

A network diagram consisting of dark blue nodes of varying sizes connected by thin lines. A large, double-lined dark blue circle is positioned on the right side, containing the text "Acción frente al Radón" in a bold, red, serif font.

Acción frente al Radón



MINISTERIO
DE SANIDAD

COLECCIÓN ESTUDIOS, INFORMES E INVESTIGACIÓN
MINISTERIO DE SANIDAD
2021

Edita y Distribuye:

© MINISTERIO DE SANIDAD
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones
Paseo del Prado, 18, 28014 Madrid

NIPO:
Depósito Legal: pendiente tramitación

Autores:

Ministerio de Sanidad

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Consejo de Seguridad Nuclear



Acción frente al radón

ÍNDICE

Introducción	2
El radón como factor de riesgo para la salud.....	5
Presencia de radón en ambientes interiores o cerrados.....	6
Efectos en salud.....	9
1. Radón y cáncer de pulmón	9
2. Factores adicionales de riesgo	16
Ordenamiento Europeo	19
Diagnóstico de situación	24
Situación actual en el ámbito europeo e internacional	25
Situación actual en España.....	29
Bibliografía	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios sobre el radón residencial y el cáncer de pulmón en España	13
Tabla 2. Porcentaje de mortalidad por cáncer de pulmón en Galicia atribuible a la exposición al radón y el tabaco.	14
Tabla 3. Estimación de la proporción de casos atribuibles al radón en distintos países europeos.	15

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Vías comunes de entrada del radón. Puntos débiles	7
Ilustración 2. Resumen del riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón interior basado en análisis agrupados internacionales que combinan los datos individuales de varios estudios de casos y controles.....	10
Ilustración 3. . Porcentaje de mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón por Comunidades Autónomas, 2017.	14
Ilustración 4. Existencia de un Plan Nacional de acción frente al radón.....	25
Ilustración 5. Mapa europeo del radón.....	26
Ilustración 6. Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural en la España peninsular...	29
Ilustración 7. Mapa del potencial del radón	34
Ilustración 8. Mapa zonas de actuación prioritaria.....	35

GLOSARIO DE TÉRMINOS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

BEIR	Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes
BSS	Normas de Seguridad Básicas
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
CTE	Código Técnico de Edificación
ENAC	Entidad Nacional de Acreditación
ERA	Asociación Europea del Radón
IARC	Agencia Internacional de Investigación en Cáncer
IETcc	Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
LARUC	Laboratorio de Radiactividad de la Universidad de Cantabria
MARNA	Mapa de Radiación Gamma Natural en España
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMS	Organización Mundial de la Salud
RADPAR	Proyecto Europeo de Prevención y Remediación frente al Radón
RPSRI	Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes
SEPR	Sociedad Española de Protección Radiológica
USC	Universidad de Santiago de Compostela
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
UTPR	Unidades Técnicas de Protección Radiológica

Resumen ejecutivo

La Directiva 2013/59/Euratom establece las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y en particular, insta a los Estados Miembros a desarrollar planes de actuación con el objetivo último de reducir el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón.

Existe abundante evidencia científica que demuestra la asociación entre exposición a radón en ambientes interiores y cáncer de pulmón. El radón está reconocido como agente carcinógeno humano de categoría 1, lo que, asociado al hecho de que un número significativo del actual parque de edificios presenta concentraciones elevadas de este gas, hace que la exposición al radón se considere como un problema para la salud pública. En relación con ello, cabe destacar que los efectos de la exposición al radón se encuentran notablemente aumentados en fumadores debido al efecto sinérgico de radón y tabaco.

El radón se produce como consecuencia de la desintegración del radio (Ra-226), elemento de la serie del uranio, que es ubicuo en las rocas y los suelos, aunque se encuentra en mayores concentraciones en zonas hercínicas. Desde el subsuelo este gas migra al aire interior de viviendas y edificios, en los cuales tiende a acumularse, aunque esta acumulación puede prevenirse o mitigarse mediante distintas soluciones constructivas. En España, las zonas de carácter granítico se encuentran principalmente en Galicia, Extremadura, Castilla y León y Madrid. Es de destacar que los efectos de la exposición al radón se encuentran notablemente aumentados en fumadores.

Siguiendo la Directiva 2013/59/Euratom, se desarrolla la acción frente al radón destinado a reducir los efectos en la salud que se derivan de la exposición a este gas en ambientes interiores. En su desarrollo e implementación, el presente documento pretende conocer la magnitud del problema, reducir la exposición y potenciar la investigación en ambientes interiores, mediante la estimación de la concentración de radón en dichos ambientes, la elaboración de mapas, el desarrollo de una evaluación de riesgo que permita establecer niveles de referencia, y en consecuencia el establecimiento de medidas correctoras y preventivas, así como medidas de comprobación y validación, y la elaboración de una guía para el público. Para ello se recopila información básica sobre el radón y los riesgos que conlleva para la salud y se presenta un análisis de la situación en España, incluyendo la información disponible sobre la exposición al gas. Con esto, se busca facilitar la participación de todos los actores interesados y servir de punto de partida para el desarrollo del futuro Plan Nacional contra el Radón.

1

Introducción

El radón (Rn-222) es un isótopo radiactivo perteneciente al grupo de los gases nobles, gaseoso, incoloro, inodoro, más denso que el aire y moderadamente soluble en el agua y otros líquidos. Procede de la cadena de desintegración del uranio (U-238) que está presente en las rocas de la corteza terrestre y es descendiente directo del radio (Ra-226).

El radón y sus descendientes de vida corta (Po-218, Pb-214, Bi-214 y Po-214) se adhieren a las partículas en suspensión en el del aire, preferentemente las de 0,1 micras, que al ser inhaladas quedan retenidas en diferentes tramos del aparato respiratorio alcanzando las partes más profundas de este. Son los descendientes del radón los que emiten radiación alfa que impacta en las células del epitelio pulmonar, pudiendo producir alteraciones moleculares y finalmente cáncer de pulmón. El radón, por tanto, es la fuente más importante de radiación natural a la que se encuentra expuesta la población general (68).

El radón que emana del suelo y exhala del terreno, penetra en las edificaciones, fundamentalmente por difusión o por advección a través de poros, grietas y fisuras de las cimentaciones, aunque también puede entrar, en menor medida, procedente de los materiales de construcción o del agua corriente. En general, las concentraciones de radón en los edificios disminuyen a medida que nos alejamos del suelo, aunque en ocasiones pueden encontrarse altas concentraciones de radón en los pisos más elevados debido a la potencial contribución de los materiales de construcción y el agua y por efecto chimenea.

El radón fue declarado carcinógeno humano tipo I por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) (41) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) (79). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que entre un 3 y un 14% de los casos de cáncer de pulmón a nivel mundial son atribuibles al radón residencial (57). De acuerdo con estas cifras, el radón representa la segunda causa más importante de cáncer de pulmón, después del tabaco, y la primera en no fumadores.

En España, la exposición ocupacional al radón está regulada de manera genérica desde 2001 por el título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), aunque no fue hasta 2011 cuando se emitió legislación específica que aclarase y facilitase la aplicación de este título (Instrucción IS-33 del CSN).

Desde entonces se han publicado otros documentos como la Guía de Rehabilitación frente al radón publicada en el Código Técnico de Edificación (51), cuyo objetivo es constituir una herramienta de ayuda para el diseño de soluciones de protección frente al radón. Además, proporciona los conceptos fundamentales necesarios que apoyan el correcto diagnóstico de las vías de entrada del radón, ilustra el proceso de realización de las mediciones de radón, así como presenta las soluciones de protección y aporta criterios para la elección de las soluciones más adecuadas a cada caso.

Esta Guía pretende ser, por un lado, una herramienta fundamental para los proyectistas ante el reto de diseñar soluciones de protección frente al radón y, por otro, una fuente de información para los usuarios de edificios afectados, para que conozcan de forma aproximada el alcance de las soluciones posibles, así como las distintas vías de entrada del radón en el edificio y la influencia que puede llegar a tener el comportamiento de los propios usuarios en la concentración de este gas.

En el ámbito europeo, en 2013 se publicó la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes (en adelante Directiva 2013/59/Euratom). Esta Directiva, en fase de transposición, establece en sus artículos 54, 74 y 103, y en su anexo XVIII, la necesidad de que los Estados Miembros lleven a cabo planes de acción para reducir a medio y largo plazo el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón. Estos requisitos suponen ampliar el alcance y el nivel de protección del actual marco regulador, así como poner en marcha medidas de comunicación y apoyo más allá del ámbito jurídico

2

El radón como factor de riesgo para la salud

El radón es la fuente de exposición a radiación ionizante natural más importante para los seres humanos. El radón es considerado la primera causa de cáncer de pulmón en no fumadores y la segunda en fumadores y ex fumadores.

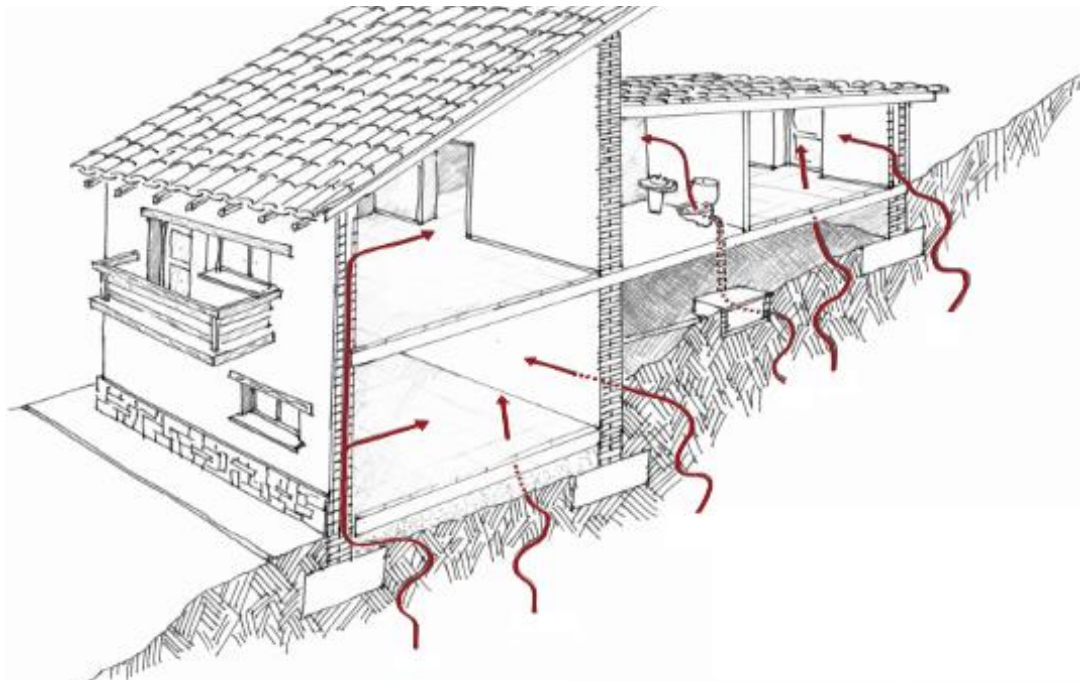
La relación entre el radón y el cáncer de pulmón fue identificada por primera vez en los trabajadores de minas de uranio que se encontraban expuestos a altas concentraciones de gas radón (11, 12).

Tras ello, han sido desarrollados estudios epidemiológicos en los cuales se ha observado el riesgo derivado de la relación entre el cáncer de pulmón y exposición a radón en interiores. De estos cabe destacar los tres meta-análisis llevados a cabo en Europa (23, 24), Norteamérica (45,46) y China (53), respectivamente. Sus resultados confirmaron que la exposición a radón en viviendas puede considerarse como un factor de riesgo para el desarrollo de cáncer de pulmón.

Presencia de radón en ambientes interiores o cerrados

El radón se produce, de forma natural, en el subsuelo, y alcanza a la superficie, en mayor o menor medida, dependiendo del tipo de terreno. Se produce más radón en zonas graníticas que en las arcillosas o calcáreas, lo cual se debe a que el contenido de uranio y torio en el granito es mayor en este tipo de suelos que en otros como las areniscas, carbonatadas o basálticas (57).

Al aire libre el radón se diluye rápidamente, tiene concentraciones medias muy bajas (entre 5 Bq/m³ a 15 Bq/m³) y no suele representar ningún problema, salvo situaciones anticiclónicas donde la altura de mezcla disminuye considerablemente. En cambio, en espacios cerrados, las concentraciones de radón son más elevadas, en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, donde se registran los niveles más altos generalmente por falta de ventilación. En edificios (como viviendas, escuelas y oficinas), las concentraciones de radón varían de <10 Bq/m³ hasta más de 10.000 Bq/m³ (57). El radón puede acceder a los edificios a través del terreno bajo el que está construida la vivienda, a través de los materiales utilizados para su construcción, o procedente de aguas subterráneas (33).

Ilustración 1. Vías comunes de entrada del radón. Puntos débiles

Fuente: Frutos Vázquez B et al. (2010).

El terreno es la principal fuente emisora de radón en la naturaleza, debido a la concentración de uranio (U-238) que se puede encontrar en él. Determinadas zonas de España cuentan con un elevado contenido de dicho elemento en el subsuelo, por lo que presentan una mayor probabilidad de que se localicen concentraciones elevadas de radón en el interior de las viviendas (35).

La principal forma de entrada del radón a los edificios y viviendas se debe a la filtración desde el terreno a través de grietas en los suelos y paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables, o pequeños poros en las paredes. Las viviendas antiguas o aquellas con deficiencias constructivas tienen una mayor probabilidad de encontrar elevadas concentraciones de radón en el interior de las mismas, debido generalmente a un peor aislamiento del terreno (32).

Otra fuente emisora de radón son algunos materiales empleados en la construcción, debido a los contenidos de radio (Ra-226), descendiente directo del uranio (U-238), que poseen. El radón que exhalan estos materiales puede llegar a contribuir en torno al 20% de la concentración total de radón en una vivienda, favoreciendo el aumento de la concentración en torno a 10 Bq/m^3 y 20 Bq/m^3 . Entre los materiales que cuentan con contenido de radio (Ra-226) se encuentran los ladrillos cerámicos, hormigones, morteros de albañilería, yesos,

cementos o cenizas volantes. Las elevadas concentraciones de radón que se encuentran en los pisos superiores suelen estar relacionadas con los materiales de construcción (59).

La utilización de aguas subterráneas para el uso doméstico procedentes de pozos o manantiales, en aquellas zonas donde exista una elevada concentración de radón, puede favorecer un aumento de concentración de radón en las viviendas. La presencia del radón en el agua se debe a la liberación procedente de rocas subterráneas. Una vez disuelto el radón en el agua subterránea accede al interior de la vivienda por sumideros o desagües, o bien difundándose en el aire desde grifos y duchas cuando se usa ésta agua (33).

Es importante destacar que la concentración de radón en las viviendas no sólo depende del tipo de fuente de exposición, sino que existen otros factores ambientales que influyen en las concentraciones de radón (33), como son:

- Las infiltraciones de aire producidas por el viento pueden modificar las concentraciones de radón.
- Una mayor presión atmosférica ayudará a disminuir la entrada de radón en las viviendas debido al descenso del gradiente de presiones que existe entre el terreno y el interior de la vivienda. En cambio, si se produce un descenso en la presión atmosférica, se puede dar una mayor exhalación de radón desde el terreno al interior de la vivienda.
- El radón es más pesado que el aire, por lo que la altura respecto del suelo influye en la probabilidad de encontrar radón en las viviendas. Por ello, suelen darse mayores concentraciones de radón en pisos bajos y sótanos.
- La humedad ambiental y las lluvias saturan los suelos. Esta saturación genera que los poros se colmaten y el radón se disuelva en el agua desplazándose por corrientes subterráneas y obstaculizando la exhalación a la superficie.
- La temperatura afecta a los movimientos convectivos del aire como medio de transporte del radón, favoreciendo un incremento de las concentraciones de radón por las noches respecto del día, o en función de la estación del año.

Efectos en salud

1. Radón y cáncer de pulmón

La relación causal del radón y las enfermedades respiratorias comienza a observarse en el siglo XVI debido a la mortalidad observada en determinados grupos de mineros. No es hasta el siglo XIX cuando se descubre que dicha mortalidad era debida al cáncer de pulmón.

Tras diversos estudios realizados en mineros, la USEPA en 1987 establece el valor de 148 Bq/m³ como la concentración de radón a partir de la cual deberían tomarse medidas de reducción en los domicilios; y un año más tarde, la IARC clasifica el radón y sus descendientes como carcinógenos humanos del Grupo 1¹.

Asimismo, en 1987 el Comité sobre los Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes publicó los resultados de un análisis pormenorizado de los estudios realizados sobre el radón en mineros y sobre el radón en animales, el BEIR IV «*Biological Effects of Ionizing Radiation*», en el cual se asocia el riesgo de padecer cáncer de pulmón con la exposición a radón. En 1999 se publicó una actualización del estudio BEIR IV (denominado BEIR VI), donde se indicó que el radón es el segundo factor de riesgo de cáncer de pulmón después del tabaco. Para la realización de este segundo estudio se tuvieron en cuenta 11 estudios de cohortes donde se incluyó un total de 68.000 mineros de Europa, América del Norte, Asia y Australia (11, 12).

Los estudios realizados sobre mineros apuntaban a la posibilidad de que el riesgo pudiera aparecer en la población general debido a la exposición que tiene lugar en el interior de las viviendas y edificios de trabajo. Desde entonces, se han realizado numerosos estudios epidemiológicos observacionales sobre el radón residencial y el riesgo de cáncer de pulmón en distintos países, que a pesar de cierta heterogeneidad han seguido revelando una asociación causal entre la exposición prolongada al radón residencial y el cáncer de pulmón.

Existen tres análisis agrupados que son tomados como referencia en la relación entre el radón residencial y el cáncer de pulmón: el análisis agrupado europeo, el análisis agrupado norteamericano y el análisis agrupado chino (23, 24, 45, 53). Todos ellos coinciden en identificar un incremento del 16% (IC95%: 5-31%), del 11% (IC95%: 0-28%) y del 13% (IC95%: 1-36%) respectivamente en el riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón residencial (Ilustración 2). De los tres estudios, es el europeo el que proporciona unos resultados más robustos y por ello se toma como referencia, puesto que es el único que se basa en la concentración media de radón a largo plazo para realizar la valoración detallada de los riesgos

¹ Procesos industriales, compuestos químicos o grupos de los mismos que son cancerígenos para el hombre. Las condiciones de la exposición conllevan exposiciones probadas como carcinógenas para el ser humano.

de radón residencial. Por el contrario, los otros dos estudios se realizan a partir de la concentración medida puntualmente de radón.

Todos los estudios coinciden en que el porcentaje de riesgo no varía ante cambios de edad o sexo. También establecen una relación incremental (a mayor exposición, mayor riesgo) de carácter lineal, sin que se pueda determinar un nivel umbral por debajo del cual no exista riesgo.

Tras la publicación de múltiples estudios, la OMS publica en el año 2009 un «*Manual sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública*», exponiendo los resultados obtenidos hasta la fecha de estudios epidemiológicos que ponían de manifiesto que el radón en las viviendas aumentaba el riesgo de cáncer de pulmón en la población general, aunque no se demostraba otros efectos del radón sobre la salud. Además, destaca que es mucho más probable que el radón provoque cáncer de pulmón en personas que fuman o han fumado a lo largo de su vida, que en quienes nunca lo han hecho, mostrando un efecto sinérgico entre el radón y el tabaco. Por lo tanto, el radón se ha convertido así en la segunda causa externa de cáncer de pulmón, solo superado por el tabaco, y la primera en no fumadores.

Como se destacaba en los meta-análisis, también se expone en este informe de la OMS que, hasta la fecha, no se conoce una concentración umbral por debajo de la cual la exposición al radón no suponga ningún riesgo y que incluso concentraciones de radón muy bajas pueden dar lugar a un pequeño incremento en el riesgo de cáncer de pulmón (56, 84).

Ilustración 2. Resumen del riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón interior basado en análisis agrupados internacionales que combinan los datos individuales de varios estudios de casos y controles

	N.º de estudios incluidos	N.º de casos de cáncer de pulmón	N.º de controles	Periodo de exposición (años) ^a	Incremento porcentual del riesgo de cáncer de pulmón por cada 100 Bq/m ³ de aumento de la concentración de radón	
					basado en el radón medido	basado en la concentración media de radón a largo plazo ^b
Análisis agrupados de estudios sobre el radón en el interior de las viviendas						
Europeo (Darby et al. 2005, 2006)	13	7 148	14 208	5-35	8 (3, 16)	16 (5, 31)
Norteamericano (Krewski et al. 2005, 2006)	7	3 662	4 966	5-30	11 (0, 28)	-
Chino (Lubin et al. 2004)	2	1 050	1 995	5-30	13 (1, 36)	-

^a Considerando las concentraciones de radón durante el periodo comprendido entre 35 y 5 años antes de la fecha del diagnóstico en los casos de cáncer de pulmón.

^b Realizando los ajustes correspondientes a la variabilidad aleatoria interanual de la concentración de radón en interiores
Fuente: Organización Mundial de la Salud (2015).

Estudios sobre radón en España

En España también existen estudios específicos sobre la relación entre el radón residencial y el cáncer de pulmón. Hasta el momento, se han desarrollado cuatro estudios de casos y controles, tres de ellos realizados en Galicia y uno en Cantabria. Los estudios gallegos han reportado resultados donde se manifiesta que existe riesgo de cáncer de pulmón por radón incluso a partir de bajas concentraciones, junto con una fuerte sinergia con el consumo de tabaco, similares a los encontrados en el marco europeo. En cambio, el estudio realizado en Cantabria no encontró asociación entre el radón y el cáncer de pulmón, debido posiblemente a que Cantabria no es una zona de alta exposición al radón como lo es Galicia (9, 10, 52, 77).

Galicia está catalogada como una zona de riesgo por radón residencial, donde más del 20% de las viviendas cuentan con unas mediciones de concentración de radón en sus hogares mayores de 200 Bq/m³, de ahí que la mayoría de estudios estén centrados en esta área geográfica.

El primer estudio, publicado en 2002, incluye 163 casos y 241 controles en el área de Santiago de Compostela (Galicia). La media aritmética de radón fue de 129,5 Bq/m³, y la media geométrica de 69,3 Bq/m³; el 22,2% de las viviendas estudiadas se encontraban expuestas a una concentración de radón de 148 Bq/m³ o más. Los resultados observaron un riesgo de 2,73 (IC95% 1,12-5,48); 2,48 (IC95% 1,29-6,79) y 2,96 (IC95% 1,29-6,79) para los expuestos a 37-55,1; 55,2-147,9 y 148 Bq/m³ o más, tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m³. Los resultados obtenidos en este estudio participaron en la elaboración del análisis agrupado europeo (9).

Posteriormente, en 2007, se publicó un estudio realizado en Cantabria donde no se encontró una asociación entre las concentraciones de radón residencial y el cáncer de pulmón. El estudio consta de 86 casos y 172 controles de Cantabria entre enero de 2002 y agosto de 2003. La exposición media registrada en los domicilios fue de 46,8 Bq/m³ para los casos, y de 42,9 Bq/m³ en los controles. Los resultados obtenidos muestran un riesgo de 0,95 (IC95% 0,33-2,65) para los expuestos a más de 37 Bq/m³, tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m³. La región de Cantabria se caracteriza por bajos valores de actividad de radón, de ahí los resultados obtenidos en el estudio (52).

En 2012 se publica otro estudio realizado en el área de Santiago de Compostela y Ourense en el que se incluyen 349 casos y 513 controles entre 2004 y 2008. Los resultados indicaron que hay más casos que controles expuestos a altas concentraciones de radón, entre el 18,6% y el 20,1% de los casos estaban expuestos a 101-147 y >147 Bq/m³ respectivamente, en comparación con el 14% y el 15% de los controles. Se observó que el riesgo de cáncer de pulmón sí se incrementaba con la exposición al radón residencial. El riesgo era estadísticamente significativo a partir de 50 Bq/m³ con unos riesgos del 1,87 (IC95% 1,21-

2,88); 2,25 (IC95% 1,32-3,84) y 2,21 (IC95% 1,33-3,69) para los expuestos a 50-100 Bq/m³, 101-147 Bq/m³, y más de 148 Bq/m³, comparado con los expuestos a menos de 50 Bq/m³ respectivamente (10).

Por último, en 2014 se publica un estudio que tiene como objetivo estimar el efecto de la exposición al radón residencial y el riesgo de cáncer de pulmón en no fumadores y conocer si el humo de tabaco ambiental modifica el efecto del radón residencial. El estudio se realiza en Galicia y Asturias tomando 192 casos y 329 controles entre 2011 y 2013. El 48% de los casos se encontraba expuesto a una exposición >200 Bq/m³ comparado con el 29,4% de los controles. Los resultados muestran un riesgo significativo de 2,42 (IC95% 1,45-4,06) para los no fumadores expuestos a >200 Bq/m³ en comparación con los expuestos a <100 Bq/m³. Junto con esto, se observa un riesgo de 1,99 (IC95% 1,16-3,41) para los expuestos a concentraciones de radón >200 Bq/m³ y que no han vivido con fumadores. Este riesgo cambia a 2,75 (IC95% 1,44-5,25) para aquellos que expuestos a la misma concentración de radón, y que han vivido entre 1 y 35 años con fumadores. Se trata del primer estudio que sugiere la posible asociación entre la exposición al radón residencial y al humo del tabaco ambiental en el riesgo de cáncer de pulmón (77).

Junto a estos estudios, existe un estudio de cohortes llevado a cabo recientemente en Galicia donde se relaciona la asociación entre cáncer de pulmón y radón usando el mapa de radón de Galicia (realizado a partir de un estudio cross-sectional) y controles de un estudio previo de casos-controles. De un total de 2.127 participantes fueron finalmente analizados 1.932 y se identificaron 24 casos de cáncer de pulmón. El riesgo relativo para la categoría de los individuos expuestos a 50 Bq/m³ o más fue 1,2 (95%CI: 0,5-2,8), aunque no se ha observado una asociación estadísticamente significativa entre la exposición al radón residencial y el cáncer de pulmón. Sin embargo, parece que, con una muestra de individuos de mayor edad, el riesgo de cáncer de pulmón habría sido mayor (8).

Además de estudios de casos-controles y cohortes, en 2015 se llevó a cabo un estudio ecológico en Galicia, cuyo objetivo fue analizar la correlación entre mortalidad por cáncer de pulmón y exposición a radón residencial en los municipios gallegos. En este estudio, se incluyeron 192 municipios con al menos 3 mediciones de radón residencial cada uno. Para obtener los datos relativos a la mortalidad por cáncer de pulmón, el número de muertes observadas se obtuvo del Registro de Mortalidad de Galicia, para calcularse posteriormente las razones de mortalidad estandarizadas (RME) de cáncer de pulmón para ambos sexos durante el período 1980-2009. Las concentraciones medianas de radón residencial para cada municipio se correlacionaron con las RME por cáncer pulmonar y los resultados indicaron que la concentración mediana de radón residencial en los municipios analizados fue de 75 Bq/m³, variando en un rango de 40,7 a 154 Bq/m³. Además, se observó que la correlación entre las RME por cáncer de pulmón y la concentración de radón fue significativa para los varones ($p =$

0,023), concluyéndose que existe asociación entre radón residencial y mortalidad municipal por cáncer de pulmón en varones, mientras que en mujeres esta asociación no es estadísticamente significativa ($p = 0,087$), por lo que no es concluyente (6).

Tabla 1. Estudios sobre el radón residencial y el cáncer de pulmón en España

Autor, Año	Tipo, lugar	Tamaño Muestral	Resultados
Barros-Dios et al. 2002	Santiago de Compostela, Galicia, España	163 casos y 241 controles	Riesgos de 2,73 (IC95% 1,12-5,48); 2,48 (IC95% 1,29-6,79) y 2,96 (IC95% 1,29-6,79) para los expuestos a 37-55,1; 55,2-147,9 y 148 Bq/m ³ o más, tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m ³
Lorca J et al. 2007	Cantabria, España	86 casos y 172 controles	Riesgo de 0,95 (IC95% 0,33-2,65) para los expuestos a >37 Bq/m ³ , tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m ³
Barros-Dios et al. 2012	Ourense y Santiago de Compostela, Galicia, España	349 casos y 513 controles	Riesgos de 1,87 (IC95% 1,21-2,88); 2,25 (IC95% 1,32-3,84) y 2,21 (IC95% 1,33-3,69) para los expuestos a 50-100, 101-147 y más de 148 Bq/m ³ comparados con los expuestos a menos de 50 Bq/m ³ respectivamente
Torres-Durán M et al. 2014	Galicia y Asturias, España	192 casos y 329 controles	Nunca fumadores. Riesgo de 2,42 (IC95% 1,45-4,06) para los expuestos a > 200 Bq/m ³ comparados con los expuestos < 100 Bq/m ³
Barbosa-Lorenzo et al. 2015	Galicia, España	Población por municipios gallegos de 1980 a 2009	Correlación significativa entre RME por cáncer de pulmón en varones y la concentración de radón
Barbosa-Lorenzo et al. 2017	Galicia, España	1,932 individuos	Riesgo de 1.2 (95%CI: 0.5-2.8), para los expuestos a 50 Bq/m ³ o más

Carga de enfermedad del radón residencial

El concepto de carga de la enfermedad se refiere al número de casos de cáncer de pulmón atribuibles al radón residencial. La OMS estima que en todo el mundo la concentración media de radón en interiores es de 39 Bq/m³, y que entre un 3 y un 14% de los casos de cáncer de pulmón en el mundo están relacionados con el radón residencial dependiendo de la concentración media de radón en el país correspondiente. En Europa, el radón es responsable de un 9% de las muertes por este tipo de cáncer (23), y en España, en particular, se estima que el radón es el causante de 1.500 muertes anuales (66).

En España existen pocos estudios que analizan la carga de enfermedad del radón residencial. Uno de ellos estima el porcentaje de muertes por cáncer de pulmón que están relacionadas con la exposición al radón residencial en Galicia. Los resultados estiman que entre un 3 y 5% de la mortalidad por cáncer de pulmón es exclusivamente por exposición al radón residencial. La mortalidad atribuible al efecto combinado del radón y el tabaco se encuentra en torno al

22% para los expuestos a niveles por encima de 148 Bq/m³. Con todo ello, aplicando el nivel de acción que establece la USEPA (148 Bq/m³), el radón participaría en el 25% de las muertes por cáncer de pulmón en Galicia (58).

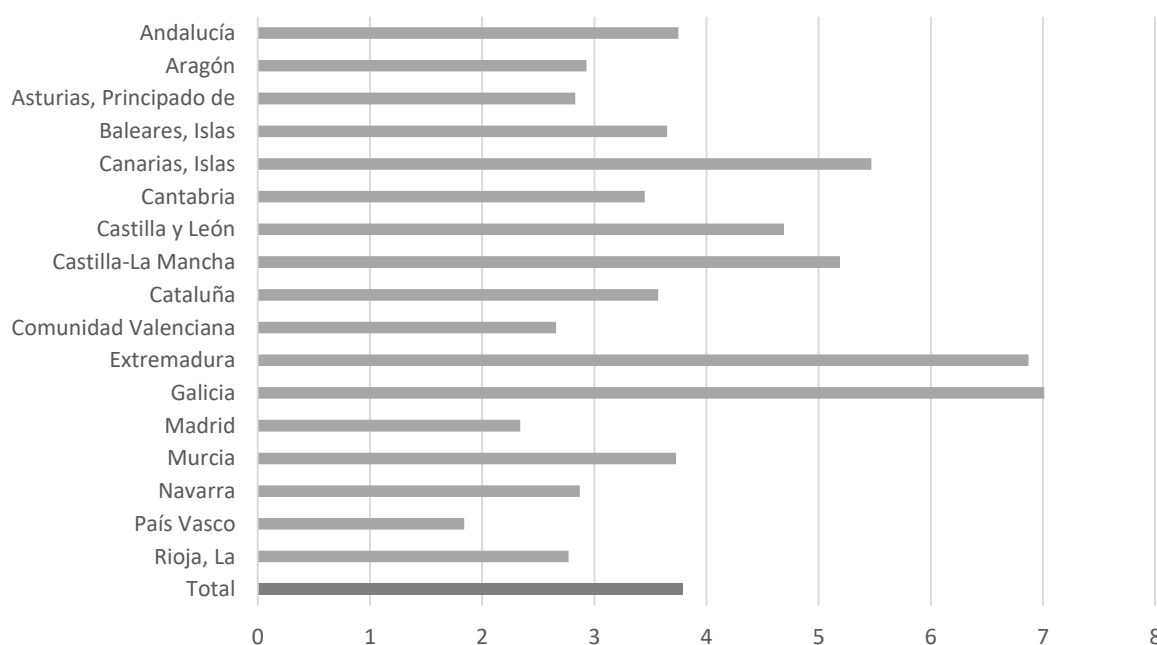
Tabla 2. Porcentaje de mortalidad por cáncer de pulmón en Galicia atribuible a la exposición al radón y el tabaco.

	148 Bq/m ³	
	Muertes atribuibles (%)	Nº muertes
No expuesto-No fumadores	7,98%	105
No expuestos-Exfumadores	38,78%	509
No expuesto-Fumadores	27,93%	367
Expuestos-No fumadores	3,29%	43
Expuestos-Exfumadores	6,61%	87
Expuestos-Fumadores	15,41%	202
Total	100%	1.313

Fuente: Pérez-Ríos M et al. (2010).

Recientemente, se ha publicado un estudio en el que se estima el impacto del radón sobre la mortalidad por cáncer de pulmón en España en el año 2017. El estudio incluye por primera vez una corrección de la exposición al radón en función de la altura de la vivienda. Los resultados muestran que aproximadamente de un 4% de todas las muertes por cáncer de pulmón en España estarían relacionadas con la exposición al radón, mostrando grandes

Ilustración 3. . Porcentaje de mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón por Comunidades Autónomas, 2017.



Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Ruano-Ravina A. et al. (2021).

diferencias entre distintas Comunidades Autónomas, como sería el caso de Galicia, donde este porcentaje aumentaría hasta el 7% o Extremadura con 6,9% (Ilustración 3). Este estudio también señala que la mayor parte de la mortalidad relaciona con el radón ocurre en hombres, tanto fumadores como exfumadores (72).

En otros países como Alemania, Suiza, Francia, Reino Unido o Italia se han publicado estimaciones de la carga de enfermedad del radón residencial. La mayoría de ellos utilizan una metodología similar, basada en utilizar como estimación de riesgo de cáncer de pulmón atribuible al radón residencial los resultados del análisis agrupado europeo. Los resultados varían desde el 3,3% de casos de cáncer de pulmón atribuibles al radón en Reino Unido, al 10% en Italia (13, 15, 39, 54).

Tabla 3. Estimación de la proporción de casos atribuibles al radón en distintos países europeos.

País	Concentración media de radón en interiores [Bq/m ³]	Porcentaje de los casos de cáncer de pulmón atribuibles al radón [%]	Nº de muertes anuales estimadas de cáncer de pulmón inducido por radón
Alemania (Menzler et al. 2008)	49	5	1.896
Suiza (Menzler et al. 2008)	78	8,3	231
Francia (Catelinois et al. 2006)	89	5	1.234
Reino Unido (Gray et al 2009)	21	3,3	1.089
Italia (Bochicchio et al. 2012)	71	10	3.326

Fuente: adaptado de OMS (2015).

Existe suficiente evidencia científica que demuestra la relación entre la exposición al radón residencial y el cáncer de pulmón. Sin embargo, son pocos los estudios que relacionan la exposición al radón con otras enfermedades y sigue siendo necesario profundizar en este campo. Aun así, en España existen estudios que sugieren una relación causal entre la exposición al radón residencial y el cáncer de esófago y el cáncer cerebral, entre otros (70, 71). Otros países han realizado investigaciones sobre la asociación entre el radón residencial y otras enfermedades distintas al cáncer de pulmón. En algunas de ellas, se encontraron relaciones entre la exposición al radón y el desarrollo de cáncer de piel (83), leucemia linfoblástica aguda (65), tumores del sistema nervioso central (14) y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (78). Estas asociaciones son demasiado débiles para ser concluyentes, si bien conviene tenerlos en consideración para futuros estudios.

2. Factores adicionales de riesgo

Los estudios realizados hasta el momento no parecen demostrar que el sexo o la edad actúen como factores de riesgo asociados con la exposición a radón. Sin embargo, el tabaco, el lugar de residencia o la ocupación sí han demostrado favorecer el riesgo en el desarrollo de cáncer de pulmón asociado a la exposición a radón.

Factores extrínsecos (modificables):

- **Tabaco:** Según datos de la OMS, el radón ejerce un efecto sinérgico con el tabaco en el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón. Estos datos muestran que el riesgo para un fumador de sufrir un cáncer de pulmón aumenta hasta 25 veces comparado con un no fumador. Esto supone que, de haber vivido en una zona libre de este gas, las posibilidades de sufrir cáncer serían mucho más bajas (56).

Un ejemplo importante es el modelo BEIR VI, que además de la relación de la exposición a radón y cáncer de pulmón, pretendía demostrar un sinergismo entre la exposición a radón y tabaco en el riesgo de cáncer de pulmón. En base a BIER VI, la USEPA estima que al nivel de radón de 148 Bq/m³ (4 pCi/L), el riesgo de inducir cáncer en no fumadores es de 7 sobre 1000, comparado con 62 sobre 1000 en fumadores (12).

Otros estudios, han seguido esta línea demostrando resultados similares de este sinergismo, sugiriendo una fuerte interacción entre la exposición a radón y el tabaco, es decir, que los fumadores tienen más riesgo de morir por cáncer de pulmón inducido por radón que los no fumadores. En base a esto, la revisión europea concluye que la mayoría de las muertes relacionadas con radón ocurrían en individuos que fumaban (23, 24).

Debido a esta asociación, diversas fuentes han discutido sobre una política conjunta en la prevención del tabaquismo y la exposición a radón. Se considera que proporciona una oportunidad más rentable en la reducción de la carga de radón en la salud, debido a que las políticas de control de radón residencial serían más efectivas y eficientes al combinarse con la prevención y control de tabaco. Argumentan que trabajar en ambas líneas a la vez podría disminuir la tasa de incidencia del cáncer de pulmón, que según los datos no solo no desciende, sino que se está incrementando, sobre todo en las zonas donde se conoce que los niveles de radón son elevados. Un campo de trabajo necesario será el llevar a cabo actividades coordinadas para en el control conjunto de radón y tabaco (50).

- **Ocupación:** Los estudios en trabajadores de minas subterráneas expuestos al radón, generalmente a concentraciones altas, han demostrado un aumento del riesgo de cáncer de pulmón (11, 12). Las tasas de cáncer de pulmón en mineros expuestos al radón han sido estudiadas mediante diseños de cohortes. En estos estudios se identifica a

trabajadores empleados en minas durante un determinado periodo de tiempo sometiéndolos a seguimiento, independientemente de que sigan o no trabajando en la mina, para al final de ese periodo determinar el estado vital de cada trabajador.

El trabajo en lugares cerrados o subterráneos entraña también un mayor riesgo de cáncer de pulmón cuando existen concentraciones elevadas de radón interior. En el ámbito laboral, al igual que en el domicilio, la exposición puede extenderse durante toda la jornada laboral y a lo largo de años, lo que supone un riesgo relevante.

- **Residencia:** como ya se ha detallado anteriormente, existen numerosos estudios que relacionan la exposición de radón residencial con riesgo de cáncer de pulmón. Especialmente, como punto de partida importante de esta relación, podemos destacar los tres análisis agrupados (europeo, norteamericano y chino), los cuales coinciden en el riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón residencial (23, 24, 45, 46, 53). En este caso, la ubicación de la residencia no es tan modificable como las características de la misma. En este sentido, existen medidas de remediación en viviendas y edificios con el objetivo de disminuir la exposición al radón de los ocupantes.

Factores intrínsecos (no modificables):

- **Sexo:** No aparece haber una relación clara de asociación entre el sexo y radón y el riesgo de cáncer. No obstante, en diferentes estudios se han encontrado correlaciones significativas de riesgo de cáncer de pulmón por exposición a radón en varones, pero no en mujeres. Esto podría ser debido que la mayoría de los estudios de radón residencial y cáncer de pulmón se han desarrollado fundamentalmente en varones y que la incidencia de cáncer de pulmón en España ha sido mayor en varones debido a su asociación con el tabaco.

Un hallazgo muy interesante del estudio ecológico llevado a cabo por Barbosa-Lorenzo *et al.* (6) en Galicia se trata de la correlación, cercana a la significación estadística, en mujeres. En este caso, un elevadísimo porcentaje de las mujeres incluidas en este estudio nunca había fumado. El cáncer de pulmón tiene su pico de incidencia entre los 65-70 años, y en los años incluidos en el análisis las mujeres gallegas apenas eran fumadoras, lo cual pone de evidencia que el radón sí podría influir en el riesgo de muerte por cáncer de pulmón.

- **Edad:** al igual que en el caso anterior, la edad tampoco ha demostrado ser un factor de riesgo en el cáncer atribuible al radón; ya que no se observa mayor riesgo en un grupo de edad que en otro. Lo que sí tiene influencia es el periodo de exposición, dado que el incremento del tiempo de exposición aumentaría la probabilidad de desarrollar un efecto adverso en salud. Es decir, un individuo de menor edad que viva en unas condiciones

determinadas de exposición a radón va a pasar más tiempo expuesto durante su vida que otra persona más mayor en las mismas condiciones. En este contexto, la edad supondría el aumento del riesgo en el desarrollo de cáncer debido al aumento en el tiempo de exposición, no a la edad *per se*.

3

Ordenamiento Europeo

En la Unión Europea, las normas básicas de seguridad contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes se establecen en la Directiva 2013/59/Euratom, en la cual los requisitos de protección contra el radón se desarrollan en los artículos 54, 74, 103 y el anexo XVIII.

El **artículo 54** se refiere al **radón en los lugares de trabajo** e indica que:

1. Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. El nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superará los 300 Bq/m³, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional.

2. Los Estados miembros requerirán que las mediciones de radón se lleven a cabo:

a) en lugares de trabajo que estén dentro de las zonas identificadas de acuerdo con el artículo 103, apartado 3, y que estén situados en la planta baja o en el sótano, teniendo en cuenta los parámetros recogidos en el plan de acción nacional según lo indicado en el anexo XVIII, punto 2, así como,

b) en tipos específicos de lugares de trabajo definidos en el plan de acción nacional teniendo en cuenta el anexo XVIII, punto 3.

3. En las zonas de los lugares de trabajo en que la concentración de radón (como promedio anual) siga superando el nivel de referencia nacional a pesar de las medidas adoptadas de acuerdo con el principio de optimización según lo expuesto en el capítulo III, los Estados miembros requerirán que esa situación se notifique de acuerdo con el artículo 25, apartado 2, y será de aplicación el artículo 35, apartado 2.

El **artículo 74** trata sobre la **exposición al radón en recintos cerrados**:

1. Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superarán los 300 Bq/m³.

2. Con arreglo al plan de acción nacional indicado en el artículo 103, los Estados miembros fomentarán la adopción de medidas para identificar aquellas viviendas donde el promedio anual de concentraciones de radón supere el nivel de referencia y fomentarán, cuando proceda, la adopción de medidas para reducir la concentración de radón en dichas viviendas por medios técnicos o de otro tipo.

3. Los Estados miembros garantizarán que se facilite la información local y nacional relativa a la exposición al radón en recintos cerrados y a los riesgos asociados para la salud, así

como sobre la importancia de efectuar medidas de radón y sobre los medios técnicos disponibles para reducir las concentraciones de radón existentes.

Por último, el **artículo 103** insta a que los Estados miembros establezcan un **plan de acción para el radón**.

1. En aplicación del artículo 100, apartado 1, los Estados miembros establecerán un plan de acción a nivel nacional para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo para cualquier vía de entrada del radón, ya sea el suelo, los materiales de construcción o el agua. El plan de acción tendrá en cuenta las cuestiones expuestas en el anexo XVIII y se actualizará de forma periódica.

2. Los Estados miembros garantizarán que se adopten las medidas adecuadas para impedir que el radón entre en los edificios de nueva construcción. Entre estas medidas se podrán incluir requisitos específicos en los códigos de edificación nacionales.

3. Los Estados miembros identificarán aquellas zonas en las que se espere que el promedio anual de concentración de radón en un número significativo de edificios supere el nivel de referencia nacional correspondiente.

El citado **Anexo XVIII** constituye la lista de aspectos que deberán considerarse para la **preparación del plan de acción nacional** destinado a hacer frente a los riesgos a largo plazo derivados de las exposiciones al radón a que se refieren los artículos 54, 74 y 103. Dicha lista se conforma de:

1. Estrategia para realizar estudios de las concentraciones de radón en recintos cerrados o las concentraciones de gas en el terreno, con vistas a calcular la distribución de las concentraciones de radón en recintos cerrados para la gestión de los datos de las medidas y para el establecimiento de otros parámetros destacados (como los tipos de suelo y roca, la permeabilidad y el contenido de radio-226 en la roca o el suelo).

2. El planteamiento, los datos y los criterios utilizados para la delimitación de zonas o para la definición de otros parámetros que puedan utilizarse como indicadores específicos de situaciones con una exposición potencialmente elevada al radón.

3. La identificación de los tipos de lugares de trabajo y edificios con acceso público, por ejemplo, escuelas, lugares de trabajo subterráneos o los situados en determinadas zonas, en los que se requiere la realización de medidas sobre la base de una evaluación del riesgo, teniéndose en cuenta, por ejemplo, las horas de ocupación.

- 4. La base para el establecimiento de los niveles de referencia para viviendas y lugares de trabajo. En su caso, la base para el establecimiento de distintos niveles de referencia en función de los distintos usos de los edificios (viviendas, edificios con acceso público, lugares de trabajo) así como para los edificios existentes y para los nuevos.*
- 5. Asignación de responsabilidades (gubernamentales y no gubernamentales), mecanismos de coordinación y recursos disponibles para poner en práctica el plan de acción.*
- 6. Estrategia para reducir la exposición al radón en viviendas y para dar prioridad a las situaciones indicadas en el punto 2.*
- 7. Estrategias que faciliten la ejecución de medidas correctoras con posterioridad a la construcción.*
- 8. Estrategia, incluidos métodos y técnicas, para prevenir la entrada del radón en edificios de nueva construcción, incluida la identificación de aquellos materiales de construcción con una exhalación significativa de radón.*
- 9. Programación de las revisiones del plan de acción.*
- 10. Estrategia de comunicación para aumentar la concienciación pública e informar a los responsables locales de la toma de decisiones, a los empresarios y a los trabajadores sobre los riesgos del radón, también en su relación con el tabaco.*
- 11. Orientación sobre los métodos y técnicas de medida y aplicación de medidas correctoras. También deberán considerarse los criterios de acreditación de los servicios de realización de medidas y de rehabilitación.*
- 12. Si procede, prestación de apoyo financiero para realizar campañas de medida de radón y para la aplicación de medidas correctoras, en particular para viviendas privadas con concentraciones de radón muy elevadas.*
- 13. Objetivos a largo plazo para reducir el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón (para fumadores y no fumadores).*
- 14. Cuando proceda, consideración de otros asuntos relacionados y de los programas correspondientes, como los programas de ahorro energético y de la calidad del aire en recintos cerrados.*

La Directiva europea, en lo relativo con los requisitos relativos a la exposición al radón, se transpondrá mediante el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, por el que se modificará el actual Real Decreto 783/2001 por el que se aprueba el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.

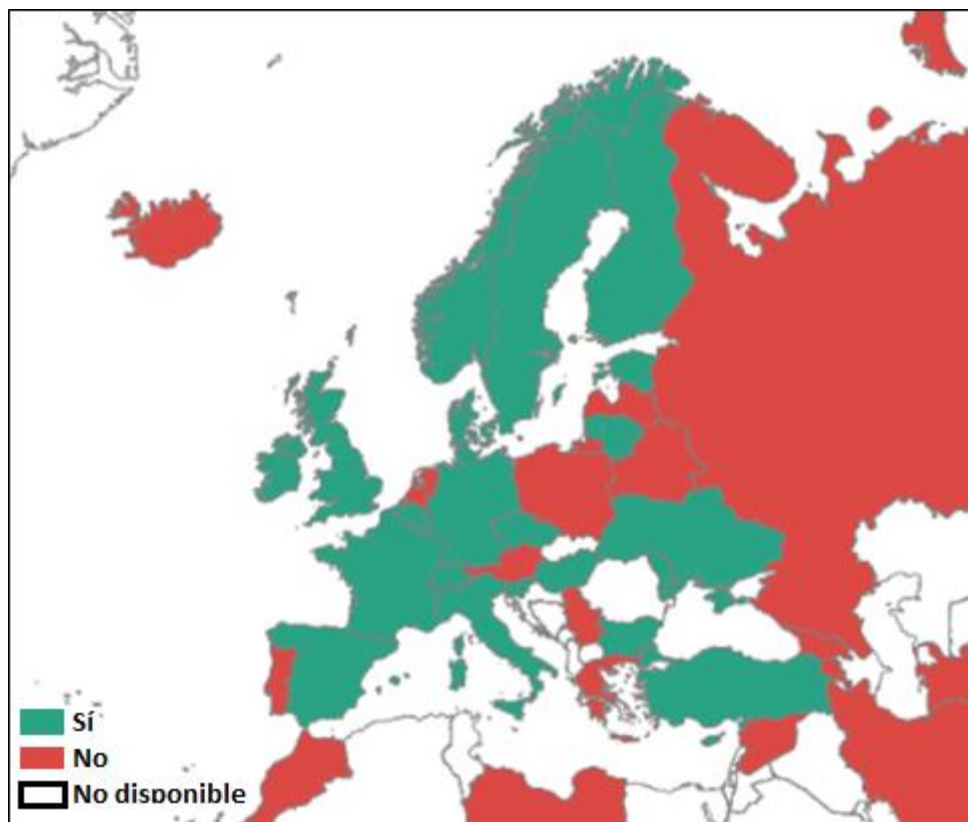
4

Diagnóstico de situación

Situación actual en el ámbito europeo e internacional

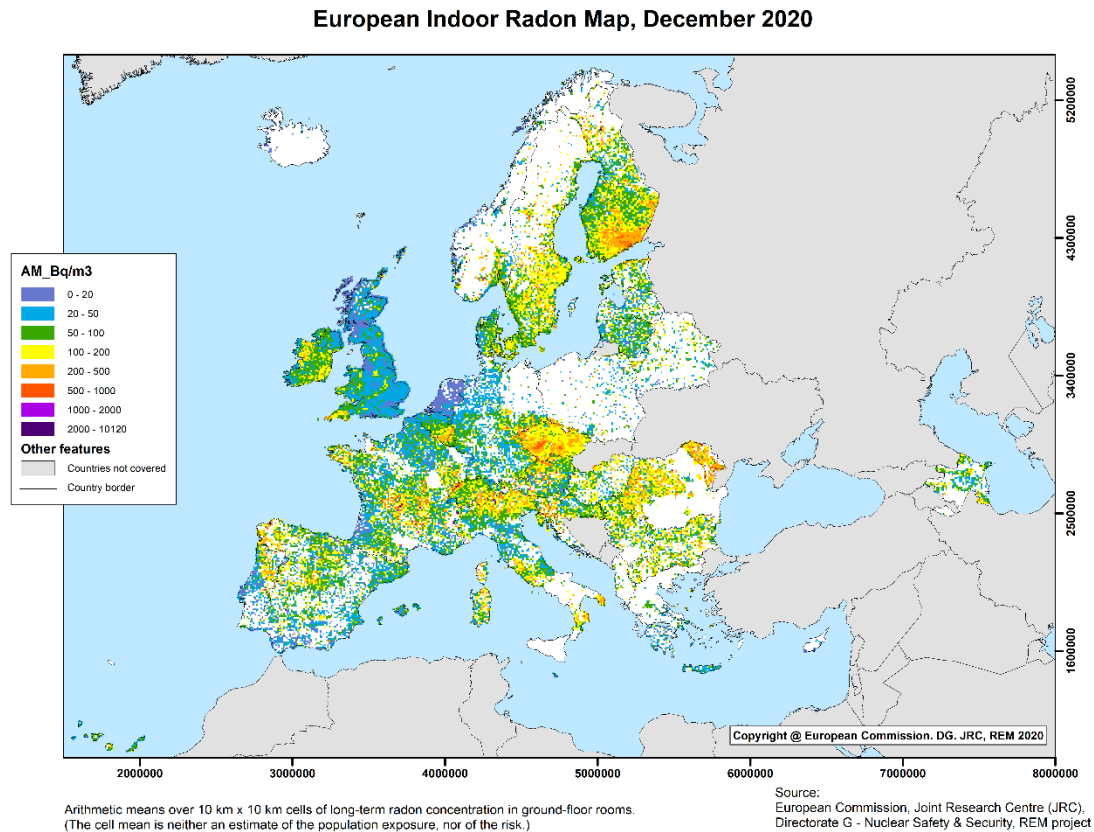
La exposición al radón en Europa no es homogénea, como tampoco lo son las medidas que actualmente llevan a cabo los diferentes países de la misma. Mientras que algunos países no disponen de un plan de acción, otros cuentan con planes nacionales de radón consolidados, con una experiencia de más de 20 años. En la Ilustración 4 puede verse aquellos países que cuentan con un Plan Nacional de acción frente al radón.

Ilustración 4. Existencia de un Plan Nacional de acción frente al radón



Fuente: Adaptado de WHO. *The global health observatory* (2021).

Ilustración 5. Mapa europeo del radón.



Fuente: *European Indoor Radon Map, European Commission, DG, JRC, REM 2020*

En Europa la mayoría de países cuentan con organismos o instituciones relacionadas con el radón, entre ellas se puede destacar, el Instituto de Protección Radiológica de Irlanda o el Instituto Radiológico de Seguridad Nuclear en Francia. Asimismo, también hay otras entidades, como la Asociación Europea del Radón, (ERA, European Radon Association), que ha instaurado el *Día europeo del radón* cada 7 de noviembre.

En cuanto a los planes nacionales, existen algunos ejemplos en los países de nuestro entorno. Uno de ellos es el “Piano Nazionale Radon” desarrollado en 2002 por Italia, en el cual se incluye cómo localizar los edificios con alta concentración de radón, las fuentes de radón y otros factores que afectan los niveles de concentración de radón en edificios, cómo medir la concentración de radón en el aire y cómo reducir y evitar altas concentraciones de radón en los edificios. Además, aporta información, formación, cualificación y normativa (55). Este Plan también incluye estudios y acciones semejantes en su eje de “Edificación”, adaptándolas a la situación del país. Sin embargo, a partir de la transposición de la Directiva 2013/59/Euratom, se ha creado un grupo de trabajo técnico para la elaboración de una nueva propuesta de un

“Piano nazionale d’azione per il radon”, el cual desarrollará estrategias encaminadas a medir, prevenir y reducir la exposición de la población.

Otro ejemplo lo constituye Francia, cuyo Plan Nacional ha permitido el seguimiento de la regulación en la construcción y aplicación de normativa en los lugares de trabajo, el suministro de herramientas para mediciones de radón y formación de profesionales. Francia ha contado con un segundo Plan Nacional de acción (2011-2015) que ha tenido como principal objetivo la reducción de exposición en las viviendas. Seguidamente, han continuado con la elaboración de un tercer Plan Nacional de acción (2016-2019) en el cual se destaca la necesidad de: poner en marcha una estrategia global de información y sensibilización, así como desarrollar herramientas para la recogida de la información y su comunicación, continuar mejorando la reducción de la exposición y su impacto sanitario y por último gestionar el riesgo de radón en edificios (2, 3). En la actualidad, se encuentra vigente el Plan Nacional de Acción 2020-2024, el cual se basa en tres ejes: el primero se orienta en la información y sensibilización sobre el riesgo asociado al radón y la normativa actual, el segundo se enfoca en la mejora del conocimiento, y el tercero en el radón y la construcción (4).

Existen también otros países con un dilatado recorrido en la materia, como son los casos de Irlanda o República Checa, donde en los años 80 se comenzó a realizar un mapeo. Cuentan con legislación referente al radón desde 1989 y actualmente se encuentran en una segunda fase de su programa de radón. En primer periodo de su plan, se ha realizado la búsqueda de edificios existentes con altas concentraciones, el desarrollo de medidas preventivas en hogares de nueva construcción y medidas a adoptar en los ya existentes. La investigación, las políticas de concienciación pública y el apoyo financiero, son otras de las medidas puestas en práctica en esta primera fase. El segundo periodo, en el cual se encuentran actualmente, los esfuerzos están orientados en la reducción del número de muertes por cáncer de pulmón como resultado del aumento de la exposición al radón y continuar con las labores de concienciación tanto del público en general como de los profesionales del sector de la construcción. Destacan lo imprescindible de la colaboración y el enfoque multi-departamental (29). Actualmente, en República Checa se encuentra vigente el “Plan de acción nacional para el control de la exposición al radón”, el cual permite el seguimiento de los programas que se ejecutaron entre 2000 y 2009, y entre 2010 y 2019. Este Plan tiene entre sus objetivos fundamentales que la administración, los profesionales y el público en general se encuentren informados adecuadamente, que exista una prevención eficaz en la construcción de edificios, así como un control eficiente de la exposición existente (75).

Otra iniciativa de relevancia llevada a cabo en Europa fue el taller de «*Radon national action plan workshop*», desarrollado de desarrollada en París en septiembre de 2014. Este taller abordó diversos temas relacionados con la elaboración de planes de acción de radón debido a los riesgos para la salud derivados de éste. En el taller, se tuvieron en cuenta los siguientes

objetivos: reducir el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón entre fumadores y no fumadores; mapeo para aumentar el conocimiento de radón en cada país; mediciones de radón en algunas áreas de trabajo; elaborar mapas y definir las áreas propensas a altas concentraciones de radón; y organizar una base de datos del radón (38). Está prevista la celebración para 2022 de un segundo “workshop on radon national action plans”. Estos objetivos también son recogidos en los diferentes ejes en los que se vertebra este documento, como se verá más adelante. Se pueden encontrar los dos primeros objetivos en el eje de “Conocimiento e infraestructura básica”, el tercero en el de “Lugares de Trabajo”, el cuarto en el de “Zonas de actuación prioritaria” y el último en el eje “Comunicación y concienciación”.

En octubre de 2014, la HERCA (Heads of the European Radiological Protection Competent Authorities, por sus siglas en inglés) publicó el documento “Herca Action Plan in relation to the transposition and implementation of Directive 2013/59/Euratom (Euratom BSS)” el cual conto con la participación de representantes de todos los países de Europa y está orientado a apoyar el proceso de transposición y aplicación de la Directiva 2013/59/Euratom, identificando el papel de la HERCA y definiendo acciones en relación a la transposición de la citada Directiva en las distintas áreas, así como las relaciones entre la HERCA y la Comisión Europea en referencia a las actividades de transposición (40).

Fuera del ámbito europeo cabría destacar Estados Unidos y su “Protecting People and Families from Radon” (2011), que marca como objetivo el disponer de un sistema de mitigación del radón en aquellos hogares donde el nivel es elevado (30%) y, además, llegar al 100% de nuevas viviendas unifamiliares construidas con características de reducción de radón en dichas zonas (28). Todo ello, ha llevado al desarrollo del “Plan nacional de acción contra el radón: Una estrategia para salvar vidas”, que inicia en 2011 con el Plan Federal y en 2015 con la estrategia nacional, para cumplir en 2020 con el objetivo de eliminar el cáncer prevenible de pulmón inducido por el radón (81).

También en Estados Unidos, la USEPA ha marcado importantes hitos en la historia del radón con el establecimiento en 1987 del nivel de concentración de radón en 148 Bq/m^3 señalando dicha concentración el punto a partir del cual deberían tomarse medidas de reducción en los domicilios. Desde entonces, se han seguido realizando estudios e informando a la población de los riesgos del radón residencial en los domicilios (80).

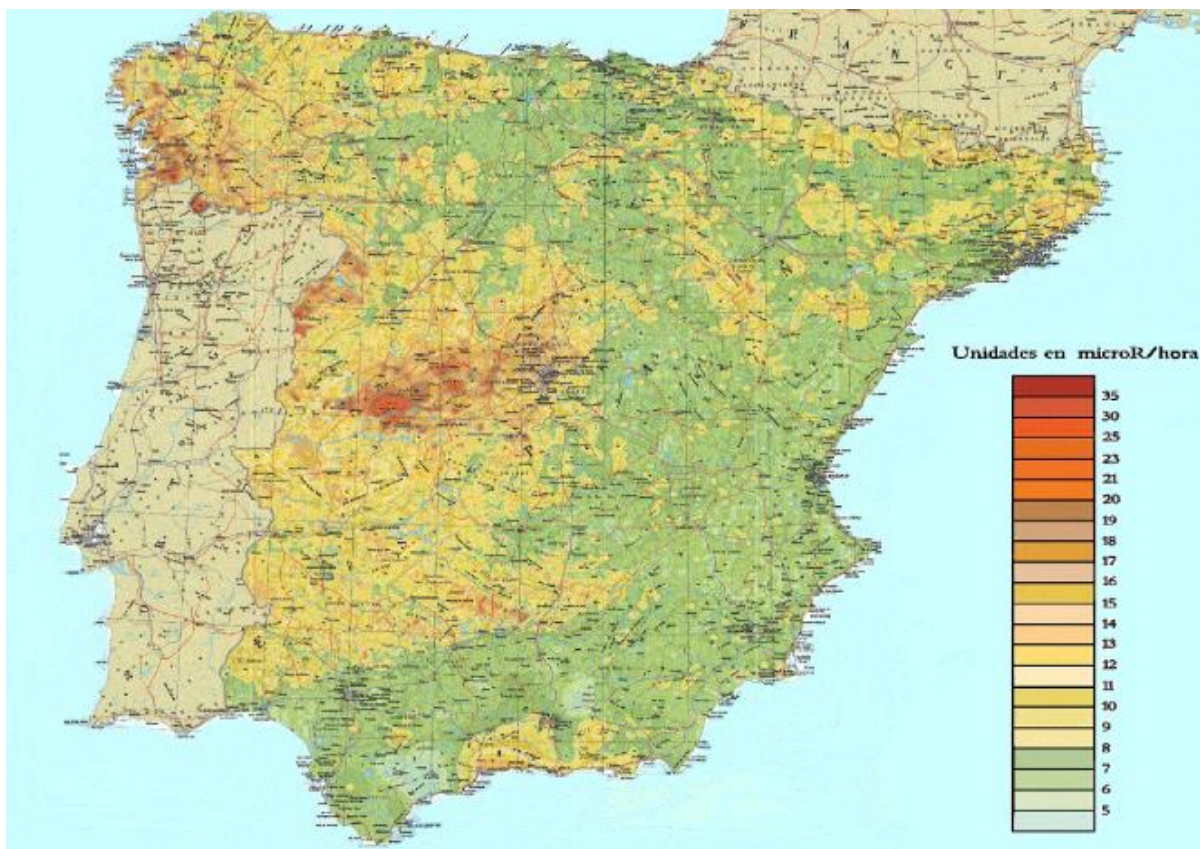
También es de mención la OMS y la publicación del *Handbook on Indoor Radon* en 2009, siendo un manual de referencia sobre el radón residencial y su efecto sobre la salud. Este manual aconseja reducir el nivel recomendado de exposición al radón residencial a 100 Bq/m^3 siempre que las circunstancias nacionales lo hagan posible, o en su defecto, establecer un nivel de referencia de 300 Bq/m^3 (56).

Situación actual en España

En España, el Plan Nacional contra el Radón debe ponerse en marcha en cumplimiento de la Directiva 2013/59/Euratom, así como coordinar e impulsar la labor y las iniciativas de los distintos actores. El Comité responsable de la elaboración del Plan estará formado por representantes del Consejo de Seguridad Nuclear, de los Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y Ministerio de Trabajo y Economía Social, de las CC. AA y de las entidades locales, y coordinado por el Ministerio de Sanidad. Este elevará el Plan al Gobierno para su aprobación.

No obstante, hay ya un largo camino recorrido en la protección frente al radón en España, y varios de los elementos que deben integrar el Plan están ya finalizados o en fase avanzada de desarrollo.

Ilustración 6. Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural en la España peninsular



Fuente: CSN, Monografías: Mapas de radiación natural.

Marco Reglamentario

En España, la exposición ocupacional al radón está regulada desde el año 2001 mediante el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI). En concreto, el título VII del Real Decreto 783/2001 regula la exposición de los trabajadores a las fuentes naturales de radiación, destacando específicamente las exposiciones al radón (Rn-222) y a sus productos de desintegración.

Las disposiciones del RPSRI se desarrollan en la Instrucción 33 (IS-33) del CSN, que establece, con carácter general, un nivel de referencia de 600 Bq/m³ de concentración media anual de radón en el aire interior de los lugares de trabajo, excepto para centros educativos y lugares de trabajo que tienen uso residencial, en los que se fija un nivel de 300 Bq/m³. Adicionalmente, la IS-33 incluye una relación de las prácticas y actividades laborales que deben llevar a cabo, de manera obligatoria, estudios radiológicos sobre las exposiciones al radón (44). Estas actividades laborales son las que se desarrollan en lugares de trabajo subterráneos (incluidas redes de metro, minas, cuevas turísticas, etc.), los lugares de trabajo en los que se exploten o traten aguas de origen subterráneo (como las plantas potabilizadoras de aguas de este origen o los establecimientos termales), así como los lugares de trabajo situados en áreas identificadas por sus valores elevados de radón. Aquellas que por sus características geológicas puedan generar cantidades elevadas de radón o favorecer su transporte al interior de lugares cerrados; por ejemplo, las zonas graníticas, volcánicas o de fallas activas (35, 37).

El nivel de referencia para puestos de trabajo se interpreta, además, como un nivel de entrada al sistema de protección radiológica ocupacional. Para aquellos lugares de trabajo en los que se demuestre que no es razonablemente posible reducir las concentraciones de radón por debajo del nivel de referencia, las exposiciones al radón se tratarán como exposiciones laborales y, por tanto, se les aplicarán los límites de dosis del RPSRI. La IS-33 establece las medidas de protección de los trabajadores que son de aplicación, con un enfoque gradual que requiere mayor nivel de control cuando la medida anual de la concentración de radón en el aire interior supere los 1.000 Bq/m³.

Al amparo de esta instrucción y del RPSRI el CSN ha emitido diversas recomendaciones en el ámbito de control de la exposición al radón, para facilitar el cumplimiento de la reglamentación y normativa anterior. Estas se recogen en las siguientes Guías de Seguridad:

- Guía GS 11.1 sobre Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire.
- Guía GS 11.2 de Control de la exposición a fuentes naturales de radiación. En ella se recomienda un nivel de referencia nacional de 300 Bq/m³ de concentración media

anual de radón, y un nivel objetivo de diseño para edificios de nueva planta o para viviendas en las que vayan a acometerse acciones de mitigación de 100 Bq/m³. A los edificios de uso público de larga estancia (como hospitales, residencias, etc.) les aplica el mismo nivel de referencia que a las viviendas, al igual que a los centros de educación infantil, primaria y secundaria.

- Guía GS 11.4 sobre Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo.

Para cumplir con lo establecido en el apartado 2 del artículo 103 de la Directiva 2013/59/Euratom, se ha aprobado el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.

En el Preámbulo del citado Real Decreto se establece que *“Como consecuencia de lo anterior y para la transposición parcial de esta Directiva, mediante este real decreto se introduce una nueva exigencia básica de salubridad HS 6, de protección frente al gas radón, por la cual se obliga a que, en los edificios situados en los términos municipales en los que se ha apreciado un nivel de riesgo no despreciable, se dispongan los medios adecuados para limitar el riesgo previsible de exposición inadecuada en su interior, a radón procedente del terreno”*. Por ello, en el Anexo II de se desarrolla en profundidad la Sección HS 6: Protección frente a la exposición al radón del Documento Básico de Salubridad, en la cual se establecen los requisitos que se deben cumplir en los edificios de nueva construcción y en determinadas intervenciones en edificio existentes, para limitar el riesgo previsible de exposición inadecuada a radón procedente del terreno en los recintos cerrados.

Este Real Decreto también transpone parcialmente el artículo 74 de la Directiva para los locales habitables ubicados en edificios nuevos o en aquellos edificios existentes en los que se realice una intervención que entre dentro del ámbito de aplicación de la nueva sección HS6, estableciendo un nivel de referencia para el promedio anual de concentración anual de radón en el interior de los mismos de 300 Bq/m³.

Por otro lado, el Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se modifican el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano, y el Real Decreto 1799/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula el proceso de elaboración y comercialización de aguas preparadas envasadas para el consumo humano, señala en su Disposición adicional novena la caracterización de las zonas de abastecimiento en cuanto a exposición del radón. Dicha caracterización aporta información sobre la escala y naturaleza de las posibles exposiciones al radón del agua

destinada al consumo humano, que estén determinadas por la geología y la hidrología de la zona, así como la radiactividad de las rocas o del suelo. De esta forma, se adoptan “criterios básicos para la protección de la salud de la población contra los peligros derivados de las radiaciones ionizantes, naturales o no, para las aguas de consumo humano”.

Concienciación y sensibilización ciudadana

Según la Organización Mundial de la Salud, uno de los objetivos primordiales debe ser una comunicación clara y eficaz respecto al problema del radón, siendo también un aspecto que recoge la Directiva 2013/59/Euratom.

La comunicación de cualquier tipo de riesgo al público abarca una serie de pasos fundamentales, como la evaluación de la percepción pública del riesgo, el empleo de mensajes de riesgo claros y comprensibles, y la identificación de los grupos a los que deben dirigirse los mensajes.

Las campañas de comunicación sobre el riesgo asociado al radón deben diseñarse partiendo de las percepciones y el nivel de conocimientos sobre el radón entre los grupos destinatarios. Por otro lado, el tener una valoración cuantitativa de partida sobre el grado de concienciación de la sociedad proporciona el nivel de base a partir del cual evaluar la eficacia de las actuaciones que se lleven a cabo en la acción frente al Radón.

Aunque en los últimos años en España ha mejorado el conocimiento y concienciación de la sociedad, en parte gracias a una mayor atención mediática desde la aprobación de la Directiva 2013/59/Euratom, no se tiene constancia de que en España se haya realizado ningún estudio para medir el grado de concienciación o sensibilidad que tiene la población respecto a los riesgos asociados a la exposición al radón y a las medidas de prevención que permita diseñar estrategias más dirigidas.

Cabe destacar, algunas actividades divulgativas que se han llevado a cabo en este ámbito por distintos agentes, administraciones y organismos públicos, como la campaña nacional de sensibilización llevada a cabo por la Universidad de Cantabria y el CSN en la cual se elaboró un documento divulgativo sobre la problemática, así como un video para obtener un mayor alcance, los cuales se han ido reeditando y actualizando en base a la evidencia científica (61).

Por otro lado, desde hace décadas diferentes Universidades centran su labor investigadora y docente en este campo; también diversos sindicatos han publicado numerosas guías y puesto en marcha campañas de información destinadas a los delegados de prevención; sociedades profesionales, como la SEPR o la SESA, que han tratado extensivamente este tema en sus congresos. Y más recientemente, tras la aprobación en 2019 de la reglamentación en el ámbito

de la edificación, de colegios de arquitectos, que han organizado cursos y jornadas para profesionales.

Conocimiento básico sobre la exposición al radón en España

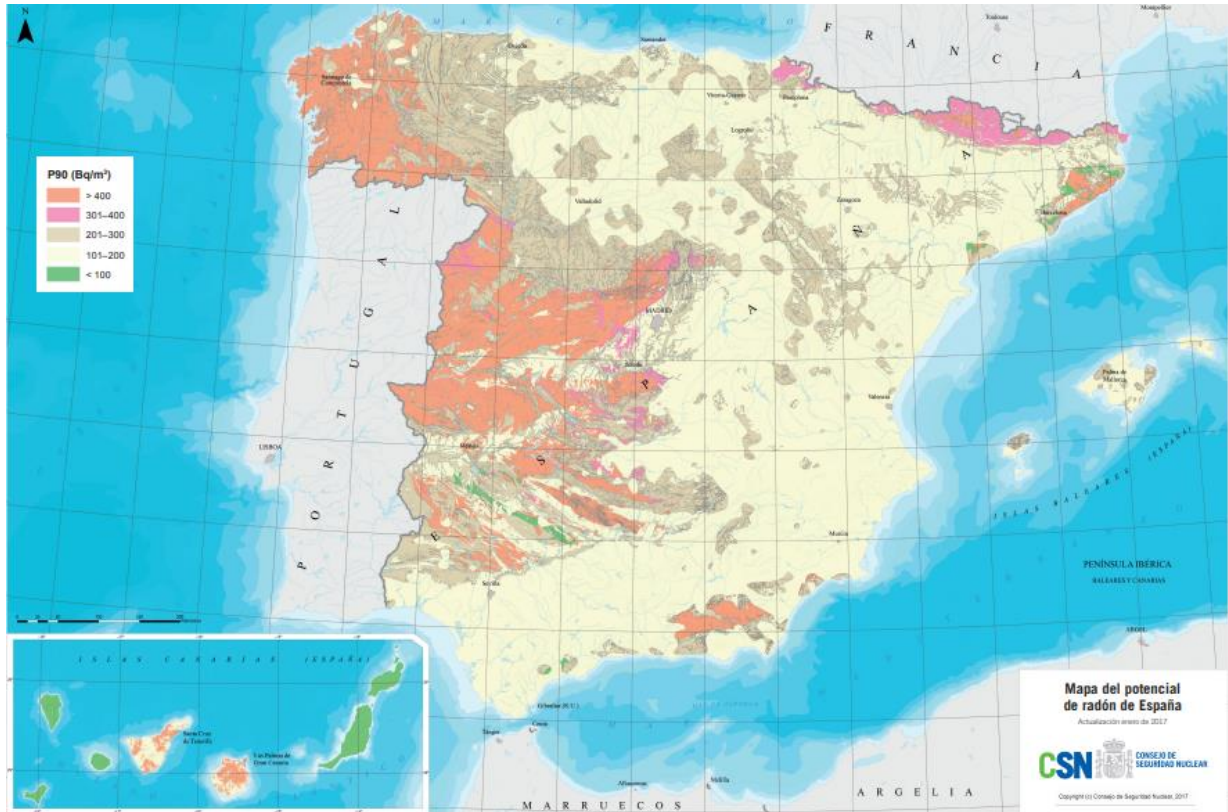
Las concentraciones de radón en un edificio, vienen determinadas, en la mayoría de los casos, por la situación geográfica de este (ligada a la geología), pero debido al gran número de factores que influyen en el nivel de radón es muy difícil predecir si los niveles de radón serán elevados en cada caso particular. No obstante, sí es posible hacer predicciones sobre las zonas en las que hay mayor probabilidad de encontrar viviendas con concentraciones altas de radón.

El método más directo y fiable para identificar esas zonas es la elaboración de mapas a partir de mediciones de la concentración de radón en el aire interior de las viviendas. Sin embargo, para establecer mapas a partir de mediciones directas requiere un gran número de medidas y una densidad aceptable en todo el territorio, para así conseguir una cuadrícula suficientemente fina y un número de datos en cada casilla suficiente para que el error muestral no supere un valor prefijado (35). Cabe recordar que la Unión Europea recomienda utilizar un grid de 10x10 km, siendo el número de medias en cada una de ellas significativo.

Por esta razón, como alternativa, se han desarrollado métodos indirectos que utilizan otras magnitudes correlacionadas con la concentración de radón en las viviendas, como la radiación gamma ambiental o la concentración de radón en la fase gaseosa del suelo.

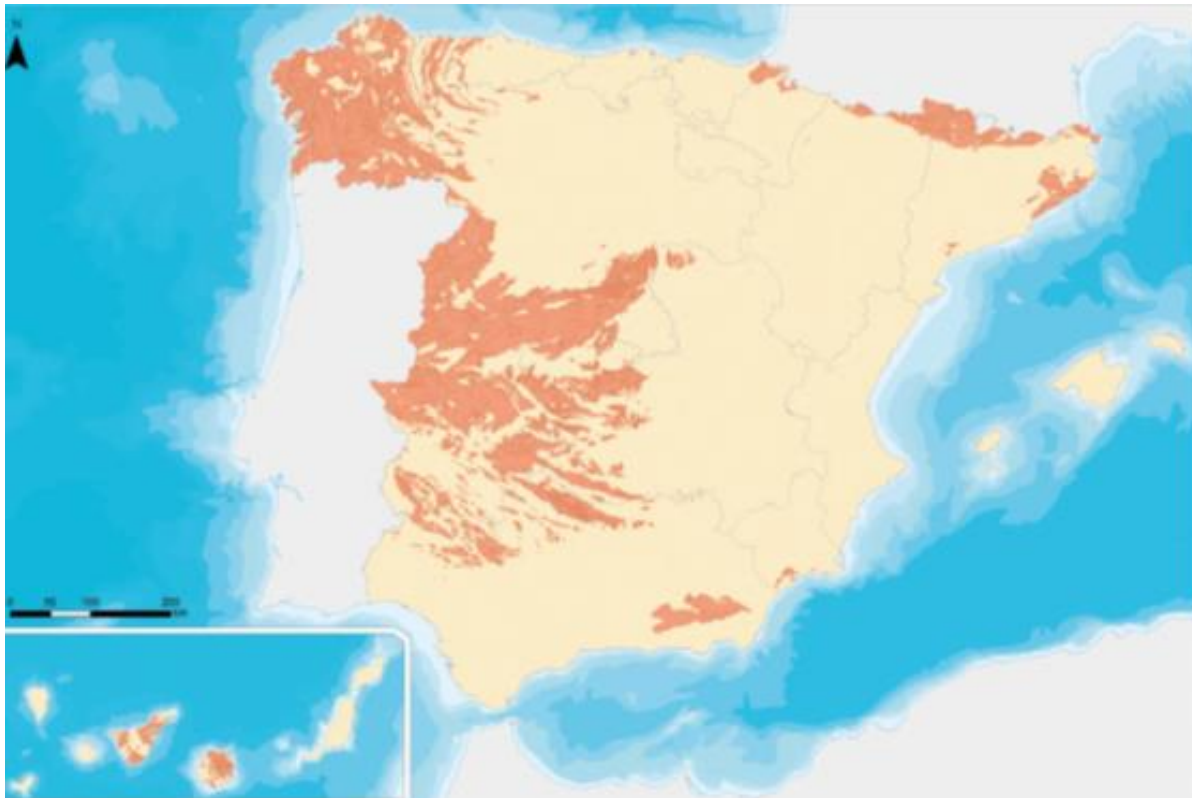
El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en colaboración con diferentes universidades como la Universidad de Cantabria, la Universidad de Santiago de Compostela (USC), o la Universidad Autónoma de Barcelona, entre otras (22), ha elaborado el mapa del potencial de radón en España, utilizando un método híbrido (36) que combina las medidas de radón en viviendas disponibles en España a fecha de 2017, los datos de exposición a la radiación gamma ambiental del MARNA (76) e información litoestratigráfica. El mapa categoriza el territorio nacional en unidades de potencial de radón, definido este como el percentil 90 de la distribución de medidas de radón en una determinada zona geográfica (Ilustración 7). En particular el mapa identifica aquellas zonas en las que más de un 10% de los edificios puede presentar, en planta baja o en primera planta, concentraciones de radón superiores al nivel de referencia de 300 Bq/m³ que establece la directiva 2013/59/Euratom (unidades coloreadas en rosa y naranja en la Ilustración 7). Existen zonas geográficas en las que, debido a su geología, es más probable encontrar edificios con niveles elevados (21).

Ilustración 7. Mapa del potencial del radón



Fuente: CSN, Cartografía del potencial de radón en España, 2017.

Las zonas del mapa con potencial superior a 300 Bq/m^3 (el nivel de referencia que establece la Directiva 2013/59/Euratom) se consideran zonas de actuación prioritaria, representadas en la Ilustración 8. En total representan el 17% del territorio nacional. Por Comunidad Autónoma, los porcentajes de superficie afectada son: Andalucía, 8%; Aragón 2%; Asturias, 12%; Canarias, 19%; Castilla y León, 19%; Castilla-La Mancha, 10%; Cataluña, 16%; Ceuta, 11%; Extremadura; 47% Galicia, 70%; Madrid; 36%; Murcia, 1%; Navarra, 6%; País Vasco, 2% (20).

Ilustración 8. Mapa zonas de actuación prioritaria

Fuente: CSN, *Cartografía del potencial de radón en España, 2017*.

El Código Técnico de Edificación (CTE) establece en el Documento Básico HS Salubridad, HS 6 sobre Protección frente a la exposición al radón un listado con la clasificación de municipios en función del potencial de radón (16). Este listado se ha basado en diversos estudios y mapas elaborados por el CSN (21), en los cuales se han definido zonas de actuación prioritaria a nivel municipales. No obstante, estos listados pueden sufrir actualizaciones en base a nuevos estudios o evidencias.

Una de las zonas con mayor presencia de radón en España es la Comunidad Autónoma de Galicia. En este territorio, el laboratorio de radón de Galicia, perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela (USC), ha llevado a cabo más de 4.300 mediciones de radón en viviendas, lo que ha permitido elaborar su propio *mapa gallego de radón*, en el cual se pueden consultar las concentraciones de radón en cada municipio de la comunidad gallega (49).

El mapa potencial de radón debe considerarse como una herramienta dinámica, que debe seguir ampliándose y mejorándose en base al conocimiento actual. En los próximos años, los esfuerzos del CSN se complementarán con los de varias Comunidades Autónomas que han puesto en marcha proyectos para mejorar los mapas de radón en sus territorios.

Capacidad metrológica e infraestructura

Una pieza fundamental de la acción frente al radón es garantizar la fiabilidad de las mediciones que, tanto en el ámbito de cumplimiento obligatorio como en el voluntario, se hagan en las viviendas y lugares de trabajo, así como fomentar que haya un mercado de servicios adecuado para dar cumplimiento a la demanda.

En 2010, el CSN publicó la Guía de Seguridad 11.1, en la que se establecen los requisitos fundamentales que deben cumplir los laboratorios y servicios de medida de radón en el aire. Estos incluyen requisitos generales relativos a la gestión, basados en la norma ISO/IEC 17025, y requisitos técnicos específicos a la medida de radón (17). La entidad nacional de acreditación ENAC toma como referencia la Guía del CSN en la acreditación de laboratorios de medida. Entre los primeros laboratorios españoles acreditados para la medida de radón en aire podemos señalar: el laboratorio de radón de la Universidad de Cantabria (detectores de trazas), el laboratorio de radón de la Universidad de Santiago de Compostela (detectores de trazas y monitores en continuo), o el AGQ Labs (detectores de traza). Si bien se prevé que el número de laboratorios acreditados para medir el radón en aire aumente en los próximos años.

5

Bibliografía

1. Asociación española para la calidad (AEC). Disponible en: https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/indicadores?p_p_id=56_INSTANCE_e0N5&p_p_lifecycle=1&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1
2. Autorité de sûreté nucléaire (2011). Plan nacional d'actions 2011-2015 pour la gestion du risque lié au radon. Disponible en: <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Le-radon/Plans-nationaux-d-action-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon/Plan-national-d-action-2011-2015-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon>
3. Autorité de sûreté nucléaire (2015). Plan nacional d'action 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon. Disponible en: <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Le-radon/Plans-nationaux-d-action-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon/Plan-national-d-action-2016-2019-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon>
4. Autorité de sûreté nucléaire. (2021). Plan national d'action 2020-2024 pour la gestion du risque lié au radon. Disponible en: <https://www.asn.fr/Professionnels/Agrements-controles-et-mesures/Le-radon/Les-plans-nationaux-d-action-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon/Plan-national-d-action-2020-2024-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon>
5. Auvinen A et al. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: a case-cohort study in Finland. *Int J Cancer J Int Cancer*; 114(1): 109-13.
6. Barbosa-Lorenzo R et al. (2015). Radón residencial y cáncer de pulmón. Un estudio ecológico en Galicia. *Med Clin (Barc)*. 2015; 144(7):304–308.
7. Barbosa-lorenzo R et al. (2016). Residential radon and cancers other than lung cancer: a cohort study in Galicia, a Spanish radon-prone area. *Eur J Epidemiol*; DOI 10.1007/s10654-016-0134-x
8. Barbosa-Lorenzo R et al. (2017). Residential radon and lung cancer: a cohort study in Galicia, Spain. *Cad. Saúde Pública* 2017; 33(6):e00189415.
9. Barros-Dios JM et al. (2002). Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *Am J Epidemiol*; 15; 156(6): 548-55.
10. Barros-Dios JM et al. (2012). Residential radon exposure, histologic types, and lung cancer risk. A case-control study in Galicia, Spain. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*; 21(6): 951-8.
11. Biological Effects of Ionizing Radiation IV Report (1988). Health risks of radon and other internally deposited Alpha-emitters. BEIR, National Academy Press, Washington D.C.
12. Biological Effects of Ionizing Radiation VI Report (1999). Health effects of exposure to indoor radon. BEIR, National Academy Press, Washington D.C.
13. Bochicchio F et al. (2012). Quantitative evaluation of the lung cancer deaths attributable to residential radon: A simple method and results for all the 21 Italian Regions. *Radiation Measurements*; 50: 121-126.
14. Bräuner EV et al. (2013). Residential radon and brain tumour incidence in a Danish cohort. *PloS One*; 8(9): e74435.

15. Catelinois O et al. (2006). Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ Health Perspect*; 114(9): 1361-66.
16. Código Técnico de la Edificación (CTE). (2019). Documento Básico HS 6 Protección frente a la exposición al radón. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>
17. Consejo de seguridad Nacional (2010). Guía de Seguridad 11.1. Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Disponible en: <http://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/CSN/gs-11.01.pdf>
18. Consejo de Seguridad Nacional (2011). Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes (RPSRI). Disponible en: http://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/CSN/RD_783-2001%20Reglamento%20proteccion%20sanitaria%20sobre%20rad%20ion.pdf
19. Consejo de seguridad Nacional (2012). Guía de seguridad 11.2 para el control de la exposición a fuentes naturales de radiación. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/896572/GS%2011-02%20Control%20de%20la%20exposici%C3%B3n%20a%20fuentes%20naturales%20de%20radiaci%C3%B3n>
20. Consejo de seguridad Nacional (2012). Guía de Seguridad 11.4. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Disponible en: <http://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/CSN/GSG-11.04%20Evaluacion%20de%20exposicion%20al%20radon%20en%20trabajo.pdf>
21. Consejo de Seguridad Nuclear (2020). <https://www.csn.es/ca/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>
22. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2017. Cartografía del Potencial de Radón de España. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-02.17%20Cartograf%C3%ADa%20del%20potencial%20de%20rad%C3%B3n%20de%20Espa%C3%B1a>
23. Darby S et al. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330(7485):223-227.
24. Darby S et al. (2006). Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*, 32 Suppl1: 1-83.
25. Del Risco Kollerud R et al. (2014). Risk of leukaemia or cancer in the central nervous system among children living in an area with high indoor radon concentrations: results from a cohort study in Norway. *BR J Cancer*; 111(7): 1413-20.
26. Directiva 2013/59/Euratom del Consejo 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básica para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.

27. Dubois G (2005). An overview of radon surveys in Europe. Disponible en: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/30b38f3c-200f-43e4-a829-438c55d921ac/language-en/format-PDF/source-92648951>
28. Environmental Protection Agency (2011). Protecting People and Families from Radon. A Federal Action Plan for Saving Lives. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/Federal_Radon_Action_Plan.pdf
29. Environmental Protection Agency (2014). National Radon Control Strategy for Ireland. Disponible en: <https://www.dccae.gov.ie/en-ie/environment/publications/Documents/4/National%20Radon%20Control%20Strategy.pdf>
30. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate G – Nuclear Safety & Security. REM proyect. (2020). European Indoor Radon Map, December 2020. Disponible en: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration>
31. Federal Office of Public Health FOPH Swiss Confederation (2011). National Action Plan concerning Radon 2012-2020.
32. Fernández A. et al. (2020). A New Methodology for Defining Radon Priority Areas in Spain. Environmental Research and Public Health (Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 1352) Public Health, 17, 1780.
33. Frutos Vázquez B et al. (2010). Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. Colección Informes Técnicos 24.2010. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protecci%C3%B3n+frente+a+la+inmisi%C3%B3n+de+gas+rad%C3%B3n+en+edificios>
34. Frutos Vázquez B et al. (2014). Técnica de ventilación como medida de rehabilitación frente a la inmisión de gas radón en edificios y su repercusión en la eficiencia energética. Congreso Latinoamericano REHABEND 2014. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5748/T%c3%a9cnica%20de%20ventilaci%C3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
35. García-Talavera et al. 2013. Mapping radón-prone areas using gamma radiation dose rate and geological information. Journal of Radiological Protection 33, 605.
36. García-Talavera M. et al. (2019). Cartografía del potencial de radón de España. Colección Informes Técnicos (INT-04.41) Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.41+Cartograf%C3%ADa+del+potencial+de+rad%C3%B3n+de+Espa%C3%B1a>
37. García-Talavera, M et al. (2013). Avances reguladores en el control de la exposición al radón en España. Radioproteccion (Madrid), 75(XX), 32-35.
38. Godet JL, Strand P, Dechaux E, Mrdakovic Popic J. French Nuclear Safety Authority (ASN), Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA). Radon National Action Plan. Report of an International Workshop. Norwegian Radiation Protection Authority, 2015.

39. Gray A et al. (2009). Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. *BMJ*; 338: a3110.
40. Heads of the European Radiological protection Competent Authorities (HERCA). (2014). HERCA Action Plan in relation to the transposition and implementation of Directive 2013/59/Euratom (Euratom BSS). Disponible en: <https://herca.org/docstats/Action%20Plan%20BSS.pdf>
41. IARC (1988). Man-made Mineral Fibres and Radon. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 43:1-300.
42. ICRP (2009). Report of the International Commission on Radiological Protection, Noviembre de 2009.
43. ICRP (2011). Radiological Protection against Radon Exposure, 6 Diciembre de 2011.
44. Instrucción IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural, CSN, 2011.
45. Krewski D et al. (2005). Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*, 16:137-145.
46. Krewski D et al. (2006). A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J Toxicol Environ Health A*, 69:533-597.
47. Kurttio P et al. (2006). Well wáter radioactivity and risk of cancers of the urinary organs. *Environ Res*; 102(3): 333-8.
48. I Rabago D. et al. (2020). Intercomparison of Indoor Radon Measurements Under Field Conditions in the Framework of MetroRADON European Project. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 1780.
49. Laboratorio de Radón de Galicia. Mapas de mediciones. Disponible en: <http://radon.gal/radon-en-galicia/mapa-mediciones/?lang=es>
50. Lanz PM et al. (2013). Radon, Smoking and Lung Cancer: The Need to Refocus Radon Control Policy. *American Journal of Public Health*, 103:3.
51. Linares Alemparte P. et al. (2020). Guía de Rehabilitación frente al Radón. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/pdf/GuiasyOtros/GuiaRadon/Guia_de_rehabilitacion_frente_al_radon+Fichas.pdf
52. Llorca J et al. (2007). Falta de asociación entre las concentraciones de radón en el domicilio y el cáncer de pulmón en Cantabria. *Arch Bronconeumol*; 43(12):695-6.
53. Lubin JH et al. (2004). Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer*, 109:132-137.
54. Menzler S et al. (2008). Population attributable fraction for lung cancer due to residential radon in Switzerland and Germany. *Health Phys*; 95: 179-189.
55. Ministero della Sallute (2002). Piano Nazionale Radon. Disponible en: <http://old.iss.it/binary/radon/cont/PNRtesto.pdf>

56. Organización Mundial de la Salud (2015). Manual de la OMS sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/161913/1/9789243547671_spa.pdf?ua=1
57. Organización Mundial de la Salud (2016). Nota descriptiva junio 2016. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>
58. Pérez-Ríos M et al. (2010). Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem? *BMC Public Health*; 10: 256.
59. Piedecausa García B et al. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*, 946: 34-50. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27056/1/Radiactividad%20natural%20de%20los%20materiales%20de%20construcci%C3%B3n_Parte%202.pdf
60. Quindós L. S. et al. (2016). The Laboratory of Natural Radiation (LNR) – a place to test radon instruments under variable conditions of radon concentration and climatic variables. *NUKLEONIKA*; 61(3):275–280.
61. Quindós L.S. (1985). Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa. Ed. Universidad de Cantabria-CSN.
62. Quindós L.S. et al. (1989). Radón, principal fuente de radiación natural. *Revista española de física*; vol 3, nº2, 22-27.
63. Quindós L.S. et al. (1991). Radon and lung cancer in Spain. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 36, nº 2/4, pp.331-333.
64. Quindós L.S. et al. (1991). Soto. Natural survey on indoor radon in Spain. *Environment International*, vol. 17, pp. 449-453.
65. Raaschou-Nielsen O et al. (2008). Domestic radon and childhood cancer in Denmark. *Epidemiol Camb Mass*; 19(4): 536-43.
66. RADPAR: Radon Prevention and Remediation Project. Executive Agency for Health and Consumer (EAHC) of DG SANCO.
67. Ruano-Raviña A et al. (2007). Radón y cáncer de pulmón. Implicaciones para profesionales sanitarios, ciudadanos y administraciones públicas. *Med Clin (Barc)*; 128(4): 545-9.
68. Ruano-Raviña A et al. (2013). Radón interior. Un carcinógeno laboral olvidado. *Arch Prev Riesgos Labor*; 16(1):5-6.
69. Ruano-Raviña et al. (2014). Radón interior y salud pública en España. Tiempo para la acción. *Gac. Sanit.*; 28(6):439-441.
70. Ruano-Raviña et al. (2014). Residential radon exposure and esophageal cancer. An ecological study from an área with high indoor radon concentration (Galicia, Spain). *Int J Radiat Biol*; 90(4): 299-305.
71. Ruano-Raviña et al. (2017). Residential radon exposure and brain cancer: an ecological study in a radon prone area (Galicia, Spain). *Scientific Reports*; 7: 3595.

72. Ruano-Ravina A et al. (2021). Lung cancer mortality attributable to residential radon exposure in Spain and its regions. *Environmental Research* 199, 111372.
73. Sáinz C. et al. (2007). Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves. *Journal of Hazardous Materials* 145; 368–371.
74. Sáinz C. et al. (2017). Spanish experience on the design of radon surveys based on the use of geogenic information. *Journal of Environmental Radioactivity* 166; 390-397.
75. State Office for Nuclear Safety (2019). National Action Plan for control of public exposure to Radon. Disponible en: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/PZIZ/Radon/RANAP_ENG.pdf
76. Suárez Mahou E et al. (2000). Proyecto MARNA. Mapa de radiación gamma natural. Colección Informes Técnicos 5. 2000. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04-02+Proy>
77. Torres-Durán M et al. (2014). Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone área (Galicia, Spain). *Eur Respir J*; 44(4): 994-1001.
78. Turner Mc et al. (2012). Radon and COPD mortality in the American Cancer Society Cohort. *Eur Respir J*; 39(5): 1113-9.
79. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Conducting Human Health risk assessment. <https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>
80. United States Environmental Protection Agency. (2012). A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. Disponible en: www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html
81. United States Environmental Protection Agency (2019). The National Radon Action Plan: A strategy for saving lives. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-05/documents/nrap-a_strategy_for_saving_lives_-_final.pdf
82. WHO (2021). The global health observatory. (2021). National radon action plans and regulations Disponible en: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/gho-phe-radon-database>
83. Wheeler BW et al. (2012). Radon and skin cancer in southwest England: an ecologic study. *Epidemiol Camb Mass*; 23(1):44-52.
84. Zeeb H. Shannoun F. WHO Hadbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva, World Health Organization, 2009.