45.
11. Enjo-Barreiro JR, Ruano-Ravina A, Pérez-Ríos M, Kelsey K, Varela-Lema L, Torres-Durán M, et al. Radon, Tobacco Exposure and Non-Small Cell Lung Cancer Risk Related to BER and NER Genetic Polymorphisms. *Arch Bronconeumol* [Internet]. 1 de abril de 2022 [citado el 15 de setiembre de 2023];58(4):311-22. Disponible en: <https://www.archbronconeumol.org/en-radon-tobacco-exposure-non-small-cell-articulo-S030028962100209X>

12. Martin-Gisbert L, Ruano-Ravina A, Varela-Lema L, Penabad M, Giraldo-Osorio A, Candal-Pedreira C, et al. Lung cancer mortality attributable to residential radon: a systematic scoping review. *J Expo Sci Environ Epidemiol* [Internet]. 2022 [citado el 10 de abril de 2023]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36577801/>
13. Ruano-Ravina A, Varela-Lema L, García Talavera M, García Gómez M, González Muñoz S, Santiago-Pérez MI, et al. Lung cancer mortality attributable to residential radon exposure in Spain and its regions. *Environ Res* [Internet]. 2021 [citado 19 de julio de 2021];199. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34051201/>
14. Darby SC, Whitely E, Howe GR, Hutchings SJ, Kusiak RA, Lubin JH, et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst* [Internet]. 1 de marzo de 1995 [citado el 14 de septiembre de 2023];87(5):378-84. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7853419/>
15. Richardson DB, Rage E, Demers PA, Do MT, DeBono N, Fenske N, et al. Mortality among uranium miners in North America and Europe: the Pooled Uranium Miners Analysis (PUMA). *Int J Epidemiol* [Internet]. 1 de abril de 2021 [citado el 14 de septiembre de 2023];50(2):633-43. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33232447/>
16. Kreuzer M, Fenske N, Schnelzer M, Walsh L. Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners. *Br J Cancer* [Internet]. 3 de noviembre de 2015 [citado el 14 de septiembre de 2023];113(9):1367-9. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26393888/>
17. Leuraud K, Billon S, Bergot D, Tirmarche M, Caër S, Quesne B, et al. Lung cancer risk associated to exposure to radon and smoking in a case-control study of French uranium miners. *Health Phys* [Internet]. Abril de 2007 [citado el 14 de septiembre de 2023];92(4):371-8. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17351502/>
18. IARC (International Agency for Research on Cancer). IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans. Volume 43: Man-Made Mineral Fibres and Radon. Lyon: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer; 1988.
19. Environmental Protection Agency. Radon Reference Manual. 1987. Report No.: EPA 520/1-87-20. In 1987.
20. Field RW, Steck DJ, Smith BJ, Brus CP, Fisher EL, Neuberger JS, et al. Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa Radon Lung Cancer Study. *Am J Epidemiol* [Internet]. 1 de junio de 2000 [citado el 14 de septiembre de 2023];151(11):1091-102. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10873134/>
21. Barros-Dios JM, Barreiro MA, Ruano-Ravina A, Figueiras A. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *Am J Epidemiol* [Internet]. 2002 [citado el 22 de julio de 2021];156(6):548-55. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12226002/>
22. Auvinen A, Mäkeläinen I, Hakama M, Castrén O, Pukkala E, Reisbacka H, et al. Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland. *J Natl Cancer Inst* [Internet]. 17 de julio de 1996 [citado el 23 de mayo de 2023];88(14):966-72. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8667427/>
23. Wichmann HE, Rosario AS, Heid IM, Kreuzer M, Heinrich J, Kreienbrock L. Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany. *Health Phys* [Internet]. Enero de 2005 [citado el 14 de septiembre de 2023];88(1):71-9. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15596992/>

24. Lubin JH, Wang ZY, Boice JD, Xu ZY, Blot WJ, De Wang L, et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer* [Internet]. 2004 [citado el 20 de julio de 2021];109(1):132-7. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14735479/>
25. Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, et al. Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health* [Internet]. 2006 [citado el 19 de julio de 2021];32 Suppl 1(1):1-84. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16538937/>
26. Consejo de la Unión Europea. Directiva 2013/59/Euratom del Consejo de 5 de diciembre de 2013 [Internet]. 2013. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32013L0059>
27. Ruano-Ravina A, Martín-Gisbert L, Kelsey K, Pérez-Ríos M, Candal-Pedreira C, Rey-Brandariz J, et al. An overview on the relationship between residential radon and lung cancer: what we know and future research. *Clin Transl Oncol* [Internet]. 2023 [citado el 14 de septiembre de 2023]; Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37610496/>
28. Ruano-Ravina A, Rodríguez MC, Cerdeira-Caramés S, Barros-Dios JM. Residential radon and lung cancer. *Epidemiology* [Internet]. Enero de 2009 [citado el 14 de septiembre de 2023];20(1): 155-6. Disponible en: [https://journals.lww.com/epidem/fulltext/2009/01000/residential\\_radon\\_and\\_lung\\_cancer.25.aspx](https://journals.lww.com/epidem/fulltext/2009/01000/residential_radon_and_lung_cancer.25.aspx)
29. Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A, Pérez-Ríos M, Castro-Bernárdez M, Abal-Arca J, Tojo-Castro M. Residential radon exposure, histologic types, and lung cancer risk. A case-control study in Galicia, Spain. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention* [Internet]. 1 de junio de 2012 [citado el 14 de septiembre de 2023];21(6):951-8. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-12-0146-T>
30. Torres-Durán M, Ruano-Ravina A, Parente-Lamelas I, Leiro-Fernández V, Abal-Arca J, Montero-Martínez C, et al. Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone area (Galicia, Spain). *Eur Respir J* [Internet]. 1 de octubre de 2014 [citado el 14 de septiembre de 2023];44(4):994-1001. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25034571/>
31. Lorenzo-González M, Ruano-Ravina A, Torres-Durán M, Kelsey KT, Provencio M, Parente-Lamelas I, et al. Lung cancer and residential radon in never-smokers: A pooling study in the Northwest of Spain. *Environ Res* [Internet]. 1 de mayo de 2019 [citado el 14 de septiembre de 2023];172:713-8. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30903971/>
32. Rodríguez-Martínez Á, Ruano-Ravina A, Torres-Durán M, Provencio M, Parente-Lamelas I, Vidal-García I, et al. Residential Radon and Small Cell Lung Cancer. Final Results of the Small Cell Study. *Arch Bronconeumol*. 1 de julio de 2022;58(7):542-6.
33. Lorenzo-Gonzalez M, Ruano-Ravina A, Torres-Duran M, Kelsey KT, Provencio M, Parente-Lamelas I, et al. Lung cancer risk and residential radon exposure: A pooling of case-control studies in northwestern Spain. *Environ Res* [Internet]. 1 de octubre de 2020 [citado el 16 de febrero de 2023];189. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32736146/>
34. Folesani G, Galetti M, Ranzieri S, Petronini PG, La Monica S, Corradi M, et al. Interaction between occupational radon exposure and tobacco smoke: a systematic review. <https://doi.org/10.1080/174763482022108795> [Internet]. 2022 [citado el 14 de septiembre de 2023];16(7):787-800. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17476348.2022.2108795>

35. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. Tobacco Smoke and Involuntary Smoking. IARC Press; 2004. 1452 p.
36. Ruano-Ravina A, Aragonés N, Pérez-Ríos M, López-Abente G, Barros-Dios JM. Residential radon exposure and esophageal cancer. An ecological study from an area with high indoor radon concentration (Galicia, Spain). *Int J Radiat Biol* [Internet]. 2014 [citado el 14 de septiembre de 2023];90(4):299-305. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24460133/>
37. Ruano-Ravina A, Aragonés N, Kelsey KT, Pérez-Ríos M, Piñeiro-Lamas M, López-Abente G, et al. Residential radon exposure and brain cancer: an ecological study in a radon prone area (Galicia, Spain). *Sci Rep* [Internet]. 1 de diciembre de 2017 [citado el 23 de mayo de 2023];7(1). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28620182/>
38. Barbosa-Lorenzo R, Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A. Radon and stomach cancer. *Int J Epidemiol* [Internet]. 1 de abril de 2017 [citado el 14 de septiembre de 2023];46(2):767-8. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1093/ije/dyx011>
39. Barbosa-Lorenzo R, Barros-Dios JM, Raíces Aldrey M, Cerdeira Caramés S, Ruano-Ravina A. Residential radon and cancers other than lung cancer: a cohort study in Galicia, a Spanish radon-prone area. *Eur J Epidemiol*. 1 de abril de 2016;31(4):437-41.
40. Salgado-Espinosa T, Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A. Radon exposure and oropharyngeal cancer risk. *Cancer Lett* [Internet]. 1 de diciembre de 2015 [citado el 14 de septiembre de 2023];369(1):45-9. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26335172/>
41. Ruano-Ravina A, Cameselle-Lago C, Torres-Durán M, Pando-Sandoval A, Dacal-Quintas R, Valdés-Cuadrado L, et al. Indoor Radon Exposure and COPD, Synergic Association? A Multicentric, Hospital-Based Case-Control Study in a Radon-Prone Area. *Arch Bronconeumol* [Internet]. 1 de octubre de 2021 [citado el 14 de septiembre de 2023];57(10):630-6. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35699045/>
42. Turner MC, Krewski D, Chen Y, Pope CA, Gapstur SM, Thun MJ. Radon and COPD mortality in the American Cancer Society Cohort. *Eur Respir J* [Internet]. 1 de mayo de 2012 [citado el 14 de septiembre de 2023];39(5):1113-9. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22005921/>
43. Lehrer S, Rheinstein PH, Rosenzweig KE. Association of Radon Background and Total Background Ionizing Radiation with Alzheimer's Disease Deaths in U.S. States. *J Alzheimers Dis* [Internet]. 2017 [citado el 14 de septiembre de 2023];59(2):737-41. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28671130/>
44. Gómez-Anca S, Barros-Dios JM. Radon Exposure and Neurodegenerative Disease. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2 de octubre de 2020 [citado el 14 de septiembre de 2023];17(20):1-17. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33066046/>
45. Cinelli G, Tollefsen T, Bossew P, Gruber V, Bogucarskis K, De Felice L, et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. *J Environ Radioact* [Internet]. 1 de enero de 2019 [citado el 20 de enero de 2022];196:240-52. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29496295/>
46. Consejo de Seguridad Nuclear. Mapa del potencial de radón en España - CSN [Internet]. [citado el 1 de octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>
47. Martín-Gisbert L, Candal-Pedreira C, García-Talavera San Miguel M, Pérez-Ríos M, Barros-Dios J, Varela-Lema L, et al. Radon exposure and its influencing factors across 3,140 workplaces in Spain. *Environ Res* [Internet]. 15 de diciembre de 2023 [citado el 10 de noviembre de 2023];239. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37852462/>

48. Martín Sánchez A, de la Torre Pérez J, Ruano Sánchez AB, Naranjo Correa FL. Radon in workplaces in Extremadura (Spain). *J Environ Radioact* [Internet]. Mayo de 2012 [citado el 26 de enero de 2022];107:86-91. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22326021/>
49. Branco PTBS, Martín-Gisbert L, Sá JP, Ruano-Raviña A, Barros-Dios J, Varela-Lema L, et al. Quantifying indoor radon levels and determinants in schools: A case study in the radon-prone area Galicia-Norte de Portugal Euroregion. *Science of The Total Environment* [Internet]. 15 de julio de 2023 [citado el 26 de abril de 2023];882:163566. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972302185X>
50. Ruano-Ravina A, Narocki C, López-Jacob MJ, García Oliver A, Calle Tierno M de la C, Peón-González J, et al. Indoor radon in Spanish workplaces. A pilot study before the introduction of the European Directive 2013/59/Euratom. *Gac Sanit* [Internet]. 1 de noviembre de 2019 [citado el 26 de junio de 2021];33(6):563-7. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0213911118301420>
51. ICRP. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 2007; Disponible en: [https://www.icrp.org/docs/ICRP\\_Publication\\_103-Annals\\_of\\_the\\_ICRP\\_37\(2-4\)-Free\\_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf)
52. Real Decreto 732/2019 de 20 de diciembre [Internet]. 2019 p. 140488 a 140674. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/12/20/732>
53. 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. [Internet]. 2022 p. BOE-A-2022-21682. Disponible en: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-21682](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-21682)
54. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE núm. 178, de 26 de julio de 2001, páginas 27284 a 27393.
55. Consejo de Seguridad Nuclear. Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural. 2011.
56. ICRP. ICRP Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. In 2018. p. Ann. ICPR 46 (3-4).
57. ICRP. ICRP Publication 65. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Vol. Ann. ICPR 23 (2). 1993.
58. Stewart BW, Wild CP. World Cancer Report 2014. *World Cancer Report 2014*. 2014. 16-53 p.
59. European Code Against Cancer-Pollutants [Internet]. [citado el 20 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://cancer-code-europe.iarc.fr/index.php/en/ecac-12-ways/pollutants-recommendation>
60. WHO. WHO Lung cancer fact sheet [Internet]. 2023 [citado el 14 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lung-cancer>
61. Poon C, Haderi A, Roediger A, Yuan M. Should we screen for lung cancer? A 10-country analysis identifying key decision-making factors. *Health Policy (New York)*. 1 de setiembre de 2022;126(9):879-88.

62. Couraud S, Cortot AB, Greillier L, Gounant V, Menecier B, Girard N, et al. From randomized trials to the clinic: is it time to implement individual lung-cancer screening in clinical practice? A multidisciplinary statement from French experts on behalf of the french intergroup (IFCT) and the groupe d'Oncologie de langue française (GOLF). *Annals of Oncology*. 1 de marzo de 2013;24(3):586-97.
63. Frauenfelder T, Puhan MA, Lazor R, Von Garnier C, Bremerich J, Niemann T, et al. Early Detection of Lung Cancer: A Statement from an Expert Panel of the Swiss University Hospitals on Lung Cancer Screening. *Respiration* [Internet]. 1 de febrero de 2014 [citado el 14 de septiembre de 2023];87(3):254-64. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1159/000357049>
64. Building a search strategy - Systematic searching - Oppaat | Guides at Tampere University Library [Internet]. [citado el 15 de setiembre de 2023]. Disponible en: <https://libguides.tuni.fi/systematic-searching/search-strategy>
65. Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ* [Internet]. 2021 [citado el 23 de agosto de 2021];372. Disponible en: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n160>
66. Fan YG, Hu P, Jiang Y, Chang RS, Yao SX, Wang W, et al. Association between sputum atypia and lung cancer risk in an occupational cohort in Yunnan, China. *Chest* [Internet]. 2009 [citado el 14 de septiembre de 2023];135(3):778-85. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19265088/>
67. Fan Y, Su Z, Wei M, Liang H, Jiang Y, Li X, et al. Long-term lung cancer risk associated with sputum atypia: A 27-year follow-up study of an occupational lung screening cohort in Yunnan, China. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*. 1 de noviembre de 2021;30(11):2122-9.
68. Marek W, Kotschy-Lang N, Muti A, Kohler Ch, Nielsen L, Topalidis Th, et al. Can semi-automated image cytometry on induced sputum become a screening tool for lung cancer?: Evaluation of quantitative semi-automated sputum cytometry on radon and uranium-exposed workers. *European Respiratory Journal*. 1 de diciembre de 2001;18(6):942-50.
69. Marek W, Richartz G, Philippou S, Marek L, Kotschy-Lang N. Sputum screening for lung cancer in radon exposed uranium miners: a comparison of semi-automated sputum cytometry and conventional cytology. *PubMed. J Physiol Pharmacol* [Internet]. Noviembre de 2007 [citado el 14 de septiembre de 2023];58:349-61. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18204147/>
70. de la Hoz RE, Weissman DN. Consideration of Occupational and Environmental Lung Carcinogen Exposures for Lung Cancer Screening Using Low-Dose Chest CT. *Chest*. 1 de octubre de 2018;154(4):996-7.
71. Schneider J, Peter Presek Ā, Braun A, Nat R, Weitowitz HJ. Serum Levels of Pantropic p53 Protein and EGF-Receptor, and Detection of Anti-p53 Antibodies in Former Uranium Miners (SDAG Wismut). *Am J Ind Med* [Internet]. 1999 [citado el 14 de septiembre de 2023];36:602-9. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/>
72. Qiao YL, Tockman MS, Li I, Erozan YS, Yao SX, Barrett MJ, et al. A case-cohort study of an early biomarker of lung cancer in a screening cohort of Yunnan tin miners in China. *PubMed. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* [Internet]. 6 de noviembre 1997 [citado el 14 de septiembre de 2023]; Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9367062/>
73. Markowitz SB, Dickens B. Screening for Occupational Lung Cancer: An Unprecedented Opportunity. *Clin Chest Med*. 1 de diciembre de 2020;41(4):723-37.

74. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* [Internet]. 2021 [citado el 23 de agosto de 2021];372(8284):n21. Disponible en: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>
75. Concentration élevée de radon dans une maison à Bessines: l'IRSN publie son rapport d'expertise [Internet]. [citado el 16 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.irsn.fr/actualites/concentration-elevee-radon-dans-maison-bessines-lirsn-publie-son-rapport-dexpertise>
76. Delva F, Margery J, Laurent F, Petitprez K, Pairon JC. Medical follow-up of workers exposed to lung carcinogens: French evidence-based and pragmatic recommendations. *BMC Public Health* [Internet]. 14 de febrero de 2017 [citado el 14 de septiembre de 2023];17(1):1-8. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28193266/>
77. OTCA28. 'Lung cancer screening in risk groups' (Final assessment now available). EUnetHTA [Internet]. [citado el 16 de setiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.eunethta.eu/otca28/>
78. Delva F, Laurent F, Paris C, Belacel M, Brochard P, Bylicki O, et al. LUCSO-1-French pilot study of Lung Cancer Screening with low-dose computed tomography in a smokers population exposed to Occupational lung carcinogens: Study protocol. *BMJ Open*. 1 de marzo de 2019;9(3).
79. Kerpel-Fronius A, Tammemägi M, Cavic M, Henschke C, Jiang L, Kazerooni E, et al. Screening for Lung Cancer in Individuals Who Never Smoked: An International Association for the Study of Lung Cancer Early Detection and Screening Committee Report. *Journal of Thoracic Oncology*. 1 de enero de 2022;17(1):56-66.
80. Rampinelli C, De Marco P, Origgi D, Maisonneuve P, Casiraghi M, Veronesi G, et al. Exposure to low dose computed tomography for lung cancer screening and risk of cancer: secondary analysis of trial data and risk-benefit analysis. *BMJ* [Internet]. 8 de febrero de 2017 [citado el 22 de setiembre de 2023];356:347. Disponible en: <https://www.bmj.com/content/356/bmj.j347>
81. Ruano-Ravina A, Wakeford R. The Increasing Exposure of the Global Population to Ionizing Radiation. *Epidemiology* [Internet]. 1 de marzo de 2020 [citado el 28 de julio de 2022];31(2):155-9. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31809337/>

El radón interior es un carcinógeno humano vinculado causalmente con el cáncer de pulmón desde hace décadas. Se conoce que existe una relación dosis respuesta lineal y estadísticamente significativa entre la exposición y el riesgo de cáncer de pulmón y que hay una interacción con el consumo de tabaco. En el ámbito laboral existe obligación de no sobrepasar el nivel de referencia de 300 Bq/m<sup>3</sup> en puestos de trabajo y si esto ocurre, debe hacerse una mitigación o considerar a la persona trabajadora como expuesta ocupacionalmente si la mitigación no es posible.

No obstante, no hay guías o recomendaciones para realizar una vigilancia de la salud específica para trabajadores expuestos, a nivel nacional o europeo, y el protocolo de vigilancia de radiaciones ionizantes presenta limitaciones en su aplicación a estos trabajadores. En este documento se reflexiona acerca de la pertinencia de un protocolo específico de estos trabajadores expuestos a radón y que además considere características concretas como duración de la exposición, concentración, y consumo de tabaco para aplicar medidas de vigilancia específicas. Se indica también la pertinencia de elaborar dicho protocolo aplicado al contexto español.

