



gemnia

Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

INFORME DE RESULTADOS

Junio 2021



SOTO DEL REAL



Índice

1	Introducción.....	4
1.1	El Radón en la naturaleza	4
1.2	El Radón en las edificaciones	5
1.3	El Radón como problema de salud pública	5
2	Marco normativo	6
3	Caracterización preliminar del riesgo por radón en Soto del Real.....	11
4	Metodología aplicada	15
4.1	Aspectos básicos	15
4.2	Toma de datos.....	16
4.3	Tratamiento estadístico	17
5	Geología.....	19
5.1	Geología regional	19
5.2	Geología local.....	20
6	Radón en suelo	25
7	Registros de la concentración de radón en aire.	28
7.1	Interpretación de resultados	31
8	Análisis de los datos. Generación del Mapa de Potencial de radón en el Municipio de Soto del Real.....	33
8.1	Interpretación de los resultados por litologías consideradas.....	33
9	Análisis de la Vulnerabilidad de los edificios	40
10	Conclusiones y recomendaciones	42
	Bibliografía.....	45
	ANEXOS.....	48
	ANEXO 1. Resultados de laboratorio.....	49
	ANEXO 2. Análisis estadístico.....	50
	ANEXO 3. Mapas.....	51
	ANEXO 4. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios.....	52



Índice de Tablas

Tabla 1. Medidas de radón en suelo y permeabilidad intrínseca.....	26
Tabla 2. Clasificación checa del terreno a partir de las medidas de concentración de actividad de radón y la permeabilidad estimada del suelo a los gases.....	26
Tabla 3. Clasificación de la permeabilidad del suelo a los gases (Neznal, 2005).....	27
Tabla 4. Registro de mediciones de radón en aire en viviendas.....	31
Tabla 5. Viviendas categorizadas por cota de construcción (Seisdedos Domínguez, 2016).....	41

Índice de Figuras

Figura 1. Localización general del municipio de Soto del Real, Madrid. En Seisdedos (2016).	4
Figura 2.. Mapa modificado (Comunidad de Madrid) del Mapa de exposición al Radón en España (CSN, Informe Técnico 38.2013). En www.geomnira-radon.es . Se remarca la situación del municipio de Soto del Real.	12
Figura 3. Detalle del municipio de Soto del Real, del Mapa de exposición al Radón en España (CSN, Informe Técnico 38.2013), donde se reconocen dos categorías de riesgo (categoría 2 o alta y categoría 1 o media).	12
Figura 4. Mapa de Potencial de Radón en el municipio de Soto del Real (Mapa de Potencial de Radón, CSN 2017)	13
Figura 5. Mapa de zonificación por municipio de Radón (Mapa de Potencial de Radón, CSN 2017)	14
Figura 6. Implicaciones de los principales componentes del riesgo del radón. Fuente: Manuel Seisdedos Domínguez (2016) ..	15
Figura 8. Criterios de clasificación de las zonas propensas al radón según la metodología propuesta por Barnet (1994) y Neznal et al. (2004).	27
Figura 9. Viviendas y edificios en cada rango de concentración	32
Figura 10. Porcentaje de viviendas y edificios en cada rango de concentración.....	32
Figura 11. Viviendas y edificios en rocas ígneas para cada rango de concentración.	34
Figura 12. Porcentaje de viviendas y edificios en rocas ígneas para cada rango de concentración.....	35
Figura 13. Viviendas y edificios en rocas metamórficas para cada rango de concentración	36
Figura 14. Porcentaje de viviendas y edificios en rocas metamórficas para cada rango de concentración	36
Figura 15. Viviendas y edificios en depósitos de ladera para cada rango de concentración	37
Figura 16. Porcentaje de viviendas y edificios en depósitos de ladera para cada rango de concentración	38
Figura 17. Viviendas y edificios en Fondos de Valle para cada rango de concentración.	39
Figura 18. Porcentaje de viviendas y edificios en Fondos de Valle para cada rango de concentración.	39

I Introducción

Los resultados del presente informe pertenecen a un proyecto promovido por el Ayuntamiento de Soto del Real con objeto de evaluar el riesgo que supone el peligro natural del gas radón en construcciones destinadas a uso residencial y/o administrativo.

Haciendo uso de tecnologías de la información geográfica y análisis estadístico, se plantea el trabajo de acuerdo a la metodología seguida por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para la Cartografía del Potencial de Radón de España (CSN. 2017), para cuantificar con la mayor precisión posible, qué zonas del municipio, y por tanto, qué construcciones están expuestas a cada una de las categorías aprobadas por el CSN.

La medición de gas radón en el aire de viviendas/edificios del municipio de Soto del Real (figura 1) se ha realizado con dosímetros de trazas nucleares (DRF de DOSIRAD con film LRI15). Este proyecto, como ya se ha indicado, ha sido impulsado por el propio Ayuntamiento de Soto del Real y consta de un total de 100 mediciones en viviendas/edificios repartidos por el municipio.

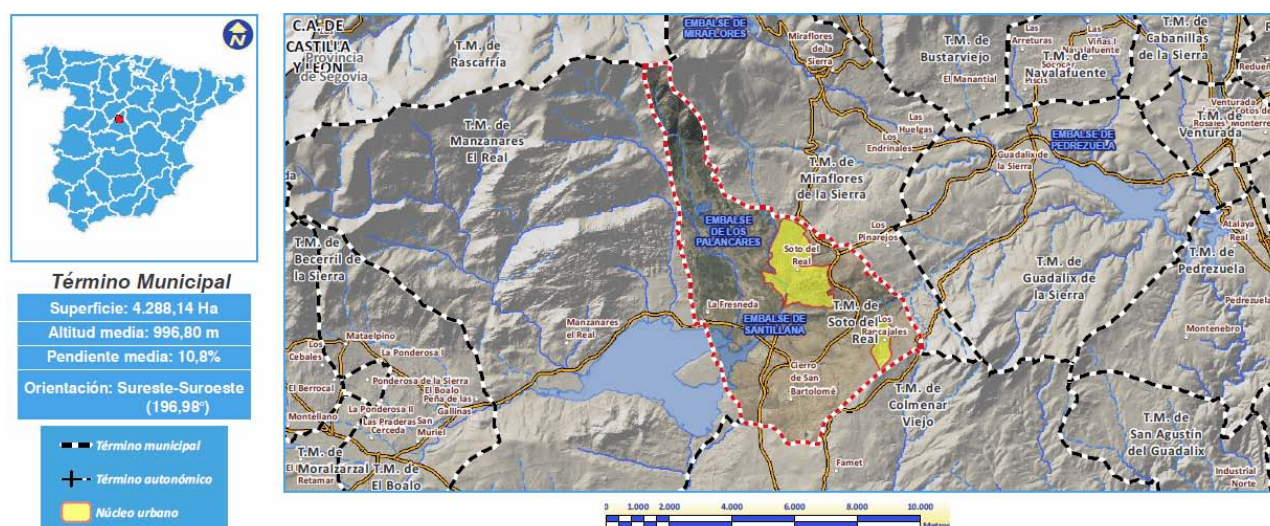


Figura 1. Localización general del municipio de Soto del Real, Madrid. En Seisdedos (2016).

1.1 El Radón en la naturaleza

El radón (Rn) es un gas noble radiactivo pero incoloro, inodoro e insípido que procede de la descomposición natural del uranio. Su símbolo químico es Rn, su número atómico es 86, la masa atómica 222, más pesado que el aire; la densidad a 0°C y 1 atm. es de 9,73 kg/m³, y soluble en agua y otros líquidos. La viscosidad a 20°C y 1 atm. tiene un valor de 229,0 micropoises y el coeficiente de difusión en el aire es de 0,1.10-5 m²/s.

Existen tres isótopos principales del radón procedentes de tres grandes cadenas radiactivas de origen natural: Rn-222, Rn-220 y Rn-219, sus nombres son respectivamente: radón, actinón y torón.

Su isótopo ²²²Rn -Radón- es el más estable -vida media de 3,8 días- y abundante, así como el más estudiado por su toxicidad. Se origina de forma natural en las rocas del subsuelo, producto de la desintegración del radio (²²⁶Ra) en la cadena de desintegración del uranio (²³⁸U).



El uranio (^{238}U) tiene un periodo de semidesintegración de 4.500 millones de años, el radio de 1.660 años y el radón posee un periodo medio de vida de 3,8 días. Es decir, la concentración de radón formado a partir de la desintegración del isótopo del radio-226, disminuye a la mitad cada 3,825 días. El radón se desintegra emitiendo partículas alfa y otros radionucleidos

La presencia de uranio en los suelos origina como descendiente el ^{226}Ra , el cual en su desintegración pasa a ^{222}Rn y, si las condiciones del suelo (porosidad, fragmentación, permeabilidad) lo permiten, el radón, tras haber emanado de las rocas en el suelo, se difunde por los pequeños espacios que quedan entre las partículas del terreno. La producción de radón en el subsuelo depende del tipo de roca, y su abundancia es significativamente mayor en rocas ígneas (granitos) y metamórficas (pizarras y esquistos). Por otro lado, la tasa de exhalación desde el subsuelo no es constante y depende de factores climáticos y ambientales.

1.2 El Radón en las edificaciones

Una parte del radón acaba alcanzando la superficie del suelo donde se disipa en el aire pero, interpuestas entre la litosfera y la atmósfera, las edificaciones humanas funcionan como un elemento de retención del radón. El gas, en su movimiento ascendente a través del terreno y al toparse con una construcción, penetra en las edificaciones a través de todas aquellas fisuras, aberturas y poros (conductos de saneamiento, forjado sanitario, cámara de aire en muros, solera, juntas pared-suelo, etc.) de su estructura en contacto con el sustrato donde se asienta. Como se ha dicho, el radón no presenta niveles altos al aire libre pero, en las viviendas tiende a acumularse y puede alcanzar niveles tóxicos para la salud humana.

Por tanto, los niveles de radón en un determinado recinto dependerán de las características geológicas del terreno, permeabilidad y contenido de agua del suelo, de diversas variables meteorológicas y ambientales, del tipo de construcción, de los materiales de construcción o de revestimiento utilizado y del grado de ventilación del espacio. Así, pueden existir edificios muy próximos entre ellos con niveles de radón muy distintos debido a las variaciones en las soluciones constructivas adoptadas y el estado de conservación de las mismas.

1.3 El Radón como problema de salud pública

Las evidencias científicas indican que una exposición continuada a concentraciones elevadas de radón puede causar cáncer de pulmón. Así, la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica al radón como agente cancerígeno de grado I del grupo A. Atribuye al radón hasta un 14% de los casos de cáncer de pulmón siendo la segunda causa de este tipo de cáncer después del consumo de tabaco.

Al inhalar aire con alta concentración del gas, parte de los átomos de radón se desintegrarán en el interior de nuestro organismo y, los descendientes sólidos a los que da lugar serán capaces de adherirse a las partículas en suspensión del aire que inspiramos y que a su vez se adherirán al tejido pulmonar. Los descendientes del radón de vida corta como el ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po , que se encuentran dentro de su misma cadena de desintegración, son los que en su proceso de descomposición liberan emisiones radiactivas capaces de generar tumores a largo plazo al detenerse y depositarse en el tracto respiratorio y, tras sucesivas desintegraciones radiactivas, causar la irradiación de los tejidos provocando lesiones en las células del epitelio bronquial.



Existen recientes estudios como puede ser la tesis doctoral de María Torres Durán (2015), "Radón residencial y riesgo de cáncer de pulmón en nunca fumadores", en el que, en base a un estudio multicéntrico de casos y controles en el noroeste de España, se expone como conclusión más relevante que las personas nunca fumadoras expuestas a concentraciones de radón residencial superiores a 200 Bq/m³ tienen un riesgo estadísticamente significativo de desarrollar cáncer de pulmón de 2,2 veces superior frente a aquellos expuestos a concentraciones por debajo de los 100 Bq/m³.

La concentración de actividad de radón en aire se mide en becquerelios por metro cúbico de aire, Bq/m³ -un becquerel equivale a una desintegración atómica por segundo-.

La intensidad y el tiempo de exposición, así como los niveles de tolerancia de los individuos, determinan el riesgo que entraña para la salud la inhalación de radón. Los efectos nocivos del gas aumentan proporcionalmente a la exposición. De tal forma que, un incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón en una vivienda, conlleva un aumento del 10% en la probabilidad de padecer cáncer de pulmón. No se han encontrado indicios de que exista un nivel de concentración umbral. Este incremento resulta estadísticamente significativo incluso para concentraciones de radón inferiores a 200 Bq/m³.

2 Marco normativo

Una vez reconocida la importancia del radón como cancerígeno humano, diversos organismos internacionales, así como gobiernos e instituciones han establecido normativas y estrategias de control del radón para reducir el riesgo para la salud pública. Así, las autoridades de EEUU fijan un límite de 148 Bq/m³ para tomar medidas (<https://www.epa.gov/radon>) y la OMS recomienda que los niveles no superen los 100 Bq/m³ para nuevas construcciones y entre 200-300 Bq/m³ para las ya existentes (WHO Handbook on Indoor Radon, 2009; <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>).

La normativa básica de referencia es:

- La norma europea UNE 171330-2 de 2009, relativa a los procedimientos de inspección de calidad ambiental en interiores, que establece un valor límite admisible de 200 Bq/m³.
- El Consejo de Seguridad Nuclear en la Guía de Seguridad 11.02 recomienda un nivel de referencia de radón en viviendas de 300 Bq/m³ de promedio anual y un nivel objetivo de 100 Bq/m³ para edificios de nueva planta o para viviendas en las que vayan a realizarse acciones de mitigación.
- La Directiva 2013/59/EURATOM de 17 de enero de 2014 que limita la exposición al radón en recintos cerrados a 300 Bq/m³ y fomenta la adopción de medidas técnicas para la remediación.

No obstante, en el momento vigente, la legislación existente en España sobre la exposición al radón en los espacios públicos y lugares de trabajo se basa en el RD 783/2001, modificado por RD 1439/2010 (REGLAMENTO SOBRE PROTECCIÓN SANITARIA CONTRA RADIACIONES IONIZANTES)

El RD 783/2001, de 6 de julio, *por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones* traspone la DIRECTIVA 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 *por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes*.



El RD 783/2001 se aplica a todas las prácticas que impliquen un riesgo derivado de las radiaciones ionizantes que procedan de una fuente artificial, o bien, de una fuente natural de radiación cuando los radionucleidos naturales son o han sido procesados por sus propiedades radiactivas, fisionables o fértiles.

Con posterioridad, el RD 783/2001 queda modificado por el RD 1439/2010 *por el que se modifica el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por RD 783/2001 de 6 de Julio*.

El RD 1439/2010 obliga directamente a los titulares de las actividades en las que existan fuentes naturales de radiación a realizar los estudios necesarios para determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica, sin necesidad de que estos estudios sean exigidos por las autoridades competentes.

El RD 1439/2010 modifica el Título VII del RD 783/2001, de forma que indica que los titulares de las actividades laborales, no reguladas en el artículo 2.1, en las que existan fuentes naturales de radiación, deberán declarar estas actividades ante los órganos competentes en materia de industria de las Comunidades Autónomas en cuyo territorio se realizan estas actividades laborales y realizar los estudios necesarios a fin de determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Las actividades laborales cuyos titulares deben realizar los estudios requeridos por el RD 1439/2010 incluyen las que se llevan a cabo en los siguientes lugares de trabajo:

- Establecimientos termales.
- Cuevas, galerías y minas.
- Instalaciones donde se almacenan y tratan aguas de origen subterráneo.
- Lugares de trabajo subterráneos en general.
- Lugares de trabajo en zonas identificadas por sus valores elevados de radón.

Las recomendaciones del Consejo de Seguridad Nuclear

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) actúa de órgano asesor, habiendo sido designado para establecer los criterios y procedimientos para la regulación de los niveles de gas radón en el entorno laboral en España.

La Guía de Seguridad 11.4. del Consejo de Seguridad Nuclear (12 de diciembre de 2012) establece la *metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo*. El objetivo de esta guía es establecer una serie de criterios metodológicos para los estudios que, en virtud del título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), deben realizar los titulares de las actividades laborales en las que exista un considerable riesgo potencial de exposición al radón (^{222}Rn) y a sus descendientes de vida corta. La finalidad principal de los estudios es determinar si la concentración media anual de radón a la que están expuestos los trabajadores o el público supera el nivel de referencia correspondiente.



En el caso de los trabajadores, este nivel (**600 Bq/m³** – Instrucción IS-33 del CSN) define cuáles son las exposiciones laborales al radón que deben considerarse dentro del sistema de protección radiológica ocupacional.

Los estudios del riesgo radiológico ligado al radón deben ser representativos de la exposición anual de los trabajadores y, en su caso, del público. Para ello, los resultados deben basarse en medidas con **detectores pasivos** expuestos durante un periodo mínimo de tres meses. Se recomienda estructurar los estudios atendiendo a un protocolo en cuatro fases:

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

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

Directiva europea 2013/59/EURATOM

La Unión Europea en una reciente directiva (directiva 2013/59/EURATOM *Diario Oficial*, 17 de enero de 2014 donde establece normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes) marca un nivel de referencia máximo de **300 Bq/m³** para el promedio anual en lugares de trabajo y en cualquier recinto cerrado. Dicha directiva establece que cada estado miembro debe disponer de niveles nacionales de referencia y de un plan de acción –que deberían haber trasladado a su legislación antes del 6 de febrero de 2018- para promover la adopción de medidas técnicas para identificar espacios donde se supere el nivel de referencia y fomentar, cuando proceda, la adopción de medidas de mitigación. Así, la gran novedad es sin duda que los niveles de referencia en espacios de trabajo **se reducirán de los 600 Bq/m³ actuales a 300 Bq/m³** con la aplicación de la nueva directiva.

El hecho de que no se hayan cumplido los plazos establecidos en la trasposición de dicha Directiva, implica necesariamente según algunas sentencias del Tribunal Constitucional, que a partir de su fecha límite de trasposición la misma sea vinculante, por lo que la misma resulta de aplicación a partir de dicha fecha. En cualquier caso, el 16 de Febrero de 2018, el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, acordó la apertura de los trámites de audiencia a los interesados y de información pública en la elaboración de la propuesta de "Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (<http://www.minetad.gob.es/energia/es-ES/Participacion/Paginas/proyecto-rd-riesgos-radiacion-ionizante.aspx>).

La norma regulará el marco para la protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, e incorporará parcialmente al ordenamiento jurídico español 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, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom. Dentro del marco regulador español, con esta nueva norma quedarán derogados el R.D. 783/2001, por el que se aprueba el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, y



el R.D. 413/1997, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes por intervención en zona controlada.

En el proyecto del RD-RPSRI se indicaba en su capítulo II (Exposición al radón), artículo 75 que cita la obligación de desarrollar estudios de radón a:

1. *Los titulares de las actividades laborales que se desarrollen en los siguientes lugares de trabajo:*

- a) lugares de trabajo subterráneos, como obras, túneles, minas o cuevas.*
- b) lugares donde se procese, manipule o aproveche agua de origen subterráneo.*
- c) todos los lugares de trabajo situados en planta baja rasante o planta baja de los términos municipales de actuación prioritaria a los que hace referencia el artículo 79, deberán determinar la concentración promedio anual de radón en todas las zonas del lugar de trabajo en las que los trabajadores deban permanecer o a las que puedan acceder por razón de su trabajo, excluidas las zonas al aire libre.*

2. *Cuando en un lugar de trabajo haya zonas con concentraciones de radón que, en promedio anual, superen el nivel de referencia de 300 Bq/m³, el titular de la actividad laboral deberá tomar las medidas oportunas para reducir las concentraciones y/o la exposición al radón.*

El artículo 76 (determinación del promedio anual de la concentración de radón) indica en su punto 2 que:

El promedio anual de la concentración de radón se estimará, a partir de medidas de larga duración, siguiendo las Guías e Instrucciones emitidas por el Consejo de Seguridad Nuclear. El laboratorio que realice la medida deberá estar acreditado de acuerdo con la Norma ISO/IEC 17025 por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), o bien por otro organismo nacional de acreditación designado de acuerdo con la normativa europea. El titular de la actividad laboral asumirá la responsabilidad de verificar que el laboratorio de medida cuente con una acreditación en vigor.

El gas radón en el Código Técnico de Edificación

En las últimas modificaciones del Código Técnico de Edificación según Real Decreto 732/2019 de 20 de diciembre (BOE 27-diciembre de 2019) se ha incorporado la Sección HS 6. Protección frente a la exposición al radón (Documento Básico HS Salubridad) en el que se indica que los edificios dispondrán de medios adecuados para limitar el riesgo previsible de exposición inadecuada a radón procedente del terreno en los recintos cerrados.

El ámbito de aplicación de esta nueva exigencia son los términos municipales en los que a partir de los estudios realizados por el Consejo de Seguridad Nuclear se considera que existe una probabilidad significativa de que los edificios allí construidos sin soluciones específicas de protección frente al radón presenten concentraciones de radón superiores al nivel de referencia de 300 Bq/m³ (municipios de Zona I y Zona II).

En estos términos municipales, la Sección HS 6 aplica en los siguientes casos:

- a) Edificios de nueva construcción;
- b) Intervenciones en edificios existentes;



Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

- i) en ampliaciones, a la parte nueva;
- ii) en cambio de uso, a todo el edificio si se trata de un cambio de uso característico o a la zona afectada, si se trata de un cambio de uso que afecta únicamente a parte de un edificio o de un establecimiento;
- iii) en obras de reforma, a la zona afectada, cuando se realicen modificaciones que permitan aumentar la protección frente al radón o alteren la protección inicial.

Esta sección no será de aplicación en los siguientes casos:

- a) Locales no habitables, por ser recintos con bajo tiempo de permanencia;
- b) Locales habitables que se encuentren separados de forma efectiva del terreno a través de espacios abiertos intermedios donde el nivel de ventilación sea análogo al del ambiente exterior.

Tal y como se ha indicado previamente, el documento Básico HS Salubridad diferencia dos tipologías de municipios; Zona I y Zona II. En función de la zona a la que pertenezca el municipio deberán implementarse las siguientes soluciones, u otras que proporcionen un nivel de protección análogo o superior:

Municipios de Zona I

Se dispondrá una barrera de protección, con las características indicadas en el apartado 3.1 (Barrera de Protección), entre el terreno y los locales habitables del edificio, que limite el paso de los gases provenientes del terreno.

Alternativamente, se podrá disponer entre el terreno y los locales habitables del edificio una cámara de aire destinada a mitigar la entrada del gas radón a estos locales. En este caso, la cámara de aire deberá estar ventilada según las indicaciones contenidas en el apartado 3.2 (Espacio de Contención Ventilado) y separada de los locales habitables mediante un cerramiento sin grietas, fisuras o discontinuidades entre los elementos y sistemas constructivos que pudieran permitir el paso del radón.

Municipios de Zona II

Se dispondrá una barrera de protección, con las características indicadas en el apartado 3.1 (Barrera de Protección) junto con un sistema adicional que podrá ser:

- i) *Un espacio de contención ventilado con las características indicadas en el apartado 3.2 (Espacio de Contención Ventilado), situado entre el terreno y los locales a proteger, para mitigar la entrada de radón proveniente del terreno a los locales habitables mediante ventilación natural o mecánica.*
- ii) *Un sistema de despresurización del terreno con las características indicadas en el apartado 3.3 (Despresurización del terreno) que permita extraer los gases contenidos en el terreno colindante al edificio.*

Edificios existentes

Tal y como el Documento Básico HS Salubridad 6 expone, en el caso de intervenciones en edificios existentes, la aplicación de las soluciones anteriores podrá ajustarse mediante la utilización de soluciones alternativas que, en



conjunto, permitan limitar adecuadamente la entrada de radón. En todo caso es necesario que los locales habitables dispongan de un nivel de ventilación interior que cumpla con la reglamentación en vigor de calidad del aire.

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

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

3 Caracterización preliminar del riesgo por radón en Soto del Real

Existen dos cartografías de referencia a nivel estatal en lo que respecta a la caracterización del riesgo por radón, por un lado el "Mapa Predictivo de Exposición al Radón en España" (Consejo de Seguridad Nuclear, informe técnico 38.2013: "El mapa predictivo de exposición al radón en España") y la "Cartografía de Potencial de Radón en España" (FDE-02.17 Cartografía del potencial de radón de España CSN, 2017). Ambas cartografías están realizadas en base a mapas escala 1:200.000, lo que limita su aplicabilidad a escala municipal.

A partir del mapa predictivo de exposición al radón en España, se establecen tres categorías de exposición potencial:

- 0 o baja (<150 Bq/m³).**
- 1 o media (150-300 Bq/m³).**
- 2 o alta (>300 Bq/m³).**

El término municipal de Soto del Real, se corresponde con Categoría 1 (exposición potencial media; 150-300 Bq/m³) y categoría 2 (exposición potencial alta; >300 Bq/m³) según el mapa predictivo de exposición al radón en España (CSN, informe técnico 38.2013) (figuras 2 y 3).

Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

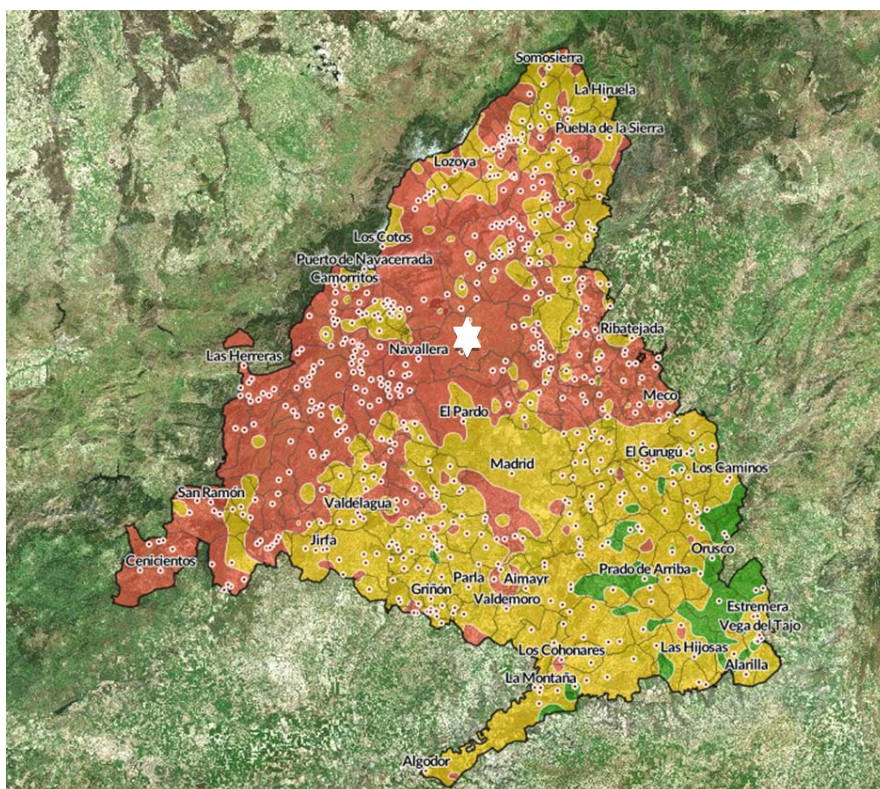


Figura 2.. Mapa modificado (Comunidad de Madrid) del Mapa de exposición al Radón en España (CSN, Informe Técnico 38.2013). En www.geomnia-radon.es. Se remarca la situación del municipio de Soto del Real.

La Sierra de Guadarrama se caracteriza por litologías graníticas dominantes, propicias para la exhalación de gas radón. En líneas generales, gran parte de los municipios madrileños que componen la Sierra de Guadarrama están catalogados como Categoría 1 y 2 (Exposición Media y Alta), entre ellos el municipio de Soto del Real (Figura 2 y 3).

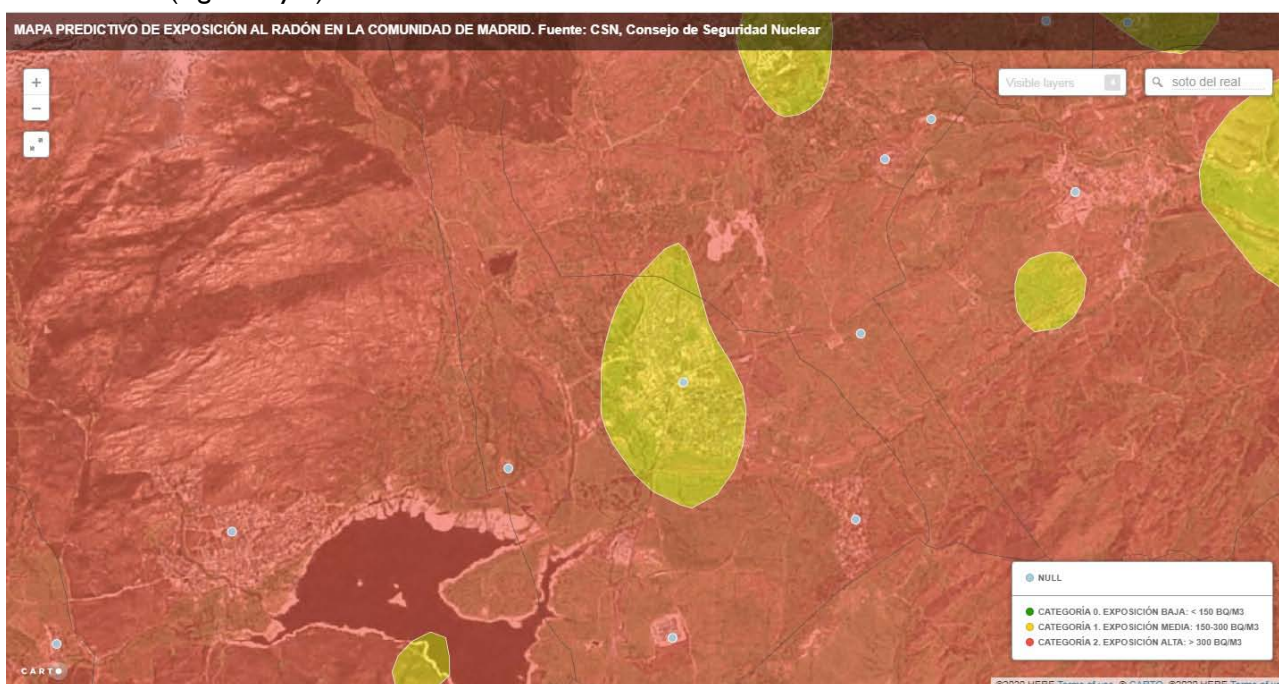


Figura 3. Detalle del municipio de Soto del Real, del Mapa de exposición al Radón en España (CSN, Informe Técnico 38.2013), donde se reconocen dos categorías de riesgo (categoría 2 o alta y categoría 1 o media).

Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

Por otra parte, el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear) ha elaborado la cartografía de potencial de radón en España (CSN, 2017), que categoriza las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón y, en particular, identifica aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presenta concentraciones superiores a 300 Bq/m³.

En este mapa, la práctica totalidad del municipio de Soto del Real es categoría P90 > 400 Bq/m³ y P90 entre 201 y 300 Bq/m³.

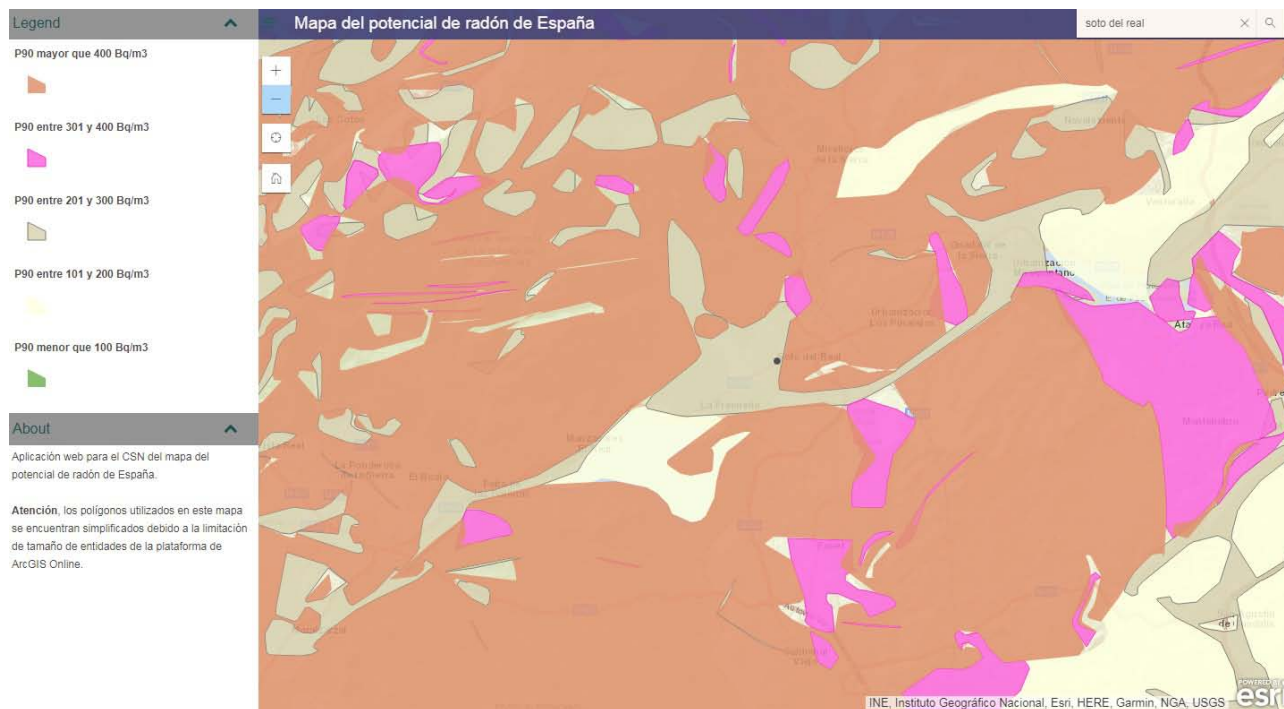


Figura 4. Mapa de Potencial de Radón en el municipio de Soto del Real (Mapa de Potencial de Radón, CSN 2017)

Para interpretar el mapa hay que entender que lo que representa es el percentil 90 de la distribución de niveles de radón de los edificios de esa zona. Por ejemplo, 300 Bq/m³ significa que:

- el 90% de los edificios tienen concentraciones inferiores a 300 Bq/m³.
- el 10% supera este nivel.

El potencial de radón depende de:

- la capacidad del terreno para generar y transportar el radón.
- las características constructivas del parque residencial.

A partir del mapa del potencial de radón se obtiene, directamente, el mapa de zonas de actuación prioritaria (aquellas con potencial de radón superior a 300 Bq/m³). En este mapa se representan, en color destacado, los municipios en los que hay población que reside en zonas de actuación prioritaria, como es el caso de Soto del Real.

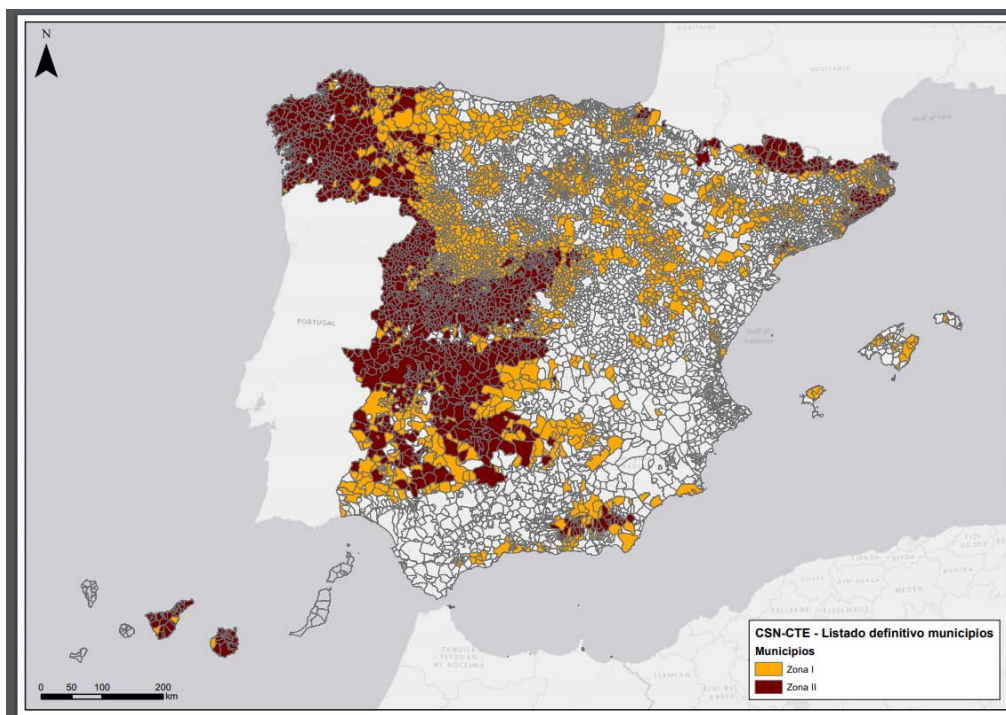


Figura 5. Mapa de zonificación por municipio de Radón (Mapa de Potencial de Radón, CSN 2017)

Esta publicación indica que, a efectos administrativos, es útil definir las zonas de actuación prioritaria a nivel municipal.

4 Metodología aplicada

La metodología aplicada para la realización de este trabajo tiene como principales referencias bibliográficas las siguientes fuentes: "Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information" (García-Talavera M. et al. 2013. Journal of Radiological Protection); "Cartografía de Potencial de radón en España" (CSN, 2017); "Mapa del Riesgo de Exposición al Gas Radón en las Viviendas de la Comunidad de Madrid" (Seisdedos Domínguez M. TFM. UCM. 2016).

El tratamiento geoespacial de los datos se ha realizado con el programa QGIS, Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License.

4.1 Aspectos básicos

El objetivo del presente trabajo es evaluar el Riesgo por Radón para el Municipio de Soto del Real a una escala adecuada para la toma de decisiones a nivel municipal. En este caso la escala seleccionada es 1:15.000.

El riesgo es la probabilidad de que un territorio y los asentamientos humanos que lo ocupan puedan verse afectados negativamente por un proceso natural. El cálculo de los riesgos naturales se resuelve relacionando peligrosidad o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

De forma simplificada, el riesgo se determina mediante el producto del peligro, la exposición y la vulnerabilidad; de tal manera que, si uno de los factores multiplicadores no existe, el riesgo es nulo.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

En el concepto de riesgo ya se ha incorporado la dimensión humana y las connotaciones negativas del daño, pero conserva aún la carga probabilística de algo que todavía no ha ocurrido.

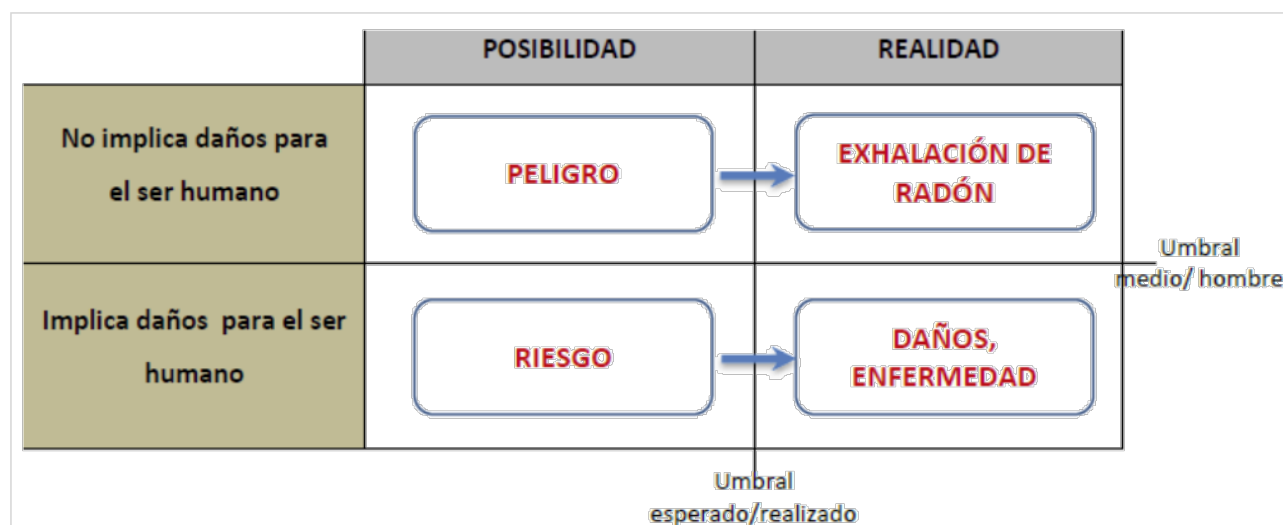


Figura 6. Implicaciones de los principales componentes del riesgo del radón. Fuente: Manuel Seisdedos Domínguez (2016)

El peligro o, la peligrosidad, que en este caso es la exhalación de radón desde el suelo, es una característica inherente al fenómeno y no se puede reducir pero, sobre el riesgo sí se puede actuar y mitigarlo disminuyendo la vulnerabilidad y/o la exposición.

En Ayala-Carcedo (2002), la exposición se define como el conjunto de elementos (personas y bienes) que se encuentran en el área amenazada; en nuestro caso se trata de las viviendas y lugares de trabajo existentes en el municipio de Soto del Real.

De otra parte, la vulnerabilidad se puede definir cómo la fragilidad intrínseca de los bienes o personas expuestos, esto es, en qué grado pueden verse afectados por el peligro. En el caso que nos aborda, esta vulnerabilidad está asociada, por un lado, a las características constructivas de los edificios (altura de la planta sobre el suelo, forjados sanitarios, sótanos, medidas específicas antiradón, etc.) y a los propios hábitos de vida de las personas (tiempo de permanencia en la vivienda, ventilación de los espacios, etc.).

4.2 Toma de datos

Siguiendo los criterios del CSN, para producir el mapa de potencial de radón, se han utilizado 100 medidas de radón en viviendas y edificios públicos distribuidos por el municipio de Soto del Real (Mapa N° 6), agrupadas por unidad geológica —modificado del mapa a escala 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)— (Mapa N° 3) y el mapa de riesgo de radón en suelo, realizado en base a mediciones de radón y permeabilidad intrínseca en las diferentes unidades geológicas diferenciadas, siguiendo el "método checo" para determinar el riesgo de radón (denominado índice de radón, IR) asociado a los terrenos (Neznal, et al., 2004) (Mapa N° 5).

Las medidas de radón en suelo se han realizado utilizando un Detector de Radón RAD7, de la casa Durridge, de acuerdo a una metodología propia para medidas de radón en suelo, contrastada en intercomparaciones realizadas con universidades y empresas del sector y en los trabajos desarrollados dentro del "Acuerdo específico de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y las Universidades Autónoma de Barcelona, de Cantabria, de Las Palmas de Gran Canaria y Politécnica de Catalunya para la caracterización del nivel de radón en terrenos representativos de la geografía estatal" (CSN 2016, 2017).

Las medidas de permeabilidad intrínseca han sido realizadas mediante el equipo Radon JOK, de acuerdo a la metodología establecida por el fabricante.

Las áreas establecidas según esos criterios primarios de agrupación se dividieron o combinaron posteriormente a fin de obtener (en la medida que la escala permite) unidades con niveles de radón espacialmente homogéneos y con un tamaño muestral adecuado. Para estas unidades se estimó el percentil 90 (P90) de la distribución de concentraciones de radón como una cota superior al 90% de confianza (García-Talavera M. et al. 2013). Los valores así obtenidos se representan agrupados por rangos en el mapa de potencial de radón.

Las mediciones de concentración de gas radón en aire dentro de edificios se ha conseguido mediante la instalación de detectores pasivos de radón en un total de 100 viviendas durante el invierno 2020-2021. Este tipo de test se realiza generalmente en largo periodo (generalmente 3 meses) mediante un tipo de detectores pasivos conocidos como detectores sólidos de trazas nucleares (SSNTD). Se trata de un procedimiento ampliamente utilizado para la detección de contaminación por radón en hogares y espacios de trabajo, que cumple con la normativa y las recomendaciones del CSN.



Este tipo de detectores proporciona una medida integrada de la concentración media de radón durante el periodo total de medición. Geomnia ha empleado el detector DRF con película de trazas nucleares tipo LR115 producida por KODAK, que tiene una alta sensibilidad y fiabilidad. Los principios de la medición se basan en que cuando el radón emite partículas alfa a gran velocidad, éstas dañan la estructura de la película sensible a dichas partículas. Posteriormente, estas trazas son contabilizadas en laboratorio.

Siguiendo la misma metodología utilizada para obtener las mediciones que alimentan el Inventario nacional de Radón - base de los mapas de radón a nivel estatal - (Quindós *et al* 1991, Gutierrez *et al* 1992, Amorós *et al* 1995, Baixeras *et al* 1996, Pérez *et al* 1996, Baeza *et al* 2003, Quindós *et al* 2011), se ha instalado un detector por vivienda o edificio, localizado en la planta 0, y cuando ésta no está habitada, en el primer piso. Por tanto, no representan directamente la exposición de la población, pero se dispone de una medición lo más comparable posible, tanto entre las que se han hecho para este proyecto como con las realizadas para el inventario estatal. Incidir que, en general, el riesgo asociado a las plantas bajo rasante es mayor que el que reflejan los mapas, mientras que es inferior —en razón de un 20% menos por planta— en los pisos altos.

El periodo de integración establecido en el experimental ha sido de tres meses. El análisis de los dosímetros ha sido realizado por el laboratorio DOSIRAD SARL (ALGADE) en Francia, en cumplimiento con la norma NF ISO 11665-4 y las recomendaciones establecidas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

DOSIRAD SARL figura en el “LISTADO DE LABORATORIOS ACREDITADOS PARA MEDIR RADÓN EN AIRE SEGÚN LA NORMA ISO/IEC 17025, UBICADOS EN ESPAÑA O CON DISTRIBUIDORES EN ESPAÑA” (<https://www.csn.es/radon>).

El laboratorio ha facilitado los siguientes resultados:

- ✓ Concentración media de radón [Bq/m^3] para el tiempo de exposición.
- ✓ Desviación standart (2σ) en [Bq/m^3].
- ✓ Número de serie del dosímetro.
- ✓ Día de comienzo, día de finalización y duración del test.

4.3 Tratamiento estadístico

Como ya se ha indicado, la metodología para realizar el tratamiento estadístico de los datos es la definida en "Mapping radon-prone areas using: radiation dose rate and geological information" M García-Talavera, A García-Pérez, C Rey and L Ramos. 2013, de la cual se extrae el siguiente resumen:

Con esta metodología, un área con altos niveles de radón se cataloga cuando el percentil 90 de la concentración de gas radón en el interior de una vivienda es mayor que el nivel de referencia. En la práctica, esta clasificación debe realizarse bajo una determinada incertidumbre, pues sólo un pequeño

porcentaje de las viviendas de esa área contarán con mediciones de gas radón en aire y por lo tanto la estimación del percentil diferirá del valor real.

Aunque existen muchas metodologías para calcular percentiles, dado que se conoce el tipo de distribución, una estimación paramétrica estará, en principio, sujeta a un menor error. Debido a que las mediciones de radón en viviendas conforman a menudo una distribución de tipo lognormal, existe una estimación paramétrica típicamente más adecuada, que puede ser obtenida como función de la media geométrica y desviación standard. Si las desviaciones standard de las áreas en estudio no difieren estadísticamente, las medias geométricas pueden ser usadas para la clasificación en lugar de los percentiles. Sin embargo, las estimaciones puntuales no proporcionan el tipo de información que una validación de hipótesis proporciona, siempre que existan diferencias significativas entre el valor real de un parámetro y su estimación.

Por lo tanto, la mejor metodología para realizar una clasificación de un área es el conocimiento de la incertidumbre a partir de la validación estadística de una hipótesis. En concreto, se basa en una validación de hipótesis que usa el límite superior del percentil 90 como un valor crítico.

La validación de hipótesis de áreas con altos niveles de radón:

$X_{0.9}$ es el percentil 90 de la concentración de radón en interior (X) en un área determinada. La decisión de clasificar esa área como “área con alto nivel de radón” puede formalizarse a partir del planteamiento de una validación de hipótesis donde la hipótesis nula ($H_0: X_{0.9} \geq 300 \text{ Bqm}^3$) es testada con la hipótesis alternativa $H_1: X_{0.9} < 300 \text{ Bqm}^3$). El valor crítico para rechazar H_0 es $X_{0.9}$, el límite superior en $X_{0.9}$, a un valor de significancia α .

Se asume que los datos de concentración de radón en interior X siguen una distribución lognormal. Se define como m_g la media geométrica de la muestra y por s_g la desviación standard geométrica de la muestra. Por tanto, la variable aleatoria $Y = \log X$ se distribuye normalmente con una media μ_y y una desviación standard α_y .

Dada una muestra aleatoria $\{X_i\}$, el límite superior del percentil 90 de Y ($Y_{0.9}$), puede ser obtenido como definen Hahn y Meeker (2011):

$$Y_p = y + g'_{(1-\alpha; p; n)} S_y$$

Donde y es la media de $\{Y_i\} = \{\log X_i\}$, $S_y = \sqrt{n/(n-1)} s_y$, n es el tamaño de muestra, s_y es la desviación standard de $\{Y_i\}$, y los factores $g'_{(1-\alpha; p; n)}$ se muestran en la tabla I de Odeh y Owen (1980).

A causa de la relación entre los percentiles teóricos de X e Y , $P\{Y < Y_{0.9}\} = 0.9 \iff P\{X < e^{Y_{0.9}}\} = 0.9$, el límite superior del percentil 90 de X es:

$$X_{0.9} = \exp\{Y_p\} = \exp\{Y + g'_{(1-\alpha; 0.9; n)} S_y\} = \exp\{Y\} \exp\{g'_{(1-\alpha; 0.9; n)} S_y\} = m_g s_g \exp\{g'_{(1-\alpha; 0.9; n)} \sqrt{n}/(n-1)\}$$

Al nivel de significancia α , la hipótesis nula puede ser rechazada (de esta forma concluyendo que un área particular no es un área de alto radón) si y sólo si $X_{0.9} < 300 \text{ Bqm}^3$. En especial, se establece $\alpha = 0.10$ (error de probabilidad de tipo I), que proporciona un 10% de probabilidad de fallar en la identificación de un área verdadera de radón.

La ecuación superior puede ser aplicada para $n > 2$, pero muestras de pequeño tamaño resultarán en mayores probabilidades de error de tipo II (no rechazos incorrectos de H_0). Para controlar este efecto, Faulkenberry and Weeks (1968) sugirieron que el tamaño de muestra fuera lo suficientemente grande para:

- (i) Exista una gran probabilidad ($1-\alpha$) de que el límite de tolerancia sea excedido por al menos $100p'\%$ de la población normal, y
- (ii) La probabilidad (δ) de que más de un $100p'\%$ de la población exceda el límite de tolerancia es pequeño, donde p' y p^* son proporciones específicas y $p^* > p'$.

La probabilidad de una demostración exitosa es $p_{\text{DEM}} = \Pr(p > p') \geq 1 - \delta$. Para $p' = 0.90$; $p^* = 0.98$ and $\delta = 0.10$, obtenemos un tamaño mínimo de muestra de 23. Como consecuencia, se establece esa figura como el tamaño mínimo de muestra para aplicar la hipótesis de áreas de alto radón, si bien, como el tamaño muestral para un municipio es más reducido se han considerado tamaños muestrales más reducidos.

5 Geología

5.1 Geología regional

El Municipio de Soto del Real, desde un punto de vista geológico se localiza en la Sierra de Guadarrama, que forma parte del Sistema Central.

Esta sierra está formada por una cadena montañosa con orientación suroeste a noreste, que tiene una longitud total de unos 80 kilómetros y el pico más alto es Peñalara con 2.428 metros de altitud sobre el nivel del mar. La Sierra divide las cuencas del Duero y Tajo y las provincias de Madrid y Segovia, dividiendo a su vez la Meseta Central Ibérica en dos submesetas.

La Sierra de Guadarrama es el resultado del choque de las placas de la submeseta sur y la submeseta norte, ambas pertenecientes a la Meseta Central de la Península Ibérica. Esta sierra se levantó durante la orogenia alpina (Era Terciaria), aunque los materiales sobre los que se asienta (zócalo granítico) sean anteriores (Orogenia Hercínica).

Acabó de perfilarse tal y como la conocemos actualmente tras la última glaciación, por lo que existen vestigios glaciares posteriormente afectados por una fuerte erosión, de forma que se han aplanado mucho tanto en las cumbres como en las estribaciones septentrionales y meridionales.

El sustrato geológico de esta zona está formado por rocas de naturaleza muy diversa (magmáticas, metamórficas y sedimentarias) caracterizadas por su gran antigüedad (Paleozoico y Mesozoico). La Sierra de Guadarrama es uno de los sistemas orográficos más antiguos de la Península Ibérica. El gneis se extiende prácticamente por toda la Sierra de Guadarrama y forma algunas de las cumbres más elevadas: Peñalara (2.428 m.), Cabezas de Hierro (2.383 m.), La Maliciosa (2.225 m.). También aparecen rocas calizas entre el gneis, debido a los avances marinos que durante el Cretácico llegaron a las faldas de la Sierra de

Guadarrama. Por último, los granitos de la Sierra de Guadarrama son rocas ígneas plutónicas originadas en el período Carbonífero, durante la Orogenia Hercínica, que hace 350 millones de años dio origen a una sierra con la misma dirección NE-SO que la actual, pero con alturas superiores.

5.2 Geología local

Se describen a continuación las principales unidades geológicas presentes en el Municipio de Soto del Real, (Mapa geológico para el Municipio de Soto del Real, Mapa N° 5), las cuales se han caracterizado en campo, contrastando con la cartografía del Mapa Geológico de España E 1:50.000 (Torrelaguna, n° 509) (IGME, 1990).

Básicamente, en el término municipal de Soto del Real, se encuentran rocas ígneas y metamórficas hercínicas de edad precámbrico-paleozoica con vestigios en su sector central de sedimentos mesozoicos (cretácicos) en una banda E-O que se desarrolla entre Guadalix de la Sierra y Soto del Real. Asimismo, sobre estas formaciones ígneas, a partir de los procesos de erosión-sedimentación se desarrollan una serie de sedimentos cuaternarios asociados a las laderas de las montañas, a los cauces de ríos y a zonas llanas de escaso drenaje en las que se acumulan sedimentos (Navas).

A continuación se describe con detalle cada unidad litológica (IGME, 1990).

Rocas graníticas hercínicas

Este grupo comprende rocas plutónicas y filonianas.

Adamellitas de grano fino.

Este tipo de rocas afloran en el sector septentrional del término municipal de Soto del Real, en las estribaciones meridionales del Macizo plutónico de La Pedriza, donde aparecen como cuerpos muy deformados, con esquistosidad milonítica subvertical. En el Macizo granítico de La Pedriza, este tipo de rocas se ubican en los sectores externos, bordeando a los otros tipos graníticos que lo componen. El contacto externo de estas rocas es siempre con los metasedimentos y ortogneises glandulares.

Compuestas mineralógicamente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita como minerales principales, y apatito, circón, opacos y ocasionalmente monacita como accesorios. El cuarzo se presenta de tres formas: a) fenocristales globosos de tamaño hasta centimétrico, b) en matriz, con recristalización variable y conservando tonos idiomorfos frente al feldespato potásico, c) como pequeñas inclusiones en plagioclasa y en fenocristales de feldespato potásico.

Se interpreta que las adamellitas fueron emplazadas durante una etapa de deformación, en relación con una probable banda de cizalla subvertical.

Leucogranitos de grano grueso.

En el Macizo de La Pedriza estas rocas ocupan una posición interna respecto a las adamellitas porfídicas tipo Sierra del Francés. Se trata de rocas homogéneas en las que solamente se pueden apreciar de forma local estructuras de tipo *Schlieren* y bandeados composicionales. Son posteriores a las adamellitas porfídicas

tipo Sierra del Francés, aunque en el sector de Soto del Real ambas unidades intrusivas quedan separadas por la Falla de Valle Hondo, de dirección E-O.

Los leucogranitos de tipo Pedriza son rocas de grano grueso (a muy grueso) de coloración clara, principalmente biotíticos y sin enclaves microgranudos o de origen metamórfico. Texturalmente son rocas heterogranulares que excepcionalmente muestran fenocristales de feldespato potásico. Desde el punto de vista mineralógico, se componen de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, así como moscovita y cordierita de forma ocasional. Los minerales accesorios son apatito, circón y opacos. El cuarzo suele presentarse en cristales globulosos de aproximadamente hasta 1 cm.

Rocas filonianas

Se trata de filones de aplitas, microdioritas, pórfidos graníticos-adamellíticos, y filones de cuarzo; los tres primeros forman haces compuestos y se localizan sobre todo en el sector septentrional del municipio de Soto del Real formando un haz de dirección ENE-OSO con extensión kilométrica que encaja en rocas graníticas.

Rocas ígneas pre-hercínicas

Este tipo de rocas se encuentran ampliamente representadas en el municipio de Soto del Real, especialmente en el sector meridional. Forman macizos intrusivos en las series metasedimentarias, que con posterioridad, en la Orogenia Hercínica, son deformados y metamorizados.

Ortogneises glandulares



Tienen amplia distribución en la zona meridional de Soto del Real y en algunos sectores no pueden distinguirse de los ortogneises glandulares metagraníticos.

Se reconocen como rocas de tonalidad oscura y carácter glandular, que en general presentan una marcada bimodalidad de tamaños de los cristales de feldespato potásico (> 3 cm) y de plagioclasa (ocasionalmente cuarzo) (0,5-2 cm). Tienen matriz cuarzo-feldespática con abundante biotita y en ocasiones se distinguen enclaves tanto metasedimentarios como ígneos que pueden alcanzar los 14 cm.

Se encuentran predominantemente afectados por metamorfismo regional de alto grado y presentan alta deformación en bandas de cizalla dúctil.

Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

Se localizan en el sector oriental del municipio, y aunque no tienen mucha representación, se encuentran en asociación con zonas metasedimentarias y con frecuente deformación.

Se distinguen tres facies distintas; a) Glandulares s.s., b) bandeados con glándulas, c) porfídicas. La facies más abundante es la primera, caracterizándose por una elevada cantidad de megacrístales feldespáticos homométricos (2-3 cm). Las facies bandeadas se caracterizan por una menor abundancia de glándulas, lo que unido a una intensa deformación, le confiere aspecto bandedo. Las facies porfídicas son más ocasionales y se describen como facies de borde de las glandulares, con megacrístales heterométricos de feldespato con bordes reabsorbidos (0,5-4 cm).

Contienen enclaves de diferentes tipos, tanto metasedimentarios (rocas de silicatos cálcicos, metapelitas y cuarcitas) como de origen ígneo (enclaves microgranudos). En algunas zonas se encuentran fuertemente afectados por deformación de cizalla dúctil.

Rocas metamórficas paraderivadas

Esquistos y paragneises con intercalaciones cuarcíticas

Los materiales metasedimentarios se encuentran aislados entre extensos afloramientos de granitos y ortogneises. En el término municipal de Soto del Real, se encuentran en el sector suroriental. No se conoce con certeza la potencia de las series, ya que no se ha podido reconocer el muro y techo. Estos materiales se han relacionado con la existencia de bandas de cizalla dúctil con desarrollo de milonitas de la segunda fase hercínica. Se componen básicamente de esquistos micáceos y cuarzosos, paragneises, metaareniscas feldespáticas y paragneises con intercalaciones de gneises bandeados.

En los afloramientos de Soto del Real, se observa a menudo la existencia de una recrystalización estática, probablemente debida al efecto de la etapa metamórfica de baja presión hercínica que confiere un aspecto similar a rocas corneanas, posterior a las etapas principales de deformación hercínica. Se observan metablastos de cordierita, sillimanita prismática y feldespato potásico no deformados.

Estas series metasedimentarias parecen ser equivalentes a otras posiblemente preordovícicas del Sistema Central (Puerto de la Hiruela) donde presenta intercalaciones de cuarcitas anfibólicas infrayacentes a la cuarcita del Arenig y la serie alternante de esquistos y cuarcitas del Tremadoc.

Las relaciones del conjunto metasedimentario con todos los tipos de ortogneises aparentan tener un carácter intrusivo, ya que existen enclaves metasedimentarios en los ortogneises. Además se pueden encontrar turmalizaciones del contacto deformadas por las principales etapas de deformación hercínica, y diques de leucogneises aplitoides y pegmatitas foliadas que intruyen las series metasedimentarias.

Serie detrítico-carbonatada del Cretácico Superior

Esta serie se extiende en dirección E-O en el sector central y oriental del municipio de Soto del Real correspondiéndose geomorfológicamente con una alineación de suaves crestas. En el municipio, se pueden distinguir hasta cuatro unidades diferentes.

Arenas, gravas y arcillas compactadas y con cementación silícea



Sucesión con una potencia de unos 6 m, formada por cuerpos de arenas y gravas con intercalaciones de limos, arcillas y arenas finas, que se apoyan directamente sobre materiales metamórficos en discordancia erosiva. A base, existe un cuerpo de 1 m de potencia con granulometría más gruesa (arena gruesa y gravas) con estratificación cruzada y bioturbación. La composición de las gravas son cuarzo, feldespatos y micas (con alto grado de alteración) que se embuten en una pasta formada por arcillas y óxidos de Fe. Los limos, arenas finas y arcillas presentan colores típicos de hidromorfismo típicos de ambiente reductor en ambiente continental. Generalmente, el ambiente de sedimentación de esta secuencia se interpreta como continental con ligera influencia marina a techo.

En la zona de El Vellón, se encuentran a techo las “*Arenas pardas, arcillas y dolomías*”, que tiene una potencia media de 40 m y se encuentra formada por arenas y areniscas con cemento dolomítico de color pardo y gris, con frecuente estratificación cruzada, ripples de oscilación, , estratificación flaser y lenticular, bioturbación, y moldes de moluscos. Hay intercalaciones de niveles de arcillas grises. Existe una frecuente tinción con óxidos de hierro derivados de una dedolomitización parcial de los cementos dolomíticos. La sedimentación de esta unidad es característica de plataforma continental somera, propio de la zona próxima de costa. Esta unidad de “*Arenas pardas, arcillas y dolomías*” no llega a aflorar en el sector de Soto del Real.

Arenas, arcillas y gravas.

Esta unidad tiene un carácter básicamente siliciclástico, homogéneo y puede alcanzar una potencia de 30 m. Se integra por cuerpos arenosos tabulares con potencias de 0,1 a 1 m que muestran estratificación cruzada, superficies erosivas y ripples de oscilación y corriente. En ocasiones esta unidad se encuentra directamente sobre un paleorrelieve irregular del basamento granítico o metamórfico. Las arenas se componen por cuarzo y en menor proporción feldespatos y micas, que quedan parcialmente transformadas a caolín. Las gravas y cantos aparecen formando “lags” en cuerpos arenosos. Las arcillas son generalmente caoliníticas presentándose en forma de lentejones, discontinuas, o en forma de canto blando.

Esta unidad se interpreta como producto de un medio tractivo influenciado por mareas, ya que se encuentran dos sentidos opuestos de movimiento de las corrientes y la presencia de discontinuidades tapizadas por arcillas y ripples de oscilación.

Dolomías rojas y arcillas

Unidad muy extensiva aunque de potencia reducida (<3m), que aparece de forma discontinua. Los materiales que la componen son dolomías, arcillas y en menor proporción areniscas con cemento dolomítico. Es muy característico el color rojo de las dolomías, de hierro liberado en procesos de dedolomitización. Texturalmente, se puede clasificar como *mudstone-wackestone* con abundante cuarzo y en menor proporción feldespatos, micas y conchas de bivalvos.

Esa unidad es característica de un medio de sedimentación carbonático de baja energía (medio de transición marino-continental).

Dolomías tableadas, margas y arcillas.

Esta unidad es de potencia variable, aunque no supera los 10 m. Se trata de dolomías tableadas de color crema que consisten en una alternancia de cuerpos tabulares detrítico-dolomíticos con niveles arcilloso-margosos de color verde y negro. Los cuerpos tabulares tienen una potencia de 0,1 a 1 m con base plana y erosiva que presentan internamente estratificación cruzada, planar y bioturbación a base y ripples de corriente y oscilación a techo.

El contacto inferior es erosivo con las dolomías rojas y arcillas o bien, según la zona, con las unidades detríticas inferiores. El contacto con la unidad suprayacente es erosivo y discordante. Se interpreta que su origen es un área de sedimentación de plataforma continental con episodios esporádicos de tormenta.

Cuaternario

Bloques, cantos y arenas (Conos de deyección)

Estos materiales se localizan en los márgenes de los cursos fluviales relacionados con salidas de barrancos. Predominan los cantos y gravas de matriz arenosa donde los elementos más gruesos (bloques) se encuentran en áreas proximales. Su litología depende de la composición del área fuente, aunque generalmente se trata de cantos de rocas graníticas, gneísicas y cuarzo con matriz arcósica. En el sector de Soto del Real, se presenta un sistema de conos amalgamados muy desarrollados que han sido disectados por la red fluvial más reciente.

Arenas, limos y cantos (Glacis)

Se trata de depósitos de carácter gravitacional o de manto de arroyada en laderas con fondo de valle cuya génesis se relaciona con el encajamiento de la red fluvial. Se compone por arenas, cantos y limos con abundante matriz, con una importante relación entre área fuente y litología de cantos.

Limos, arenas y turberas (Fondos de Navas)

Se trata de depósitos mixtos y de granulometría fina que se ubican en zonas deprimidas y mal drenadas, donde se originan procesos hidromórficos, decantaciones y edafizaciones que implican a depósitos de carácter fluvial, coluvionar o eluvionar. En ocasiones, se pueden desarrollar turberas por el alto contenido en materia orgánica.

Arenas, limos y gravas (Aluviales, fondos de valles)

Se trata de sedimentos compuestos por gravas, arenas y limos de naturaleza poligénica (granito, gneis, cuarzo, etc) relacionados con cursos fluviales permanentes o estacionales.

6 Radón en suelo

La medida puntual de la concentración de radón en el suelo se realiza a una profundidad de 80 cm. y requiere la extracción de un cierto volumen de aire del suelo que se debe incorporar al volumen sensible del detector.



Geomnia realiza la determinación de gas radón en suelo a partir de una sonda de penetración en suelo acoplada a un DurrIDGE RAD7, que extrae el gas por la bomba interior del mismo y su concentración es determinada mediante un detector de estado sólido de partículas alfa. El detector de estado sólido es un material semiconductor que convierte la radiación alfa directamente en señal eléctrica. El RAD7 puede determinar la energía de cada partícula alfa, de forma que puede identificar qué isótopo (Polonio-218, Polonio-214, etc.) produce la radiación. Esta técnica se

denomina clásicamente como espectrometría alfa.

La permeabilidad intrínseca ha sido obtenida mediante Radón JOK, que se trata de un equipo portátil que ha sido desarrollado para mediciones in situ de permeabilidad a los gases en suelos. El principio de los equipos Radon-JOK se basa en la extracción de aire por medio de presión negativa. El aire es bombeado desde el suelo bajo una presión constante a través de una sonda especialmente diseñada con una superficie de contacto constante y conocida entre el cabezal de la sonda y el suelo.

Se han realizado un total de 15 medidas realizadas en formaciones edáficas desarrolladas sobre las litologías de referencia. A continuación, se incluyen los resultados obtenidos:

Fecha	Código	Litología	Conc (kbq/m ³)	Permeabilidad (m ²)
02/03/2021	CRS1	Arenas, limos y gravas (fondos de valle)	0,0	Impermeable
02/03/2021	CRS2	Leucogranitos de grano fino y adamellitas	113,5	9,5E-10
02/03/2021	CRS3	Ortogneises glandulares	121,4	9,3E-11
02/03/2021	CRS4	Arenas, limos y cantos (Glacis)	33,9	8,5E-12
02/03/2021	CRS5	Arenas, limos y gravas (fondos de valle)	0,3	9,5E-12
02/03/2021	CRS6	Ortogneises glandulares	115,5	7E-11
02/03/2021	CRS7	Esquistos y paragneises	180,8	7E-11

04/03/2021	CRS8	Leucogranitos de grano fino y adamellitas	23,3	9,3E-11
04/03/2021	CRS9	Esquistos y paragneises	137,1	9,5E-12
04/03/2021	CRS10	Dolomías tableadas, margas y arcillas	5,0	3E-11
04/03/2021	CRS11	Leucogneises y ortogneises glandulares	143,4	2E-11
08/04/2021	CRS12	Arenas, limos y gravas (fondos de valle)	48,2	3,5E-12
08/04/2021	CRS13	Ortogneises glandulares	119,9	7,5E-12
08/04/2021	CRS14	Bloques, cantos y arenas (conos de deyección)	54,7	1E-11
08/04/2021	CRS15	Bloques, cantos y arenas (conos de deyección)	0,8	Impermeable

Tabla 1. Medidas de radón en suelo y permeabilidad intrínseca.

Como puede observarse los resultados obtenidos resultan dispares dependiendo de la unidad litológica que conforma el sustrato o la estructura del suelo, si bien la información generada resulta de gran utilidad para definir el tratamiento estadístico de las medidas tomadas en las viviendas y su relación con las diferentes unidades litológicas definidas.

Tal y como se ha indicado en el apartado de metodología, el método checo (Nezmal et al., 2004) para determinar el riesgo de radón asociado a los terrenos se basa en la determinación del denominado *índice de radón*, *RI* o *potencial de radón*, *RP* a partir de las medidas de la concentración de radón en el suelo y de la permeabilidad intrínseca. Según esta aproximación, el índice de radón proporciona un nivel de riesgo de un terreno (cantidad categórica ordinal) que puede ser expresado numéricamente a partir del potencial de radón del terreno. El procedimiento se ha diseñado con el objetivo de caracterizar radiológicamente terrenos para la construcción de viviendas en la República Checa para cuantificar el riesgo de radón.

El índice de radón se puede determinar a partir de una estimación no numérica de la permeabilidad del suelo y de la concentración de radón obtenida. Fijada la permeabilidad en tres clases (alta, media y baja), el índice de radón se puede obtener a partir de la tabla 2.

Categoría del índice de Radón	Concentración de actividad de radón en el suelo (kBq m³)		
Bajo	CRn <30	CRn <20	CRn <10
Medio	30 ≤ CRn <100	20 ≤ CA <70	10 ≤ CRn <30
Alto	CRn ≥ 100	CRn ≥ 70	CRn ≥ 30
	Baja	Media	Alta
	Permeabilidad		

Tabla 2. Clasificación checa del terreno a partir de las medidas de concentración de actividad de radón y la permeabilidad estimada del suelo a los gases

Los límites de permeabilidad establecidos por Nezmal y colaboradores se muestran en la tabla 3 y están basados en su experiencia y en propiedades conocidas del terreno (conocimiento previo de perfiles verticales, resistencia al vacío, etc.).

CLASE	Permeabilidad
Alta	$k > 4.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
Media	$4.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \geq k \geq 4.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$
Baja	$k < 4.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Tabla 3. Clasificación de la permeabilidad del suelo a los gases (Neznal, 2005).

Este potencial de radón admite una representación gráfica construida representando el logaritmo de la permeabilidad en ordenadas y la concentración de radón en abscisas. Este diagrama es una modificación del propuesto por Barnett (1994). En la figura 8 mostramos esta representación gráfica en las que se representan los límites de las zonas alta, media y baja junto con los criterios empíricos establecidos por Neznal et al. (2004) para delimitar las zonas de nivel bajo-medio y de nivel medio-alto de su modelo. El modelo de evaluación del RP se basa en el criterio utilizado la clasificación de RI descrito en la tabla 2.

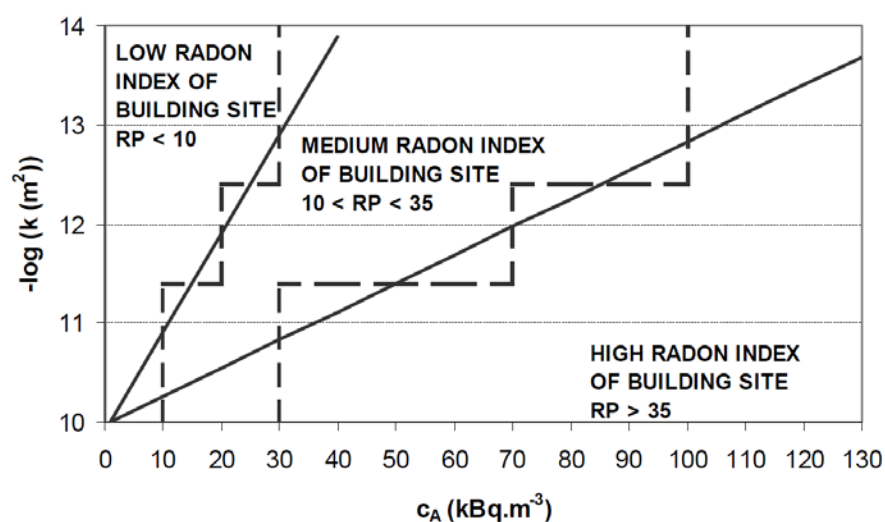


Figura 7. Criterios de clasificación de las zonas propensas al radón según la metodología propuesta por Barnett (1994) y Neznal et al. (2004).

Aplicando el método checo a los distintos emplazamientos a partir de los datos de la tabla I, llegamos a las siguientes conclusiones:

Los materiales ígneos (rocas plutónicas y filonianas definidas en el apartado 5.2.) y metamórficos (Ortogneises glandulares y esquistos y paragneises con intercalaciones cuarcíticas), presentan elevadas concentraciones de radón en suelo ($> 100 \text{ KBq/m}^3$) y permeabilidades medias o altas, (hay que tener en cuenta que las medidas se hacen en las zonas de alteración superficial y suelos desarrollados a partir de estas litologías), por lo que el Índice de Radón para esas litologías, o el riesgo por radón de las mismas se puede considerar ALTO.

En el caso de los depósitos de ladera, presentan elevadas concentraciones de radón en suelo ($> 50 \text{ KBq/m}^3$) y permeabilidades medias, (hay que tener en cuenta la heterogeneidad textural de estos materiales, que pueden presentar litologías que van desde arcillas a gravas), por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de estas se puede considerar MEDIO.



En los materiales sedimentarios mesozoicos, la concentración de radón en suelo es baja ($<10 \text{ KBq/m}^3$), y permeabilidad alta, por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de las mismas se puede considerar BAJO.

En los fondos de valle, la concentración de radón en suelo es baja ($<10 \text{ KBq/m}^3$), y permeabilidad media-baja, (hay que tener en cuenta la heterogeneidad textural de estos materiales, que pueden presentar litologías que van desde arcillas a gravas), por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de las mismas se puede considerar BAJO.

7 Registros de la concentración de radón en aire.

Se incluyen a continuación los datos de concentración de radón medidos en un total de 100 viviendas de Soto del Real, obviando su ubicación concreta de cara a preservar la privacidad de los participantes en el trabajo.

En base a estas medidas y su ubicación en las unidades litológicas diferenciadas se procederá al análisis estadístico de las mismas de cara a evaluar el potencial de radón en el municipio.



Nº	Dosímetro nº de Serie	Fecha de comienzo de la exposición	Fecha de finalización de la exposición	Número de días	Concentración media [Bq/m³]	Incertidumbre 2.σ	
						%	± Bq/m³
1	689967	18/12/2020	18/03/2021	90	95	20%	19
2	689968	18/12/2020	17/03/2021	89	310	17%	54
3	689969	17/12/2020	18/03/2021	91	176	18%	32
4	689970	17/12/2020	18/03/2021	91	229	18%	41
5	689971	17/12/2020	18/03/2021	91	169	18%	31
6	689972	17/12/2020	17/03/2021	90	93	20%	19
7	689973	18/12/2020	21/03/2021	93	83	20%	17
8	689974	18/12/2020	17/03/2021	89	441	17%	75
9	689975	17/12/2020	18/03/2021	91	130	19%	25
10	689976	17/12/2020	18/03/2021	91	155	19%	29
11	689977	17/12/2020	18/03/2021	91	117	19%	22
12	689978	04/01/2021	17/03/2021	72	525	17%	89
13	689979	17/12/2020	18/03/2021	91	419	17%	71
14	689980	17/12/2020	18/03/2021	91	112	20%	22
15	689981	17/12/2020	17/03/2021	90	305	17%	53
16	689982	17/12/2020	17/03/2021	90	929	17%	154
17	689983	17/12/2020	17/03/2021	90	175	18%	32
18	689984	17/12/2020	18/03/2021	91	91	20%	18
19	689985	17/12/2020	17/03/2021	90	309	17%	54
20	689986	17/12/2020	17/03/2021	90	291	18%	51
21	689987	17/12/2020	17/03/2021	90	171	18%	31
22	689988	18/12/2020	17/03/2021	89	157	18%	29
23	689989	17/12/2020	17/03/2021	90	75	21%	16
24	689990	17/12/2020	18/03/2021	91	138	19%	26
25	689991	18/12/2020	18/03/2021	90	150	19%	28
26	689992	17/12/2020	18/03/2021	91	154	18%	28
27	689993	18/12/2020	17/03/2021	89	242	18%	43
28	689994	18/12/2020	18/03/2021	90	328	17%	56
29	689995	18/12/2020	17/03/2021	89	83	20%	17
30	689996	17/12/2020	18/03/2021	91	306	17%	53
31	689997	21/12/2020	17/03/2021	86	36	28%	10
32	689998	18/12/2020	17/03/2021	89	94	20%	19
33	689999	18/12/2020	17/03/2021	89	286	17%	50
34	690000	17/12/2020	17/03/2021	90	268	18%	47
35	690001	18/12/2020	17/03/2021	89	412	17%	70
36	690002	17/12/2020	17/03/2021	90	109	19%	21
37	690003	17/12/2020	18/03/2021	91	373	17%	64
38	690004	17/12/2020	17/03/2021	90	81	21%	17
39	690005	17/12/2020	17/03/2021	90	259	17%	45
40	690006	18/12/2020	17/03/2021	89	113	19%	22



Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

41	690007	18/12/2020	17/03/2021	89	305	17%	53
42	690008	17/12/2020	18/03/2021	91	211	18%	38
43	690009	18/12/2020	17/03/2021	89	215	18%	38
44	690010	18/12/2020	15/03/2021	87	114	19%	22
45	690011	18/12/2020	18/03/2021	90	720	17%	120
46	690012	18/12/2020	17/03/2021	89	127	19%	24
47	690013	18/12/2020	17/03/2021	89	264	17%	46
48	690014	18/12/2020	17/03/2021	89	111	20%	22
49	690015	18/12/2020	17/03/2021	89	214	18%	38
50	690016	18/12/2020	17/03/2021	89	222	18%	40
51	690964	18/12/2020	17/03/2021	89	276	17%	48
52	690965	18/12/2020	17/03/2021	89	210	18%	37
53	690966	18/12/2020	17/03/2021	89	59	24%	14
54	690967	18/12/2020	17/03/2021	89	376	17%	65
55	690968	18/12/2020	17/03/2021	89	161	19%	30
56	690969	18/12/2020	18/03/2021	90	1507	16%	247
57	690970	18/12/2020	18/03/2021	90	176	18%	32
58	690971	18/12/2020	18/03/2021	90	425	17%	72
59	690972	18/12/2020	17/03/2021	89	134	19%	25
60	690973	17/12/2020	18/03/2021	91	300	17%	52
61	690974	17/12/2020	17/03/2021	90	417	17%	71
62	690975	18/12/2020	17/03/2021	89	284	18%	50
63	690976	18/12/2020	17/03/2021	89	53	23%	12
64	690977	21/12/2020	18/03/2021	87	120	19%	23
65	690978	17/12/2020	17/03/2021	90	222	18%	39
66	690979	18/12/2020	17/03/2021	89	452	17%	77
67	690980	18/12/2020	18/03/2021	90	413	17%	70
68	690981	17/12/2020	17/03/2021	90	203	18%	37
69	690982	17/12/2020	17/03/2021	90	160	19%	30
70	690983	18/12/2020	18/03/2021	90	50	24%	12
71	690984	18/12/2020	18/03/2021	90	339	17%	58
72	690985	17/12/2020	18/03/2021	91	151	19%	28
73	690986	18/12/2020	17/03/2021	89	357	17%	61
74	690987	17/12/2020	17/03/2021	90	208	18%	37
75	690988	17/12/2020	17/03/2021	90	60	22%	13
76	690989	17/12/2020	18/03/2021	91	382	17%	65
77	690990	17/12/2020	17/03/2021	90	108	19%	21
78	690991	18/12/2020	18/03/2021	90	341	17%	59
79	690992	18/12/2020	17/03/2021	89	47	23%	11
80	690993	17/12/2020	17/03/2021	90	666	17%	111
81	690994	17/12/2020	18/03/2021	91	315	17%	54
82	690995	17/12/2020	17/03/2021	90	148	18%	27
83	690996	17/12/2020	17/03/2021	90	622	17%	104
84	690997	18/12/2020	17/03/2021	89	140	19%	26

85	690998	18/12/2020	17/03/2021	89	297	17%	51
86	690999	17/12/2020	18/03/2021	91	182	18%	33
87	691000	17/12/2020	17/03/2021	90	130	19%	25
88	691001	17/12/2020	17/03/2021	90	172	18%	31
89	691002	17/12/2020	18/03/2021	91	701	17%	117
90	691003	17/12/2020	17/03/2021	90	360	17%	62
91	691004	17/12/2020	17/03/2021	90	164	18%	30
92	691005	17/12/2020	18/03/2021	91	117	19%	22
93	691006	17/12/2020	17/03/2021	90	101	20%	20
94	691007	17/12/2020	18/03/2021	91	73	22%	16
95	691008	18/12/2020	17/03/2021	89	548	17%	92
96	691009	17/12/2020	17/03/2021	90	204	18%	37
97	691010	18/12/2020	17/03/2021	89	108	19%	21
98	691011	18/12/2020	17/03/2021	89	437	17%	74
99	691012	17/12/2020	17/03/2021	90	452	17%	77
100	691013	18/12/2020	18/03/2021	90	209	18%	38

Tabla 4. Registro de mediciones de radón en aire en viviendas.

7.1 Interpretación de resultados

Para la realización de esta campaña de medición se ha elegido el periodo invernal, entre el 17-18 de diciembre de 2020 y 17-18 de marzo de 2021, completando un periodo de medición en torno a 90 días. Las mediciones realizadas se consideran representativas del periodo invernal, así como la duración del periodo de medición en consonancia con las recomendaciones del Consejo de Seguridad Nuclear.

Generalmente, la realización de las mediciones en periodo invernal es representativa de la peor situación posible respecto a los niveles de radón en el interior de la vivienda, pues las mayores concentraciones de radón se suelen alcanzar en la época fría del año debido a tres factores principales:

- La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior genera una presión ligeramente inferior en el interior de la vivienda que favorece la entrada de radón desde el suelo-subsuelo a las zonas bajas del edificio.
- Las lluvias y la alta humedad se traducen en una disminución de la ventilación a través del suelo adyacente a la vivienda.
- Disminución de los hábitos de ventilación habitual en periodos invernales, lo que puede contribuir a aumentar las concentraciones de radón.

Como se observa, se colocaron un total de 100 detectores, que de acuerdo a las instrucciones aportadas han sido colocados en la planta 0, o planta 1 en ausencia de planta 0 y en estancias adecuadas.

Se debe considerar que el nivel de referencia de 300 Bq/m³ considera el valor anual promedio, sin embargo, la concentración de gas radón en aire obtenida, aunque no puede extrapolarse de forma directa a un valor anual promedio exacto, puede ser utilizada como valor representativo de las condiciones invernales e indicativo de las concentraciones promedio anual.

Las concentraciones de gas radón en las estancias/espacios medidos se encuentran con un 31% de las viviendas que tienen valores superiores a los niveles de referencia (300 Bq/m³) de la Directiva

2013/59/EURATOM Diario Oficial, 17 de enero de 2014 donde establece normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

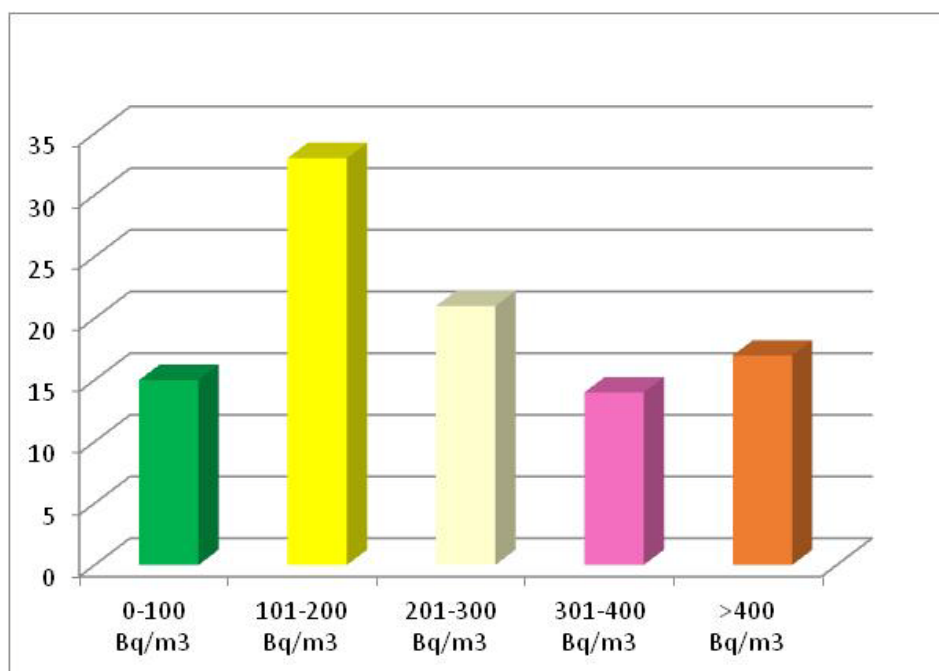


Figura 8. Viviendas y edificios en cada rango de concentración

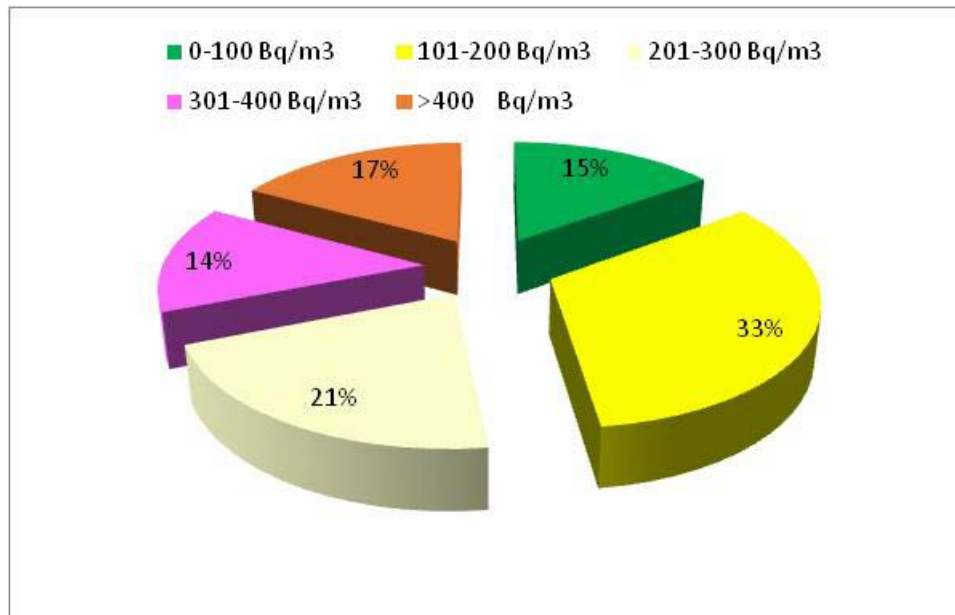


Figura 9. Porcentaje de viviendas y edificios en cada rango de concentración

Si discretizamos las medidas realizadas de acuerdo a los criterios utilizados en la "Cartografía del Potencial de Radón en el Municipio de Soto del Real", se observa que el mayor porcentaje de viviendas medidas (33 %) presenta concentraciones entre 101 Bq/m³ y 200 Bq/m³, lo que podría considerarse rangos medios, si bien no debemos obviar que un 31 % de las medidas, tomando el conjunto del municipio se sitúan por encima de 300 Bq/m³, incluyendo dos viviendas cuya medida se sitúan por encima de 900 Bq/m³, una de ellas por encima de 1500 Bq/m³.

8 Análisis de los datos. Generación del Mapa de Potencial de radón en el Municipio de Soto del Real.

8.1 Interpretación de los resultados por litologías consideradas.

Como ya se ha adelantado en apartados anteriores, se han considerado un total de 6 unidades litológicas representativas del municipio de Soto del Real, y más concretamente del núcleo urbano habitado del mismo:

- Rocas graníticas
- Rocas ígneas prehercínicas
- Rocas metamórficas
- Rocas sedimentarias mesozoicas
- Conos de deyección y depósitos de ladera.
- Fondos de Valle

En estas seis unidades se dispone de medidas de radón y permeabilidad en suelo y de medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios (salvo rocas mesozoicas), por lo que podemos considerar que se disponen de datos suficientes y adecuados para poder realizar un tratamiento estadístico de los mismos de acuerdo a la metodología prevista ("*Mapping radon-prone areas using radiation dose rate and geological information*" M García-Talavera, A García-Pérez, C.Rey and L Ramos. 2013).

En base a las medidas de radón y permeabilidad en suelo junto con las medidas de concentración en viviendas se han establecido las siguientes Unidades Litológicas Homogéneas (ULH) en lo que respecta a comportamiento respecto a potencial exhalación de radón:

- Rocas graníticas
- Rocas ígneas prehercínicas
- Rocas metamórficas
- Rocas sedimentarias mesozoicas
- Depósitos de ladera.
- Fondos de Valle

Se incluye a continuación un análisis de los datos para cada una de estas ULH.

a) Rocas graníticas

Como ya se indicó anteriormente, se trata de materiales plutónicos con elevadas concentraciones de radón en suelo ($> 100 \text{ KBq/m}^3$) y permeabilidades medias o altas, por lo que el Índice de Radón para esta ULH, o el riesgo por radón en suelo de las misma se puede considerar ALTO.

Se cuenta únicamente con una medida de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH, por lo que no se puede calcular el percentil 90, X_{90} , de acuerdo a la metodología empleada, si bien, se tendrá en cuenta en el análisis de los resultados que esa vivienda presenta una concentración de 419 Bq/m^3 .

b) Rocas ígneas prehercínicas

Como ya se indicó anteriormente, se trata de materiales plutónicos con elevadas concentraciones de radón en suelo ($> 100 \text{ KBq/m}^3$) y permeabilidades medias o altas, por lo que el Índice de Radón para esta ULH, o el riesgo por radón en suelo de las misma se puede considerar ALTO.

Por otro lado, se cuenta con un total de 36 medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH.

El percentil 90, X_{90} , considerado como valor para determinar el rango que define las categorías de potencial de radón, de acuerdo a la metodología empleada se sitúa **por encima de 400 Bq/m^3** , concretamente en $544,93 \text{ Bq/m}^3$.

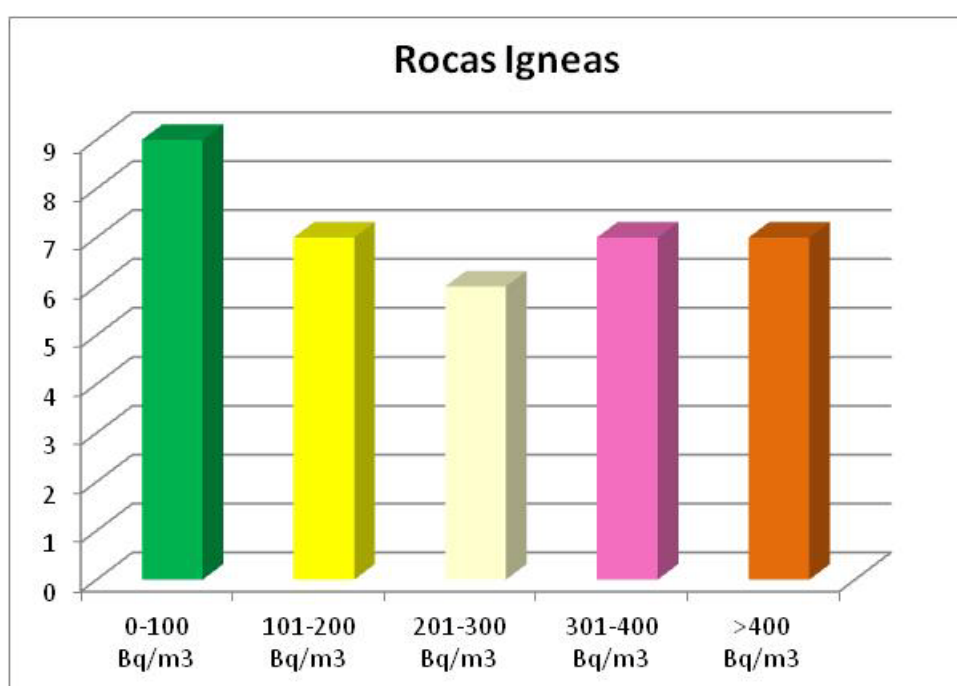


Figura 10. Viviendas y edificios en rocas ígneas para cada rango de concentración.

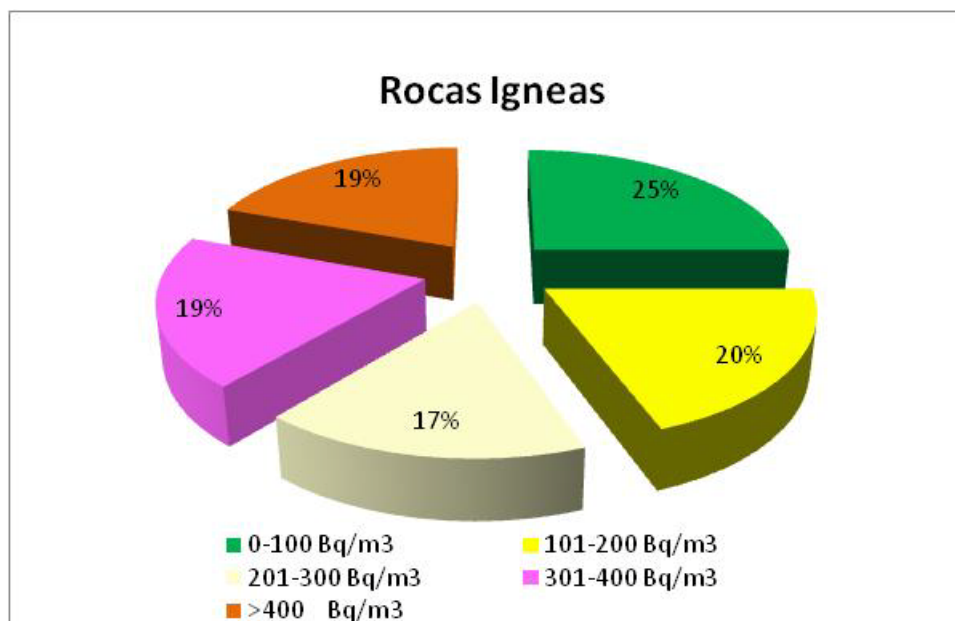


Figura 11. Porcentaje de viviendas y edificios en rocas ígneas para cada rango de concentración

Como puede observarse en los gráficos, el mayor volumen de medidas realizadas en viviendas construidas sobre esta unidad están por debajo de 100 Bq/m³, si bien tal y como representa las gráficas y el ANEXO 2. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS, la existencia de un importante número de medidas por encima de 400 Bq/m³, incluyendo una medida por encima de 1.500 Bq/m³ implica que el valor de X_{90} finalmente quede por encima de 400 Bq/m³; no podemos obviar que la metodología empleada se sitúa del lado de la seguridad.

b) Rocas metamórficas.

En el caso de las rocas metamórficas, presentan elevadas concentraciones de radón en suelo (> 100 KBq/m³) y permeabilidades medias o altas, por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de la misma se puede considerar ALTO.

Por otro lado, se cuenta con un total de 13 medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH.

El percentil 90, X_{90} , considerado como valor para determinar el rango que define las categorías de potencial de radón, de acuerdo a la metodología empleada se sitúa **en el rango de 301-400 Bq/m³**, concretamente en 350,12 Bq/m³.

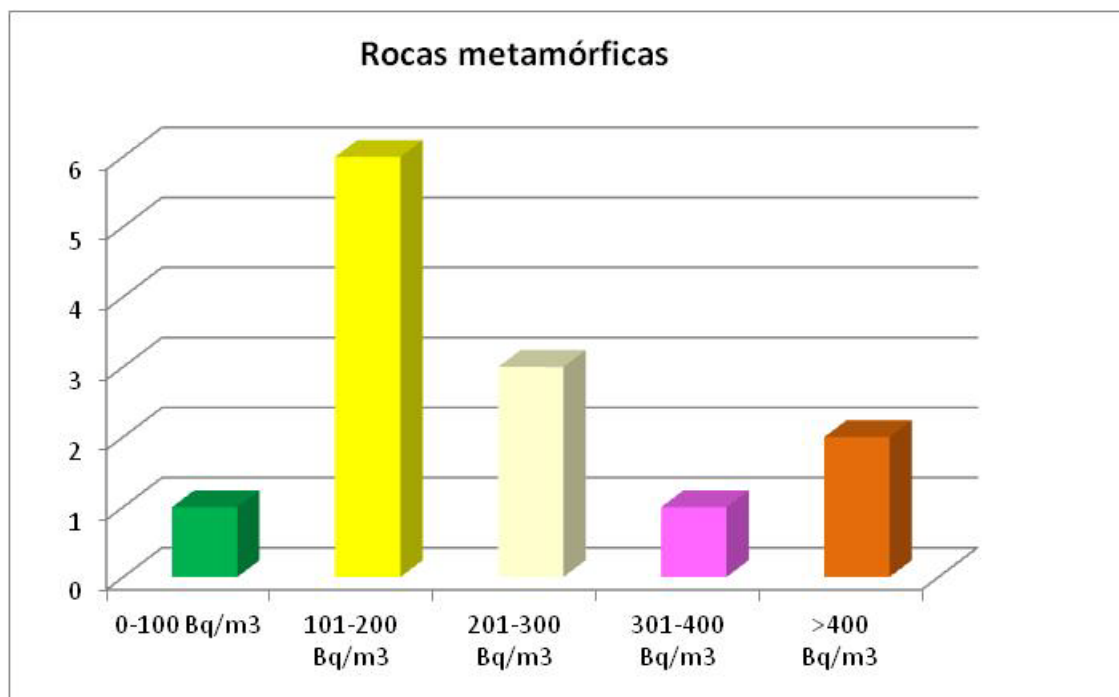


Figura 12. Viviendas y edificios en rocas metamórficas para cada rango de concentración

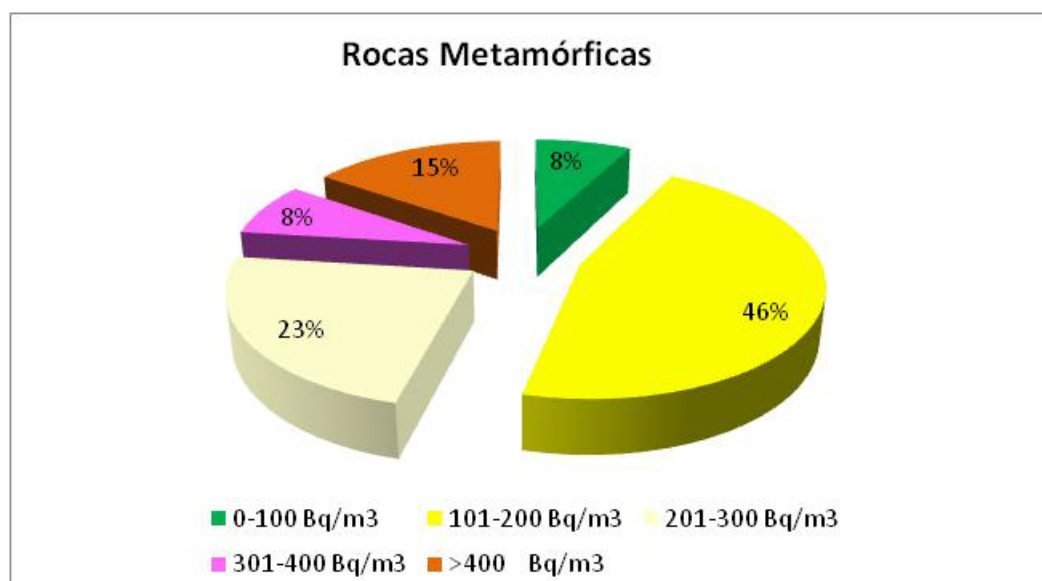


Figura 13. Porcentaje de viviendas y edificios en rocas metamórficas para cada rango de concentración

Como puede observarse en los gráficos, el mayor volumen de medidas realizadas en viviendas construidas sobre esta unidad, están entre 101 y 200 Bq/m³, si bien tal y cómo muestran las graficas y el ANEXO 2. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS, existe un porcentaje importante de medidas por encima de 300 Bq/m³ de forma que el valor de X_{90} se sitúa entre 301 y 400 Bq/m³.

c) Rocas sedimentarias mesozoicas

Como ya se indicó anteriormente, se trata de materiales con concentraciones de radón en suelo (< 10 KBq/m³) y permeabilidades altas, por lo que el Índice de Radón para esta ULH, o el riesgo por radón en suelo de la misma se puede considerar **BAJO**.

Debido a la ausencia de construcciones sobre esta unidad, no se cuenta con medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH, por lo que no se puede calcular el percentil 90, X_{90} , de acuerdo a la metodología empleada.

d) Depósitos de ladera.

En el caso de los depósitos de ladera, presentan elevadas concentraciones de radón en suelo (> 50 KBq/m³) y permeabilidades medias, (hay que tener en cuenta la heterogeneidad textural de estos materiales, que pueden presentar litologías que van desde arcillas a gravas), por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de éstas se puede considerar **MEDIO**.

Por otro lado, se cuenta con un total de 44 medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH.

El percentil 90, X_{90} , considerado como valor para determinar el rango que define las categorías de potencial de radón, de acuerdo a la metodología empleada se sitúa **por encima de 400 Bq/m³**, concretamente en 432,65 Bq/m³.

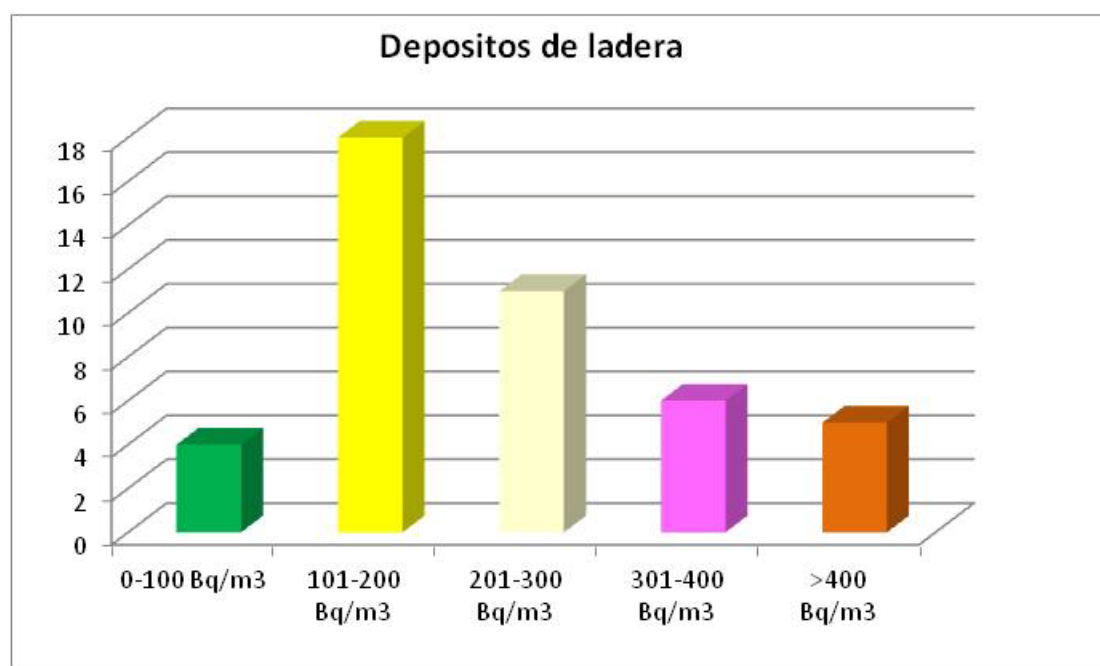


Figura 14. Viviendas y edificios en depósitos de ladera para cada rango de concentración

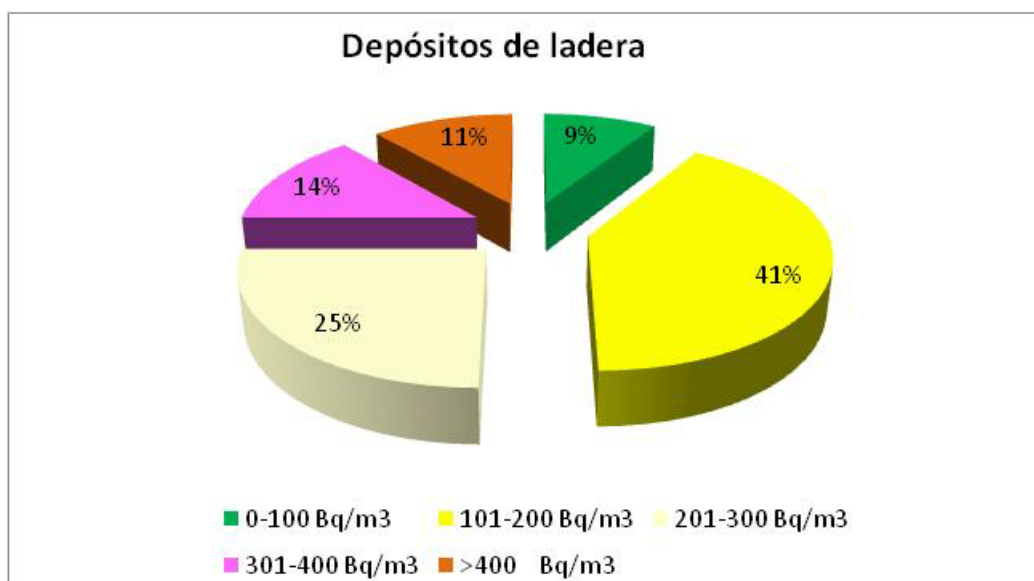


Figura 15. Porcentaje de viviendas y edificios en depósitos de ladera para cada rango de concentración

Como puede observarse en los gráficos, el mayor volumen de medidas realizadas en viviendas construidas sobre esta unidad, están entre 101 y 200 Bq/m³, si bien como representan las gráficas y en el ANEXO 2. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS, existe un porcentaje importante de medidas por encima de 400 Bq/m³, entre ellas una con un valor de 929 Bq/m³, de forma que el valor de X90 se sitúa por encima 400 Bq/m³.

e) Fondos de Valle

En los fondos de valle, la concentración de radón en suelo es baja (<10 KBq/m³), y permeabilidad media-baja, (hay que tener en cuenta la heterogeneidad textural de estos materiales, que pueden presentar litologías que van desde arcillas a gravas), por lo que el Índice de Radón para esta unidad, o el riesgo por radón de las mismas se puede considerar BAJO.

Por otro lado, se cuenta con un total de 6 medidas de radón en aire interior de viviendas o edificios construidos sobre esta ULH. Hay que considerar que es un tamaño muestral escaso de cara a realizar el análisis.

El percentil 90, X_{90} , considerado como valor para determinar el rango que define las categorías de potencial de radón, de acuerdo a la metodología empleada se sitúa **por encima de 400 Bq/m³**, concretamente en 560,93 Bq/m³.

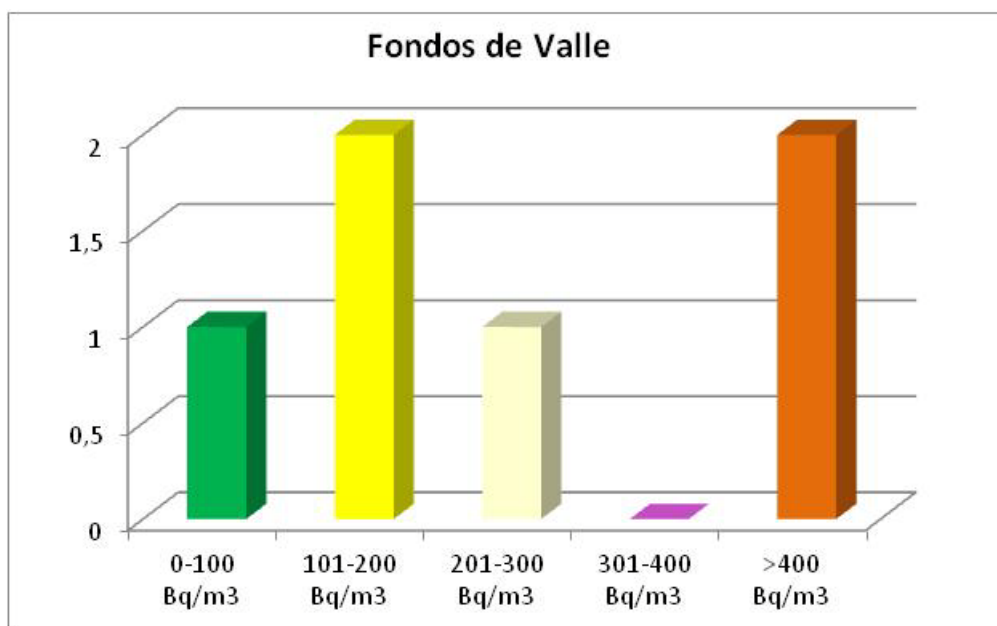


Figura 16. Viviendas y edificios en Fondos de Valle para cada rango de concentración.

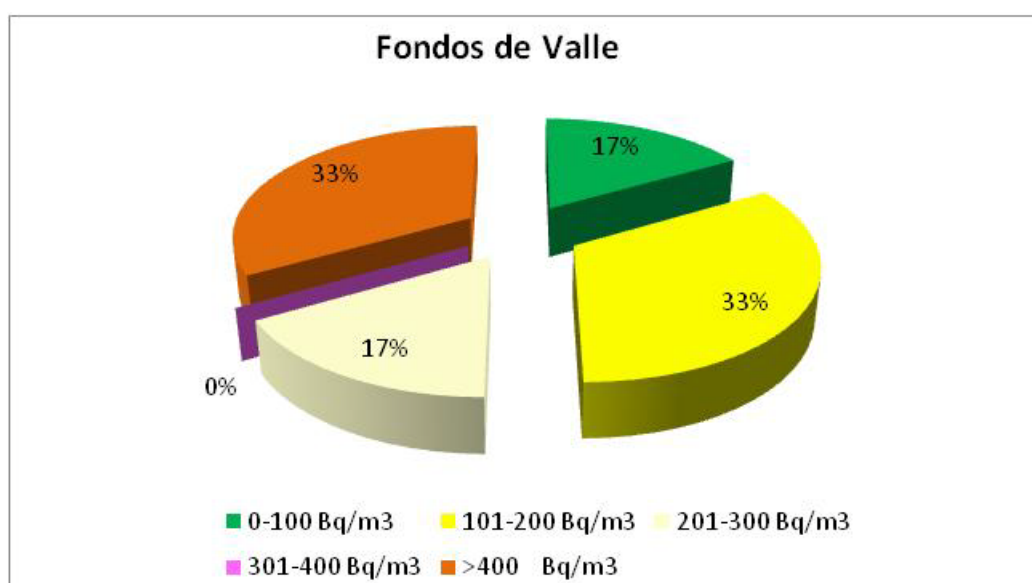


Figura 17. Porcentaje de viviendas y edificios en Fondos de Valle para cada rango de concentración.

Como puede observarse en los gráficos, el mayor volumen de medidas realizadas en viviendas construidas sobre esta unidad, están entre 100 y 200 Bq/m³, si bien tal como representan las gráficas y el ANEXO 2. TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS, existe un porcentaje importante de medidas entre 101 y 300 Bq/m³ y por encima de 400 Bq/m³. A todas luces, este valor resulta elevado, dada la naturaleza del sustrato geológico, si bien, la existencia de una medida de 720 Bq/m³ en un tamaño muestral tan escaso asigna mucho peso a la misma, de forma que el percentil se ve maximizado. En cualquier caso, la evidencia está ahí, en depósitos cuaternarios de fondos de valle, quizá influenciado por condiciones muy locales o por las propias características de la vivienda, se dan concentraciones muy por encima de 400 Bq/m³.

9 Análisis de la Vulnerabilidad de los edificios

La vulnerabilidad: es la probabilidad de que se acumule radón en una estancia construida por el hombre y depende de los siguientes factores:

- ✓ Altura de la planta sobre el suelo.
- ✓ Localización espacial respecto de la pendiente del terreno.
- ✓ Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la vivienda.
- ✓ Viento.
- ✓ Presión atmosférica.
- ✓ Precipitaciones.
- ✓ Tipología de la construcción: edificación colectiva o vivienda unifamiliar.
- ✓ Características constructivas: materiales constructivos, impermeabilización, sistemas de ventilación, geometría de la vivienda, forjados sanitarios, etc.
- ✓ Características de la vivienda: estado conservación, año de construcción, reformas, etc.

Los distintos factores que integran la vulnerabilidad se han ido viendo a lo largo del trabajo quedando de manifiesto su gran variabilidad y sensibilidad, así como la imposibilidad de establecer unos valores estáticos para algunos de ellos que nos permitieran analizar la influencia de los mismos para el periodo analizado.

Para explicar esa variabilidad y sensibilidad de los factores se pueden citar aquellos relativos a las edificaciones y en concreto a su antigüedad y, en su caso, reformas. Los años de construcción y reformas de cada referencia catastral son de acceso público en la página web del catastro, si bien el dato en sí no contiene la información suficiente para estimar si de alguna manera incrementa o disminuye la vulnerabilidad.

Teóricamente, las construcciones anteriores a 1940 son más vulnerables a la entrada del gas debido a las características constructivas de los materiales en contacto con el sustrato. Si en una construcción de este tipo se detecta una reforma reciente, desconocemos la naturaleza de esta modificación constructiva y consiguientemente, ignoramos los efectos sobre la vulnerabilidad. Podrá aumentar aún más la vulnerabilidad o por el contrario reducirla. Si la reforma consiste en una actuación de refuerzo, impermeabilización, aislamiento, etc. de los elementos en contacto con el suelo, conllevará una disminución de la vulnerabilidad al evitar vías de entrada del radón en el interior de la construcción. El caso antagónico sería que la reforma consistiese en el aislamiento e impermeabilización de puertas y ventanas dificultando las vías de escape del gas. Esto último provocaría un aumento de la vulnerabilidad.

Por el contrario, sí parece adecuado emplear la información de la planta en la que se localiza la vivienda como factor de vulnerabilidad, pero con ciertas cautelas y limitaciones.

El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, IETcc-CSIC junto con el CSN, en el “Estudio de la viabilidad y efectividad de las acciones de remedio ante la presencia de gas radón en edificios existentes”, realizó un estudio experimental con el fin de abordar la protección frente a la inmisión de gas

radón con tipologías, materiales, y técnicas constructivas propias de la edificación actual en España. El fin perseguido fue el de constituir una base técnica, con una experiencia real de aplicación de técnicas constructivas destinadas a frenar la inmisión de gas radón, para dar apoyo al documento de soluciones constructivas.

Para ello, se estudió el comportamiento del gas radón en el interior de un módulo real de vivienda construido con las características tipológicas propias de España y ensayar posteriormente los diferentes sistemas de protección frente a la entrada de radón. La concentración promedio en 3 meses para planta sótano fue de 39.385 Bq/m³ y para la planta primera de 6.855 Bq/m³, lo que representa una relación P. sótano/P. primera de 5,75.

Esta relación obtenida experimentalmente no es extrapolable a las edificaciones de forma masiva ya que el experimento se realizó en un terreno seleccionado por su alta exhalación de gas radón. Sin embargo, este dato sí sirve para apoyar una clasificación cualitativa en función de la planta en la que se encuentre la vivienda.

Esta clasificación básica será:

- considerar que en aquella coordenada [x,y] en la que se ubique un volumen construido bajo la cota del terreno destinado a vivienda tendrá una vulnerabilidad **ALTA**.
- aquellas viviendas construidas coincidiendo con la cota del terreno tendrán una vulnerabilidad **MEDIA**.
- a las viviendas en la planta primera le corresponderá una vulnerabilidad **BAJA**.

Por lo que, a partir de las definiciones anteriores se han establecido las categorías del mapa de viviendas. Igualmente, se dispone del número de viviendas por cada una de las tipologías seleccionadas en el municipio de Soto del Real, pudiendo asignar un rango de vulnerabilidad.

TIPOLOGIA DE VIVIENDA	PREDOMINA	NUMERO DE VIVIENDAS	VULNERABILIDAD	% DE VIVIENDAS
BR BR+01 BR+00 BR+00+01	BR	154	ALTA	4%
00+01 00	00	3072	MEDIA	84%
01	01	417	BAJA	11%

Tabla 5. Viviendas categorizadas por cota de construcción (Seisdedos Domínguez, 2016)

Como puede observarse, lógicamente, dada la tipología residencial del municipio, el mayor porcentaje de viviendas existentes se encuentran construidas por encima de la cota del terreno, correspondiendo básicamente a unifamiliares, adosados y pareados, incluido algún bajo de edificios multipropiedad. Las edificaciones cuya planta habitada es la 01 y/o superiores corresponden a los bloques de pisos existentes y alguna edificación unifamiliar en las que la planta 00 presenta uso como garaje o trasteros. Por último, como es lógico, existen escasas viviendas en las que las zonas habitables se sitúen bajo rasante, si bien este

dato hay que tomarlo con cautela, dada la tendencia habitual de adecuar estos espacios como vivienda auxiliar sin que quede registrado en la información pública disponible en Catastro.

10 Conclusiones y recomendaciones

En base al trabajo realizado se han conseguido tres objetivos principales de interés para el municipio de Soto del Real:

1. Un total de 99 viviendas particulares y 1 edificio público disponen de una medida de la concentración de radón en aire. Se trata de una medida realizada por laboratorio acreditado.
2. Se ha realizado la Cartografía del Potencial de Radón para el Municipio de Soto del Real, utilizando la misma metodología que la utilizada por el CSN para la realización de esa cartografía a nivel estatal, que proporciona un mayor grado de detalle y en una escala apta para uso municipal. En concreto se dispone de una serie de mapas a escala 1:15.000.
3. Se han identificado un total de seis Unidad Litológicas Homogéneas en el ámbito del municipio a partir de las mediciones de concentración en gas radón en suelo y la permeabilidad asociada. Se han analizado las relaciones entre estas unidades y las mediciones de radón en aire de viviendas. Como se ha indicado, las mediciones se han realizado en plantas 0 y en un periodo de tiempo homogéneo, de forma que la muestra de datos obtenida es adecuada para el análisis estadístico que se ha realizado, base de la cartografía desarrollada
4. El ayuntamiento de Soto del Real dispone de una Evaluación del Riesgo por Radón, a escala 1:15.000, que es la base fundamental para aportar a los vecinos del municipio la información necesaria a la hora de canalizar las inquietudes de los mismos respecto a lo que este riesgo supone. Igualmente es la base para establecer criterios y prioridades para la puesta en marcha de medidas o actuaciones de ámbito municipal de cara a reducir la incidencia de este riesgo en el municipio.

Hay que tener en cuenta que existen una serie de factores constructivos específicos de cada vivienda, que requerirían un exhaustivo análisis de cada una de las mismas (existencia de forjado sanitario, antigüedad de la construcción, materiales de construcción, etc., etc.). Es por esto, que volvemos a reiterar que las categorías de riesgo establecidas no sustituyen en ningún caso las medidas realizadas en cada vivienda, pudiéndonos encontrar viviendas categorizadas como de riesgo medio que presentan medidas reales en su interior que superan los 300 Bq/m³, tal y como se puede observar en los datos aportados y en los mapas generados.

En cualquier caso, se pueden sacar una serie de conclusiones respecto los datos y mapas disponibles:

- a) Las medidas realizadas en los edificios municipales, en los cuales es de aplicación RD 1439/2010 al ser un lugar de trabajo presentan concentraciones por debajo de los límites establecidos en el citado real Decreto y por debajo de los que establece el resto de normativa Europea, que será de aplicación en la nueva legislación estatal (300 Bq/m³).
- b) De las medidas realizadas, 31 de ellas, lo que supone un 31 % del conjunto del municipio se sitúan por encima de 300 Bq/m³, incluyendo dos viviendas cuya medida se sitúan por encima de 900 Bq/m³.

- c) El mayor porcentaje de viviendas medidas (33 %) presenta concentraciones entre 101 Bq/m³ y 200 Bq/m³, lo que podría considerarse rangos medios, y un 15 % de las medidas están por debajo de 100 Bq/m³, lo que supone un importante volumen de medidas que se pueden considerar en rangos de bajo o muy bajo riesgo.
- d) Las concentraciones más elevadas se asocian de forma general a viviendas construidas sobre rocas ígneas, si bien también hay registros de concentraciones elevadas tanto en depósitos de ladera como en fondos de valle.
- e) Las viviendas habituales en planta bajo rasante o en planta 0 presentan una mayor vulnerabilidad, como se desprende de la bibliografía consultada y se corrobora con los resultados obtenidos.

En base a las conclusiones obtenidas, se extraen una serie de recomendaciones tanto a nivel municipal como a nivel individual:

- a) Sería de interés que el Ayuntamiento de Soto del Real diera la mayor difusión al presente trabajo, dotando a los habitantes y usuarios de los servicios públicos municipales de información actualizada y detallada del riesgo por radón existente en el municipio.
- b) Igualmente se recomienda establecer un mecanismo que permita incorporar a una base de datos las medidas de radón que, a nivel particular, hagan los vecinos del municipio. De esta forma se dispondrían de un mayor número de medidas que permitan ajustar el análisis estadístico, en base al cual afinar la cartografía desarrollada, obteniendo así un mapeo del riesgo por radón más detallado.
- c) Consideramos importante que la información que incluye este trabajo se tenga en cuenta a la hora de la tramitación de las Licencias de Obra, tanto para obra nueva como rehabilitación, de forma que se informe del riesgo potencial por radón y de las medidas que sería necesario tomar para evitarlo, de acuerdo a los criterios que el Código Técnico de Edificación establece en este sentido.
- d) Igualmente se recomienda que, a nivel municipal, se establezca un plan de seguimiento de la concentración de radón en los edificios municipales, realizando mediciones al menos cada 5 años, garantizando así que tanto empleados como usuarios se encuentran con baja concentración de radón.
- e) Respecto a los vecinos de Soto del Real, en particular aquellos que su vivienda está en zonas con potencial de radón $P_{90} > 300$ Bq/m³, y su vivienda se desarrolla en planta 0 o bajo rasante, se recomienda que realicen mediciones específicas de acuerdo a los criterios establecidos por el CSN. Como se ha reiterado a lo largo del documento, en ningún caso la categoría de riesgo establecida sustituye a la medida real, pudiéndonos encontrar viviendas categorizadas como de riesgo bajo que presentan medidas reales en su interior que superan los 300 Bq/m³, y lo contrario, medidas reales menores incluso de 100 Bq/m³ en zonas categorizadas como de riesgo alto o muy alto.
- f) En el caso que una vivienda presente una concentración de radón por encima de los límites recomendados, existen una serie de medidas de mitigación, basadas en bibliografía detallada y contrastada, que pueden aplicarse.

En el caso de viviendas ya construidas, se tiene que tomar como referencia el *I.T. 24.2010 del CSN Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios*, (que se incluye como ANEXO 4) y la Tesis Doctoral "*Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones*" Borja Frutos Vázquez. 2009, documentos en los que están ampliamente descritas las posibles soluciones y la efectividad de las mismas. En este



Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

punto hay que incidir en que cada vivienda requiere una solución particular, por lo que se recomienda contar con el respaldo de una empresa especializada que diseñe y ejecute la medida de mitigación.

Soto del Real, junio de 2021

Bibliografía

AYALA-CARCEDO, F.J; OLCINA CANTOS, J. (coord). (2002): “Riesgos Naturales”. Ariel Ciencia, octubre 2002.

CSN (2010): “Guía de Seguridad II.01 Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire” Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2010

CSN (2017):. "Cartografía de Potencial de Radón en España" (FDE-02.17 Cartografía del potencial de radón de España" CSN, 2017

FONT GUITERAS, LL. (1997) “Radon generation, entry and accumulation indoors”. PhD Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).

FRUTOS VÁZQUEZ, B. (2009) “Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

FRUTOS VÁZQUEZ, B; OLAYA ADÁN, M. (2010): “Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios”. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Colección Informes Técnicos 24.2010.

GARCÍA-TALavera SAN MIGUEL, M; MARTÍN MATARRANZ, J.L; GIL DE MINGO, R; GARCÍA CADIerno, J.P.; SUÁREZ MAHOU, E. (2013): “El mapa predictivo de exposición al radón en España”. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Colección Informes Técnicos 38.2013.

GARCÍA-TALavera SAN MIGUEL, M, GARCÍA-PÉREZ A. , REY C. Y RAMOS L. (2013) "Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information". Journal of Radiological Protection 33 (3), 605-620.

ICOG (2008): “Riesgos naturales. Guía metodológica para la elaboración de cartografías en España v.2”. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG), julio 2008.

NEZNAL, M., MATOLÍN, I., BARNET, I., MIKSOVA, J. (2004): “The new method for assessing the radon risk of building sites”. RADON v.o.s. 2004.

QUINDÓS PONCELA, L.S. (1995): “Radón un gas radiactivo de origen natural en su casa”. Ed. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. Madrid, 1995.

QUINDÓS PONCELA, L.S; SOTO, J; FERNÁNDEZ, P.L. (1991): “National survey on indoor radon in Spain”. Environment International, 17, pp 449-453.

QUINDÓS PONCELA, L.S; SOTO, J; FERNÁNDEZ, P.L. (1992): “Geología y niveles de radón en viviendas españolas”. Revista Española de Física 6 (1).



SEISDEDOS DOMINGUEZ M. (2016): "Mapa del Riesgo de Exposición al Gas Radón en las Viviendas de la Comunidad De Madrid" (TFM. UCM. 2016)

TORRES DURÁN, M. (2015): "Radón residencial y riesgo de cáncer de pulmón en nunca fumadores. Un estudio multicéntrico de casos y controles en el noroeste de España". Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (USC), 2015

Algunas direcciones de internet de consulta y descarga de datos:

Consejo de Seguridad Nuclear:

<https://www.csn.es/home>

Instituto Geológico y Minero de España:

<http://www.igme.es/>

Instituto Geográfico Nacional de España:

<http://www.ign.es/ign/main/index.do>

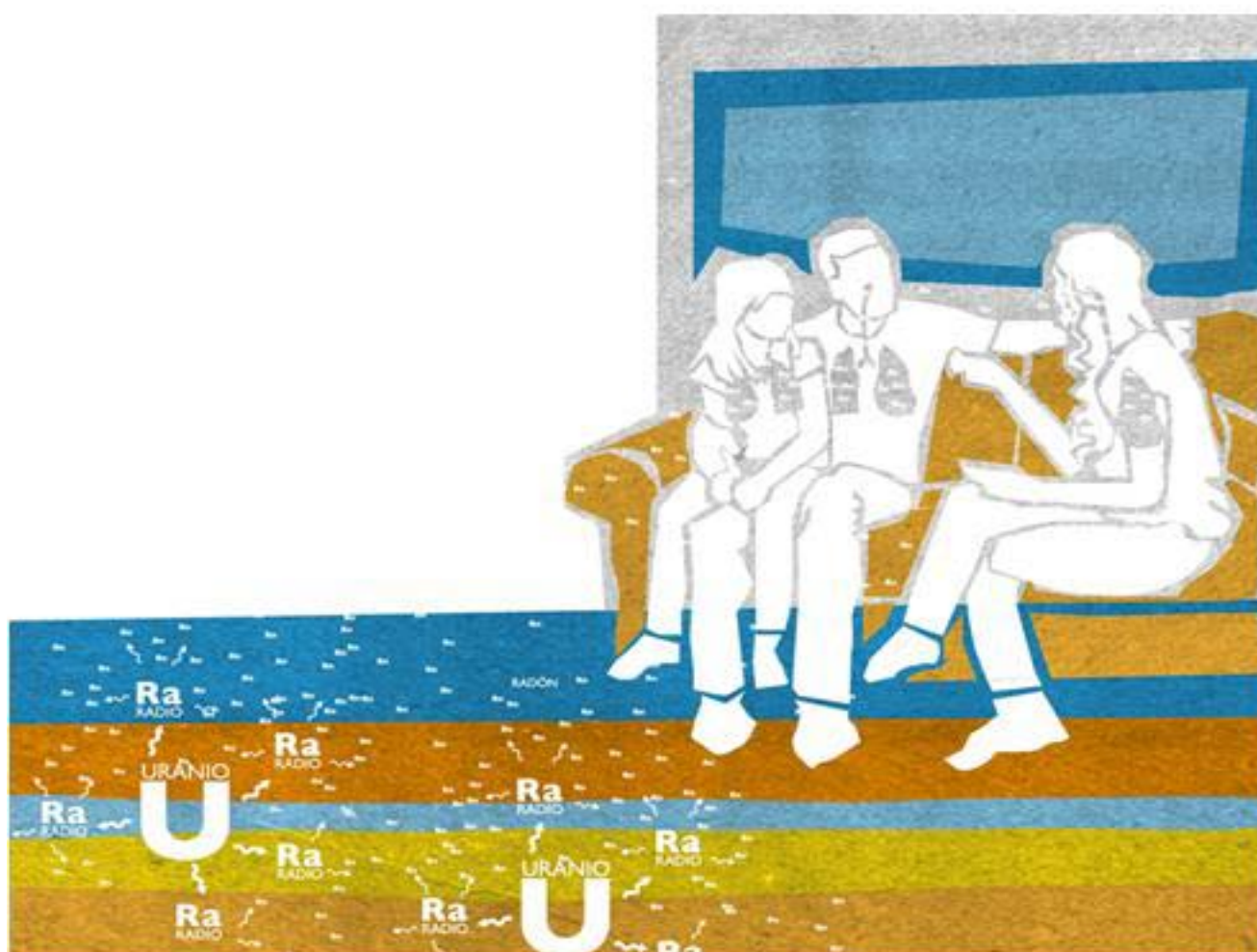
D Sede Electrónica del Catastro:

<https://www.sedecatastro.gob.es/>



Riesgo por Gas Radón en el Municipio de Soto del Real

Este trabajo ha sido realizado por el Equipo de GEOMNIA NATURAL RESOURCES SLNE. Para más información contactar en info@geomnia.es.



ANEXOS.

ANEXO I. Resultados de laboratorio.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection $kBq \cdot h/m^3$	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾ Bq/m^3	Observations
689 967	DRF	06/04/2021	206 ± 41	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	95 ± 19	
689 968	DRF	06/04/2021	663 ± 115	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	310 ± 54	
689 969	DRF	06/04/2021	384 ± 70	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	176 ± 32	
689 970	DRF	06/04/2021	500 ± 89	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	229 ± 41	
689 971	DRF	06/04/2021	370 ± 68	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	169 ± 31	
689 972	DRF	06/04/2021	202 ± 41	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	93 ± 19	
689 973	DRF	06/04/2021	185 ± 38	≤ 30		18/12/2020	21/03/2021	83 ± 17	
689 974	DRF	06/04/2021	941 ± 160	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	441 ± 75	
689 975	DRF	06/04/2021	284 ± 54	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	130 ± 25	
689 976	DRF	06/04/2021	339 ± 63	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	155 ± 29	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

— Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.

— Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

— Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.

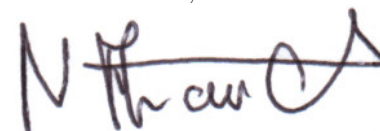
— Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

A L G A D E

Laboratoire DOSIRAD - 15 rue du Gardon - 26700 PIERRELATTE (FRANCE) - Tél: +33 (0)4 75 27 53 39 - Fax: +33 (0)4 75 01 53 59 - www.dosirad.fr
Société ALGADE - Avenue du Brugeaud - BP 46 - 87250 BESSINES SUR GARTEMPE (FRANCE) - Tél. : +33 (0)5.55.60.50.00 - Fax : +33 (0)5.55.60.50.59
S.A.S. au capital de 996 200 Euros - R.C.S. Limoges B 389 321 746 - Siret 389 321 746 00015 - N° TVA : FR 84 389 321 746

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$kBq \cdot h/m^3$				Bq/m^3	
689 977	DRF	06/04/2021	256 ± 49	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	117 ± 22	
689 978	DRF	06/04/2021	907 ± 154	≤ 30		04/01/2021	17/03/2021	525 ± 89	
689 979	DRF	06/04/2021	915 ± 156	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	419 ± 71	
689 980	DRF	06/04/2021	244 ± 47	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	112 ± 22	
689 981	DRF	06/04/2021	659 ± 114	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	305 ± 53	
689 982	DRF	06/04/2021	2007 ± 332	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	929 ± 154	
689 983	DRF	06/04/2021	378 ± 69	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	175 ± 32	
689 984	DRF	06/04/2021	199 ± 40	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	91 ± 18	
689 985	DRF	06/04/2021	667 ± 116	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	309 ± 54	
689 986	DRF	06/04/2021	629 ± 110	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	291 ± 51	
689 987	DRF	06/04/2021	369 ± 68	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	171 ± 31	
689 988	DRF	06/04/2021	336 ± 62	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	157 ± 29	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

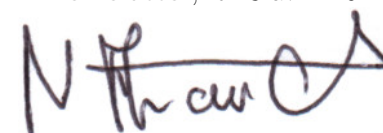
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$kBq \cdot h/m^3$				Bq/m^3	
689 989	DRF	06/04/2021	161 ± 34	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	75 ± 16	
689 990	DRF	06/04/2021	301 ± 56	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	138 ± 26	
689 991	DRF	06/04/2021	324 ± 60	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	150 ± 28	
689 992	DRF	06/04/2021	336 ± 62	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	154 ± 28	
689 993	DRF	06/04/2021	518 ± 91	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	242 ± 43	
689 994	DRF	06/04/2021	709 ± 122	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	328 ± 56	
689 995	DRF	06/04/2021	177 ± 37	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	83 ± 17	
689 996	DRF	06/04/2021	669 ± 116	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	306 ± 53	
689 997	DRF	06/04/2021	73 ± 20	≤ 30		21/12/2020	17/03/2021	36 ± 10	
689 998	DRF	06/04/2021	201 ± 40	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	94 ± 19	
689 999	DRF	06/04/2021	612 ± 107	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	286 ± 50	
690 000	DRF	06/04/2021	578 ± 101	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	268 ± 47	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

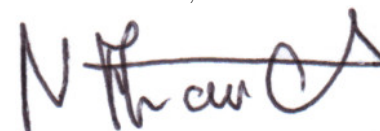
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

Laboratoire DOSIRAD - 15 rue du Gardon - 26700 PIERRELATTE (FRANCE) - Tel: +33 (0)4 75 27 53 39 - Fax: +33 (0)4 75 01 53 59 - www.dosirad.fr
Société ALGADE - Avenue du Brugeaud - BP 46 - 87250 BESSINES SUR GARTEMPE (FRANCE) - Tél. : +33 (0)5.55.60.50.00 - Fax : +33 (0)5.55.60.50.59
S.A.S. au capital de 996 200 Euros - R.C.S. Limoges B 389 321 746 - Siret 389 321 746 00015 - N° TVA : FR 84 389 321 746

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
			$k\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$					Bq/m^3	
690 001	DRF	06/04/2021	879 ± 150	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	412 ± 70	
690 002	DRF	06/04/2021	236 ± 46	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	109 ± 21	
690 003	DRF	06/04/2021	815 ± 140	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	373 ± 64	
690 004	DRF	06/04/2021	176 ± 36	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	81 ± 17	
690 005	DRF	06/04/2021	560 ± 98	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	259 ± 45	
690 006	DRF	06/04/2021	240 ± 47	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	113 ± 22	
690 007	DRF	06/04/2021	652 ± 113	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	305 ± 53	
690 008	DRF	06/04/2021	461 ± 82	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	211 ± 38	
690 009	DRF	06/04/2021	459 ± 82	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	215 ± 38	
690 010	DRF	06/04/2021	237 ± 46	≤ 30		18/12/2020	15/03/2021	114 ± 22	
690 011	DRF	06/04/2021	1556 ± 259	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	720 ± 120	
690 012	DRF	06/04/2021	272 ± 52	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	127 ± 24	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

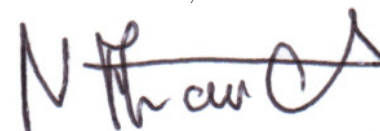
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$kBq \cdot h/m^3$				Bq/m^3	
690 013	DRF	06/04/2021	564 ± 99	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	264 ± 46	
690 014	DRF	06/04/2021	238 ± 46	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	111 ± 22	
690 015	DRF	06/04/2021	457 ± 82	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	214 ± 38	
690 016	DRF	06/04/2021	475 ± 85	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	222 ± 40	
690 964	DRF	06/04/2021	589 ± 103	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	276 ± 48	
690 965	DRF	06/04/2021	448 ± 80	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	210 ± 37	
690 966	DRF	06/04/2021	127 ± 29	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	59 ± 14	
690 967	DRF	06/04/2021	803 ± 138	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	376 ± 65	
690 968	DRF	06/04/2021	344 ± 64	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	161 ± 30	
690 969	DRF	06/04/2021	3255 ± 534	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	1507 ± 247	
690 970	DRF	06/04/2021	381 ± 69	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	176 ± 32	
690 971	DRF	06/04/2021	917 ± 156	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	425 ± 72	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

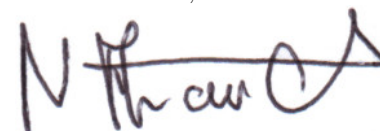
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
			$kBq \cdot h/m^3$					Bq/m^3	
690 972	DRF	06/04/2021	285 ± 54	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	134 ± 25	
690 973	DRF	06/04/2021	655 ± 114	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	300 ± 52	
690 974	DRF	06/04/2021	900 ± 153	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	417 ± 71	
690 975	DRF	06/04/2021	607 ± 106	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	284 ± 50	
690 976	DRF	06/04/2021	113 ± 26	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	53 ± 12	
690 977	DRF	06/04/2021	252 ± 49	≤ 30		21/12/2020	18/03/2021	120 ± 23	
690 978	DRF	06/04/2021	480 ± 85	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	222 ± 39	
690 979	DRF	06/04/2021	965 ± 164	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	452 ± 77	
690 980	DRF	06/04/2021	893 ± 152	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	413 ± 70	
690 981	DRF	06/04/2021	439 ± 79	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	203 ± 37	
690 982	DRF	06/04/2021	346 ± 64	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	160 ± 30	
690 983	DRF	06/04/2021	109 ± 26	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	50 ± 12	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

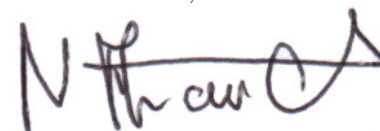
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$k\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$				Bq/m^3	
690 984	DRF	06/04/2021	732 ± 126	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	339 ± 58	
690 985	DRF	06/04/2021	331 ± 61	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	151 ± 28	
690 986	DRF	06/04/2021	762 ± 131	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	357 ± 61	
690 987	DRF	06/04/2021	448 ± 80	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	208 ± 37	
690 988	DRF	06/04/2021	129 ± 29	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	60 ± 13	
690 989	DRF	06/04/2021	835 ± 143	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	382 ± 65	
690 990	DRF	06/04/2021	232 ± 45	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	108 ± 21	
690 991	DRF	06/04/2021	737 ± 127	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	341 ± 59	
690 992	DRF	06/04/2021	101 ± 24	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	47 ± 11	
690 993	DRF	06/04/2021	1439 ± 240	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	666 ± 111	
690 994	DRF	06/04/2021	687 ± 119	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	315 ± 54	
690 995	DRF	06/04/2021	319 ± 59	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	148 ± 27	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

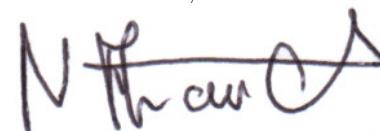
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$k\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$				Bq/m^3	
690 996	DRF	06/04/2021	1344 ± 225	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	622 ± 104	
690 997	DRF	06/04/2021	298 ± 56	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	140 ± 26	
690 998	DRF	06/04/2021	634 ± 110	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	297 ± 51	
690 999	DRF	06/04/2021	397 ± 72	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	182 ± 33	
691 000	DRF	06/04/2021	281 ± 53	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	130 ± 25	
691 001	DRF	06/04/2021	372 ± 68	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	172 ± 31	
691 002	DRF	06/04/2021	1531 ± 255	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	701 ± 117	
691 003	DRF	06/04/2021	778 ± 134	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	360 ± 62	
691 004	DRF	06/04/2021	354 ± 65	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	164 ± 30	
691 005	DRF	06/04/2021	255 ± 49	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	117 ± 22	
691 006	DRF	06/04/2021	218 ± 43	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	101 ± 20	
691 007	DRF	06/04/2021	160 ± 34	≤ 30		17/12/2020	18/03/2021	73 ± 16	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

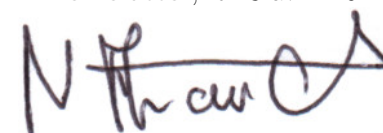
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Dosimètre			Analyse		Prélèvement			Résultat final calculé	Observations
Num	Type	Réception	Exposition ⁽¹⁾	Limite de détection	Lieu d'exposition	Pose	Dépose	Activité volumique ⁽²⁾	
				$kBq \cdot h/m^3$				Bq/m^3	
691 008	DRF	06/04/2021	1170 ± 197	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	548 ± 92	
691 009	DRF	06/04/2021	441 ± 79	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	204 ± 37	
691 010	DRF	06/04/2021	230 ± 45	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	108 ± 21	
691 011	DRF	06/04/2021	934 ± 159	≤ 30		18/12/2020	17/03/2021	437 ± 74	
691 012	DRF	06/04/2021	977 ± 166	≤ 30		17/12/2020	17/03/2021	452 ± 77	
691 013	DRF	06/04/2021	452 ± 81	≤ 30		18/12/2020	18/03/2021	209 ± 38	

Traitement N°T-1796 du 07/04/2021.

Commentaires : 100 films.

⁽¹⁾ Exposition du radon : résultat de mesure [Rm], couvert par l'accréditation.

- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rm \pm U(Rm)$, avec $U(Rm)$ = Incertitude associée à Rm.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp$.

⁽²⁾ Activité volumique du radon: résultat final [Rf], calculé avec la durée d'exposition [te] fournie par le client.

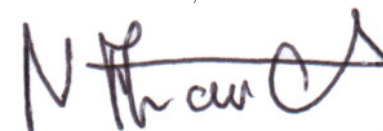
- Si $Rm > LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $Rf \pm U(Rf)$, avec $U(Rf)$ = Incertitude associée à Rf.
- Si $Rm \leq LDExp$, alors le résultat est fourni sous la forme: $\leq LDExp/d$.

Avec $LDExp$ = Limite de détection en exposition, d = durée d'exposition en heures.

Toutes les incertitudes sont données avec un facteur d'élargissement $k = 2$.

ALGADE désengage sa responsabilité sur les données fournies par le client (lieux d'exposition, dates de pose et de dépose).

Pierrelatte , le 13 avril 2021



Nicolas Tharaud
Responsable Technique Laboratoire

A L G A D E

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

ANEXO 2. Análisis estadístico.

Rocas igneas

		<i>n</i>	<i>Rn_i</i>	<i>Ln(Rn_i)</i>	
		37	309	5,73	0,184943674
			150	5,01	0,085647068
			305	5,72	0,173906748
			666	6,50	1,435202021
			373	5,92	0,382279956
			300	5,70	0,160393825
			276	5,62	0,100558986
			95	4,55	0,561620751
			452	6,11	0,65673468
			75	4,32	0,971806338
			47	3,85	2,111624273
			59	4,08	1,502470546
			339	5,83	0,273225337
			83	4,42	0,782251606
			341	5,83	0,279409482
			154	5,04	0,070935874
			208	5,34	0,001172897
			1507	7,32	4,058555551
			284	5,65	0,119497249
			50	3,91	1,935625232
			94	4,54	0,577593486
			130	4,87	0,189883332
			108	4,68	0,385838838
			286	5,66	0,124398217
			297	5,69	0,152444676
			109	4,69	0,374473763
			176	5,17	0,017637567
			328	5,79	0,239828726
			417	6,03	0,532601801
			425	6,05	0,560699452
			81	4,39	0,825992585
			310	5,74	0,187733119
			93	4,53	0,593964623
			701	6,55	1,560544089
			117	4,76	0,292807133
		525	525	6,26	0,921806922
				5,30	0,78
			GEOM_MEAN	201,00	
			GSD		2,18
			X_90	544,93	

Rocas metamórficas

		<i>n</i>	Rn_i	Ln(Rn_i)	
		13	413	6,02	0,606002266
			222	5,40	0,024866534
			412	6,02	0,602233782
			164	5,10	0,021059725
			210	5,35	0,010428783
			111	4,71	0,28671304
			204	5,32	0,005348564
			172	5,15	0,00950462
			127	4,84	0,160639865
			91	4,51	0,538941884
			376	5,93	0,468681301
			120	4,79	0,209301105
			155	5,04	0,040626838
				5,24	0,48
			GEOM_MEAN	189,61	
			GSD		1,61
			X_90	350,12	

Depósitos de ladera

		<i>n</i>	<i>Rn_i</i>	<i>Ln(Rn_i)</i>	
		44	437	6,08	0,663162068
			140	4,94	0,104939157
			441	6,09	0,678085242
			83	4,42	0,716977017
			622	6,43	1,362716602
			229	5,43	0,028269863
			134	4,90	0,135236945
			101	4,62	0,423104774
			268	5,59	0,105886084
			157	5,06	0,043823133
			382	5,95	0,462175691
			315	5,75	0,237156414
			242	5,49	0,049886189
			130	4,87	0,158444687
			175	5,16	0,010160557
			182	5,20	0,003791958
			215	5,37	0,011036021
			209	5,34	0,005890361
			214	5,37	0,010078243
			112	4,72	0,299303847
			929	6,83	2,460264958
			53	3,97	1,677785634
			114	4,74	0,280250715
			291	5,67	0,166250037
			211	5,35	0,007442957
			151	5,02	0,061655733
			357	5,88	0,374727892
			259	5,56	0,084822194
			264	5,58	0,096325528
			113	4,73	0,28965681
			138	4,93	0,114468459
			160	5,08	0,036256633
			306	5,72	0,209763579
			161	5,08	0,033922713
			360	5,89	0,385043172
			176	5,17	0,009044308
			108	4,68	0,34041896
			60	4,09	1,371805478
			452	6,11	0,719267874
			305	5,72	0,206775931
			169	5,13	0,01841092
			36	3,58	2,829348124
			222	5,40	0,018794167
			148	5,00	0,072024222

5,27 0,63

GEOM_MEAN 193,56

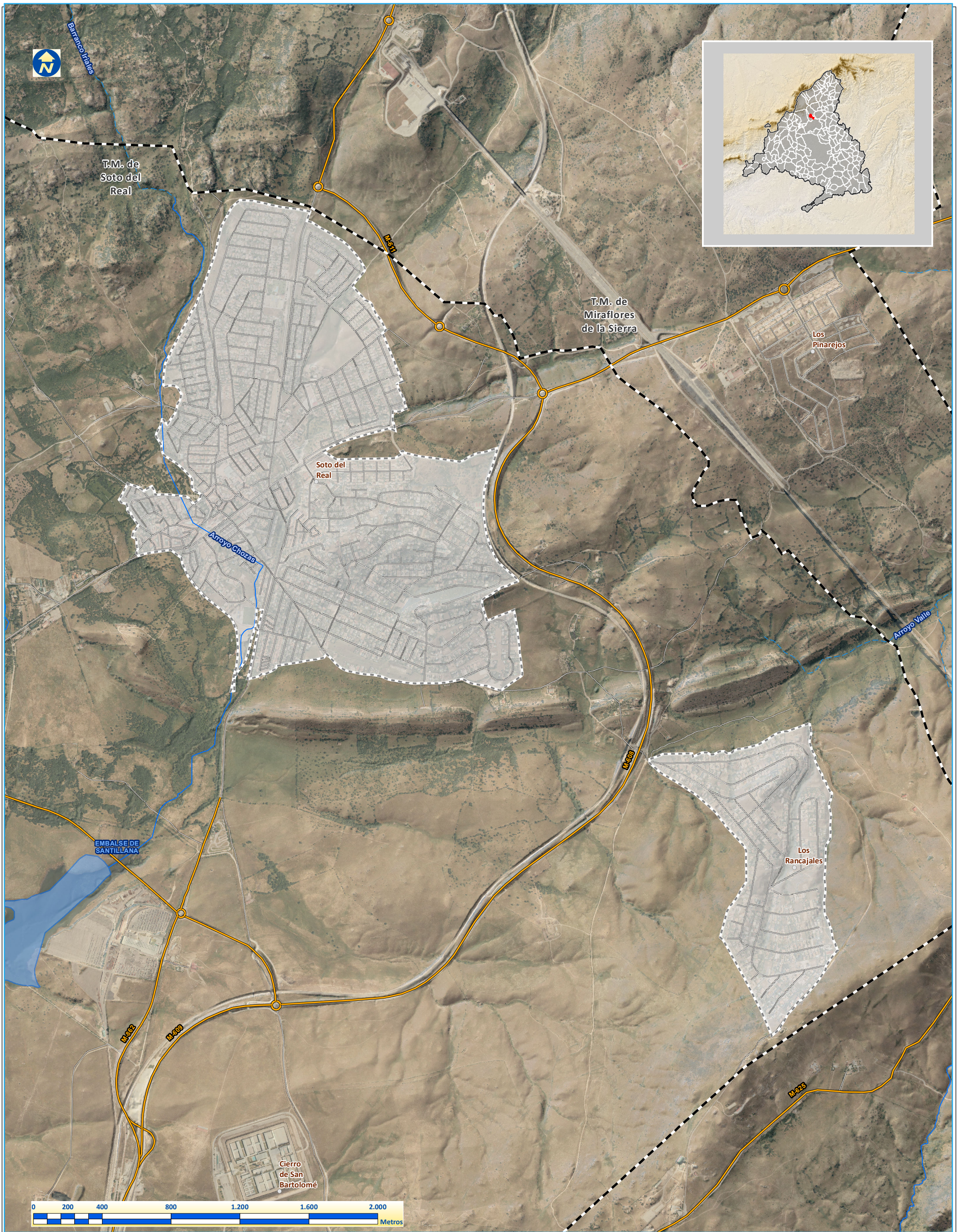
GSD 1,87

X_90 432,65

Fondos de Valle

		n	Rn_i	Ln(Rn_i)	
			6	117	4,76 0,349437975
				203	5,31 0,00160807
				720	6,58 1,502939887
				417	6,03 0,462100165
				171	5,14 0,04479283
				73	4,29 1,129644347
					5,35 0,76
				GEOM_MEAN	211,31
				GSD	2,14
				X_90	560,93

ANEXO 3. Mapas.



Realizado por:
geomnia

**MAPA DEL RIESGO
DE EXPOSICIÓN AL GAS RADÓN
EN EL MUNICIPIO DE SOTO DEL REAL**

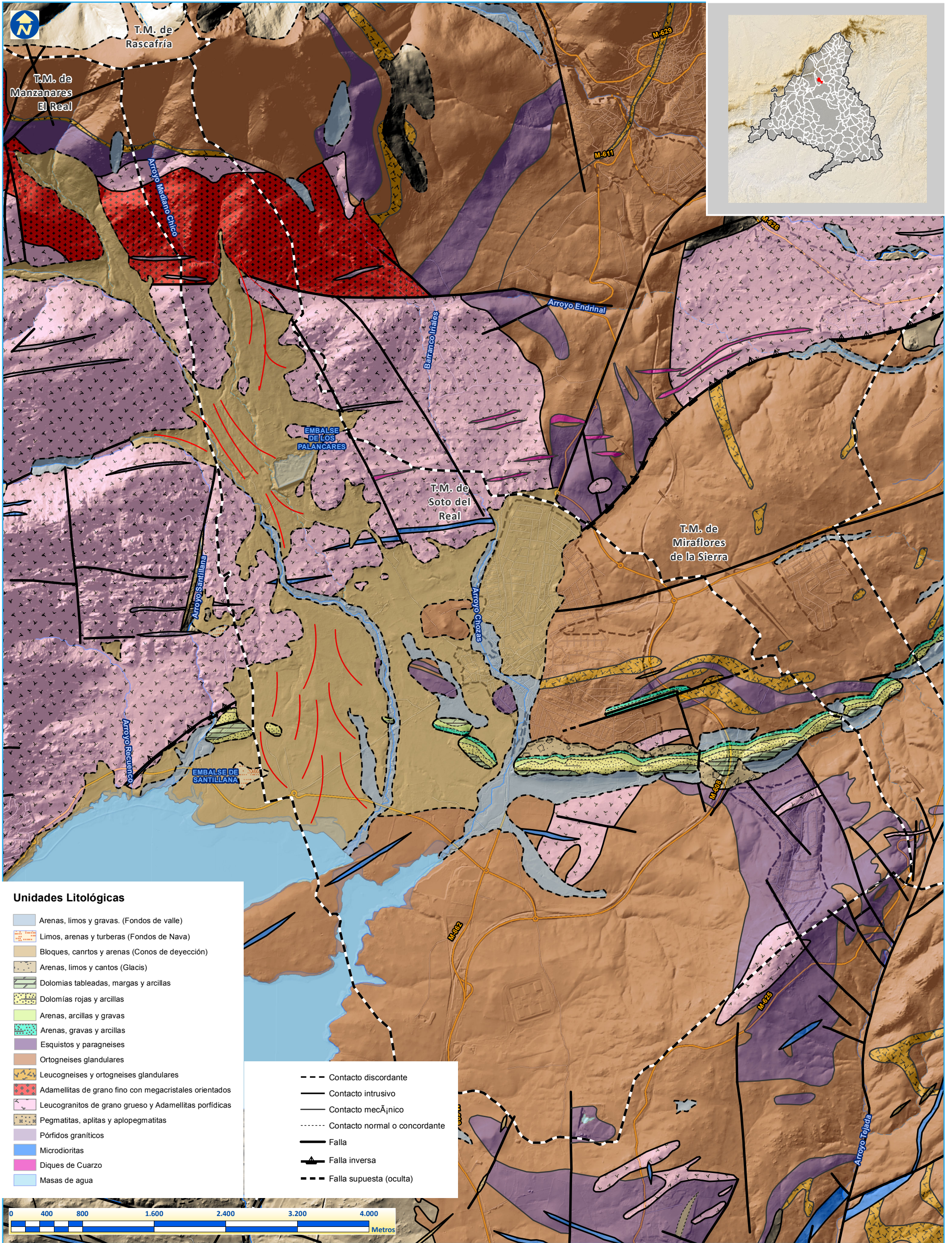
**Título :
ZONA URBANA**

Nº de mapa: 2

Escala Original (A3) 1:20.000 UTM, ETRS89, HUSO 30

Mayo 2021

LIDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España
Base cartográfica: carreteras, hidrografía, embalses y límites administrativos cedidos por la Comunidad de Madrid



Realizado por:
geomnía

**MAPA DEL RIESGO
DE EXPOSICIÓN AL GAS RADÓN
EN EL MUNICIPIO DE SOTO DEL REAL**

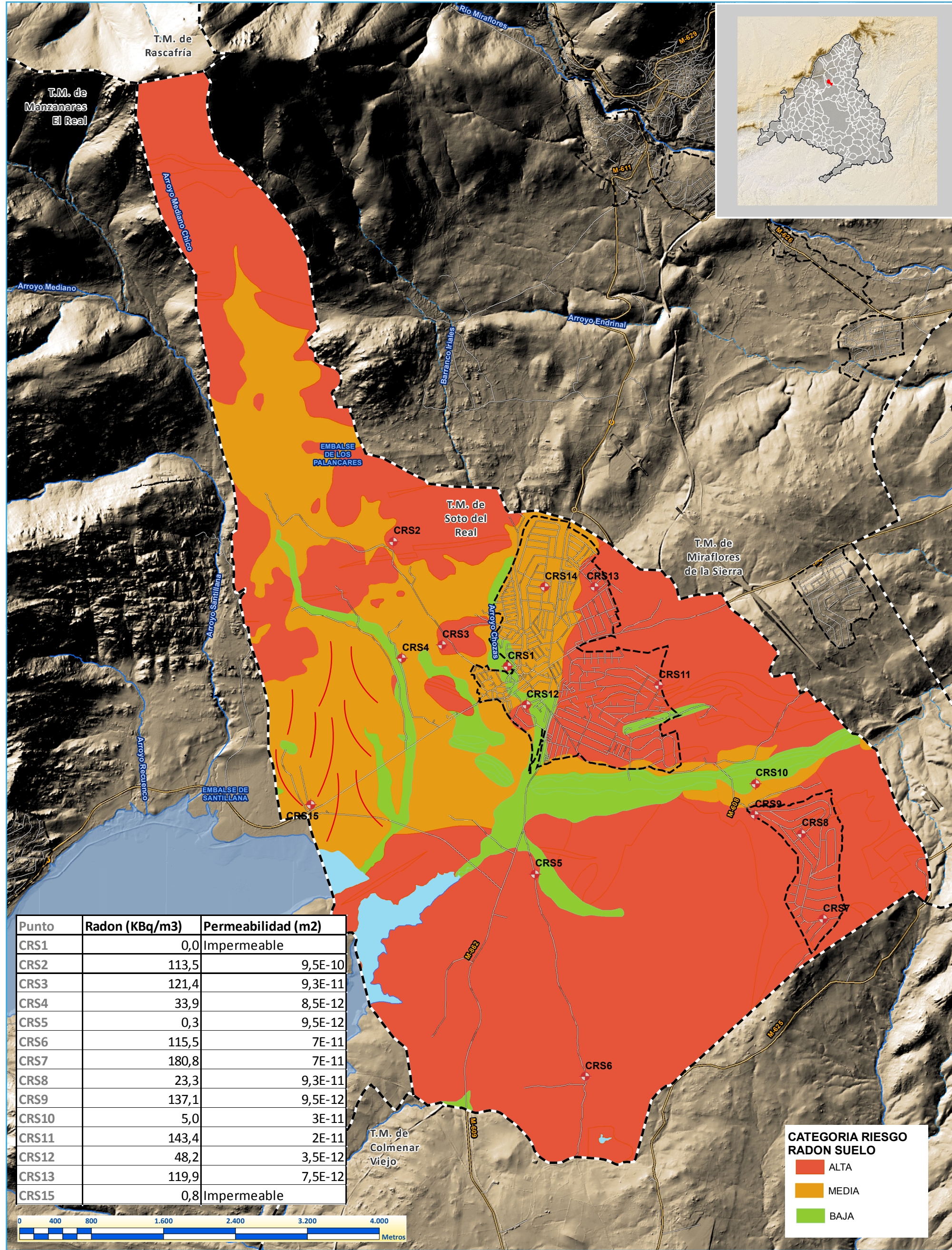
Título :
GEOLOGÍA

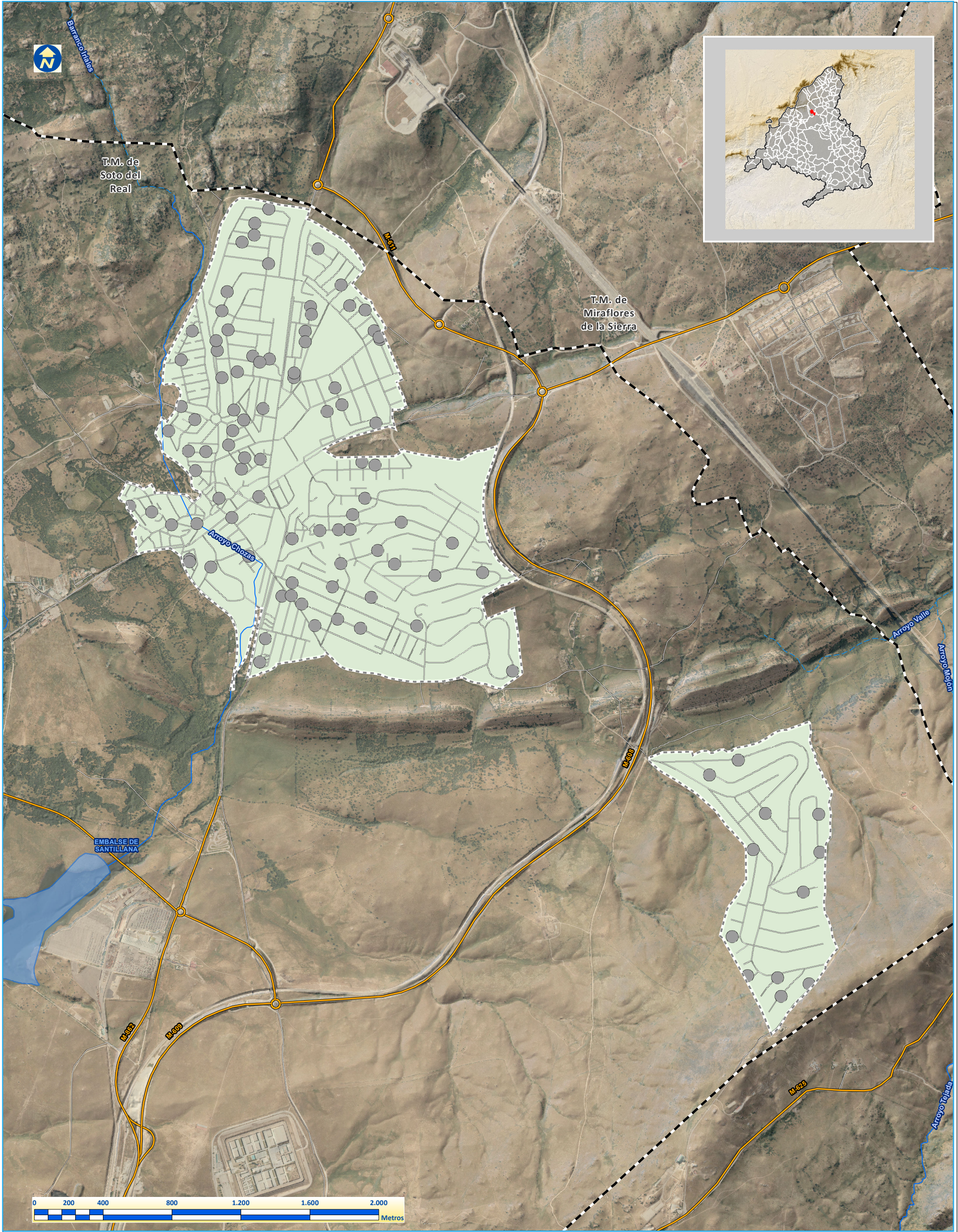
Escala Original (A3): 1:40.000 UTM, ETRS89, HUSO 30

Nº de mapa:
3

Mayo 2021

LIDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España
Base cartográfica: carreteras, hidrografía, embalses y límites administrativos cedidos por la Comunidad de Madrid





Realizado por:
geomnia

**MAPA DEL RIESGO
DE EXPOSICIÓN AL GAS RADÓN
EN EL MUNICIPIO DE SOTO DEL REAL**

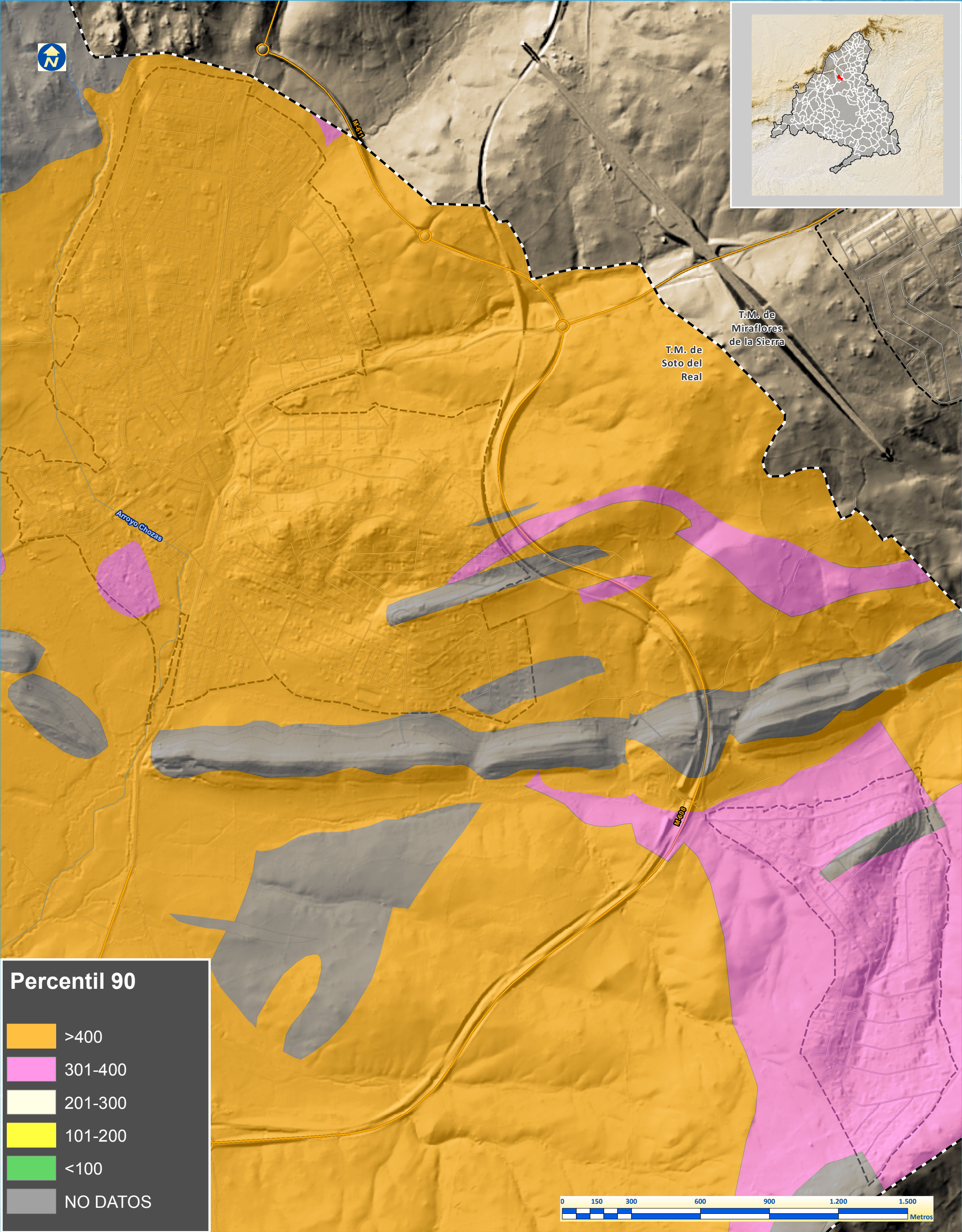
**Título :
UBICACIÓN DE LOS PUNTOS
DE MEDICIÓN DE RADON EN VIVIENDAS**

Nº de mapa: 5

Escala Original (A3) 1:20.000 UTM, ETRS89, HUSO 30

Mayo 2021

LIDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España
Base cartográfica: carreteras, hidrografía, embalses y límites administrativos cedidos por la Comunidad de Madrid



Realizado por:
geomنيا

**MAPA DEL RIESGO
DE EXPOSICIÓN AL GAS RADÓN
EN EL MUNICIPIO DE SOTO DEL REAL**

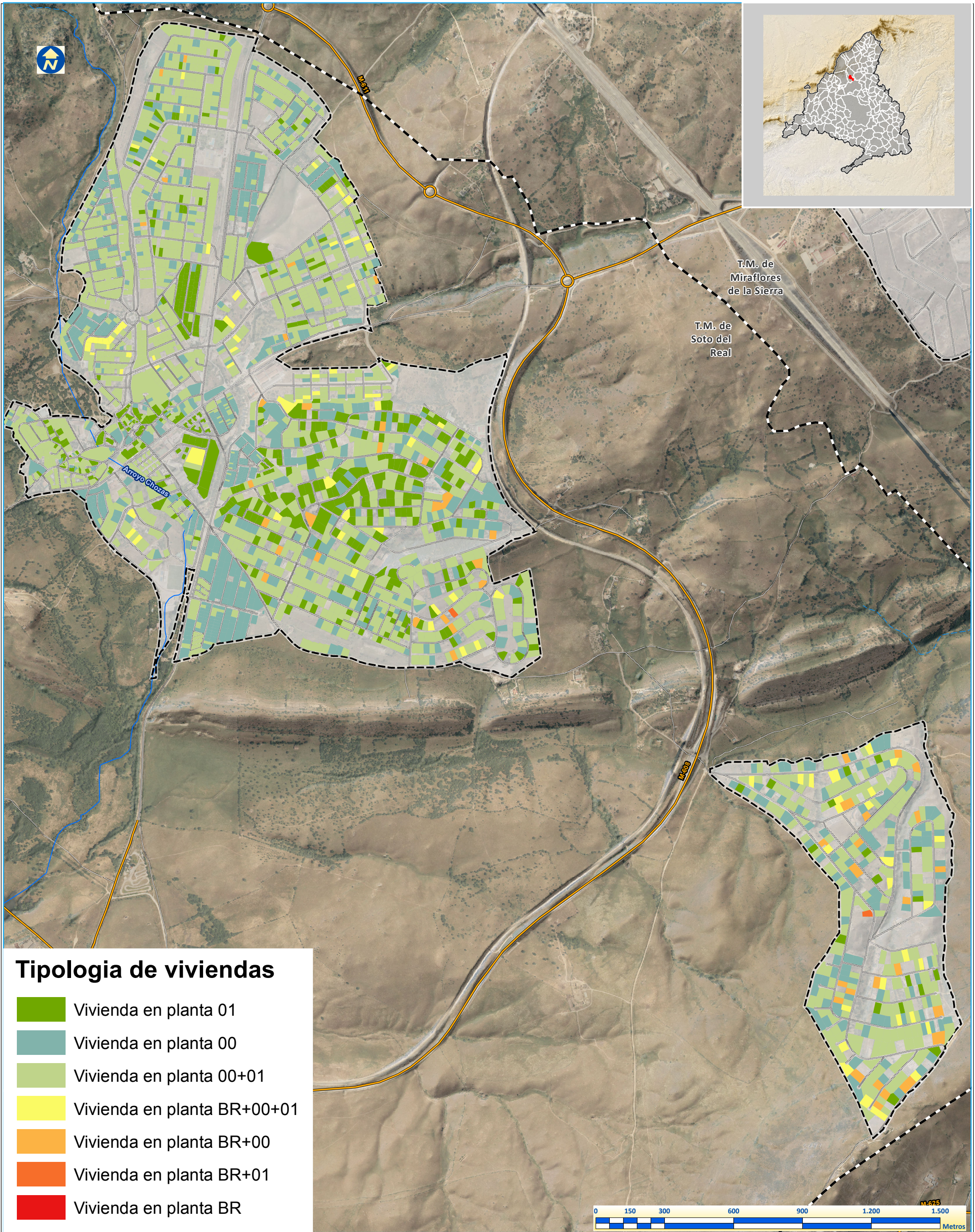
**Título :
POTENCIAL DE RADÓN**

**Nº de mapa:
6**

Escala Original (A3)1:15.000 UTM, ETRS89, HUSO 30

Mayo 2021

LIDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España
Base cartográfica: carreteras, hidrografía, embalses y límites administrativos cedidos por la Comunidad de Madrid



Tipologia de viviendas

- Vivienda en planta 01
- Vivienda en planta 00
- Vivienda en planta 00+01
- Vivienda en planta BR+00+01
- Vivienda en planta BR+00
- Vivienda en planta BR+01
- Vivienda en planta BR

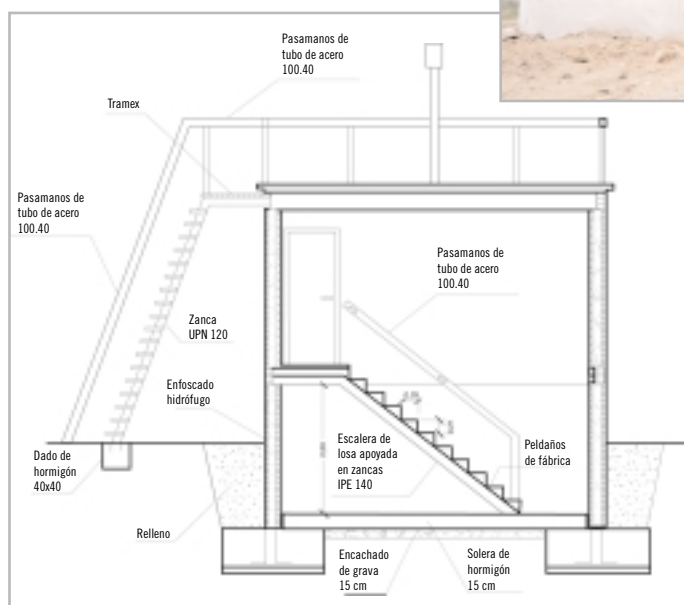
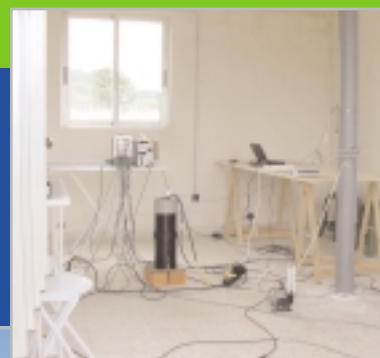
 Ayuntamiento de Soto del Real	Realizado por: 	MAPA DEL RIESGO DE EXPOSICIÓN AL GAS RADÓN EN EL MUNICIPIO DE SOTO DEL REAL	Título : MAPA DE TIPOLOGIA DE VIVIENDAS	Nº de mapa: 7
			Escala Original (A3)1:15.000 UTM, ETRS89, HUSO 30	Mayo 2021

LIDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España
Base cartográfica: carreteras, hidrografía, embalses y límites administrativos cedidos por la Comunidad de Madrid

ANEXO 4. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios.

Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

CSN



Colección
Informes Técnicos
24.2010

Protección frente a la inmisi3n
de gas rad3n en edificios

Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

Autores: Borja Frutos Vázquez y
Manuel Olaya Adán
(Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja, IETcc-CSIC)

Colección
Informes Técnicos
24.2010



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04.20

© Copyright 2010, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 - Madrid-España
www.csn.es
peticiones@csn.es

Maquetación y fotomecánica: Pilar Guzmán
Impresión:

Depósito legal: M-00000-2010

En las últimas décadas se han ido recogiendo, en la normativa sobre salubridad en distintos países, las sucesivas recomendaciones que derivan de investigaciones sobre los efectos que supone para la salud respirar en espacios cerrados con presencia de gas radón, como por ejemplo las de organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Comisión Europea, etc.

El denominador común de estas recomendaciones es el establecimiento de niveles de referencia de concentración de radón en tales espacios, así como la intervención mediante técnicas correctoras para la reducción de las concentraciones en función de dichos niveles. En general, contemplan ámbitos de aplicación, bien relacionados con las condiciones que deben cumplir los espacios destinados a puestos de trabajo, o los espacios residenciales.

En particular, en lo referente a espacios residenciales, las condiciones de salubridad en la edificación para España, están recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) derivado de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) (www.codigotecnico.org). En la actualidad, esta normativa no contempla la protección de los usuarios de los edificios frente al riesgo de habitar en espacios con excesiva concentración de gas radón.

El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, junto con la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria, colaboran con el Consejo de Seguridad Nuclear, en dos líneas de investigación:

1. Fundamentos científico técnicos para abordar un requisito específico dentro del CTE que contemple las condiciones mínimas de salubridad, referente a concentraciones de radón, exigidas a los espacios habitados.
2. Investigaciones concretas sobre la efectividad de distintas medidas correctoras para evitar la penetración de gas radón en los espacios habitados.

Esta publicación comienza con un acercamiento a la problemática que supone habitar en espacios con excesivas concentraciones de gas radón, continúa con un planteamiento a nivel normativo para afrontar la protección frente a la penetración del gas en viviendas nuevas, y termina con la presentación de los resultados de una investigación sobre técnicas de intervención probadas en un módulo que reproduce las características de una vivienda construida.

Con este documento se pretende ofrecer al lector una visión sobre técnicas de protección destinadas a reducir la presencia de radón en el interior de los edificios, diseñadas con sistemas constructivos habituales en España y en base a los conocimientos adquiridos experimentalmente, con el objetivo de servir de referencia técnica para normativas futuras y por otro lado, como directrices para la aplicación práctica en casos reales.

Sumario

Introducción	5
El radón y su problemática en espacios habitados	9
Aproximación a una propuesta normativa en España para viviendas nuevas	17
La experiencia adquirida en las soluciones contra la inmisión de radón.	37
Conclusiones y perspectivas futuras	69
Referencias bibliográficas	71

EL RADÓN Y SU PROBLEMÁTICA
EN ESPACIOS HABITADOS



El radón, como gas noble, se presenta en la naturaleza en tres isótopos: el ^{222}Rn , al que se denomina específicamente radón, proveniente de la cadena de desintegración del uranio ^{238}U y con un periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) de 3,8 días; el ^{220}Rn ($T_{1/2}$ de 54,5 segundos) que proviene de la serie de desintegración del torio ^{232}Th y que se denomina torón; y el ^{219}Rn ($T_{1/2}$ de 3,92 segundos) proveniente de la desintegración del actinio ^{235}U y al que se denomina actinón.

De estos tres isótopos del radón, el de mayor significación radiológica es el ^{222}Rn , al que nos referiremos, de ahora en adelante, como radón.

Este gas inerte de origen natural, derivado de la desintegración del radio (^{226}Ra) presente en los suelos terrestres, es capaz de viajar entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie, donde podrá diluirse entre los gases de la atmósfera, o penetrar en el interior de los edificios si éstos no se encuentran debidamente protegidos.

Al penetrar en un espacio cerrado, el radón se acumula aumentando su concentración. La inhalación de este gas puede llegar a generar cáncer pulmonar debido a que la radiación que se produce de la desintegración del mismo y de sus descendientes de vida corta (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) en el interior de nuestro organismo, es capaz alterar el ADN de los tejidos pulmonares.

El radón es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU, que lo clasifican como cancerígeno del grupo 1. Advierten que el principal efecto adverso derivado de la inhalación de radón y en especial de sus productos de desintegración es el riesgo de contraer cáncer de pulmón, siendo la segunda causa detrás del tabaco.

La magnitud con la que medimos la actividad de la radiación producida por la desintegración del núcleo de cualquier elemento radiactivo es el Becquerel (Bq), que indica el número de desintegraciones por segundo del núcleo atómico, en este caso del radón. Para el

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

A nivel internacional, y en distintos países, se han desarrollado este tipo de normativas referentes a la protección de los espacios habitados frente a una excesiva concentración de gas radón.

En el ámbito europeo, la recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom) establece los siguientes niveles de radón en viviendas:

- 200 Bq/m^3 . Nivel de diseño (edificios de nueva construcción). Recomendación de no sobrepasar este nivel en el interior de una vivienda que va a ser construida.
- 400 Bq/m^3 . Nivel de actuación (edificios existentes). Recomendación de actuación para reducir la concentración en una vivienda construida cuando los niveles de radón registrados superen dicho valor.

Se entiende, que los edificios construidos deben protegerse frente a la inmisión de radón, mediante la intervención con soluciones constructivas, para que en su interior se reduzcan los niveles por debajo de 400 Bq/m^3 y que, en edificios de nueva construcción, el proyecto deberá contemplar las soluciones adecuadas para que, una vez construido, el nivel de concentración no supere 200 Bq/m^3 y sea tan bajo como sea posible.

1. Medida de la concentración de radón

Como se ha indicado, el parámetro que mide la concentración de radón y sus descendientes es el bequerelio por m^3 de aire (1 Bq equivale a una desintegración atómica por segundo).

Existen varios métodos para determinar la concentración en un espacio (por ejemplo en un edificio) o en

los poros del mismo terreno. La mayoría de ellos se basan en el recuento de las partículas alfa emitidas por la desintegración del radón y sus descendientes de vida corta.

Existen equipos de medida en continuo que muestran las concentraciones de actividad de radón en un espacio en tiempo real, y medidores integradores, que ofrecen los resultados de concentraciones de actividad de radón para periodos de tiempo largo¹.

2. Fuentes de radón

El radón ^{222}Rn procede del radio ^{226}Ra presente en la composición de determinados materiales. Se puede encontrar tanto en suelos terrestres, en mayor o menor proporción en función del tipo de roca, en el agua al disolverse el gas en ella en corrientes subterráneas, o en materiales de construcción al usarse materias primas con contenidos de radio en el proceso de fabricación.

Como fuentes principales encontramos las siguientes:

2.1. Terreno

El terreno es la principal fuente de radón. En función del contenido de uranio que posea la roca, el terreno será potencialmente activo en la generación de radón. En la siguiente tabla, se muestran las concentraciones representativas de uranio en rocas presentes en la corteza terrestre.

Tabla 1.1. Concentración de uranio en rocas²

Tipo de roca	Concentración de uranio ^{238}U (ppm)
Basálticas	1.0
Granitos	5.0
Arcillas	3.7
Arenas	0.5

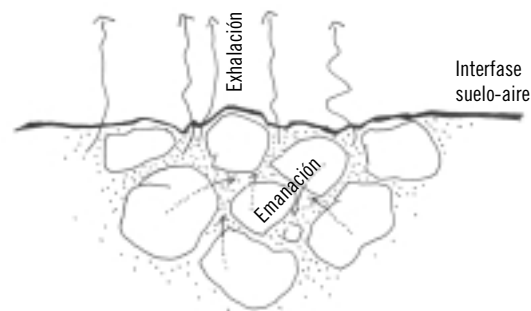
¹ A. Vargas Drechsler y X. Ortega Aramburu. *Calidad metrológica y dosimetría del radón*. Colección Documentos I+D, 12.2004. CSN.

² L. S. Quindós Poncela. *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear, 1995.

Aun siendo el contenido de uranio ^{238}U un factor determinante a la hora de catalogar a un terreno en su capacidad de generar radón, la permeabilidad del mismo es sumamente importante ya que de este parámetro depende que el radón sea capaz de escapar de la estructura de la roca, viajar entre los poros del terreno y alcanzar la superficie.

Se denomina *exhalación* al parámetro que pondera la cantidad de gas que deja escapar la roca fuente de radón, y *emanación* al parámetro que determina el movimiento del radón entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie terrestre.

Figura 1.1. Procesos de emanación y exhalación



2.2. Agua

El gas radón, tras haber emanado de las rocas puede disolverse en corrientes de agua subterráneas y transportarse de esta manera hacia su destino final (balnearios de aguas termales, manantiales, etc.). Una vez liberado al aire, el radón disuelto en el agua puede contribuir al incremento de la concentración en locales cerrados.

Respecto a los contenidos de radón en aguas, existen como referencia los valores establecidos por la Recomendación de la Comisión Europea (2001/928/Euratom) de 20 de diciembre de 2001 relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable.

2.3. Materiales de construcción

Los materiales de construcción pueden constituir otra fuente de radón. Muchos de ellos están formados a

partir de materias que presentan contenidos, más o menos elevados, de radio ^{226}Ra . La problemática en este caso es diferente, pues no se trata de proteger los espacios habitados de la exhalación del gas proveniente del suelo, sino de procurar usar materiales con bajos contenidos de radio o resolver adecuadamente la estanquidad del espacio interior frente a la exhalación del gas proveniente de los materiales usados en la vivienda.

Entre los materiales con contenido en radio, se encuentran los habitualmente usados en los sistemas de construcción, como son los ladrillos cerámicos, los hormigones, los morteros de albañilería, los yesos, los cementos, y adiciones tales como las cenizas volantes. Al tratarse de productos elaborados con materias primas que proceden de diferentes orígenes, su caracterización radiológica tiene que ser específica para un material determinado³.

Se estima que el porcentaje de radón debido a los materiales empleados en la construcción puede ser del orden de un 20% del total registrado en una habitación y que su contribución puede ser del orden de 5 a 20 Bq/m³ ⁴.

3. Movilidad del radón

En cuanto al movimiento del gas radón a través del terreno o a través de los materiales se contemplan dos procesos:

- *Movimiento por difusión.* Por difusión se entiende la migración de un soluto desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. Es decir, el flujo de radón por difusión depende de la diferencia de concentraciones del gas que exista entre un espacio y otro, por ejemplo, entre los poros del

terreno y el interior de un edificio. Se puede modelizar por medio de la Ley de Fick.

- *Movimiento por convección.* Por otro lado, están los procesos convectivos (advectivos), determinantes en la entrada de radón en los edificios. El flujo convectivo se establece por una diferencia de presión entre la existente en el sustrato donde se encuentra el radón y la que existe en la atmósfera o en el interior del edificio. Este proceso depende de la permeabilidad del medio y del gradiente de presión y se modeliza mediante la Ley de Darcy.

Por otro lado, la concentración del gas en el aire dependerá también de las condiciones meteorológicas:

- *El viento.* Las infiltraciones de aire producidas por el viento pueden modificar las concentraciones de radón mientras que por otro lado, las velocidades de viento se asocian a cambios de presión que modifican el flujo convectivo.
- *La presión atmosférica.* Las modificaciones de las presiones atmosféricas afectan de distinta manera al espacio intersticial de los poros del terreno que al espacio aéreo en las proximidades de su superficie, por lo que se produce un cambio en el gradiente de presión que modifica el flujo convectivo que se traduce en una mayor exhalación de radón en periodos de bajas presiones.
- *La altura con respecto al suelo.* Dado que se trata de un gas más pesado que el aire (aproximadamente ocho veces más) la probabilidad de encontrar altas concentraciones a altura elevada sobre el terreno es baja.
- *La temperatura* afecta a los movimientos convectivos del aire como medio de transporte del radón. Durante el día, las concentraciones del gas a nivel de suelo son menores, debido a la dispersión vertical producida por el calentamiento de la atmósfera, mientras que por las noches, debido a una mayor estabilidad atmosférica, se produce un incremento.

En interiores, se puede producir el llamado efecto *stack* por el cual, el aire caliente, por expansión,

³ Chen, C.-J.; Weng, P.-S., y Chu, T.-C. "Radon exhalation rate from various building materials". *Health Phys.* 64:613-619. 1993.

⁴ G.-A. Roserens; H.-U. Johner; G. Piller, y P. Imbaumgarten. *Swiss Radon handbook*. Swiss Federal Office of Public Health. Berna, 2000. Suiza.

tiende a *fugarse* del edificio generando una ligera depresión que puede aumentar el flujo de radón hacia el interior.

- *La humedad ambiental y las lluvias.* En terrenos saturados, los poros se colmatan y el radón se disuelve en el agua desplazándose con ella por corrientes subterráneas dificultando la exhalación a la superficie.

Por tanto, y resumiendo, la concentración de radón en el aire dependerá de:

- La capacidad que tenga el gas de escapar de la estructura de la roca (*emanación*).
- La porosidad y humedad que presente el terreno para que el radón pueda alcanzar la superficie (*exhalación*).
- Las condiciones meteorológicas en la proximidad de la superficie que modifiquen el flujo por diferencias de presión, saturación de poros, ventilaciones, etc.

4. Penetración y acumulación del radón en espacios habitados

El gas radón proveniente del subsuelo, generado por la desintegración del radio, exhala a la atmósfera y se mezcla con el resto de gases, disminuyendo así su concentración sin que alcance niveles importantes.

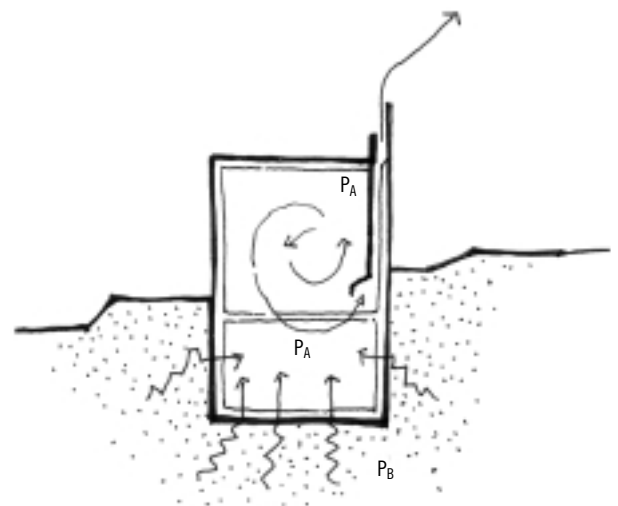
Ahora bien, si existiese una edificación sobre el terreno, y debido a la diferencia de presión que se establece entre los poros del terreno y el espacio cerrado de la edificación (normalmente alta debido a ventilaciones o ausencia de las mismas), se establecería un flujo desde el terreno hacia el interior de la edificación.

Por su condición de gas, su movilidad es alta entre los poros de los materiales normalmente usados en la edificación y penetra fácilmente en el interior de la vivienda, atravesando los forjados, soleras o muros o introduciéndose a través de grietas o fisuras. La acumulación de radón en el interior de los edificios eleva las concentraciones y por tanto el riesgo para la salud de sus habitantes.

Debido a las ventilaciones de los edificios, a las evacuaciones de aire viciado de cuartos húmedos, a las chimeneas, y a las filtraciones por ventanas y puertas, unido todo ello a las variaciones atmosféricas, es normal que exista una pequeña depresión en el interior de los edificios en comparación con la que existe en el terreno donde se está generando radón de forma continua.

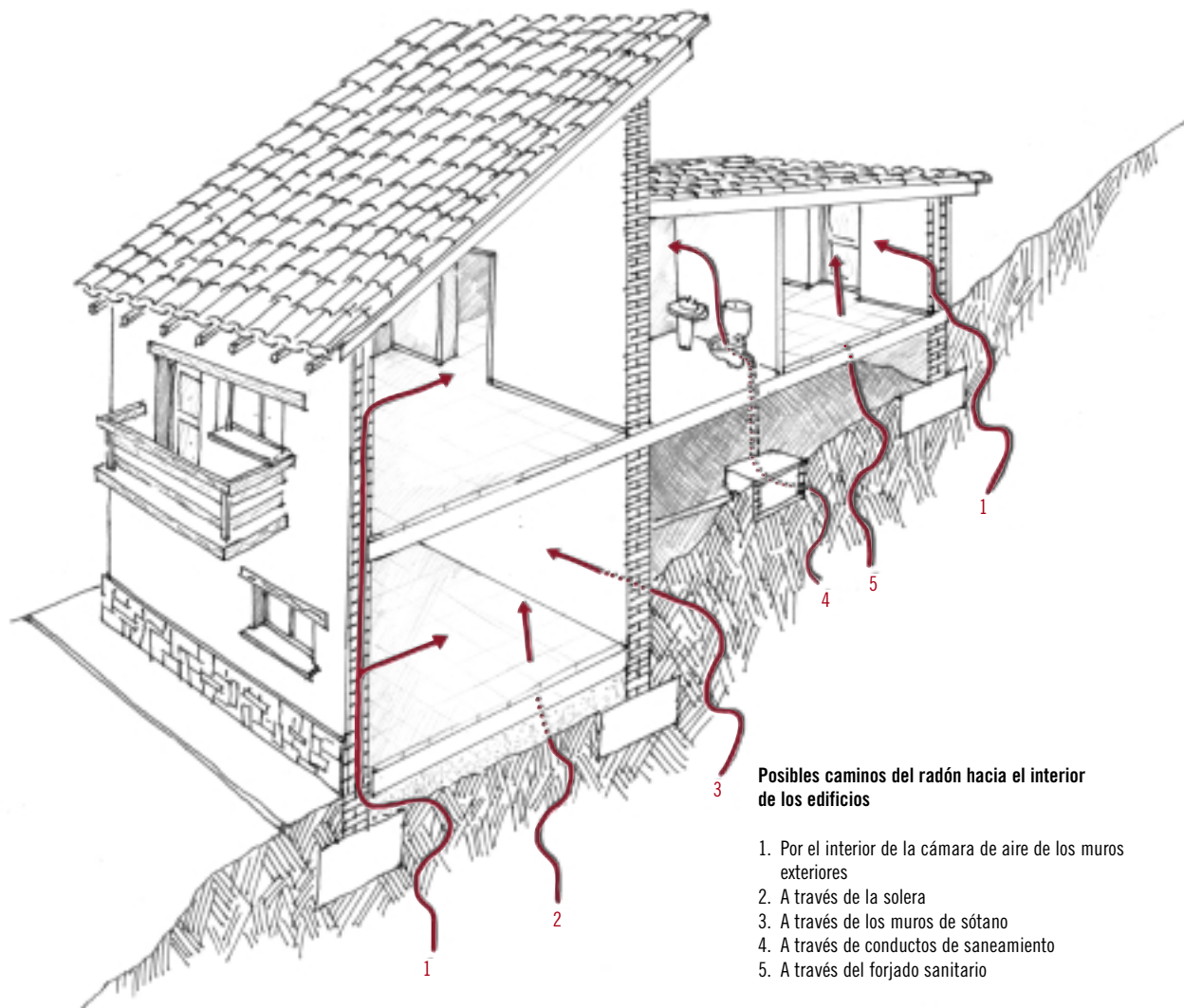
A medida que ha ido evolucionando la construcción, primando conceptos de ahorro energético, los edificios se han ido haciendo cada vez más estancos y con menores filtraciones. Ello ha provocado un incremento en los niveles de radón en el interior por la escasa ventilación. Incluso, usando sistemas de extracción de aire viciado como los que recomienda el actual Código Técnico de la Edificación, si no se disponen holgadas aberturas de inmisión, puede ocurrir el fenómeno de depresión interior que favorezca la entrada de radón.

Figura 1.2. El flujo de radón hacia el interior, debido a procesos convectivos, se establece cuando el gradiente de presiones es positivo ($P_B > P_A$)



En la figura 1.3 se reflejan algunas de las vías de penetración más frecuentes.

Figura 1.3. Vías comunes de entrada de radón. Puntos débiles



1. Cámaras de aire de muros

Ésta es una vía frecuente por donde el radón, tras penetrar en ellas, podrá moverse con absoluta libertad e incluso viajar por estas cámaras hasta pisos altos.

2. Soleras en sótanos

Las soleras suelen realizarse con hormigón armado o en masa, con juntas de dilatación situadas por tramos de superficie, y con juntas en los encuentros con paramentos verticales, permitiendo de esta manera, que puedan producirse movimientos diferenciales entre

elementos constructivos distintos sin que se presenten patologías por rotura de sistemas. Estas juntas, necesarias en un proceso constructivo, constituyen caminos del gas hacia el interior. También lo constituyen las fisuras de la propia solera e incluso el hormigón mismo (el gas es capaz de atravesar los poros de materiales hasta un determinado espesor definido por la longitud de difusión del material).

3. Muros de sótano

Los muros de los sótanos de viviendas enterradas o semienterradas pueden ser traspasados por el gas del te-

rreno. Ocurrirá lo mismo que con las soleras. Son sistemas que están en contacto directo con el terreno y se deberán proteger de la misma manera.

4. Conductos de saneamiento

En muchas ocasiones, los conductos verticales de saneamiento conectan los aseos, baños y cocinas, con las arquetas de la red horizontal de distribución situada normalmente bajo la solera o el piso de sótano.

Las arquetas no son elementos suficientemente estancos por lo que el gas penetrará en ellas y a través de las bajantes podrá ascender hasta los cuartos húmedos si el sifón perdiese efectividad.

Normalmente las concentraciones altas de radón se encuentran en las plantas bajas que están más cerca del terreno. No obstante se han registrado valores elevados en plantas altas. Este fenómeno puede justificarse, entre otras razones, por los conductos de saneamiento que están en contacto con las arquetas enterradas en el terreno y que a través de ellos asciende el gas hasta plantas más alejadas.

5. Forjados sanitarios

El gas proveniente del terreno podrá acumularse en la cámara de aire bajo el forjado sanitario y si ésta no está ventilada, podrá traspasar el forjado y penetrar en la vivienda.

APROXIMACIÓN A UNA PROPUESTA NORMATIVA
EN ESPAÑA PARA VIVIENDAS NUEVAS



2

1. La salubridad en el Código Técnico de Edificación

Anteriormente a lo que hoy conocemos como Código Técnico de la Edificación (CTE), la normativa del sector estaba dispersa en un conjunto de normas básicas de la edificación y otras normas de distinta índole, que pretendían garantizar el proceso constructivo, la seguridad y la habitabilidad de los edificios. Parte de esta normativa quedaba obsoleta en el avance de la técnica y, fundamentalmente, de las nuevas necesidades sociales. Se vio oportuno por tanto, aprovechando la Ley de Ordenación de la Edificación (Ley 38/1999), realizar una unificación normativa que sirviera como referente de los agentes participantes en el proceso constructivo.

El Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE). En el primer artículo del texto de la primera parte se establece el objeto del mismo:

Artículo 1. Objeto

1. *El Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE, es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la disposición adicional segunda de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, en adelante LOE.*

En el artículo 2 se establece el ámbito de aplicación, siendo obligatorio para todo tipo de edificación, pública o privada, de nueva planta o de rehabilitación.

En el artículo 13, en el primer requisito básico de habitabilidad, se establecen las exigencias básicas de salubridad:

13.3. Exigencia básica HS 3: Calidad del aire interior

1. *Los edificios dispondrán de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificios, de forma que se aporte un caudal suficiente*

de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes.

2. *Para limitar el riesgo de contaminación del aire interior de los edificios y del entorno exterior en fachadas y patios, la evacuación de productos de combustión de las instalaciones térmicas se producirá, con carácter general, por la cubierta del edificio, con independencia del tipo de combustible y del aparato que se utilice, de acuerdo con la reglamentación específica sobre instalaciones térmicas.*

Según esta exigencia, los contaminantes contemplados proceden del hábitat interior sin tener en cuenta la inmisión de agentes externos. Dentro de estos agentes externos, que pueden proceder de la contaminación del aire exterior o provenir de aguas de suministro, nos encontramos con el gas radón que principalmente proviene del terreno de asiento del edificio.

Falta por el momento, que se introduzcan en el CTE, provisiones normativas que contemplen la exigencia de prevención frente a la inmisión de gas radón.

2. Recomendaciones de niveles de concentración de radón

Con el objetivo de introducir un apartado referente a la protección frente a gas radón en dicho Código, se podría expresar la exigencia de la siguiente manera:

El diseño, la construcción, y en su caso la rehabilitación del edificio, se llevará a cabo de manera que se asegure que los ocupantes no estén expuestos a concentraciones de radón que pudieran implicar un riesgo para la salud.

Como referencia, los niveles de concentración de gas radón recomendados serían los contemplados en la Recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom), en la que se establecen dos niveles:

- 200 Bq/m³ como *nivel de diseño* (objetivo a cumplir) para edificios de nueva construcción. Se recomienda

tomar las medidas necesarias, para que, aplicadas al diseño del edificio y una vez construido éste, los niveles de radón no superen dicho valor.

- 400 Bq/m³ como *nivel de actuación* en edificios existentes. Si los niveles de concentración medidos en un edificio existente superan este valor, se recomienda introducir medidas correctoras con el fin de reducir la concentración.

3. La actuación en la edificación

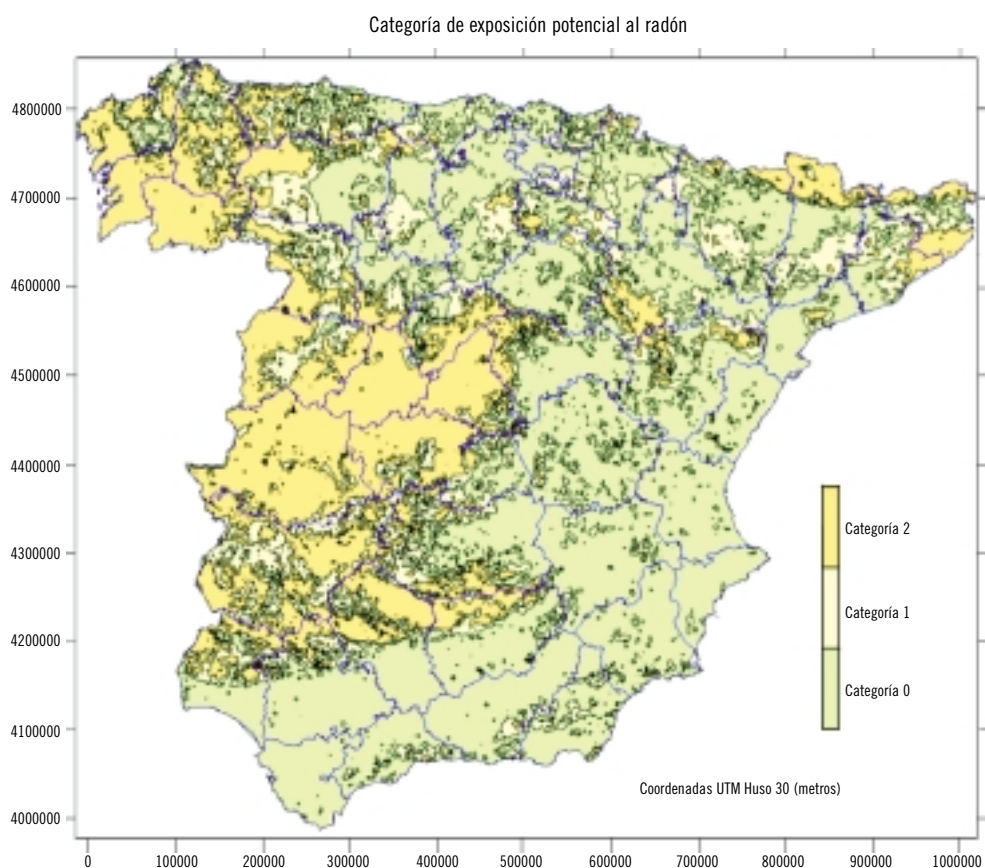
Dar cumplimiento a una exigencia del CTE, como podría ser la expresada en el punto anterior, implica se-

guir un procedimiento de evaluación del riesgo que conlleve una serie de intervenciones en los edificios en función de su tipología constructiva y del nivel de radón al que podrían estar expuestos.

Existe un mapa peninsular de categorías de exposición potencial al radón en los edificios elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear. Este mapa deriva del mapa de radiación gamma natural, Marna, y establece tres niveles de exposición potencial asociados a la naturaleza del terreno.

Donde: categoría 0 (riesgo bajo), categoría 1 (riesgo medio) y categoría 2 (riesgo alto).

Figura 2.1. Mapa de categorías de exposición potencial al radón en el interior de edificaciones. Consejo de Seguridad Nuclear



No obstante, la responsabilidad de la decisión de edificar en un determinado lugar conlleva el tomar determinadas prevenciones respecto a la posible existencia real de radón en el solar, mediante mediciones *in situ*. Se trataría de establecer un procedimiento de medidas de concentración en el interior del terreno que, junto con datos de la permeabilidad, sirvieran de referencia para poder tomar la decisión sobre el tipo de solución constructiva adecuada desde el comienzo del proyecto arquitectónico.

A través de medidas de radón y permeabilidad en el terreno, se podrían establecer tres categorías de exposición potencial al radón en los mismos términos que los que presenta el mapa de categorías de exposición potencial de radón.

Para ello, y a modo de ejemplo, puede ser útil el criterio de clasificación del terreno que ha desarrollado la Republica Checa y que se muestra en la tabla siguiente¹:

Tabla 2.1. La tabla muestra la exposición potencial al radón en un solar concreto a partir de los datos de concentraciones de radón en profundidad y permeabilidad del terreno

Exposición potencial al radón	Concentración de ²²² Rn Bq/m ³ (en terreno)		
	Permeabilidad (*) baja	Permeabilidad (*) media	Permeabilidad (*) alta
Baja	<30.000	<20.000	<10.000
Media	30.000 –100.000	20.000-70.000	10.000-30.000
Alta	>100.000	>70.000	>30.000

Donde:

(*) Permeabilidad intrínseca del terreno:

Permeabilidad baja: $< 4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Permeabilidad media: $4 \cdot 10^{-13} - 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

Permeabilidad alta: $> 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

A nivel normativo, dentro del ámbito del CTE, se podría pensar en un diagrama de toma de decisiones que partiera de una categoría de riesgo, entendida como una exposición potencial al radón, determinada siempre por medidas realizadas *in situ*, tanto para la con-

centración de radón en terreno como para la permeabilidad del mismo, y de esta manera obtener un nivel de exposición al radón propio del solar de construcción.

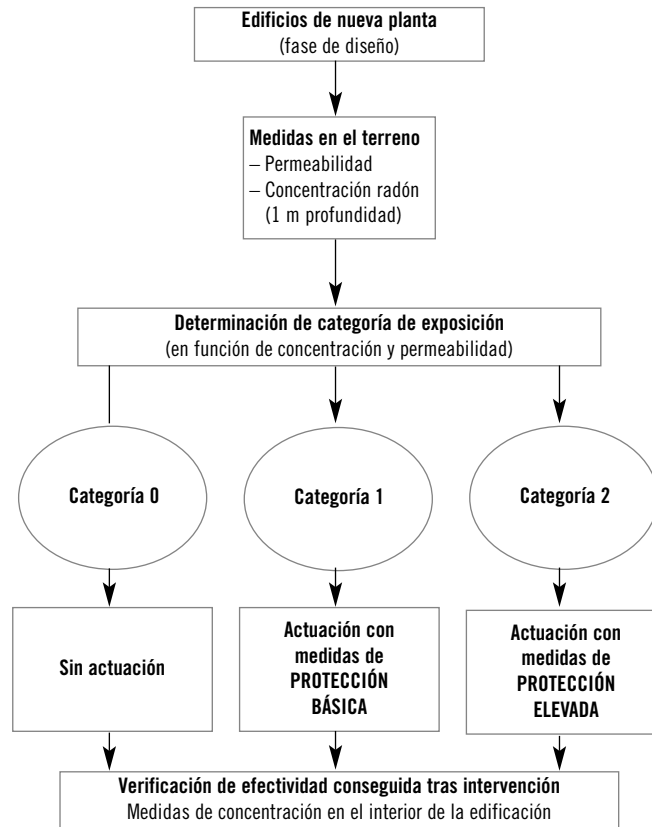
Este tipo de medidas podrían englobarse dentro del estudio previo del terreno (estudios geotécnicos, estudios topográficos, etc.), constituyendo parte de la documentación preparatoria de un proyecto arquitectónico.

En este sentido, y tras el conocimiento adquirido en estos últimos años, tanto en el registro de concentraciones *in situ*, como en la aplicación de soluciones constructivas para frenar la inmisión de radón, se podría plantear el diagrama de actuación de la figura 2.2.

Este diagrama conduce a la elección de una medida de protección adecuada a la categoría de exposición al radón propia del solar de construcción.

¹ Neznal M. *et al.* (2004): The new method for assessing the radon risk of building sites. *Czech. Geol. Survey Special Papers*, 47 pp., CGS Prague.

Figura 2.2. Actuaciones de protección derivadas de la categoría de exposición potencial al radón determinada para el solar de construcción



4. Posibles medidas de protección en función de la categoría de exposición al radón

Las medidas de protección frente a la inmisión de gas radón, que están siendo actualmente usadas en diferentes países, tratan de frenar la entrada de radón mediante la aplicación de diferentes técnicas constructivas.

La gran mayoría de estas técnicas basan su funcionamiento en dos estrategias de actuación diferentes, que pueden ser ejecutadas de forma conjunta para conseguir mayor eficacia.

Sistemas de barreras antiradón:

Estrategias de estanquidad frente al gas mediante la aplicación de barreras impermeables al radón en los elementos constructivos que conforman la envolvente del edificio y que están en contacto con el terreno.

Sistemas de extracción o presurización:

Estos sistemas basan su funcionamiento en la extracción del gas del terreno circundante a la edificación, y evacuarlo a la atmósfera para impedir que penetre en el edificio, o bien invertir el sistema e impulsar aire bajo la vivienda creando un bulbo de sobrepresión que desvíe el flujo del gas. La figura muestra un ejemplo del sistema de extracción.

A raíz de los resultados obtenidos de la aplicación de las distintas técnicas de protección en viviendas con presencia de radón, se ha podido estudiar la efectividad de las mismas en relación a su capacidad para atenuar la entrada de radón, y de esta manera, poder aconsejar unas medidas de actuación u otras, en función de la categoría de exposición al radón del terreno de que se trate.

En este sentido, algunas entidades como el BRE (Building Research Establishment) en el Reino Unido, o el Centro Científico y Técnico de la Construcción (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, CSTB) en Francia, entre otras, han publicado documentos en los que se muestran cuadros comparativos de efectividades para clasificar las distintas soluciones de protección.

No obstante, la eficacia de las técnicas no puede ser garantizada en todos los casos, ya que la singularidad de cada edificio en cuanto a tipología constructiva, geometría, volumetría, o los materiales empleados, requiere que se realicen estudios pormenorizados enfocados al ajuste de los parámetros fundamentales de

cada técnica. Dada la gran cantidad de soluciones posibles en el diseño de un edificio, deberá ser el proyectista el que integre la solución de protección frente a radón en el diseño general del edificio, y el que adapte o adecue los distintos parámetros de la misma para que la efectividad alcance el objetivo de diseño.

A continuación, se muestra un repertorio de técnicas posibles para cada categoría de exposición al radón según la aplicación del diagrama de la figura 2.2. Las técnicas mostradas deben ser entendidas como principios básicos o líneas generales de actuación, que requerirán ser estudiadas y ajustadas para cada caso particular.

Figura 2.3. Esquema gráfico de un sistema de barrera colocado bajo la solera y por el exterior del muro de contención de sótano de una vivienda

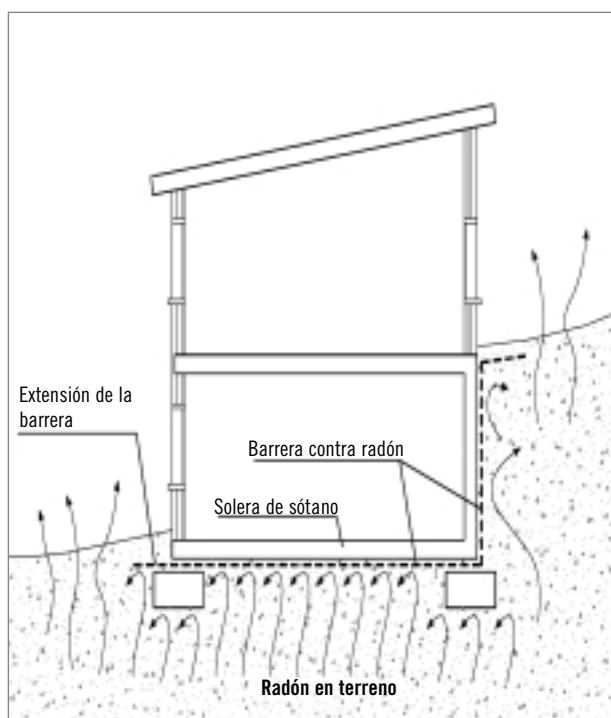
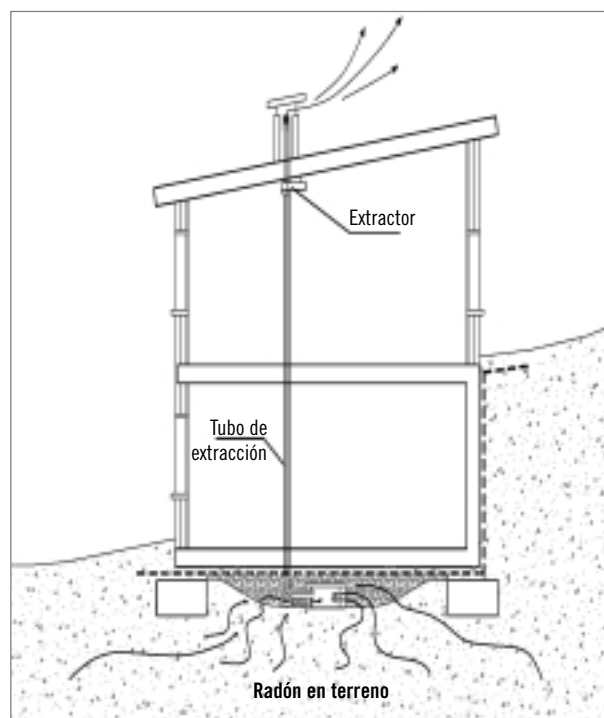


Figura 2.4. Esquema gráfico de un sistema de extracción por arqueta captadora bajo solera



Categoría 0: sin actuación

La categoría 0 comprende zonas de baja exhalación de radón, bien por la escasa actividad de radón en el terreno, bien por una baja permeabilidad del mismo o bien por la combinación de ambas. Cuando, tras la aplicación del cuadro de categorías de exposición (tabla 2.1), en el que se deben tener los datos de permeabilidad y concentración de radón en terreno, se obtenga esta clasificación, se entiende que la cantidad de radón que alcanza la superficie es baja y que por tanto no es necesario prever técnicas de protección en el proyecto arquitectónico.

Categoría 1: protección básica

En esta categoría, la exhalación de radón es superior y se aconseja la incorporación en el proyecto de

alguna de las técnicas que han demostrado una protección básica.

La experiencia en el estudio de efectividades permite situar algunas medidas de protección como posibles soluciones para esta categoría. No obstante, y como se ha dicho anteriormente, el grado alcanzado en la efectividad de la medida dependerá de varios factores que se deberán tener en cuenta a la hora de ajustar la solución y realizar un diseño detallado de la misma. Algunos de los aspectos a considerar son la superficie de planta a proteger, la tipología constructiva en cuanto a geometría, volumetría y estructura, los materiales de construcción empleados, etc.

A continuación se muestran algunas de las medidas habitualmente usadas para esta categoría, normalmente sistemas pasivos en los que no se requiere un aporte extra de energía tras su instalación:

Figura 2.5. Fotografía del proceso de ejecución de un sistema de barrera colocado en el basamento de una edificación en construcción (The Radon Barrier Company Ltd. Irlanda)



a) Sistemas de barreras antiradón

La función de estas barreras es evitar que el gas radón, procedente del terreno, penetre al interior de las edificaciones. Por tal motivo se deben colocar en todo muro, forjado o solera que esté en contacto con el terreno y deben cubrir la totalidad del área de contacto.

La forma de aplicación y sellados dependen del material empleado. Deberán seguirse las pautas del suministrador en cuanto a la puesta en obra, para evitar fisuras o puntos de fuga en las uniones de la membrana y conseguir la estanquidad necesaria que asegure la eficacia.

La situación de la membrana puede ser por la cara exterior del elemento a proteger, solera o muro, o por la cara interior. Si bien en ambos casos la membrana funcionará correctamente como barrera contra el paso del radón, si la colocamos por la cara exterior del elemento la podremos usar a su vez como barrera impermeabilizante. En cualquier caso, la membrana debe protegerse mediante interposición de capas separadoras (antipunzonantes) para evitar fisuras.

En el apartado 5 se detallan aspectos que deben considerarse para conseguir una correcta aplicación del sistema.

Figura 2.6. Esquema sobre la situación de la barrera, sobre la cara interior o por la cara exterior, en una solera de sótano

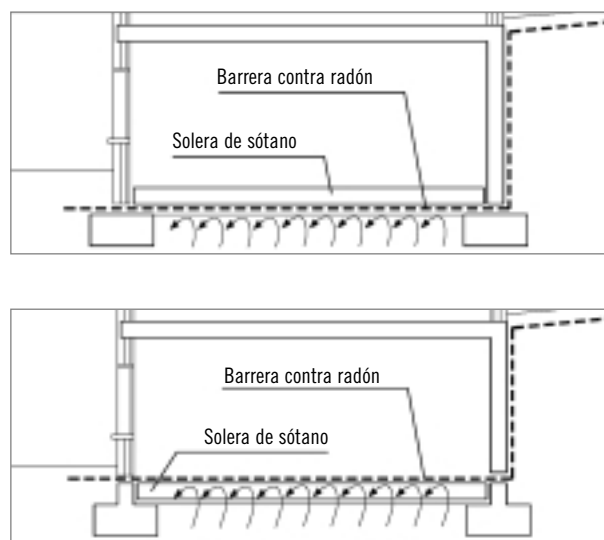
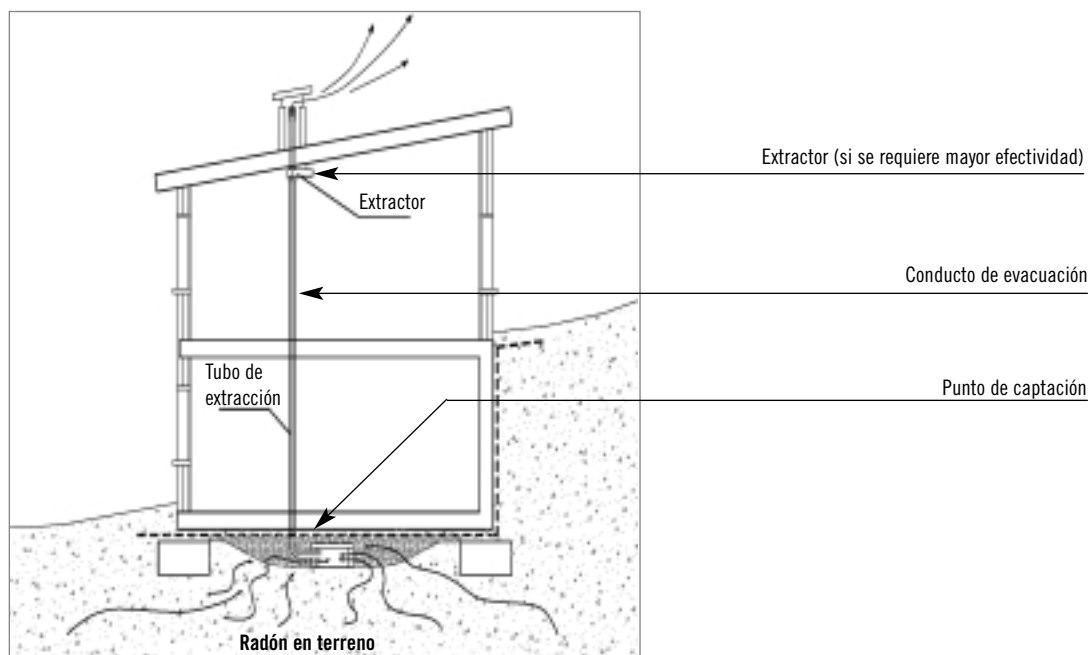


Figura 2.7. Esquema de elementos que componen un sistema de extracción



b) Sistemas de extracción natural

Estos sistemas se basan en extraer el aire con contenido de radón que se encuentra en el terreno sobre el que se apoya la vivienda, y expulsarlo al exterior, evitando en parte, que pasen al interior de los edificios.

Para la extracción es necesario un punto de captación de radón en el terreno conectado a un conducto de evacuación hacia el exterior que funciona por tiro natural. En este tipo de medidas, la evacuación del radón hacia el exterior se produce por procesos naturales debido al gradiente de presiones que se establece entre los poros del terreno y la atmósfera, sin embargo, el sistema permite la incorporación de un extractor mecánico que fuerce el tiro de expulsión y así, conseguir efectividades superiores de reducción de radón. En ese caso, el sistema pasaría a formar parte de las soluciones de protección elevada.

En este tipo de soluciones, la permeabilidad del terreno jugará un papel fundamental en el funcionamiento. Para conseguir mejores efectividades esta debe ser alta para que el radón pueda desplazarse entre los poros del terreno y alcanzar el punto de captación. Si el terreno no presentase esta cualidad, puede remediarse realizando un relleno con grava bajo el piso de asiento del edificio.

Los elementos fundamentales que conforman este sistema son:

Punto de captación

Un punto de captación no es más que un espacio ubicado bajo la vivienda y que por su configuración permite el paso de gases del terreno a su interior. A él acomete un tubo de extracción por el que se evacuarán los gases al exterior.

Pueden ser puntos de captación arquetas permeables enterradas bajo la vivienda que permitan el paso de radón a su interior; cámaras de forjado sanitario a la que acomete el tubo de expulsión, o simplemente una excavación libre bajo la solera de sótano en donde se inserta el tubo.

Conducto de evacuación

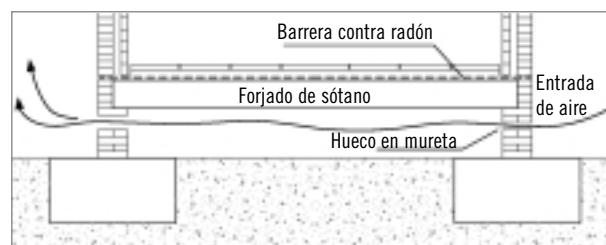
El conducto de evacuación se encarga de conducir los gases desde la captación hasta el exterior del edificio. Lo comúnmente usado para estos propósitos es una tubería plástica de diámetro comprendido entre 110-125 mm, aunque éste puede variar en función del cálculo de necesidades para la cantidad de radón detectada, la permeabilidad del terreno, y los puntos de captación a cubrir.

Lo más efectivo suele ser conducir el tubo de extracción en vertical hasta la cubierta porque de esta manera se incrementa el tiro natural por diferencia de presiones debido a la altura, pero puede hacerse horizontal hasta el exterior de la vivienda atravesando los muros. Esta opción será válida siempre y cuando se produzca un tiro natural.

Esta última opción es adecuada para edificios contruidos con cámara de aire bajo forjado sanitario ya que practicando perforaciones en los muretes del mismo se puede inducir una corriente de ventilación que elimine el radón acumulado. Esta práctica constructiva posee la ventaja de proteger el edificio contra la humedad y contra el radón (ver figura 2.8).

Esta solución aparece referenciada en las Normas do Hábitat Galego² como sistema de protección frente a radón en viviendas de nueva ejecución, dentro del territorio gallego.

Figura 2.8. Ventilación de cámara de forjado sanitario



² Consellería de Vivenda e Solo, Galicia 2008. Decreto 262/2007, de 20 de diciembre por el que aprueban las Normas do Hábitat Galego. DOGA nº 12, 17 de enero de 2008, p. 1.110-1.150.

Todos estos sistemas de extracción pueden mejorarse en cuanto a la efectividad, incorporando un extractor mecánico que fuerce el tiro para conseguir evacuar mayor cantidad de radón. De esta manera el sistema consigue una protección elevada y es considerado apto para su aplicación en la categoría 2 de exposición al radón.

El uso de este tipo de soluciones está cada vez más extendido ya que posee la ventaja de aumentar su capacidad de reducción de radón instalando un extractor. Resulta útil en casos en los que, al verificar la concentración de radón en el edificio construido con un sistema de extracción natural, las concentraciones resultantes no fueran las esperadas.

En el apartado 5 se detallan más aspectos sobre estos sistemas y sus posibles variantes.

Categoría 2: protección elevada

En esta categoría, la exhalación de radón es la más alta, y por tanto se aconsejan soluciones de alta efectividad.

Las soluciones que suelen emplearse para esta categoría suelen ser del tipo de extracción o presurización, en las que se hace uso de extractores mecánicos. Para conseguir mayor efectividad se suelen complementar con sistemas de barreras antiradón.

Por el uso de aparatos eléctricos, estas soluciones requieren aporte de energía para su puesta en marcha y un mantenimiento para su correcto funcionamiento.

Este aspecto resulta de suma importancia, ya que si se confía a un extractor la evacuación del radón, y éste dejase de funcionar, las concentraciones se elevarían y no serían detectables hasta que se realizasen nuevos registros de radón. El riesgo en este caso sería muy

elevado al tratarse de zonas de categoría máxima de exposición al radón. Para evitar problemas es recomendable el uso de alarmas de aviso en caso de fallo del extractor o de suministro de energía.

Los sistemas que se muestran a continuación son habituales para aplicaciones de protección elevada:

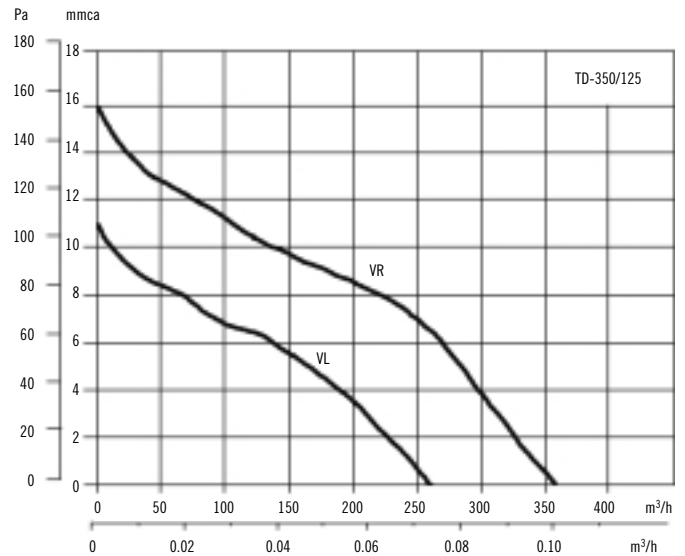
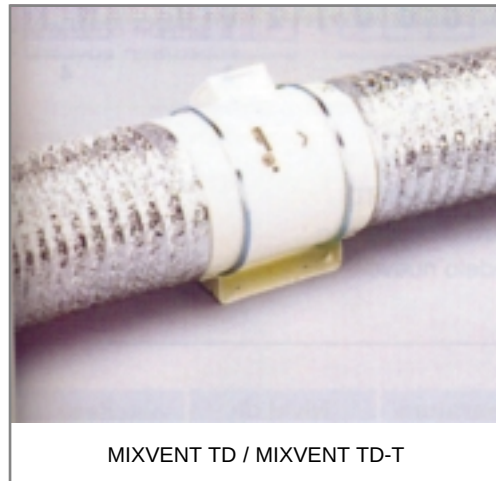
a) Sistemas de extracción forzada

El funcionamiento es el mismo que el descrito para la categoría 1, con la salvedad de la incorporación de un extractor para forzar el tiro de evacuación. La succión que genera, en el punto de captación, es mayor y constante, y el radón es evacuado a la atmósfera en mayor cantidad que en una extracción de tiro natural.

Las potencias de extractores suelen estar comprendidas en el rango de 50-100 W para un radio de cobertura de terreno de 15 m desde el punto de captación, aunque pueden aumentarse para conseguir abarcar mayor cantidad de terreno y así, ajustarse a la superficie de planta de edificio que se necesite proteger. No obstante, estas precisiones se deben realizar para cada caso concreto considerando los siguientes aspectos:

- Permeabilidad del terreno. Es posible que para casos de permeabilidad baja, se necesiten potencias de extracción superiores para captar el radón del terreno.
- Concentración de radón en terreno. Cuanta más concentración se detecte, mayor será la potencia requerida.
- Puntos de captación. Si se instalan varios puntos de captación bajo la vivienda, es recomendable elevar la potencia hasta dar cobertura a todos ellos. Lo mismo ocurre para casos en los que se desee cubrir mayor superficie de terreno.

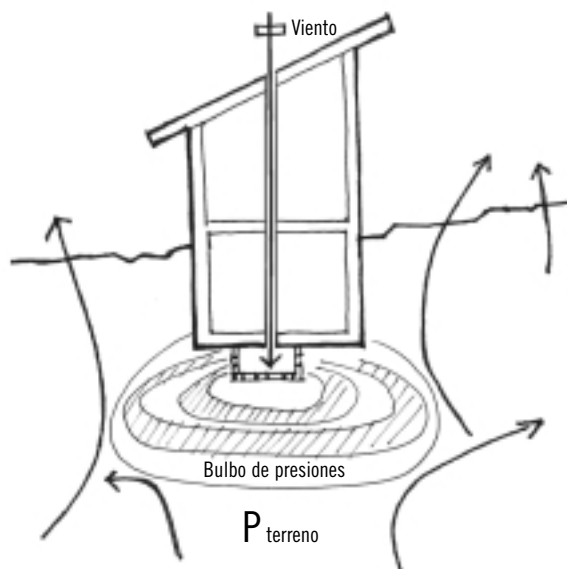
Figura 2.9. Ejemplo de extractor helico-centrífugo colocado en el conducto de evacuación. El gráfico muestra las curvas de presión generadas en función del caudal para un modelo con 56 W de potencia



b) Sistemas de presurización

Este tipo de soluciones basan su funcionamiento en invertir el flujo de aire del extractor para insuflarlo en el punto de captación. De esta manera lo que se crea en la arqueta no es una depresión que capte el gas

Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de un sistema de presurización



del terreno y lo expulse fuera, sino un bulbo de presiones positivas a su alrededor que obliga al gas a recorrer otros caminos para alcanzar la atmósfera.

c) Sistemas de ventilación de cámara de forjado sanitario

Desde un punto de vista arquitectónico, en ocasiones se prefiere realizar un forjado sanitario (forjado de planta baja elevado sobre el terreno) en lugar de apoyar una solera de hormigón directamente sobre el terreno con el fin de solucionar, entre otras cosas, problemas de infiltración de humedad.

Esta cámara de aire funciona como un espacio de captación de radón, que puede ventilarse a través de los muretes de apoyo, para evacuar el gas hacia el exterior. Para casos de categoría 2 de exposición al radón, es recomendable procurar una ventilación forzada de este espacio, permitiendo la entrada de aire nuevo desde los muretes opuestos al de extracción.

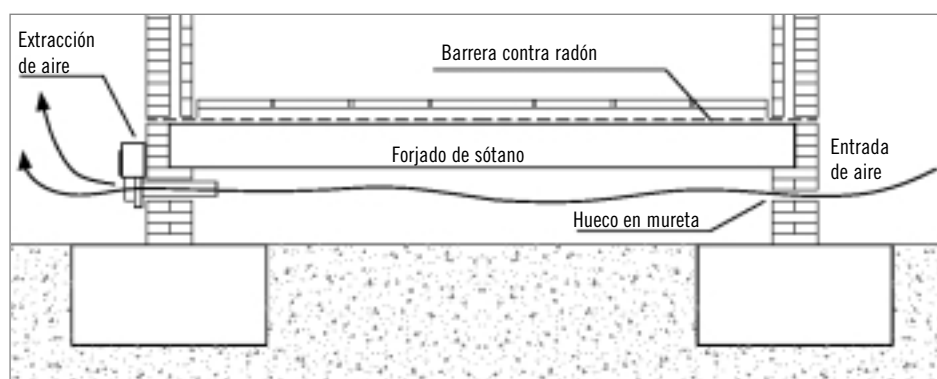
d) Complemento a los sistemas de extracción forzada con barreras antiradón

Se trata de usar conjuntamente los sistemas de extracción forzada con los sistemas de barreras frente a

radón en los elementos de cerramiento que estén en contacto con el terreno. De esta manera se consigue

una protección extra aconsejada para situaciones de alta concentración de radón.

Figura 2.11. Ventilación forzada de la cámara de forjado sanitario



5. Consideraciones particulares sobre la ejecución y diseño de las soluciones de protección. Tratamiento de puntos conflictivos

Como se desprende de las investigaciones, la efectividad de los sistemas que se han mostrado depende enormemente de la buena ejecución de los mismos y de una serie de particularidades que se han de tener en cuenta.

5.1. Tipos de barreras antiradón y materiales empleados

La característica fundamental que deben cumplir las barreras es ser impermeables frente al paso del radón. Esto es relativamente fácil de conseguir con diferentes materiales, ya que dependerá básicamente del espesor del mismo para un material dado. Pero es más complicado conseguir esta estanquidad cuando sometemos a la barrera a diferentes procesos de puesta en obra y a futuros movimientos diferenciales de las estructuras soporte.

La lámina, cuando se coloca sobre el terreno, deberá soportar el peso de la losa de solera y no punzonarse con las irregularidades de la misma y del propio terreno. Por otro lado, cuando se coloca encima de la

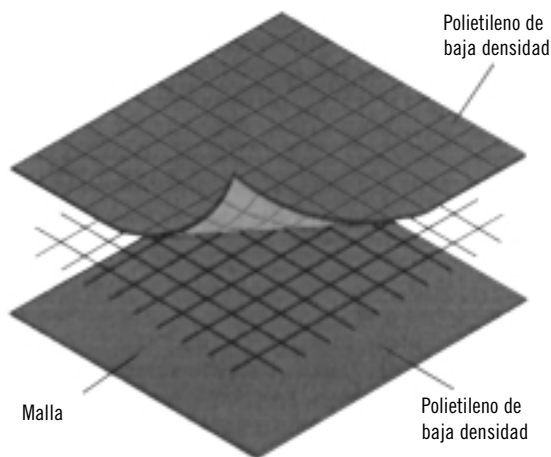
solera también deberá resistir el peso del solado y no punzonarse con la capa superior de la solera. También deben ser resistentes al paso de personal de la obra durante su colocación y durante el proceso constructivo de las fases siguientes, solado, vertido de morteros, etc.

Aparte de la impermeabilidad, se les exigirá altas resistencias al punzonamiento, al desgarró, y a la tracción, para evitar fisuras durante la ejecución y la vida útil de la membrana. La elongación también es importante para absorber dilataciones del soporte y no fisurarse. Por otro lado, es frecuente el uso de fieltros separadores para desligar la membrana barrera del soporte donde esté instalada y absorber las irregularidades.

Normalmente estas características se consiguen mediante la adición de capas a la membrana y el aumento del grosor de la misma. Las mallas incorporadas a las láminas aumentan las resistencias mecánicas, mientras que las láminas de aluminio incorporadas entre las capas de la membrana le confieren mayor resistencia al paso de radón.

Los materiales empleados son diversos. A continuación figuran algunos ejemplos usados actualmente en otros países:

Figura 2.12. Ejemplo de una membrana multicapa de la empresa Monarflex. Reino Unido



Láminas de polietileno:

Este material es adecuado por ser completamente barrera de vapor y evitar por tanto el paso del aire. Aún así, cuando se emplea polietileno de baja densidad, aparecen diversas capas de refuerzo, como mallas de poliéster, fibra de vidrio o polietileno de alta densidad.

- Láminas de polietileno de baja densidad reforzadas con malla de poliéster y lámina de aluminio.
- Láminas de polietileno de baja densidad con incorporación de malla de polietileno de alta densidad.
- Lámina de polietileno de baja densidad aditivada con flexibilizantes.

Láminas bituminosas:

Este tipo de lámina cumple con la resistencia al paso del gas, pero son muy dúctiles y sus resistencias mecánicas son escasas. Es común encontrarlas con refuerzos de mallas.

Láminas de cauchos:

Se encuentran cauchos reforzados con láminas de aluminio. Estos sistemas son muy flexibles y duraderos, aunque suponen un mayor coste económico.

Láminas de PVC:

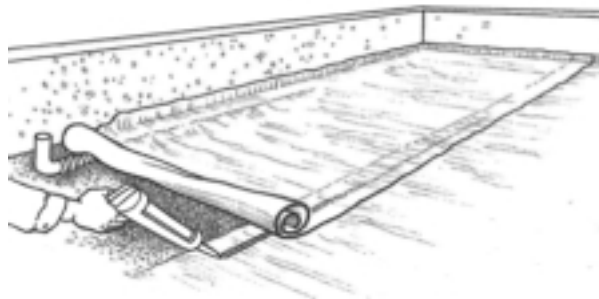
El problema fundamental del PVC radica en su rigidez. Para conseguir mayor flexibilidad se introducen plastificantes como aditivos en su masa polimérica. Estos plastificantes tienden, con el paso del tiempo, a escapar de la cadena polimérica y por tanto a rigidizar la membrana que podrá partirse o fisurarse.

Sistemas líquidos:

Estos sistemas se conforman por aplicación en líquido, que al catalizar, configuran una membrana continua con ausencia de solapes como ocurre en el resto de láminas comercializadas en rollo. Ello supone una ventaja al eliminar el punto conflictivo que implica el sellado de dos bandas consecutivas. Se pueden encontrar sistemas en base a poliuretanos, acrílicos, etc., muy similares a los usados para impermeabilizar frente al agua. En algunas ocasiones, la aplicación se realiza con la incorporación de algún tipo de malla de refuerzo para aumentar las resistencias mecánicas.

En cuanto a la forma de aplicación, se encuentran sistemas que hacen uso de rodillo y brocha, y sistemas que requieren una máquina para proyectar el material sobre la superficie a tratar, lo que facilita la tarea para grandes superficies.

Figura 2.13. Tratamiento de solapes con adhesivos³



³ EPA (Environmental Protection Agency). *Building Radon Out*. USA 2001.

5.2. Sobre la ejecución de la barrera

Hay que prestar especial atención a las uniones entre láminas y realizar correctamente, y según las especificaciones del fabricante, los solapes entre bandas.

Se debe conseguir una estanquidad total en todo elemento que esté en contacto con el terreno. Para ello es preciso prolongar la barrera hasta sobrepasar los muros de cerramiento teniendo en cuenta que se deben mantener las juntas de dilatación. Éstas se resuelven con mecanismos similares a los usados en láminas impermeabilizantes.

Si durante la puesta en obra se produjese algún daño en la lámina, se remachará con fragmentos de lámina.

El apoyo de la lámina debe ser sobre una superficie limpia y estable. Si se coloca sobre el forjado o solera, es aconsejable hacerlo sobre una capa de mortero de regularización. Si se coloca sobre el terreno, se recomienda extender una capa de 5 cm de arena y una membrana de tipo fieltro antiraíces para posteriormente apoyar la barrera contra radón.

5.3. Tratamiento de juntas de estructura, soleras y forjados

Como en cualquier sistema constructivo, debe existir compatibilidad de movimientos entre los diferentes materiales, y si por las circunstancias que fueran esto no es posible, se deberán buscar las soluciones adecuadas para permitir que estos movimientos no afecten negativamente a los componentes de los subsistemas.

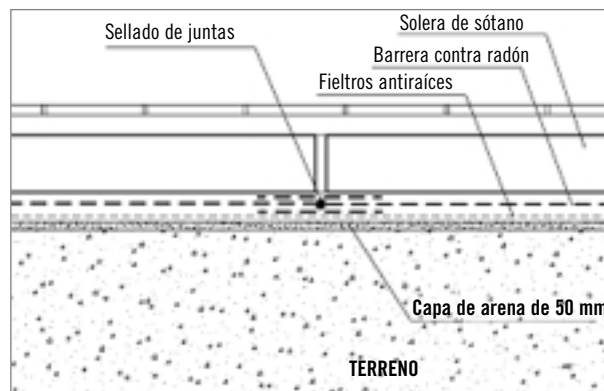
El tratamiento de juntas de dilatación, o juntas estructurales es una práctica habitual en la construcción y consiste en desligar los materiales para independizar movimientos. En sistemas de impermeabilización tanto en cubiertas como en muros de sótano o soleras, se suelen usar juntas elásticas, sellado con masillas elásticas, refuerzo de las membranas de impermeabilización, etc.

En membranas que actúan como barreras contra el gas radón se deberá actuar de la misma forma y desligar los movimientos de los soportes de la membrana para evitar que ésta llegue a romperse. La diferencia entre

el tratamiento que se da a los sistemas de impermeabilización y los de protección frente al gas radón estriba únicamente en el extremado cuidado con el que se ha de actuar en estos últimos por tratarse de un gas y no de un líquido, y que cualquier fisura, por pequeña que sea, puede constituir una vía de entrada del gas.

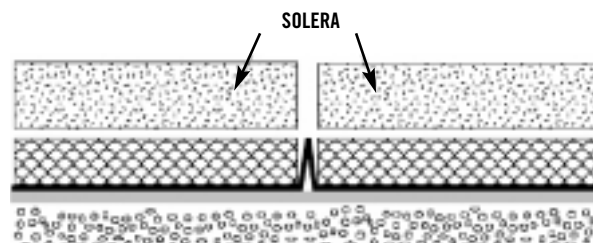
En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo tratar una junta de dilatación de una solera de sótano bajo la cual se ha instalado una barrera protectora frente al gas.

Figura 2.14. Tratamiento de junta mediante la superposición de capas de membrana que permiten la absorción del movimiento por dilatación de la solera



En la siguiente figura se ve otra posible solución que consiste en plegar la membrana en la zona de la junta para dejar una pequeña holgura en ella y que los movimientos que se produzcan no lleguen a romperla.

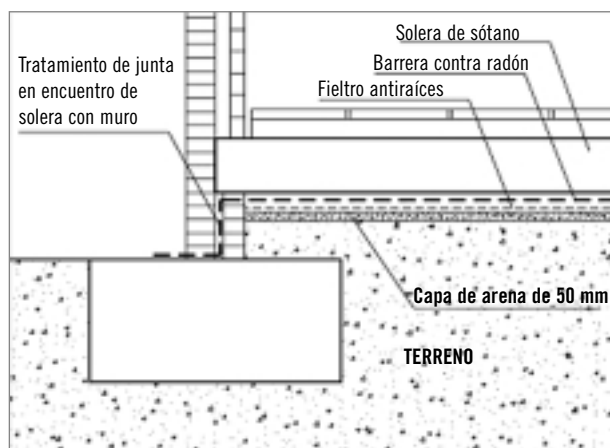
Figura 2.15. Plegado de la membrana en las juntas⁴



⁴ Dura Skrim 15 WW Radon Resisting Membrans. Raven Industries. USA.

Otra junta aparece en el encuentro de soleras con muros perimetrales. La figura 2.16 muestra una posible solución constructiva de este encuentro.

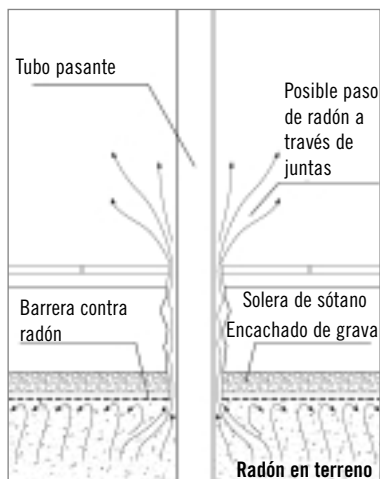
Figura 2.16. Ejemplo de tratamiento de encuentros entre cerramientos y soleras



5.4. Paso de conductos a través de la barrera

Es habitual que la red vertical de saneamiento de un edificio perfora la solera o forjado de sótano para conectarse a la distribución horizontal que se suele dejar oculta bajo la vivienda. En esta operación se debe atravesar la lámina de protección y, si no se resuelve de un modo correcto, es posible que pierda eficacia por fugas.

Figura 2.17. Pérdida de estanquidad por paso de conductos



Aunque se pueden usar sistemas tradicionales de sellado como masillas, morteros poliméricos, o membranas solapadas, lo más aconsejable es usar piezas prefabricadas que garanticen una unión limpia del tubo pasante y la membrana.

Figura 2.18. Piezas de sellado para paso de conductos. Ejemplo de la empresa Monarflex, Reino Unido

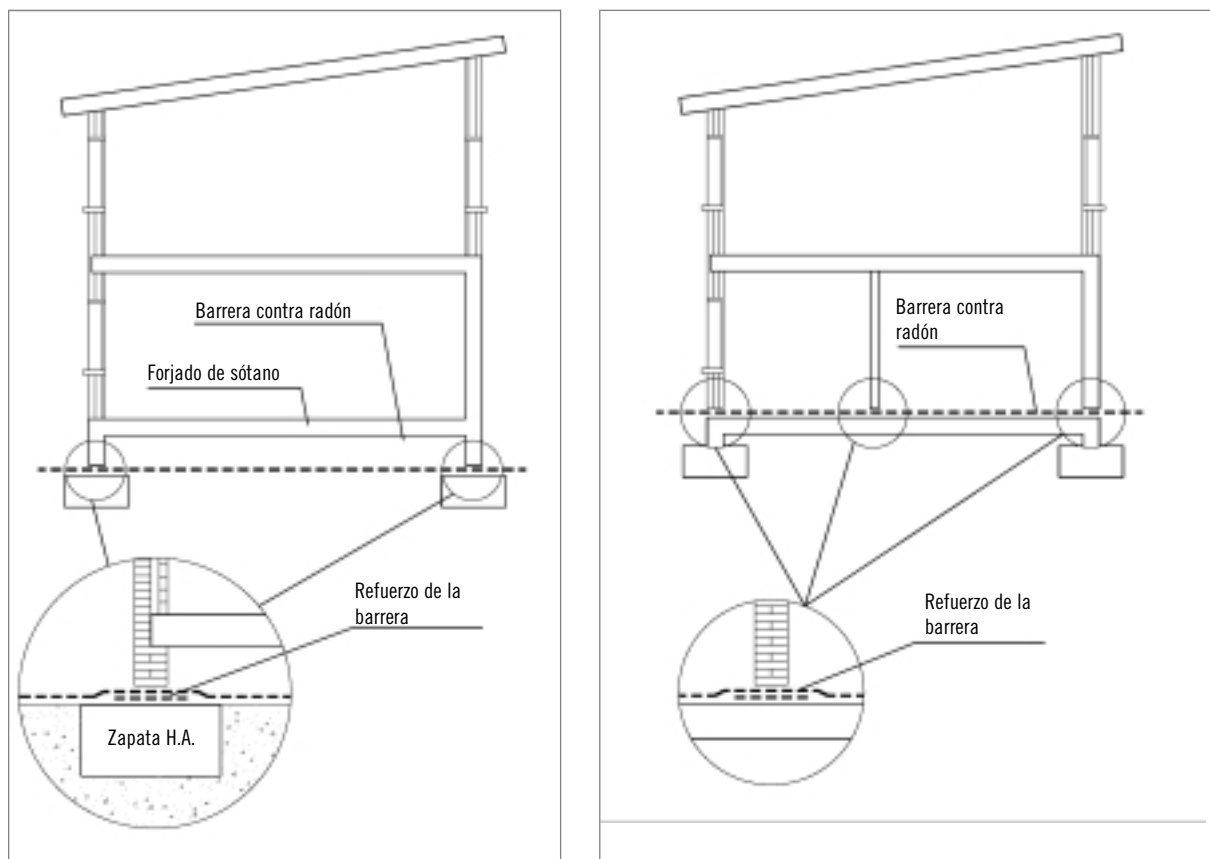


5.5. Refuerzos en barreras

La membrana es un elemento con resistencias limitadas. Un poro en la misma, provocado por una puesta en obra incorrecta, o por un exceso de cargas en la lámina, es un camino para la entrada de radón. Por tal motivo, cualquier punto en donde se prevean cargas extra a la membrana, deberá tenerse en cuenta y reforzarse con más capas u otros materiales.

En la siguiente figura se muestran ejemplos de refuerzos de puntos de sobre carga:

Figura 2.19. Ejemplos de refuerzo de membrana en apoyos de muros y tabiques



5.6. Fisuras en solera

Para evitar las posibles fisuras que puedan aparecer en el hormigón, se recomienda el uso de hormigones bien dosificados y aditivados, para garantizar un fraguado sin fisuras.

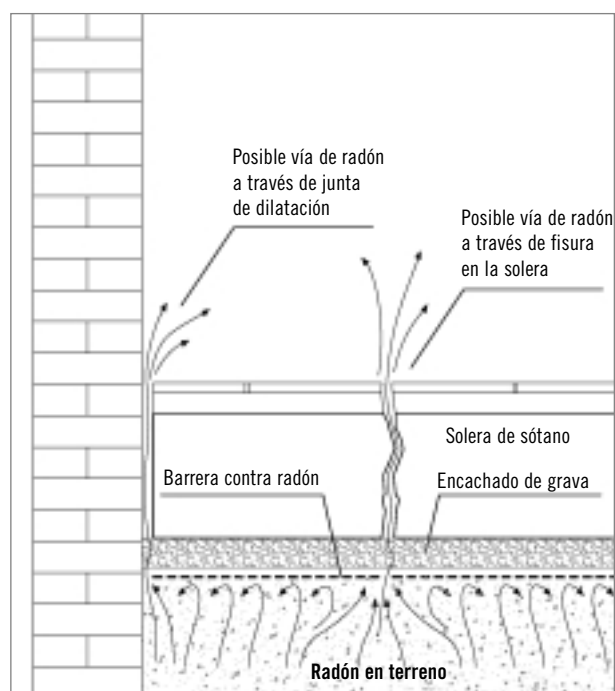


Figura 2.20. Una fisuración de la solera de hormigón crea una vía preferente para el paso del gas

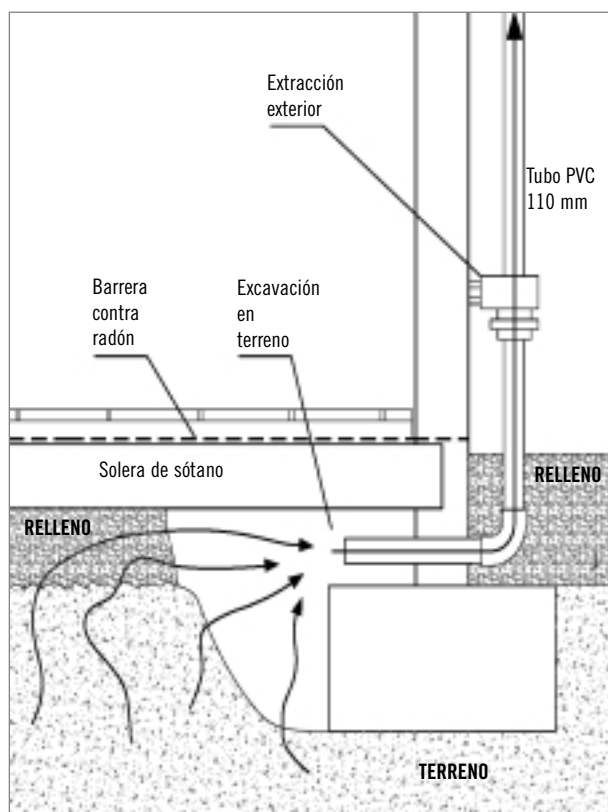
5.7. Puntos de captación en sistemas extracción

Normalmente se usan unas arquetas parecidas a las de las redes de saneamiento, con la salvedad de que la interfaz con el terreno debe ser porosa para permitir el paso del gas al interior.

Si se utilizan barreras para complementar el sistema, su instalación es siempre bajo la misma y se puede hacer de diversas formas. A continuación se muestran unos ejemplos de los sistemas que actualmente se están utilizando.

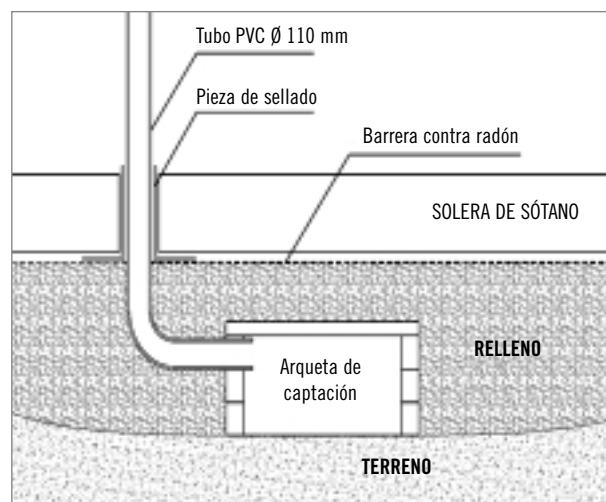
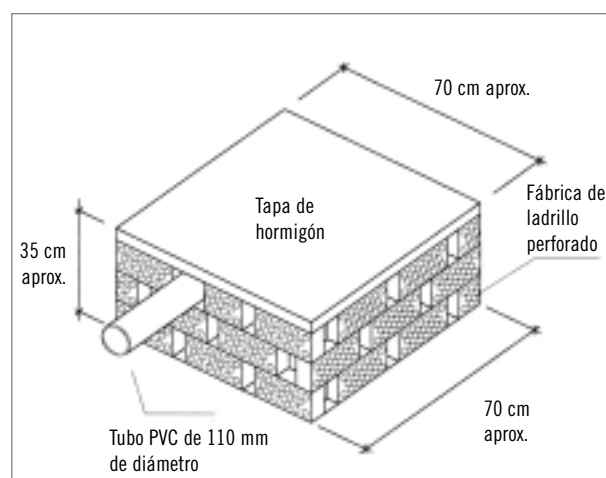
- El más simple de todos ellos consiste en dejar una oquedad en el terreno bajo la barrera, desde la cual un tubo de evacuación extraerá el gas. En este caso se debe evitar la posible inundación de la excavación y se debe mantener su volumen hueco evitando desprendimientos.

Figura 2.21. Punto de captación realizado mediante excavación



- Mediante la instalación de una arqueta de captación hecha *in situ*. Ésta debe tener orificios en las paredes para permitir la entrada de gases, por lo que se suele realizar con ladrillo perforado colocado en sentido transversal

Figura 2.22. Modelo de arqueta de captación hecha *in situ* con ladrillo perforado



- Aparte de estos sistemas de fabricación *in situ* con elementos convencionales, existen empresas en el mercado que han desarrollado multitud de elementos prefabricados que actúan como puntos de captación del gas.

Figura 2.23. Ejemplo de modelo de arqueta prefabricada de la empresa Wavin Ireland (Limited Balbriggan Co. Dublín)



- Existen otros sistemas de extracción algo más sofisticados que se han desarrollado últimamente:

Figura 2.24. Sistema de captación basado en un suelo flotante realizado con paneles de poliestireno expandido con tallas en su base que permiten el paso del aire entre los surcos. Aerobord Ltd. (Askeaton, Co. Limerick)

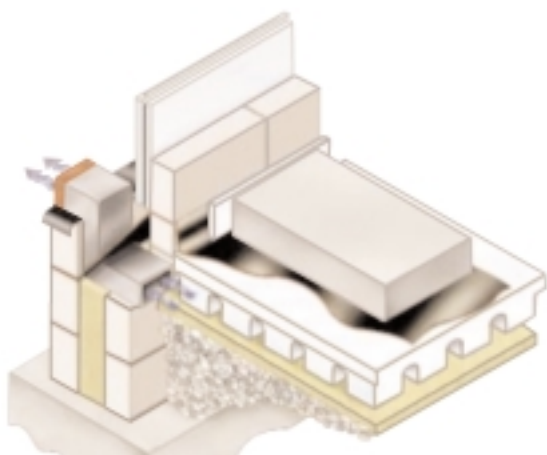
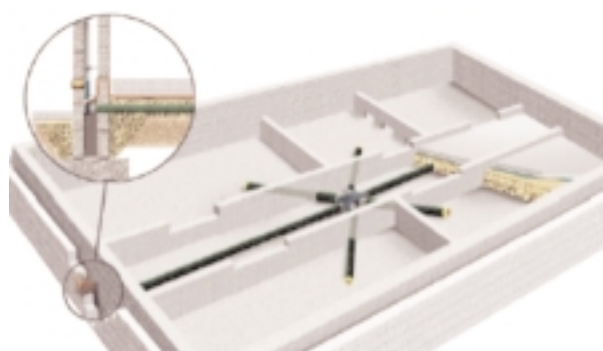
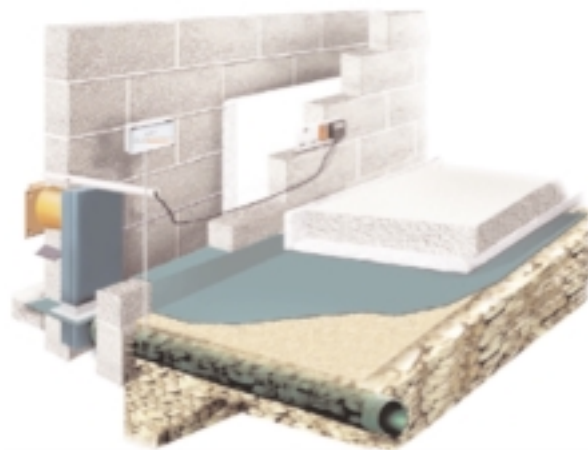


Figura 2.25. Sistema de captación que basa su funcionamiento en una serie de tubos perforados y enterrados bajo la vivienda, similares a los usados como tuberías de drenaje, que se conectan a un extractor. Rad Safe Supplies Ltd.

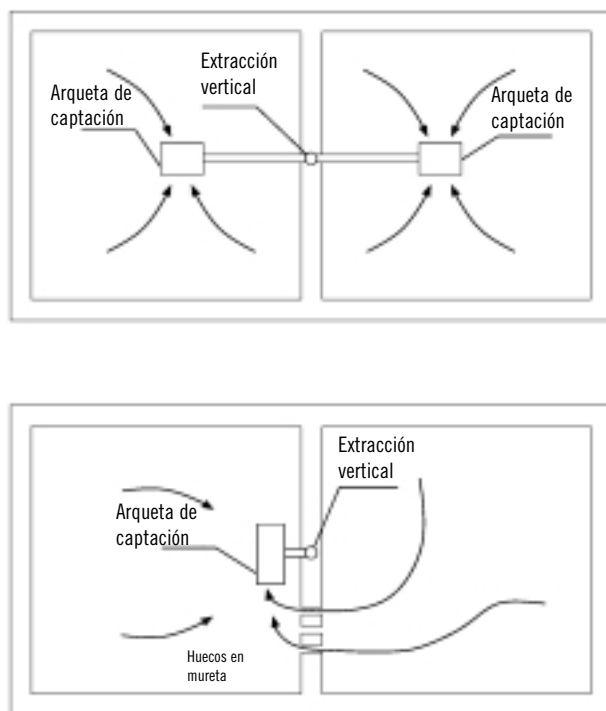


5.8. Situación de los puntos de captación

Para tener la planta del edificio cubierta con los sistemas de extracción, es recomendable colocar los puntos de captación de tal manera, que los radios de acción de los mismos, cubran la superficie de planta en su totalidad. La cantidad de captadores y su colocación dependerá de la permeabilidad del terreno, de la superficie de planta, y de la solución de tiro, natural o forzado.

Un único extractor puede dar servicio a más de un captador. La siguiente figura muestra un ejemplo de situación de varios captadores para una única extracción vertical.

Figura 2.26. Posibles soluciones de unión de puntos de captación para una misma tubería de *extracción*



En determinadas situaciones de permeabilidad alta del terreno, se puede situar un punto de captación enterrado por el exterior del edificio y lo más cercano a él. De esta manera, si la permeabilidad del terreno lo permite, la extracción desde ese punto puede llegar a abarcar la totalidad de la planta sin que tenga que estar situado justo debajo. En estos casos también influirá la mayor potencia de un extractor. Esta técnica se usa habitualmente en viviendas construidas en las que intervenir por el interior implicaría ejecutar obra en la propia vivienda.

En un sentido más amplio, puede usarse un extractor de gran potencia que cubra un área de terreno suficientemente grande como para solucionar la protección de varias viviendas. Lógicamente, esta solución podrá usarse siempre y cuando las permeabilidades sean altas y las potencias de extracción altas. No obstante conviene hacer cálculos, mediante

sistemas de flujos, para averiguar qué superficie puede cubrirse con un extractor de gran potencia colocado en un punto de captación.

Figura 2.27. Un ejemplo de cómo un punto de captación puede dar servicio a varias viviendas cubriendo una gran superficie de succión. Estos cálculos pueden realizarse con programas de análisis de fluidos



5.9. Sobre la ventilación de una vivienda

Al ventilar una vivienda es previsible una reducción de radón al intercambiar aire con el exterior que presenta menos concentración que el aire del interior. Al introducir aire desde el exterior, las condiciones térmicas interiores no quedarán aseguradas y será necesario recurrir a equipos de calor o frío que supondrán un mayor gasto energético. Por este motivo, la ventilación no es una técnica recomendable en situaciones en las que el intercambio de aire con el exterior suponga una merma de las condiciones térmicas.

Por otro lado, si únicamente se expulsa aire de la vivienda, o si la inmisión de aire nuevo procedente del exterior es insuficiente comparado con la expulsión, puede generarse una depresión interior que potencie una succión de radón proveniente del terreno y por tanto aumentar los niveles de concentración interior.

LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA EN LAS SOLUCIONES
CONTRA LA INMISIÓN DE RADÓN



3

El conocer de primera mano lo que ya han sido experiencias contrastadas en otros países determinó el planteamiento de un estudio experimental con el fin de abordar la protección frente a la inmisión de gas radón con tipologías, materiales, y técnicas constructivas propias de la construcción actual en España.

Como base de partida para la investigación se tuvo en cuenta la simplicidad de las técnicas constructivas, con utilización de materiales básicos y, fundamentalmente, una elección de terreno con altas concentraciones de radón para evaluar los límites en la efectividad de las técnicas.

A continuación se resume el trabajo que se realizó. Constituye un avance en los conocimientos sobre las técnicas de protección frente al gas radón y puede ser la base de posteriores estudios, y una aportación técnica a tener en cuenta en la elaboración de una propuesta normativa.

1. Planteamiento de un proyecto experimental

El proyecto tuvo por título el *Estudio de la viabilidad y efectividad de las acciones de remedio ante la presencia de gas radón en edificios existentes* y fue subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

El fin perseguido fue el de constituir una base técnica, con una experiencia real de aplicación de técnicas constructivas destinadas a frenar la inmisión de gas radón, para dar apoyo al documento de soluciones constructivas mostrado en el apartado anterior.

Para ello, se consideró estudiar el comportamiento del gas radón en el interior de un módulo real de vivienda construido con las características tipológicas propias de España, y ensayar posteriormente los diferentes sistemas de protección frente a la entrada de radón. Esto supuso la realización de las siguientes tareas:

- Actualización del estado bibliográfico referente a técnicas de protección frente a la entrada de gas radón en edificios existentes. Este apartado es el primer paso y base para la comprensión de los fundamentos de las técnicas de protección y para el diseño con materiales propios del país.

- Elección de una zona con altas tasas de exhalación de radón en terreno donde construir el módulo para poder estudiar, entre otras, las soluciones correctoras con mayor efectividad.
- Diseñar un módulo real que reproduzca las características tipológicas de una vivienda unifamiliar con dos alturas y parte semienterrada.
- Construir el módulo con técnicas y materiales propios del lugar.
- Estudiar las concentraciones de radón registradas en los diferentes espacios del interior del módulo y correlacionarlas con las variables meteorológicas.
- Intervenir en el módulo para introducir las distintas soluciones correctoras con el fin de disminuir las concentraciones iniciales.
- Estudiar en cada fase las concentraciones registradas y analizarlas en función de las variables meteorológicas cuando proceda.
- Analizar la efectividad de cada solución correctora y la viabilidad de introducir dichas medidas en un módulo de vivienda ya construido.

El proyecto, subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear, fue desarrollado entre los años 2005 y 2006.

El equipo investigador estuvo compuesto por personal del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) y por personal de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria.

A continuación se detallan las distintas fases que se desarrollaron.

1.1. Elección de la ubicación

Para la elección del lugar donde ubicar el módulo se siguieron los siguientes criterios:

- La alta presencia de radón registrada en la zona. Ello nos permitiría plantearnos situaciones de alto riesgo y plantear soluciones de alta efectividad.

- Facilidad de construcción y consulta de datos climáticos en una estación meteorológica cercana.

A través de los mapas de radón (Consejo de Seguridad Nuclear) se observó que, la región oeste de la provincia de Salamanca, poseía unos niveles altos de exhalación de radón en el terreno que coincidía con los registros que se tenían de concentración de radón en algunas viviendas en dicha zona.

Para la elección concreta del lugar se contó con la ayuda de Enusa (Industrias Avanzadas, S.A.) que disponía de una mina de extracción de mineral de uranio, junto con una fábrica de concentrados de uranio (actualmente en proceso de desmantelación), cercana a la población de Ciudad Rodrigo, en un lugar en el que predominaba la alta exhalación de radón. La disponibilidad de Enusa en aportar el terreno para la cons-

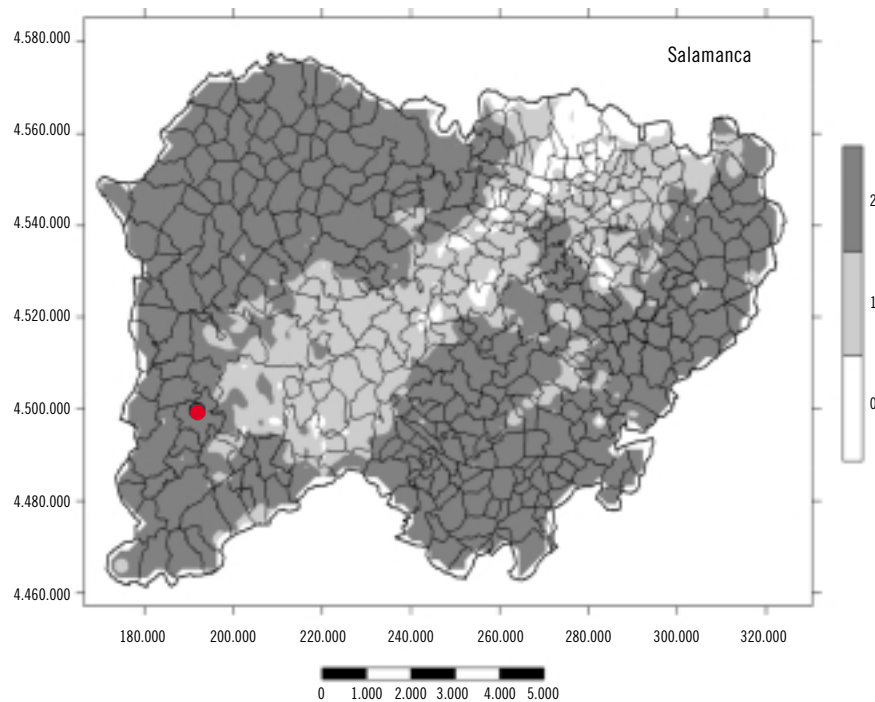
trucción del prototipo de vivienda determinó la elección final de la ubicación.

Tras la elección del lugar apropiado para la construcción del módulo se procedió a realizar una caracterización radiológica del suelo, que consistió básicamente en:

- a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo.
- b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad.
- c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad.

A continuación se presentan los principales resultados de los estudios realizados por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Cantabria:

Figura 3.1. Situación final del modulo experimental en las instalaciones de Enusa, Ciudad Rodrigo, Salamanca



a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo

Se recogieron muestras de suelo, todas ellas representativas del entorno próximo al módulo. Se realizó un análisis por espectrometría gamma al conjunto de muestras, siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio.

De los resultados destaca la elevada concentración de radio (^{226}Ra) comparado con un suelo normal, lo que confirmó la alta exhalación de radón (^{222}Rn) en dicha zona.

b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad

Mediante el empleo de una sonda, células de centelleo y equipo contador, se determinó la concentración de radón a un metro de profundidad en la zona de construcción del prototipo de vivienda. Los resultados de las 20 medidas realizadas en una superficie de unos 150 m², muestran una concentración media de radón, a un metro de profundidad, de 250.000 Bq/m³, si bien es de destacar la gran variabilidad encontrada que oscila entre 70.000 Bq/m³ y 500.000 Bq/m³.

c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad

Para disponer de una información global del terreno se llevó a cabo un análisis granulométrico del que se obtuvo una permeabilidad media para el suelo de 10⁻¹² m².

Este dato, junto con la concentración de radón en terreno, clasificaba la zona como de alto riesgo según la tabla 2.1 del presente documento.

1.2. Diseño y construcción de un módulo representativo de una edificación habitual en España

El diseño del módulo experimental desarrollado refleja las características básicas de una construcción de vivienda unifamiliar en un entorno rural, con una superficie de planta de 25 m² (5 x 5 m), con una parte enterrada bajo rasante y una planta sobre la superficie

del terreno. De esta manera se pudo ensayar el movimiento del radón tanto en la parte enterrada, con los muros de sótano y solera, como en la parte sobre rasante considerada habitable. El espacio de sótano pudo ser también considerado como cámara de un forjado sanitario.

El sistema constructivo y el diseño del módulo fueron pensados para reproducir las condiciones más desfavorables respecto a la protección frente al radón. Los materiales empleados fueron convencionales y los sistemas constructivos habituales:

- La *excavación* de planta de semisótano alcanza una profundidad de 1,30 metros para la base de la solera. Esta profundidad fue necesaria para estar en condiciones de medir la entrada de radón a través de los muros de sótano.
- El *muro de sótano* se realizó con ladrillo de un pie de espesor (24 cm).
- Las *dos plantas*, sótano y primera, estaban aisladas mediante una puerta de acceso al sótano que permitía reproducir el tránsito de una planta a otra en una vivienda tipo, o la cámara de un forjado sanitario según la solución de protección que se estuviese probando.
- El *cerramiento exterior* se componía de doble hoja de ladrillo con cámara de aire. De esta manera existe una posible vía de entrada del radón a través de dicha cámara.
- La *solera de sótano*, piso, se realizó con un espesor de 20 cm de hormigón armado sobre un encachado de grava de 15 cm.
- La *cubierta* se diseñó plana y con acceso desde el exterior con el fin de poder instalar los extractores de expulsión de aire para las soluciones de arquetas enterradas.

A continuación se muestran los planos y fotografías del módulo construido.

Figura 3.2. Planos de planta del modulo experimental

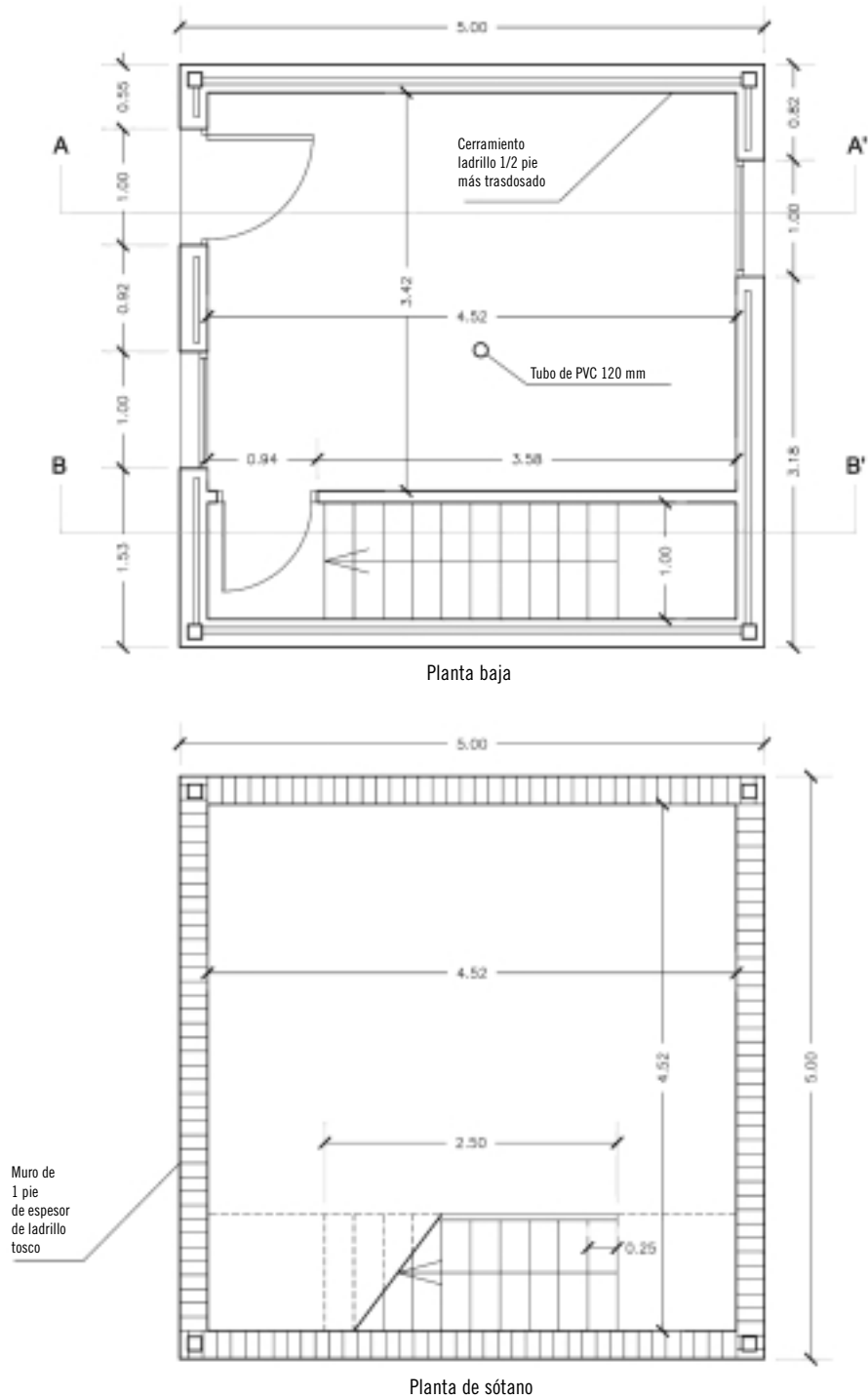


Figura 3.3. Plano de sección constructiva del modulo experimental

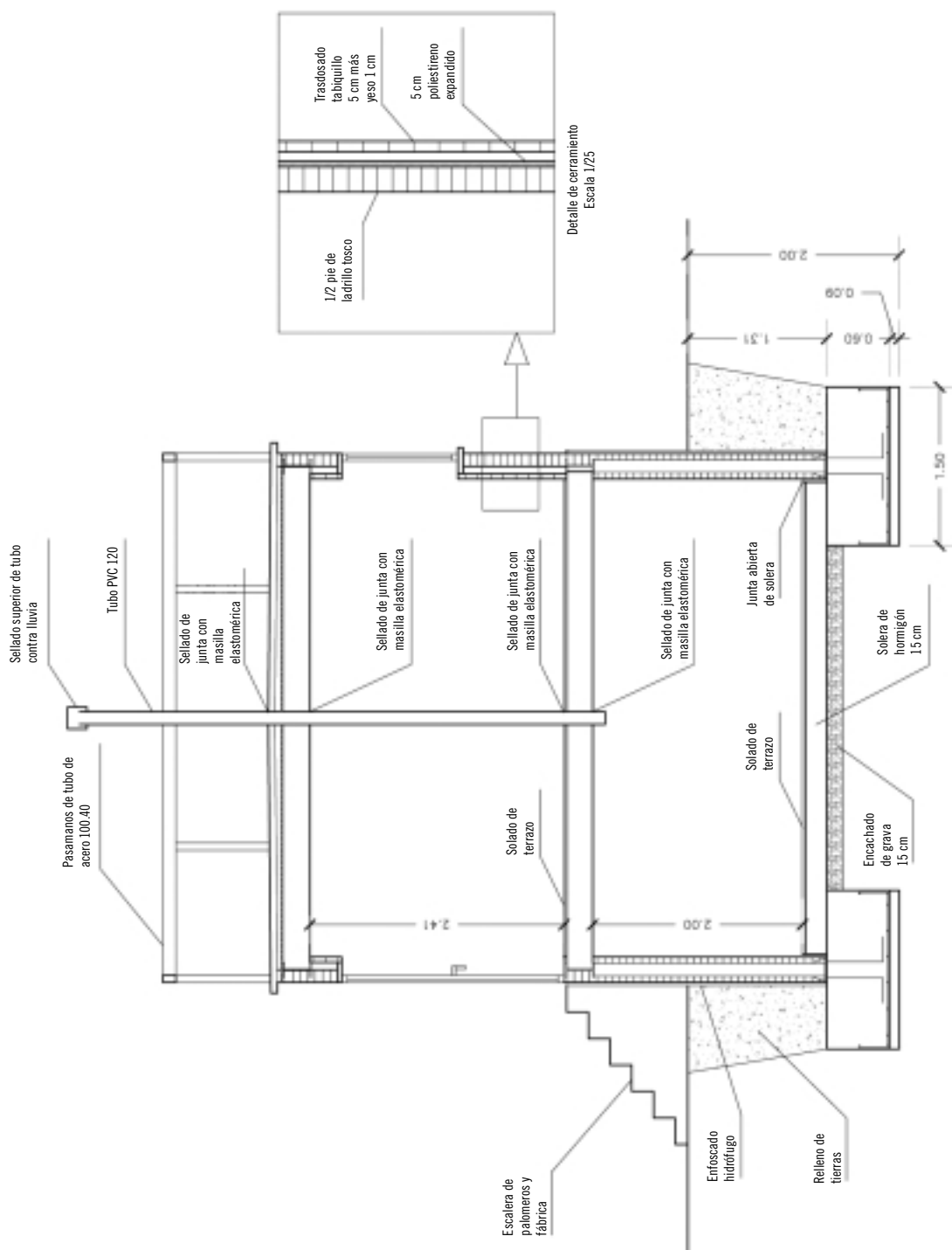


Figura 3.4. Fotografía de la excavación con los muros de sótano



Figura 3.5. Fotografía del módulo terminado



1.3. Dispositivos de medición empleados

En el interior del módulo se instalaron los equipos de medida necesarios para el registro de las concentraciones de radón interior, así como sondas de temperatura y presión.

Un equipo portátil formado por un ordenador central que controlaba y almacenaba la información de los siguientes periféricos:

- Contador Ludlum con bomba de flujo de aire y célula de centelleo de Lucas modificada con sulfuro de zinc.
- Ocho sondas de temperatura.
- Cuatro sondas de diferencia de presión.

Aparte se instalaron medidores de radón en continuo portátiles:

Figura 3.6. Equipos instalados en la planta baja del módulo



- Dos equipos DOSEman de SARAD.
- Dos equipos Scout de SARAD.

Se configuraron para almacenar las concentraciones de radón durante periodos de una hora (tiempo de integración).

Durante el tiempo que duró la investigación se registraron los siguientes parámetros:

- Concentración de radón (Bq/m^3) en sótano y en planta baja, evaluadas con diferentes equipos de medida en continuo como DOSEman y Scout, así como con detectores de trazas CR-39 que proporcionan valores integrados a lo largo de periodos de tiempo mayores. Las medidas realizadas en los mismos intervalos de tiempo han resultado ser equivalentes con los diferentes métodos de medida.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en diversas localizaciones en el interior y exterior del módulo mediante ocho sondas controladas por el ordenador portátil.
- Diferencias de presión (Pa) entre varios puntos del módulo con cuatro sensores controlados con el mismo equipo.

Aparte de estos parámetros, la estación meteorológica de Enusa nos proporcionó los siguientes datos que fueron fundamentales para el análisis de las correlaciones entre las concentraciones de radón interior y los cambios atmosféricos.

- Velocidad media del viento (m/s).
- Velocidad máxima del viento (m/s).
- Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- Temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- Humedad relativa media (%).
- Presión media (mb).
- Lluvia acumulada (mm).

2. Análisis de la inmisión de radón en el módulo sin protección

El módulo construido se mantuvo cerrado durante el periodo inicial, aproximadamente cuatro meses, con el fin de estudiar el comportamiento del radón en su interior. Se trataba de una edificación construida sin

ningún tipo de medida de protección frente a la inmisión y, por tanto, cabía esperar la penetración de radón a través de su envolvente.

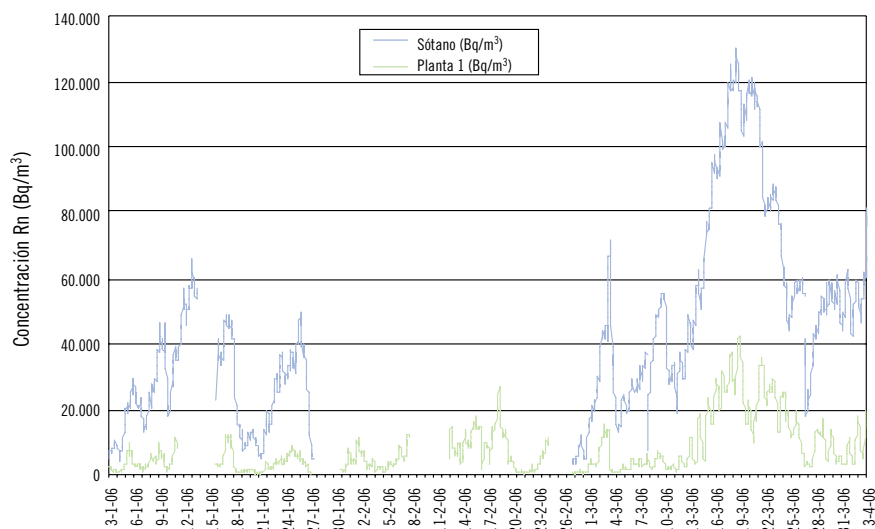
Como se ha indicado, las tasas de emanación y exhalación tienen que ver con la generación de radón y su movilidad a través de los poros del terreno, siendo factores fundamentales, la cantidad de radio en origen y la permeabilidad en el suelo. Estos aspectos se habían medido y se había obtenido una clasificación de alto riesgo de exposición al radón, por lo que era de esperar que existiese un flujo de radón hacia el interior del módulo como así demostraron las medidas

que se realizaron, obteniendo las siguientes concentraciones medias:

- Concentración promedio para planta de sótano: 39.385 Bq/m³.
- Concentración promedio para planta primera: 6.855 Bq/m³.

Por otro lado, el gradiente de presiones existente entre el terreno y el interior del módulo, determinan la variación del flujo de radón hacia el interior por convección como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3.7. Curvas de concentración de radón en el interior del módulo durante el periodo sin protección. Fase inicial



Este gradiente se ve alterado por los cambios en las variables atmosféricas, y fue objeto de una primera fase, analizar estos fenómenos con el fin de estudiar las correlaciones que pudiesen existir con las concentraciones de radón interior.

Para ello, durante este periodo inicial en el que el módulo no estaba protegido contra la inmisión de radón, se registraron las concentraciones de radón interior, tanto en la planta de sótano como en la planta baja, y también los distintos parámetros atmosféricos, como la temperatura, precipitaciones, viento, presión atmosférica,

que fueron proporcionados por la estación meteorológica de Enusa.

Seguidamente se exponen las principales conclusiones obtenidas del estudio de la correlación entre las concentraciones de radón y los distintos parámetros atmosféricos.

2.1. Influencia de las presiones atmosféricas

Se observa una relación inversa entre la presión atmosférica y las concentraciones de radón en el inte-

rior del módulo. Los descensos de presión provocan un incremento significativo de la concentración interior.

El mecanismo por el que se produce tal incremento podría estar relacionado con la permeabilidad del suelo. Ante un cambio en la presión atmosférica, la presión del interior del módulo se iguala de una manera casi instantánea mientras que en los poros del terreno, la presión no se igualará hasta transcurrido un tiempo que depende de la permeabilidad del mismo. Esto provocaría que, ante una caída repentina de presión atmosférica, la presión en el terreno se mantuviese en valores superiores a los del interior del módulo, favoreciendo la entrada de radón en la casa.

Durante este periodo se observó que ante una caída de presión de 3.000 Pa se producía un incremento puntual de concentración de radón de 90.000 Bq/m³, lo que supone un incremento del 225% sobre el valor promedio del periodo.

2.2. Influencia de los vientos

Las variaciones en la concentración de radón parecen estar correlacionadas positivamente con la velocidad del viento. La acción del viento sobre la concentración de radón interior tiene dos efectos opuestos. Por un lado, debido a la filtración que se produce por carpinterías de ventanas y puertas, el viento favorece un intercambio de aire entre el interior y el exterior. Este aporte de aire exterior con baja concentración de radón, daría lugar a una reducción de la misma en el interior.

Por otro lado, el viento provoca presiones y succiones en las fachadas del edificio, e induce una diferencia local de presiones entre el interior y el exterior proporcional al cuadrado de su velocidad, que favorece la entrada de radón en el recinto cerrado. En nuestro caso, este efecto tuvo mayor presencia que el de intercambio de aire. No obstante, las diferencias de presión inducidas apenas superan los 20 Pa, significativamente menores que las diferencias

observadas en la presión atmosférica (del orden de 3.000 Pa.)

2.3. Influencia de las temperaturas

El cambio de temperatura en el exterior es objeto de una modificación del gradiente de presiones entre el interior y el exterior. Este efecto se denomina *stack* (efecto chimenea) y explica, en los edificios, el movimiento de un gas por cambios de temperatura. El aire caliente que se genera en una vivienda en invierno, se expande y tiende a fugarse por chimeneas, fisuras o grietas, ventanas, etc. Ese proceso crea una ligera depresión interior que favorece la entrada de radón desde el terreno por succión.

Para el rango de datos disponibles, las diferencias de presión inducidas por cambios en las temperaturas, son pequeñas (del orden de 1 Pa) y no parecen responsables de las variaciones observadas en la concentración de radón.

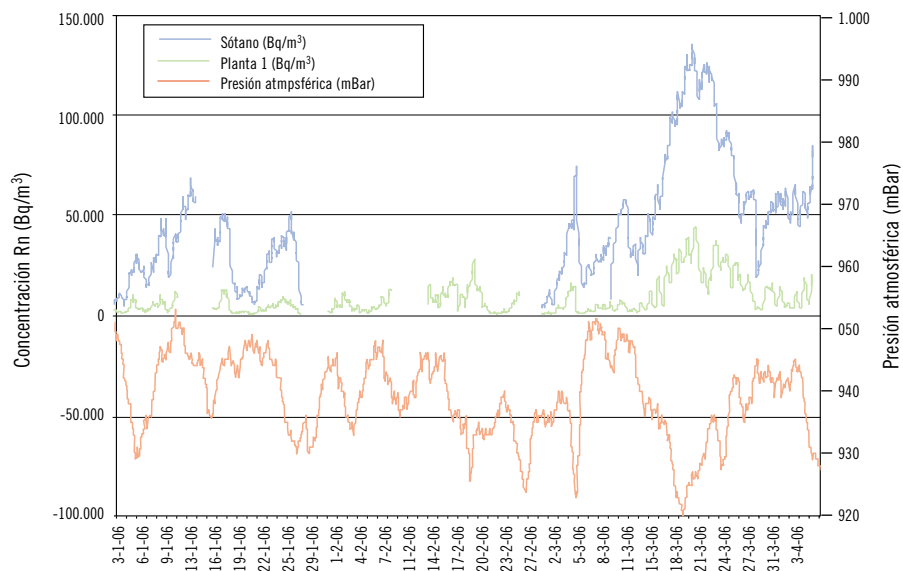
2.4. Influencia de las precipitaciones

Aún cuando los días de lluvia en la zona han sido escasos, se observa una correlación positiva entre la lluvia y el aumento de la concentración interior de radón en ambas plantas. Este efecto de la precipitación puede estar relacionado con una reducción de la permeabilidad del suelo en el entorno del módulo, que induce una salida preferente del radón por el suelo seco bajo el mismo. No obstante, y debido a las escasas precipitaciones, este fenómeno no fue relevante frente al de la presión atmosférica.

Conclusión:

Con todo, la presión atmosférica parece el parámetro determinante de las variaciones en la concentración de radón observadas en el interior del módulo cerrado. Las variaciones en la presión atmosférica fueron del orden de 3.000 Pa, superiores a las inducidas por los cambios de temperatura (3 Pa), y superiores a los provocados por el viento (30 Pa). La siguiente figura muestra la correlación de concentraciones con la presión atmosférica.

Figura 3.8. Grafica de curvas de concentración de radón contrastadas con los cambios de presión atmosférica en la que se observa como a un descenso de presión, entre los días 11 y 18 de marzo, le corresponde un aumento de concentración interior



3. Resultado de efectividades de distintas medidas correctoras

Se muestra el resultado de efectividades conseguidas por las distintas medidas correctoras, entendidas como las capacidades que poseen en cuanto a la reducción de radón interior.

Para poder realizar estos análisis, previamente se registraron las concentraciones medias de radón para el periodo inicial (módulo sin protección frente a la inmisión de gas radón), que sirvieron de base comparativa

Tabla 3.1. Concentración promedio de radón en las dos plantas, durante la fase sin protección

	Planta sótano	Planta 1	Relación P. sótano/P. 1
Concentración promedio (3 meses)	39.385 Bq/m³	6.855 Bq/m³	5,75

para poder evaluar la reducción de radón que consiguieron las diferentes soluciones. Los resultados fueron los siguientes:

Posteriormente se diseñaron las distintas soluciones de protección que requerían una reinterpretación de los sistemas encontrados en la literatura para su adaptación a los materiales convencionales de España y a las tipologías constructivas propias. El estudio de estas técnicas constructivas, en experiencias internacionales, fue fundamental para entender los mecanismos por los cuales dichas soluciones reducen la concentración y cómo se pueden rediseñar para el mismo objetivo pero mediante uso de diferentes medios.

Como ya se ha indicado, estas soluciones se clasifican en dos grupos atendiendo a la base de funcionamiento. Las que interponen barreras frente al paso de radón en todo elemento del edificio que esté en contacto con el terreno (soleras, muros de sótano, etc.) y aquellas que extraen el gas del terreno antes de que éste pueda penetrar en los edificios.

Para la elección de las medidas a estudiar se tuvo en cuenta que se quería probar el mayor número de ellas para contar con un abanico amplio de efectividades y que éstas no podían superponerse para no contaminar el análisis.

Atendiendo a estos criterios se eligieron las siguientes clases:

1. Sistemas de extracción del gas bajo el módulo usando arquetas de captación enterradas y conectadas a tubos de evacuación por cubierta.

Se realizaron dos arquetas distintas situadas, una bajo la solera del módulo en una localización central, y la otra enterrada por el exterior del módulo adosada a la cimentación del mismo. De esta manera se podía comparar la efectividad en función de la ubicación del punto de captación.

También se pudo estudiar la efectividad en función de si la extracción se hacía mediante tiro natural o forzado y, en este último caso, qué influencia podía tener la potencia del extractor.

2. Sistemas de ventilación del semisótano, actuando éste como cámara de forjado sanitario, con ventilación natural y con ventilación forzada. Esta propuesta se estudia para viviendas construidas con un forjado elevado sobre el terreno.
3. También, y dentro de los sistemas que hacen uso de extractores mecánicos, se invirtió el flujo para crear una sobrepresión en el terreno que desviase el gas.
4. Por último, dentro de la otra gama de soluciones, se analizó un sistema de barrera antiradón con el uso de material elastomérico de proyección *in situ*.

Contando con las variantes de cada clase, se estudiaron nueve medidas correctoras en total.

A continuación se detallan los diseños constructivos de cada una de ellas.

Tabla 3.2. Medidas correctoras probadas en el módulo

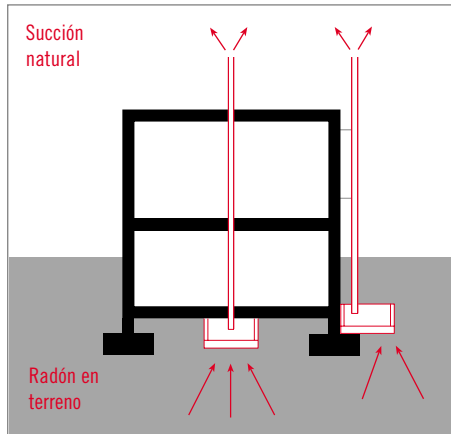
	Actuación
0	Periodo inicial Sin medidas correctoras
Medidas de extracción natural	
1	Extracción natural por dos arquetas (central y exterior)
2	Extracción natural por una arqueta (Central)
3	Extracción natural por una arqueta (Exterior)
4	Vuelta a situación inicial
Medidas de extracción forzada	
5	Extracción forzada (56 W) por una arqueta (Central)
6	Extracción forzada (80 W) por una arqueta (Central)
7	Extracción forzada (80 W) por una arqueta (Exterior)
Medidas de presurización	
8	Presurización (80 W) por una arqueta (Central)
Medidas de ventilación forjado sanitario	
9	Extracción forzada (80 W) del aire de la planta de sótano
Barrera antiradón	
10	Membrana elastomérica como barrera antiradón

3.1. Extracción natural por arqueta central y lateral

Se introdujo, bajo la solera de asiento del módulo, una arqueta enterrada con las paredes perforadas para permitir la entrada del gas a su interior. A ella se conectó un tubo de PVC de 125 mm de diámetro con salida directa a cubierta atravesando la solera, forjados y cubierta. La evacuación se realizaba por tiro natural.

Se construyó el mismo tipo de arqueta y tubo de salida, pero en este caso enterrada por el exterior del módulo. De esta manera se pudo estudiar la efectividad de la medida cuando funcionan las dos arquetas, o cada una de ellas por separado. La siguiente figura esquematiza la base de funcionamiento:

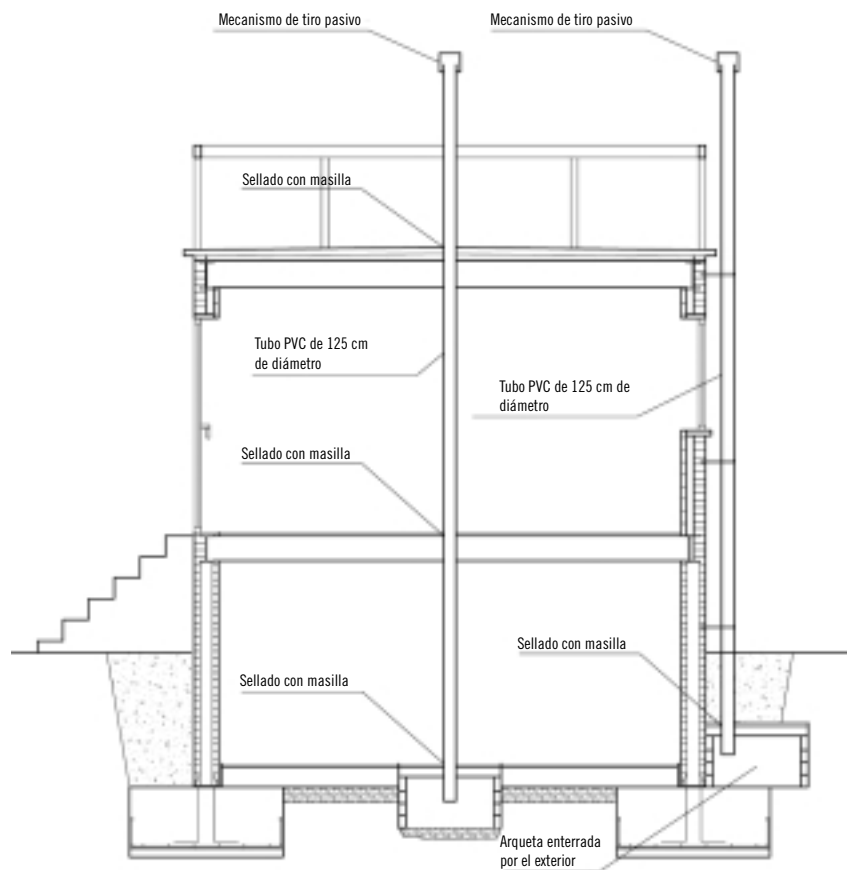
Figura 38. El tubo crea una depresión en la arqueta favorecida por el *efecto venturi* y por la diferencia de presiones generadas por el gradiente de temperatura. El radón se introduce en ella y es expulsado al exterior por la cubierta



La siguiente figura muestra la ubicación de las dos arquetas. Como se puede observar, la arqueta situada en el exterior del perímetro se encuentra fuera de la

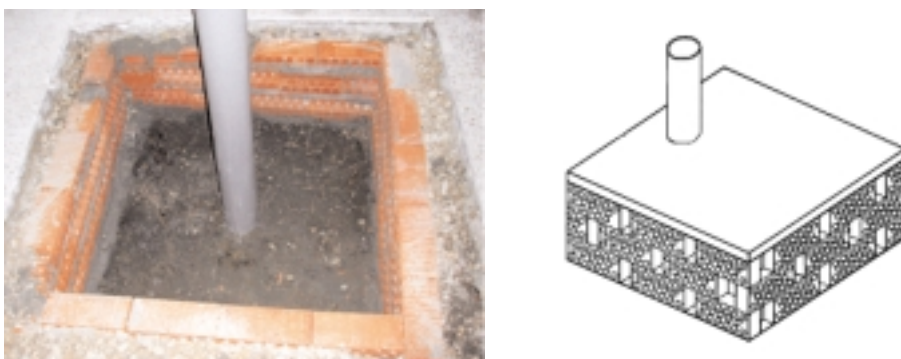
línea de cimentación, lo que causó un peor funcionamiento como se detalla mas adelante.

Figura 3.10. Situación de las dos arquetas enterradas



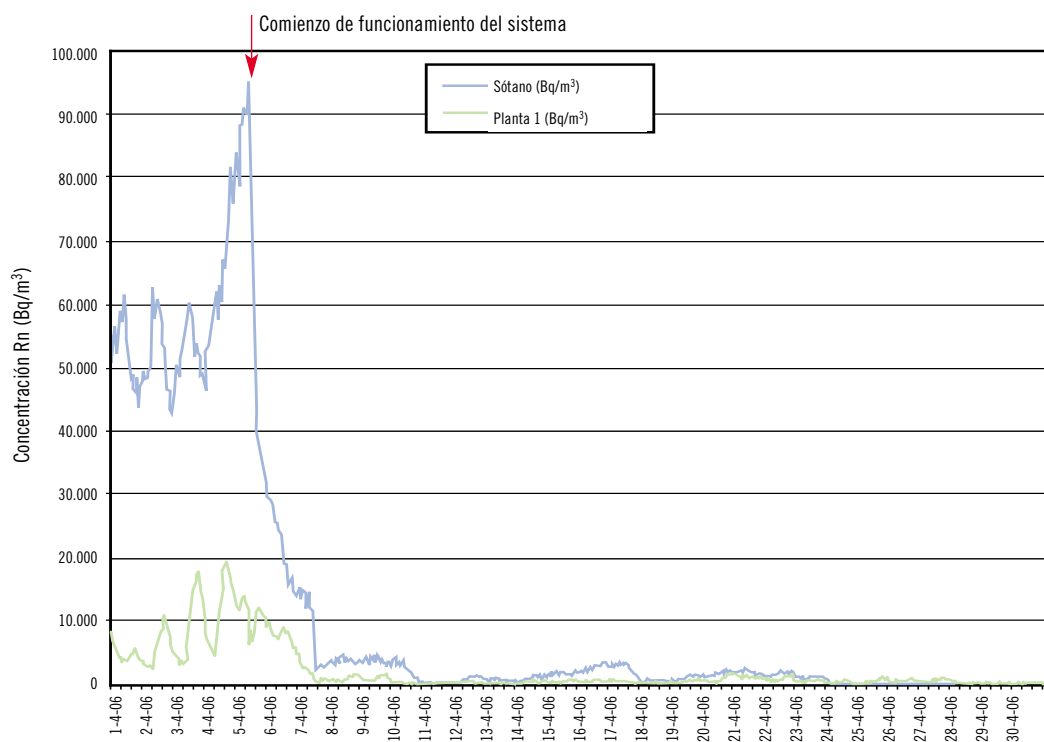
Las arquetas se construyeron con ladrillo perforado como se muestra en las figuras siguientes:

Figura 3.11. Fotografía y dibujo de la construcción de una arqueta de captación con ladrillo perforado



El gráfico siguiente muestra la reducción de radón conseguida cuando se activa el mecanismo de las dos arquetas.

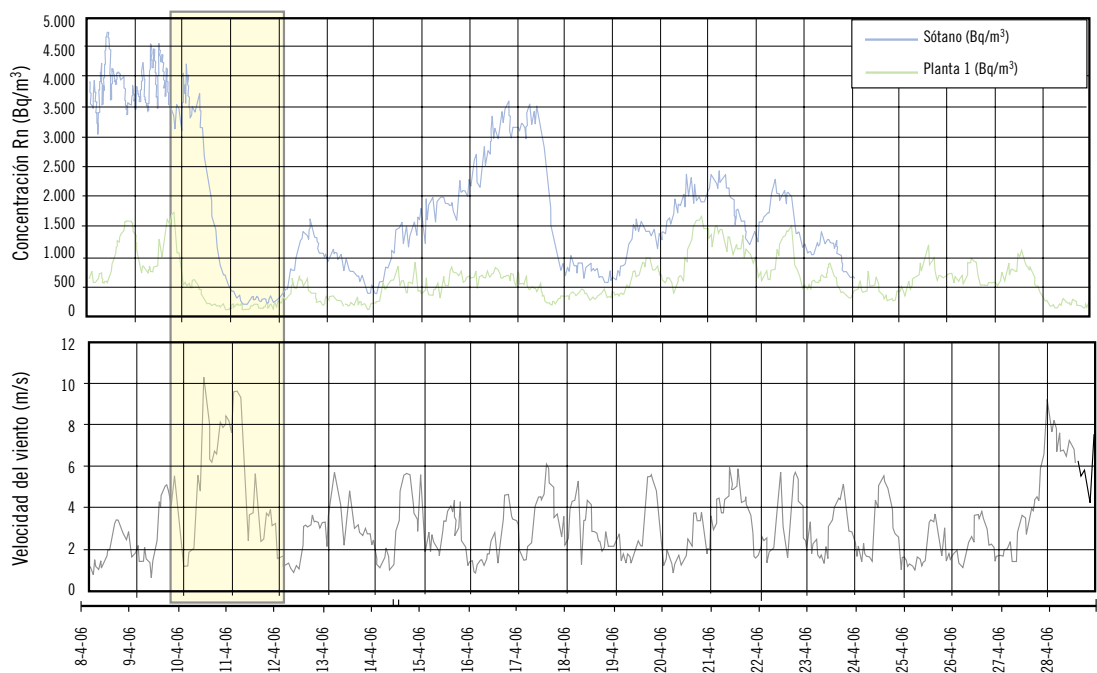
Figura 3.12. Curvas de concentración de radón cuando entra en funcionamiento la extracción natural por las dos arquetas enterradas



Se observó una clara reducción de las concentraciones en ambas plantas que se vio mejorada durante los días en que los vientos superaban velocidades de 8 m/s, lo

que confirmaba que el efecto *venturi* producido por el viento, inducía una mayor depresión en la arqueta como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3.13. Curvas de concentración de radón contrastadas con velocidades de viento. Se aprecia una disminución en la concentración de radón cuando aumenta la velocidad del viento



Los resultados de efectividades de esta primera medida se resumen en la tabla siguiente que muestra las concentraciones iniciales, las obtenidas tras la inter-

vención y la reducción de radón conseguida por la medida correctora introducida. Esta reducción se expresa también en porcentaje sobre la inicial.

Tabla 3.3. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por las dos arquetas enterradas

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
01-Extracción natural por arquetas central y exterior	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92

3.2. Extracción natural por arqueta central

En lugar de extraer radón desde las dos arquetas, en esta medida la extracción se realizó únicamente por la arqueta central mediante tiro natural. De esta manera se estudió qué diferencias, en cuanto a efectividades, tiene la colocación de una o dos arquetas en el resultado final de concentración.

La efectividad se muestra en la tabla 3.4.

Se observó que no existía gran diferencia de efectividades comparando con la medida anterior, lo que indicaba que la arqueta central poseía una capacidad de reducción alta, y que la incorporación de otra arqueta (en este caso exterior) no mejoraba sustancialmente la efectividad de la medida.

Por otro lado, se observó también que la velocidad del viento influía positivamente en el incremento de efectividad del tiro natural.

Figura 3.14. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción natural por arqueta central

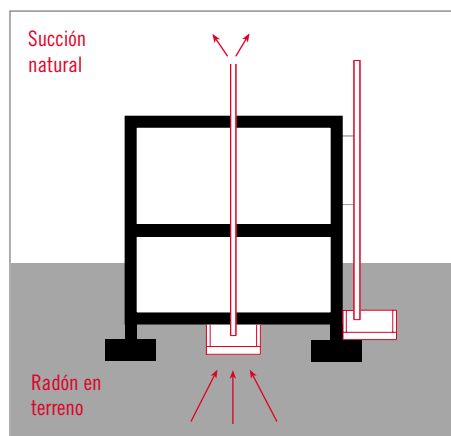


Tabla 3.4. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
02-Extracción natural por arqueta central	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92

3.3. Extracción natural por arqueta exterior

En este caso, se selló el tubo que conectaba la arqueta central y se abrió el de la exterior.

Este sistema manifestó menos efectividad que el que hacía uso de la arqueta central, alcanzando un porcentaje de reducción de 58 y 53% para sótano y planta 1 respectivamente, mientras que el que hace uso de la arqueta central había obtenido porcentajes de 96 y 91%. Este fenómeno pudo tener su explicación en la barrera que constituía la cimentación del módulo. La arqueta se encontraba enterrada por el exterior de la zapata corrida de cimentación y ésta, cercaba físicamente el espacio de terreno bajo él, generando una zona que se veía menos afectada por las succiones creadas por la arqueta. Esta situación pudo provocar que una mayor cantidad de radón penetrase en el interior del módulo en lugar de alcanzar la arqueta de captación.

Figura 3.15. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción natural por arqueta exterior

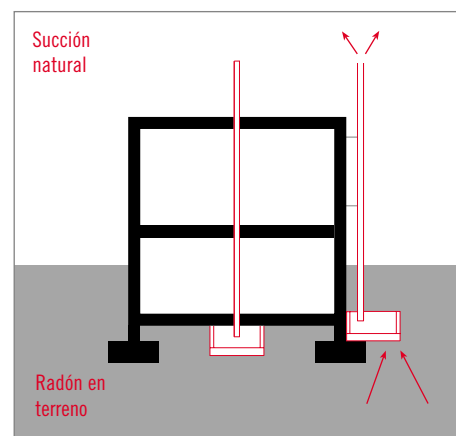


Tabla 3.5. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción natural por arqueta exterior

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
03-Extracción natural por arqueta exterior	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53

Por otro lado, y al igual que ocurre en las medidas anteriores, el viento juega un papel importante en la extracción de radón por arquetas de captación cuando funcionan por tiro natural. A mayor velocidad de viento mayor es la succión y por tanto mayor es la reducción en la concentración interior.

Figura 3.16. La figura muestra la barrera que constituye la cimentación en cuanto al área de succión de la arqueta

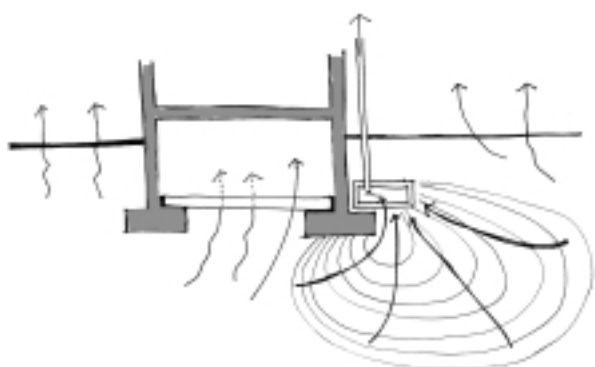


Figura 3.17. Tubo de extracción conectado a la arqueta exterior con un mecanismo de tiro pasivo conectado al extremo de expulsión



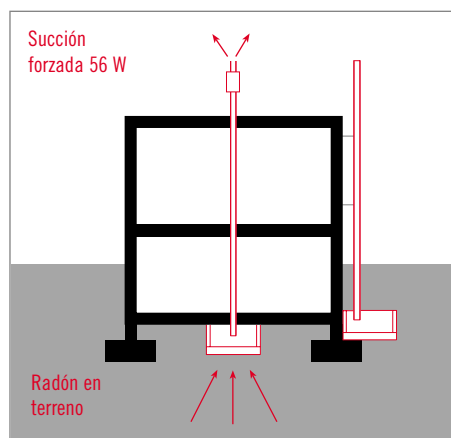
3.4. Retorno a la posición inicial sin medidas de protección

Con el fin de reproducir de nuevo las condiciones iniciales del módulo, se sellaron los tubos de evacuación para dejar el módulo sin ninguna medida de protección. Con ello se retornó a las concentraciones de radón iniciales para probar posteriormente los sistemas de extracción mecánica.

3.5. Extracción mecánica (56 W) por arqueta central

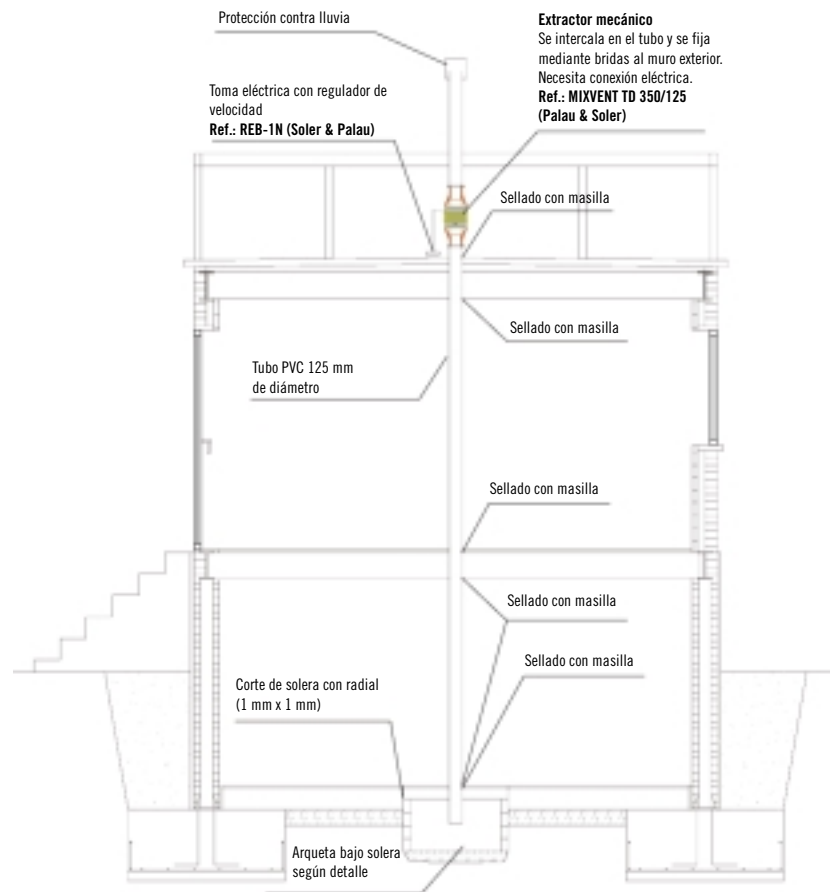
Ésta es una variante de la medida correctora n° 2 (extracción natural por arqueta central) en la que se forzó el tiro mediante un extractor mecánico de 56 W de potencia. Para ello se instaló un extractor mecánico de tipo helico-centrífugo en la boca de salida a cubierta. El diámetro de conexión era de 125 mm y generaba una depresión máxima en la arqueta central de 155 Pa, con una velocidad de 2.210 rpm, y un caudal de descarga libre de 360 m³/h.

Figura 3.18. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta central, con una potencia de 56 W



La figura siguiente muestra el diseño detallado de la medida correctora:

Figura 3.19. Sección constructiva donde figura la situación de los componentes del sistema de extracción



La efectividad que se consiguió se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.6. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (56 W) por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
05-Extracción forzada (56 W) por arqueta central	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95

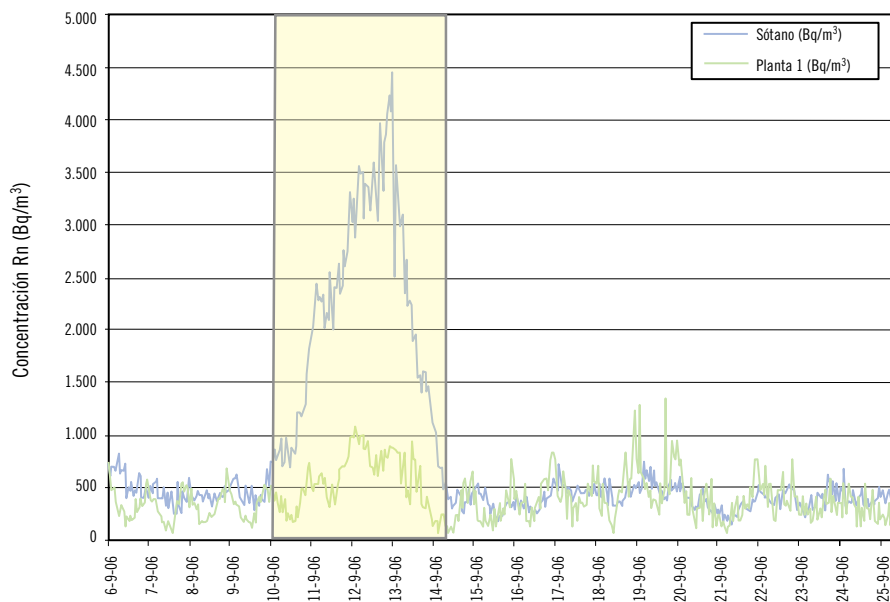
Los valores obtenidos se encuentran próximos a los 400 Bq/m³ lo que indica una alta efectividad teniendo en cuenta la situación de concentración de partida.

Un aspecto que queda patente en el análisis de las graficas, es la importancia que tiene el mantenimiento del extractor, ya que como se puede compro-

bar, en los días en los que se produjeron fallos en el suministro eléctrico, la concentración se elevó considerablemente.

Estos problemas, en los sistemas activos que necesitan energía, se pueden solucionar instalando alarmas que detecten un mal funcionamiento del ventilador.

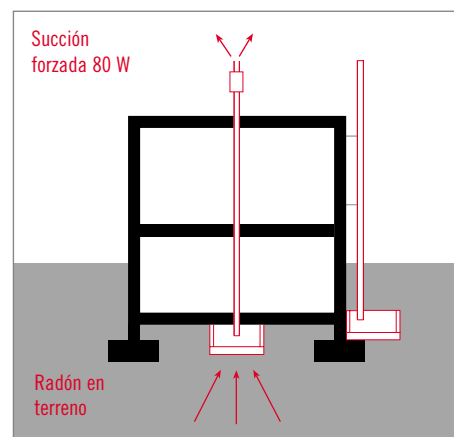
Figura 3.20. Se observa un aumento de niveles cuando falla el extractor debido a que el sistema actúa por tiro pasivo. En el momento en el que comienza de nuevo a funcionar, los niveles se reducen hasta oscilar en torno a 400 Bq/m³



3.6. Extracción mecánica (80 W) por arqueta central

La diferencia con la solución anterior estriba únicamente en la potencia del extractor mecánico que se instaló en el tubo de evacuación de la arqueta central. En este caso se colocó uno de mayor potencia (80 W), que genera una depresión máxima de 270 Pa, con una velocidad de 2.700 rpm, y un caudal de descarga libre de 907 m³/h. El objetivo era estudiar la influencia que tenía la potencia del extractor en la concentración de radón interior.

Figura 3.21. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta central, con una potencia de 80 W



Las efectividades conseguidas fueron las siguientes:

Tabla 3.7. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (80 W) por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
06-Extracción forzada (80 W) por arqueta central	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93

Se observó que las reducciones fueron similares a las obtenidas por la medida anterior en la que se hacía uso de un extractor menos potente, lo que indica que la potencia de 56 W es suficiente para la extracción en el caso concreto del módulo experimental y con las permeabilidades de terreno particulares de la zona. Sería necesario ampliar el estudio para analizar el alcance de extracción que tiene una potencia determinada para distintas permeabilidades de terreno.

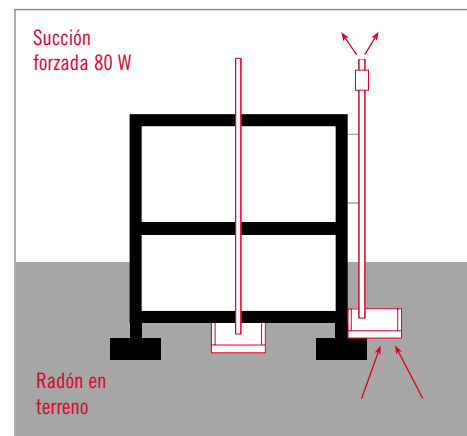
Por otro lado se observó que, en este tipo de medidas de extracción forzada en las que las succiones son mayores que en las de tiro natural, la concentración de radón interior se veía menos afectada por los cambios atmosféricos.

3.7. Extracción mecánica (80 W) por arqueta exterior

Se trasladó el extractor mecánico de 80 W a la salida del tubo que conectaba con la arqueta exterior. De

esta manera se pudieron comparar las efectividades en función de la ubicación de la arqueta.

Figura 3.22. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de extracción forzada por arqueta exterior, con una potencia de 80 W



Se obtuvieron los siguientes datos de efectividad que figuran en la tabla 3.8:

Tabla 3.8. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción forzada (80 W) por arqueta exterior

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción forzada								
07-Extracción forzada (80 W) por arqueta exterior	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

Se observaron efectividades bastante superiores a las que ofrecía la misma arqueta exterior por tiro natural (nº 3), que conseguía reducciones de 58 y 53% para la planta de sótano y planta 1 respectivamente, mientras que al instalarle el extractor aumentaron hasta los 99 y 93%.

En este caso concreto, la cimentación del módulo, que constituía una barrera para la extracción por arqueta exterior en tiro natural, no pareció influir en la efectividad cuando se hizo uso de un extractor, y obtuvo efectividades muy similares a las obtenidas por extracción forzada por arqueta central. Serviría, pues, para una actuación en el edificio existente con una intervención por el exterior.

3.8. Presurización por arqueta central mediante extractor (80 W) colocado en sentido inverso

En esta medida se invirtió el funcionamiento del extractor de la solución correctora nº 6 para que en lugar de extraer aire lo introdujese, creando así una sobrepresión alrededor de la arqueta que obligase al gas a recorrer otros caminos para alcanzar la atmósfera.

Figura 3.23. Bulbo de presiones positivas bajo el módulo generado al introducir aire desde el exterior

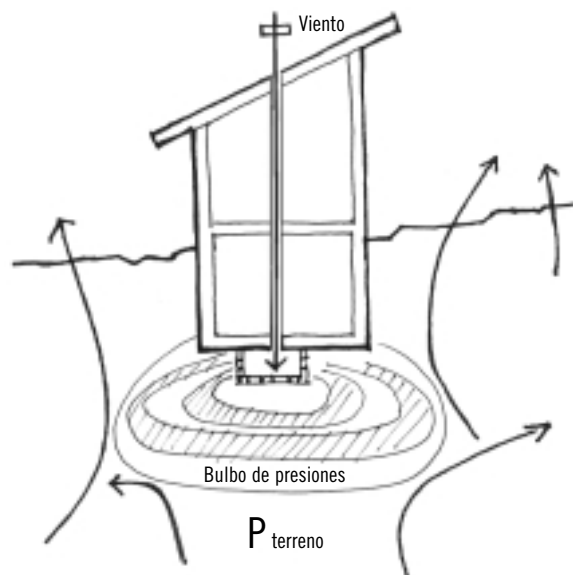
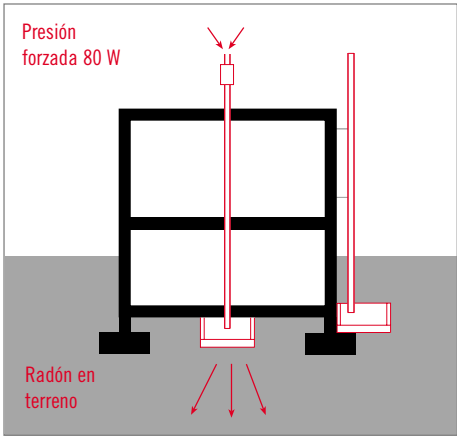


Figura 3.24. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de presurización por arqueta central con una potencia de 80 W



Se obtuvieron los siguientes datos de efectividad:

Tabla 3.9. Tabla de efectividades de reducción de la medida de presurización por arqueta central

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Presurización								
08-Presurización por arqueta central (80 W)	39.385	6.855	271	388	39.114	6.467	99	94

Se trata de una de las soluciones con mayor efectividad de las que se probaron, con una reducción de radón, en ambas plantas, inferior a los 400 Bq/m³, aunque similares a las conseguidas por las medidas de extracción forzada, tanto por arqueta central como por la exterior.

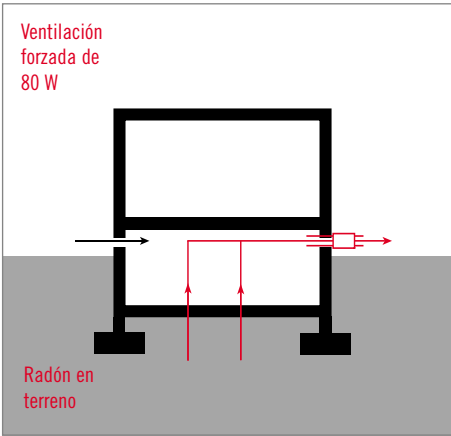
3.9. Ventilación cruzada por muros de sótano con extractor de 80 W

Un forjado sanitario se define como aquel elemento estructural de suelo que se eleva sobre el terreno y que

deja una cámara de aire bajo él. Esta práctica está muy extendida en el sector de la construcción ya que evita, entre otras cosas, humedades de capilaridad desde el terreno.

Para el caso de la protección frente al radón el uso de la cámara es idóneo si se considera como una gran arqueta de captación bajo el forjado de la planta más baja. Esta cámara actúa como un captador del gas que puede ser evacuado al exterior, bien usando tubos de conexión a cubierta, o bien practicando huecos en sus

Figura 3.25. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de ventilación forzada de forjado sanitario



muros para inducir una corriente que conduzca el radón hacia el exterior.

Para poder reproducir las condiciones de un forjado sanitario se utilizó el espacio de semisótano como la cámara bajo el forjado y únicamente la planta alta como espacio habitable.

En los muros opuestos de esta cámara simulada (semi-sótano) se practicaron dos huecos enfrentados para producir una ventilación de este espacio. En uno de ellos se instaló un extractor mecánico de 80 W con el fin de forzar la extracción, y en el otro una rejilla de inmisión de aire.

Se obtuvieron las siguientes efectividades:

Tabla 3.10. Tabla de efectividades de reducción de la medida de extracción por cámara de forjado sanitario (en este caso el espacio de semisótano)

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m³)		Reducción (Bq/m³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Ventilación sótano								
09-Ventilación del sótano forzada	39.385	6.855	10.072	307	29.313	6.548	74	96

El cuadro de efectividades muestra una reducción alta en la planta 1, la planta habitable, y una reducción mínima en la planta de sótano, en este caso considerada como la cámara de un forjado sanitario.

Estos datos resultan lógicos ya que, al generar una extracción en la cámara (semisótano), se está creando una ligera depresión en el interior y por tanto una succión del radón procedente del terreno. Este radón no llega a alcanzar la planta 1 ya que la misma extracción lo evacua hacia el exterior.

Sin embargo, este dato revela un aspecto de las medidas de extracción que debe tenerse en cuenta a la hora

de proponer soluciones correctoras en edificios. Se suele pensar que generando una ventilación en un espacio es posible eliminar el radón, y en principio es un pensamiento bastante lógico. Pero lo que suele suceder es que la extracción de aire de un espacio interior genere una ligera depresión en dicho espacio, por la insuficiente inmisión de aire exterior, y ello conlleve a una mayor succión de radón procedente del terreno que eleve los índices de concentración. Por tal motivo se recomienda estudiar las depresiones interiores en función de las superficies de expulsión e inmisión y de las potencias de extracción.

3.10. Barrera antiradón

Esta medida es de las consideradas pasivas al no usar ningún mecanismo que necesite energía. Esta solución hace uso de una barrera que frena el paso del radón al interior. Se usó una membrana constituida por una proyección en líquido que se aplicaba sobre toda la superficie de muros y solera que estaban en contacto con el terreno. Al tratarse de un módulo que simula un edificio construido, la proyección de la membrana se realizó por las caras interiores de la solera y muros.

El material de la membrana era poliuretano de dos componentes (poliol e isocianato) con una densidad de producto aplicado de 1.000 kg/m³. La mezcla de los dos componentes se producía en la boquilla de la máquina de proyección y en contacto con el aire, la mezcla catalizaba en pocos segundos adquiriendo consistencia sólida. El resultado final de la proyección era de una membrana elastomérica continua, con cierta flexibilidad, resistente al punzonamiento y a las tracciones. El espesor de la

membrana variaba entre 3 y 5 mm según los puntos de aplicación.

Al tratarse de un sistema de proyección, no existían juntas ni solapes, constituyendo el conjunto, un elemento-barrera que cubre la totalidad de la superficie de solera y muros de sótano.

El laboratorio de la Cátedra de Física Médica de la Universidad de Medicina de Cantabria realizó los análisis de permeabilidad del material frente al paso de radón con distintos espesores, utilizando el método de las dos cámaras separadas por el material de ensayo.

Los resultados realizados a láminas Urespray F-75, con diferentes espesores, son los siguientes:

Tabla 3.11. Coeficientes de permeabilidad de membranas Urespray F-75 con diferentes espesores

Producto	Espesor (m)	Permeabilidad (m ² /s)
F-75 1,5 mm	0,0015	5,53.10 ⁻¹²
F-75 2,0 mm	0,002	6,50.10 ⁻⁹
F-75 2,3 mm	0,0023	4,22.10 ⁻⁹
F-75 3,5 mm	0,0035	1,96.10 ⁻⁹

El módulo se proyectó con un espesor medio de 3 mm por lo que la permeabilidad se encuentra en torno a 1,96.10⁻⁹ m²/s.

La fotografía siguiente muestra el proceso de proyección del material sobre la superficie de los muros y la solera.

Figura 3.26. Esquema de funcionamiento de la medida correctora de barrera antiradón

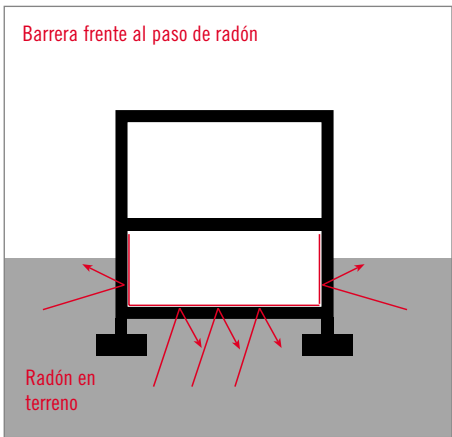


Figura 3.27. Fotografía durante el proceso de aplicación por proyección del material elastomérico



Los resultados de efectividades que se obtuvieron se muestran en la tabla 3.12.

Las efectividades fueron bastante altas, sobre todo para la planta 1, comparado con lo que se ha documentado en la literatura sobre efectividades para las medidas de barreras.

En este sentido se puede decir que, con una membrana de poliuretano de densidad 1.000 kg/m^3 aplicada en continuo se han conseguido efectividades similares a las de extracción natural por arqueta central para planta de sótano y se han mejorado para la planta 1. Es decir, de todas las medidas pasivas que se han probado, extracciones naturales por arquetas central y lateral, esta membrana ha conseguido el mejor resultado en la reducción de radón interior.

Tabla 3.12. Tabla de efectividades de reducción de la medida de barrera antiradón

Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m^3)		Concentración media tras la intervención (Bq/m^3)		Reducción (Bq/m^3)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Barrera antiradón								
10-Membrana de poliuretano en sótano	39.385	6.855	1.446	434	37.939	6.421	96	94

La alta efectividad que ha conseguido esta membrana, comparada con otros sistemas de barreras antiradón que se comercializan en otros países por aplicación en bandas, puede deberse a la ausencia de juntas y solapes, y al mejor sellado de puntos conflictivos (encuentros entre paramentos, encuentros con pilares, juntas de dilatación, fisuras en solera) que consigue una aplicación en continuo ya que, en cuanto a la permeabilidad del material, la membrana aplicada posee valores que indican que es más permeable que la mayoría de las membranas que se comercializan en otros países para estos fines.

Por otro lado, y comparando de nuevo con las otras medidas pasivas de extracción natural, en ésta no

existe dependencia de los vientos para conseguir altas efectividades. Se independiza en mayor grado de las condiciones atmosféricas.

Tal y como se ha desarrollado esta medida correctora, la aplicación conlleva a una actuación en toda la superficie del espacio interior que se quiera proteger. En este sentido, la viabilidad de aplicarse en viviendas construidas implicará un revestimiento posterior de la aplicación para protegerla del uso habitual del espacio. Es importante no dañar la membrana para mantener la efectividad.

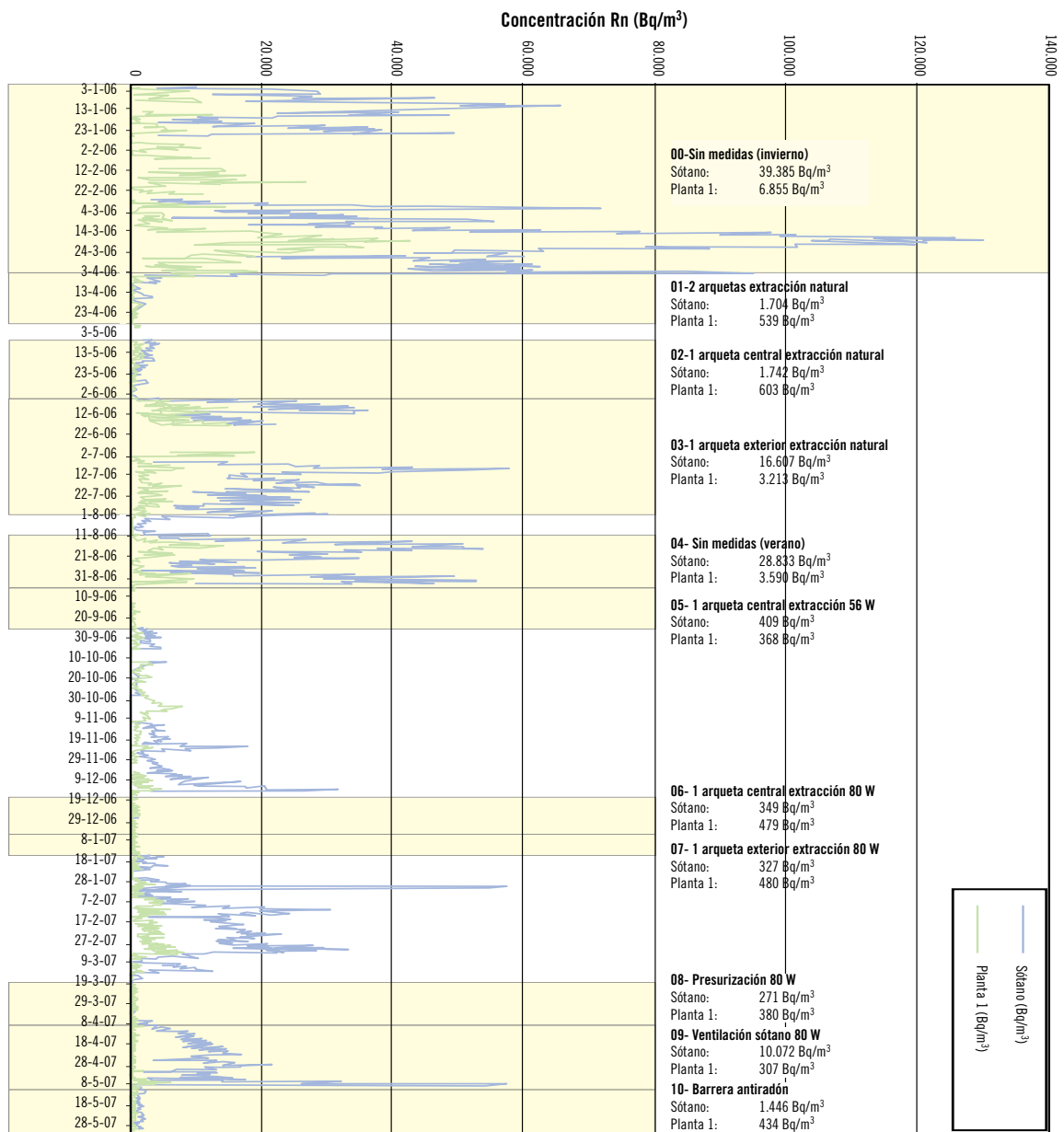
Si se tratase de actuar sobre una vivienda en fase de construcción, se podría realizar la aplicación por el ex-

terior de los muros de cerramiento de sótano. En ese caso habría que proteger la membrana mediante capas antipunzonamiento y antiraíces con el fin de evitar daños. En cuanto a realizar la aplicación sobre la superficie de terreno previa a la colocación de la solera, se debería estudiar la adherencia sobre el terreno. También puede ser necesario el vertido de un hormigón de limpieza como soporte de la membrana y la incorporación de capas separadoras que eviten el daño de la misma.

4. Análisis y resumen de efectividades

El siguiente gráfico muestra todo el periodo de registros con las fases de cada medida correctora y con los promedios de concentraciones de radón resultantes para cada planta. Los intervalos que no están marcados son periodos en los que los datos no son válidos para el cálculo, debido principalmente a fallos en el generador de suministro eléctrico.

Figura 3.28 Curvas de concentraciones de radón en cada una de las fases de prueba de las medidas correctoras



En el siguiente cuadro se muestran las reducciones de concentración de radón conseguidas por las distintas medidas de protección, expresadas tanto en Bq/m³

como en un porcentaje de reducción frente a las concentraciones iniciales.

Tabla 3.13 Tabla de efectividades de reducción de radón de cada solución correctora

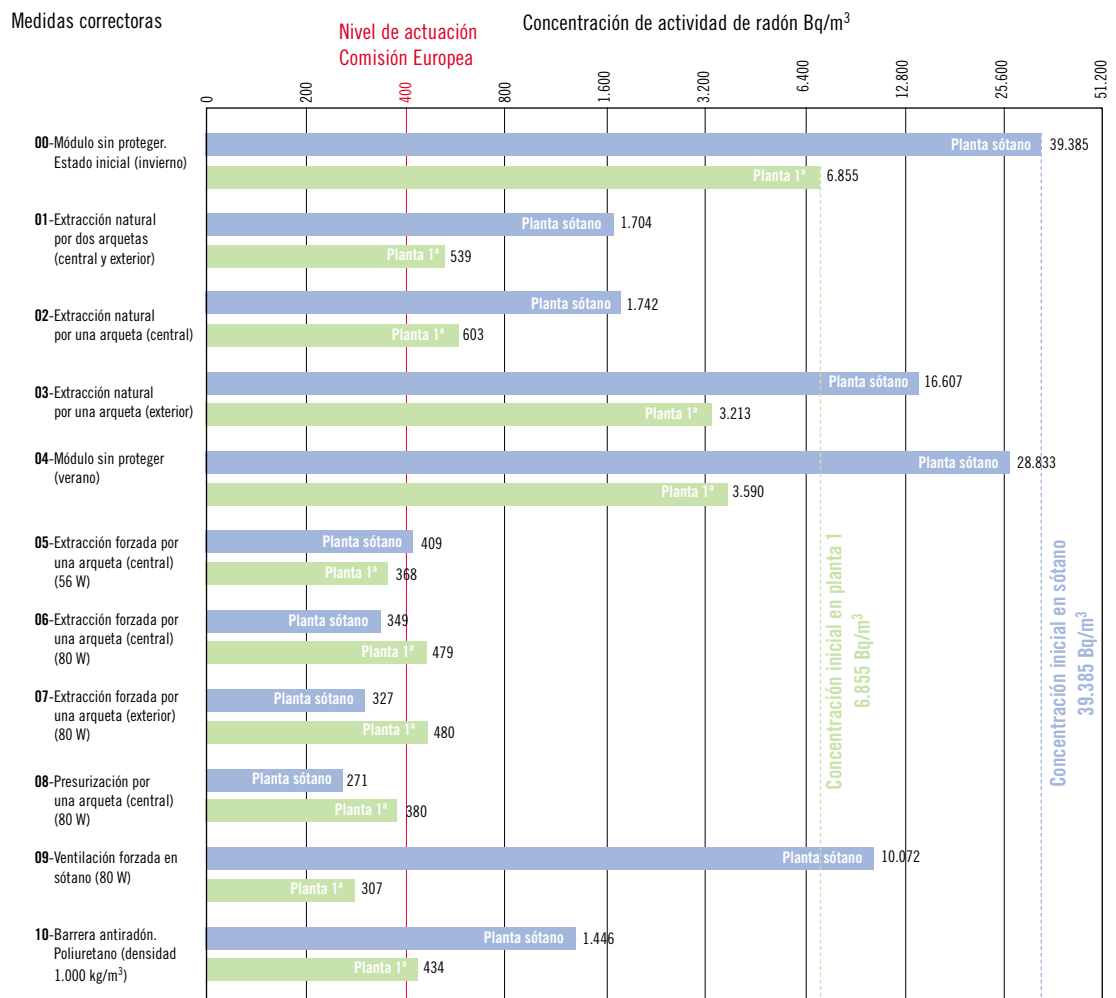
Medida correctora	Concentración media inicial (Bq/m ³)		Concentración media tras la intervención (Bq/m ³)		Reducción (Bq/m ³)		Reducción %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
Extracción natural								
01-Extracción natural por dos arquetas (central y exterior)	39.385	6.855	1.704	539	37.681	6.316	96	92
02-Extracción natural por una arqueta (central)	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
03-Extracción natural por una arqueta (exterior)	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
Extracción forzada								
05-Extracción forzada por una arqueta (central) (56 W)	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95
06-Extracción forzada por una arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
07-Extracción forzada por una arqueta (exterior) (80 W)	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93
Presurización								
08-Presurización por una arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	271	380	39.114	6.467	99	94
Ventilación forjado sanitario								
09-Ventilación forzada en sótano (80 W)	39.385	6.855	10.072	307	29.313	6.548	74	96
Barrera frente al radón								
10-Barrera antiradón. Poliuretano (densidad 1.000 kg/m ³)	39.385	6.855	1.446	434	37.939	6.421	96	94

En todas ellas, salvo en la medida nº 3 (extracción natural por arqueta exterior), se han conseguido efecti-
vidades superiores al 90%. Aunque no se ha podido
comprobar que exista una relación lineal en la aplica-
ción de este porcentaje a otras concentraciones dife-
rentes a las de partida en este proyecto, es de esperar
que, en situaciones habituales en las que no exista una
concentración de radón tan elevada (como ha sido el
caso del terreno de la mina de uranio), sí hubiera sido
posible conseguir reducciones de radón por debajo de

los 400 o 200 Bq/m³ en la mayoría de las soluciones
probadas.

Gráficamente se presenta el siguiente diagrama de ba-
rras con los promedios de concentración tras la inter-
vención en cada una de las medidas correctoras. La lí-
nea roja indica el nivel de concentración a partir del
cual se recomienda introducir una actuación de co-
rrección para viviendas existentes según la Comisión
Europea (400 Bq/m³)¹.

Figura 3.29. Diagrama de barras, en escala logarítmica, con las concentraciones finales conseguidas por cada una de las soluciones correctoras



¹ Recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom).

La línea azul y la verde son las concentraciones iniciales tanto en planta de sótano como en planta 1ª, respectivamente.

Las medidas que mayor efectividad consiguieron fueron aquellas que hicieron uso de extractores mecánicos para forzar los tiros de las arquetas captadoras, tanto para la central como para la colocada por el exterior. Dentro de esta categoría de máxima efectividad también se encuentran las soluciones de presurización por arquetas, y de ventilación forzada de cámara de forjado sanitario (sótano en este caso).

Pero también hay que decir que, para conseguir el rendimiento previsto en este tipo de soluciones, es necesario que el extractor se mantenga en funcionamiento continuo. Si dejase de funcionar, las concentraciones se elevarían sin ser detectadas hasta que se realizasen nuevas medidas. Por este motivo, es recomendable la instalación de un sistema de alarmas que detecte fallos eléctricos o mecánicos, y un programa de mantenimiento para garantizar su funcionamiento.

En cuanto a los sistemas de extracción por tiro natural, medidas de tipo pasivo al igual que la de barrera antiradón, se comprobó que la arqueta situada de forma centrada conforme a la planta tiene una capacidad de captación mayor que la colocada por el exterior. Este comportamiento viene explicado por el obstáculo que supone la cimentación perimetral para la extracción por la arqueta exterior y que conlleva a una peor cobertura del área de asiento del edificio.

También se pudo observar que la velocidad del viento influye positivamente en la reducción de radón en este tipo de soluciones de tiro natural. En el ejemplo de la medida correctora nº 2, extracción natural por arqueta central, la concentración de radón para el periodo completo fue de 1.742 Bq/m³ para la planta de sótano y de 603 Bq/m³ para la planta 1, mientras que en los días en los que se registraron vientos de 6 a 8 km/h, las concentraciones descendieron en ambas plantas por debajo de los 300 Bq/m³.

Como ya se ha indicado, este efecto está relacionado con la mayor succión que se produce en la arqueta de-

bido al efecto *venturi* que provoca la velocidad de viento en la boca del tubo de expulsión.

La incorporación de extractores en los tubos de las arquetas (medidas 6 y 7) también aumentó la succión y supuso un incremento de efectividades. En estos casos, las dos arquetas consiguieron reducciones muy similares, llegando al 99 y 93 % para el sótano y la planta 1ª, respectivamente.

- La mejora que supuso el extractor para la arqueta central:
 - (3 %) en sótano: (de 96 a 99 %).
 - (2 %) en planta 1ª: (de 91 a 93 %).
- Mejora que supuso el extractor para la arqueta exterior:
 - (41 %) en sótano: (de 58 a 99 %).
 - (40 %) en planta 1ª: (de 53 a 93 %).

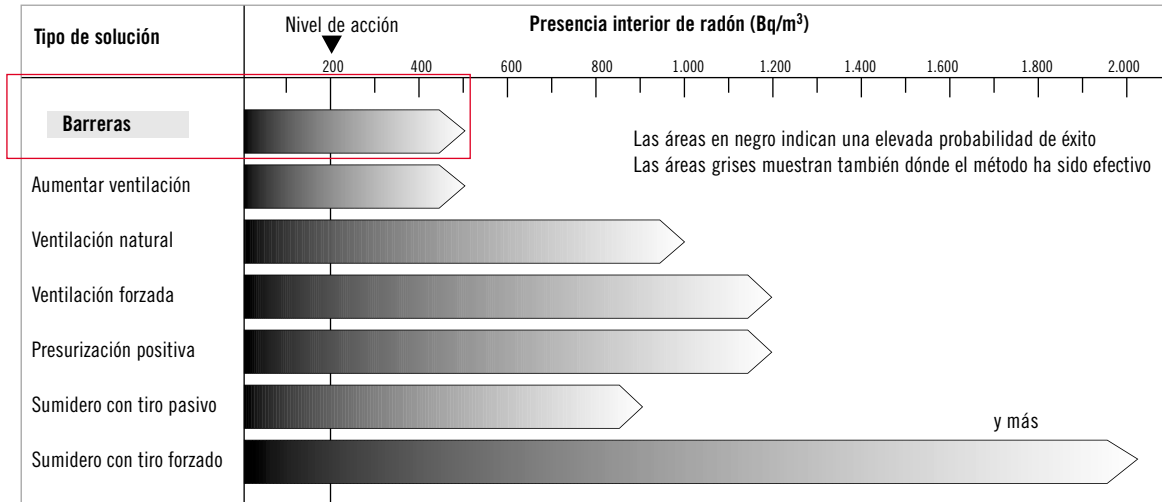
Como se puede apreciar, la mejora para la arqueta central, al colocar el extractor, fue únicamente de un 2-3 %, mientras que la misma actuación pero para la arqueta exterior supuso una mejora de un 40-41 %.

En cuanto a la medida de barrera antiradón, se consiguió una efectividad elevada en la planta 1ª, superando las previsiones que se tenían sobre la efectividad de este tipo de soluciones. Experiencias similares en otros países consideran esta propuesta como una medida pasiva, de efectividad media-baja, y únicamente recomendable para situaciones de baja concentración de radón (en torno a 500 Bq/m³) como muestra el siguiente cuadro del BRE.

Sin embargo, en nuestro caso con una concentración inicial en la planta 1ª del orden de 7.000 Bq/m³, se obtuvo una reducción cercana a la de los sistemas de extracción forzada, lo que la sitúa más próxima a la categoría de soluciones de efectividad media-alta.

El método de aplicación de esta barrera ha sido, posiblemente, el determinante del buen resultado que obtuvo el sistema en comparación con otras experiencias similares de barreras en otros países. En los documen-

Figura 3.30. Efectividades de medidas correctoras presentado por BRE (Building Research Establishment, Reino Unido)



tos consultados, las barreras se comercializan en rollos y su aplicación *in situ* requiere la realización de solapes entre las distintas bandas, para cubrir el área deseada. Además se venden piezas especiales para el remate y tratamiento de puntos conflictivos en los que se puedan producir fisuras en la barrera.

En el caso que se ensayó, con la aplicación de un sistema líquido por proyección, se eliminaron los solapes. Por otro lado, el sellado de puntos singulares quedó resuelto gracias a que, sus características de resistencias mecánicas y elongación, permitieron su uso en juntas y encuentros entre paramentos.

CONCLUSIONES Y
PERSPECTIVAS FUTURAS



4

Atendiendo a las advertencias de entidades como la Organización Mundial de la Salud¹, o la propia Comunidad Europea en su Recomendación de 21 de febrero de 1990 (90/143/Euratom), la inhalación de gas radón constituye un riesgo para la salud al estar vinculado a la generación de cáncer pulmonar. En este sentido, el sector de la edificación debe plantear sistemas de protección que garanticen que, la inmisión del gas al interior de los espacios habitados, no supere los niveles de concentración recomendados.

De las investigaciones desarrolladas, en cuanto a la capacidad que presentan las distintas medidas correctoras para atenuar la inmisión de radón, se han obtenido resultados que permiten abordar aspectos de prevención, materializados en actuaciones arquitectónicas que pueden ayudar como documentación técnica acompañando al desarrollo de la normativa de edificación correspondiente.

En términos generales, y teniendo en cuenta que se ha realizado el prototipo de edificio en un terreno con altos contenidos de radón, todas las medidas han dado como resultado descensos de la concentración, siendo de notable efectividad las de tiro forzado, la solución de presurización y la de ventilación de cámara de forjado sanitario (sótano en este caso). La solución, consistente en la incorporación de una barrera elastomérica, junto con la técnica de extracción natural por arqueta central, fueron los sistemas pasivos que obtuvieron resultados significativos aunque por debajo de los sistemas activos (extracciones forzadas y presurizaciones). La medida de arqueta exterior funcionando por tiro natural fue de eficacia reducida por lo que

sólo se aconsejaría su uso forzando el tiro con extractor mecánico, con lo que pasaría a formar parte de las medidas activas.

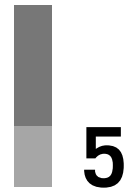
Por otra parte, parece necesario profundizar en el estudio de este tipo de actuaciones, ya que en la práctica se pueden presentar situaciones en las que sería aventurado extrapolar los resultados de esta investigación por cuanto quedan aspectos que convendría abordar en un futuro inmediato, como por ejemplo:

- Radio de efectividad de las medidas de extracción por arquetas enterradas, tanto por tiro natural como forzado, contando con distintas porosidades del terreno.
- Diámetro de la tubería de extracción en función del número de arquetas al que dé servicio.
- Posibilidades de actuación por sistemas de ventilación-drenaje.
- Control de la depresión interior en los locales para evitar que los sistemas de ventilación no provoquen succiones de radón.
- Estudio de los espesores óptimos de membranas.

A modo de epílogo cabe decir que el contenido de este documento representa un acercamiento de la aplicación de las soluciones constructivas a una tipología edificatoria cercana a la construcción habitual en el área mediterránea, con técnicas y materiales convencionales.

¹ WHO, *Handbook on Indoor Radon. A public health perspective*. World Health Organization. 2009.

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS



ALLEN, L.; ROBINSON RICHARD, G.; SEXTRO and WILLIAM J. RILEY. "Soil-gas entry into houses driven by atmospheric pressure fluctuations-the influence of soil properties". *Atmospheric Environment* vol. 31, no. 10, pp. 1487-1495. 1997.

BARROS-DIOS, J. M.; RUANO-RAVINA, A.; CONDE RODRÍGUEZ, M.; CERDEIRA-CARAMÉS, S. "Residential radon and lung cancer". *Epidemiology*. Vol. 20 no. 1. 2009.

CHEN, C.-J.; WENG, P.-S., and CHU, T.-C. "Radon exhalation rate from various building materials". *Health Phys.* 64:613-619. 1993.

CLAVENSJÖN, BERTIL y AKERTBLOM, GUSTAV. *The Radon Book. Measures against radon*. The Swedish Council for Building Research. Suecia 1994.

COLLIGNAN, BERNARD. *Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants*. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTB) Francia 1999.

Comisión de las Comunidades Europeas. Recomendación de la Comisión de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios (90/143/Euratom). DOCE, L80, 26-28.

Comisión de las Comunidades Europeas. Recomendación 2001/928/Euratom de la Comisión, de 20 de diciembre de 2001, relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable – DO L 344 de 28.12.2001, p. 85.

DARBY, S.; HILL, D.; DEO, H. *et al.* "Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe, Scand". *J. Work Environ. Health* 32 (suppl. 1): 1-84 (2006).

Environmental Protection Agency (EPA). *Assessment of Risks from Radon in Homes*. EEUU 2003.

Environmental Protection Agency (EPA). *Building Radon Out*. EEUU 2001.

FONT, LLUIS; BAIXERAS, C.; JÖNSSON, G.; ENGE, W.; GHOSE, R. "Application of a radon model to explain indoor radon levels in a swedish house". *Radiation measurements* 31 pag 359-362. 1999.

Health effects of exposure to radon (BEIR VI- Committee on Health Risks of Exposure to Radon) National Research Council (1999). EEUU.

HINTENLANG, D. E.; AL-AHMADY, K. K. "Pressure differentials for radon entry coupled to periodic atmospheric pressure variations". *Indoor Air*, Volume 2, Number 4, pp. 208-215(8). December 1992.

ICRP (International Commission on Radiological Protection). "Protection against radon-222 at home and at work". ICRP Publication 65. Annals of ICRP. 23 (2). Pergamon Press, Oxford, 1993.

JIRÁNEK, M.; NEZNA, L. M. "Mitigation of ineffective measures against radon". *Radiation Protection Dosimetry* (2008). Vol. 130, N° 1, pp. 68-71.

NAISMITH, S. P. "The influence of House Characteristics on the effectiveness of Radon Remedial Measures". *Health Physics* Vol 75, N° 4. 1998.

NEZNAL, M. *et al.* (2004): "The new method for assessing the radon risk of building sites". *Czech. Geol. Survey Special Papers*, 47 p., CGS Prague.

Notas Técnicas de Prevención (NTP 440: Radón en ambientes interiores) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

Notas Técnicas de Prevención (NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

QUINDÓS PONCELA, L. S. *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear. 1995.

QUINDÓS, L. S.; FERNÁNDEZ, P. L.; GÓMEZ, J.; SAINZ, C.; FERNÁNDEZ, J. A.; SUAREZ, E.; MATARRANZ, J. L.; CASCÓN, M. C. "Natural gamma radiation map

(Marna) and indoor radon levels in Spain”. *Environment International* 29, 1091-1096. 2004.

ROSERENS, G. A.; JOHNER, H. U.; PILLER, G.; IMBAUMGARTEN, P. *Swiss radon handbook. Swiss Federal Office of Public Health*. Radiological Protection Division. Berna 2000.

SCIVYER, CHRIS. MCIOB. “Radon guidance on protective measures for new buildings”. *BRE Guides* (Build-

ding Research Establishment). ISBN 978-1-84806-013-5. Reino Unido 2007.

VARGAS DRECHSLER, A. y ORTEGA ARAMBURU, X. *Calidad metrológica y dosimetría del radón*. Colección Documentos I+D 12.2004. CSN.

WHO, *Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*. World Health Organization. 2009.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
SUMARIO	7
1. EL RADÓN Y SU PROBLEMÁTICA EN ESPACIOS HABITADOS	9
1. Medida de la concentración de radón	10
2. Fuentes de radón	11
2.1. Terreno	11
2.2. Agua	11
2.3. Materiales de construcción	11
3. Movilidad del radón	12
4. Penetración y acumulación del radón en espacios habitados	13
2. APROXIMACIÓN A UNA PROPUESTA NORMATIVA EN ESPAÑA PARA VIVIENDAS NUEVAS ..	17
1. La salubridad en el Código Técnico de Edificios	18
2. Recomendaciones de niveles de concentración de radón	18
3. La actuación en la edificación	19
4. Posibles medidas de protección en función de la categoría de exposición al radón	21
5. Consideraciones particulares sobre la ejecución y diseño de las soluciones de protección. Tratamiento de puntos conflictivos	28
5.1. Tipos de barreras antiradón y materiales empleados	28
5.2. Sobre la ejecución de la barrera	30
5.3. Tratamiento de juntas de estructura, soleras y forjados	30
5.4. Paso de conductos a través de la barrera	31
5.5. Refuerzos en barreras	31
5.6. Fisuras en solera	32
5.7. Puntos de captación en sistemas extracción	33
5.8. Situación de los puntos de captación	34
5.9. Sobre la ventilación de una vivienda	35
3. LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA EN LAS SOLUCIONES CONTRA LA INMISIÓN DE RADÓN ...	37
1. Planteamiento de un proyecto experimental	38
1.1. Elección de la ubicación	38
1.2. Diseño y construcción de un módulo representativo de una edificación habitual en España	40
1.3. Dispositivos de medición empleados	43

2. Análisis de la inmisión de radón en el módulo sin protección.	44
2.1. Influencia de las presiones atmosféricas.	45
2.2. Influencia de los vientos	46
2.3. Influencia de las temperaturas	46
2.4. Influencia de las precipitaciones.	46
3. Resultado de efectividades de distintas medidas correctoras.	47
3.1. Extracción natural por arqueta central y lateral	48
3.2. Extracción natural por arqueta central	52
3.3. Extracción natural por arqueta exterior.	53
3.4. Retorno a la posición inicial sin medidas de protección	54
3.5. Extracción mecánica (56 W) por arqueta central	54
3.6. Extracción mecánica (80 W) por arqueta central	56
3.7. Extracción mecánica (80 W) por arqueta exterior	57
3.8. Presurización por arqueta central mediante extractor (80 W) colocado en sentido inverso	58
3.9. Ventilación cruzada por muros de sótano con extractor de 80 W	59
3.10. Barrera antiradón	61
4. Análisis y resumen de efectividades.	63
4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.	69
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios

Colección Informes Técnicos
24.2010

