



Ricardo Pol Sánchez

escola superior  gallaecia

MESTRADO INTEGRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

escola superior  gallaecia

Mestrado Integrado em Arquitetura e Urbanismo  
Vila Nova de Cerveira, Julho de 2017

# Forma e Radão

Estudo dos efeitos da implantação das construções no terreno,  
na concentração de gás radão interior.

Ricardo Pol Sánchez

FORMA E RADÃO

Julho 2017



## MESTRADO INTEGRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

### **Forma e Radão**

Estudo dos efeitos da implantação das construções no terreno,  
na concentração de gás radão interior.

*Autor: Ricardo Pol Sánchez*

*Orientadoras: Dra. Mónica Alcindor y a la Dra. Goreti Sousa*

Vila Nova de Cerveira, Julho de 2017

Portada - **Fotografía del autor, tomada en Agosto de 2015, puerto fenicio de Estaca de Bares (A Coruña).** Se pueden apreciar las formaciones graníticas meteorizadas características del macizo Galaico y fuente natural de gas Radón.

Si desea más información acerca del radón y sus efectos o de las soluciones arquitectónicas de mitigación, puede escribir a [ceo@interface.es](mailto:ceo@interface.es).  
Impreso en A Coruña a 30 de Septiembre de 2017. © Ricardo Pol Sánchez







A mí padre Manuel Pol Montaña, piloto de caza,  
que me enseñó a mirar detrás del horizonte y  
que por unos días no pudo ver concluido este  
trabajo.



## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Toñi San Martín y a la Dra. Celeste Natarío, por su incondicional amistad, apoyo y colaboración en la revisión de los textos.

A la Dra. Mónica Alcindor y a la Dra. Goreti Sousa cuya permanente disposición e infatigable capacidad de corrección, supusieron una inestimable aportación a esta obra.

Al Profesor Dr. Luis Quindós Poncela y su equipo, por su asesoramiento y desinteresada colaboración que ha permitido el desarrollo de esta experimentación.

A la ESG y sus fundadores Profesora Delmira Correia y Profesor João Correia que lo hicieron posible.



## RESUMO

A inalação de gás rádón (ou radão, ou radónio) acumulado no interior de espaços fechados é um fator de risco para o cancro do pulmão. Segundo a Organização Mundial de Saúde, o rádón é a segunda principal causa de morte por cancro do pulmão, logo a seguir ao tabaco.

Os organismos governamentais produziram mapas de previsão da concentração de radão, que determinam a prevalência de uma determinada área para alcançar altas concentrações de rádón, estabelecendo regras que exigem a intervenção arquitetónica em prédios que excedem os níveis de referência, que em Espanha são de 300 bq/m<sup>3</sup> para os espaços de trabalho.

Este estudo investiga, pela experimentação de três modelos à escala, a influência que o projeto arquitetónico tem na acumulação de gás radão no interior das construções. O trabalho está dividido em quatro capítulos, em que a metodologia da pesquisa, a execução da experiência e os resultados obtidos são explicados, concluindo-se que o projeto de construção é um fator determinante no comportamento do radão e, por isso, os arquitetos devem considerar este aspeto na concepção de soluções construtivas de mitigação dos riscos.

A área geográfica em que a pesquisa foi conduzida é a Comunidade Autónoma da Galiza (Espanha), por se considerar ser esta uma das áreas de maior probabilidade de exposição ao radão na União Europeia.

Nas conclusões do estudo, apresentam-se algumas recomendações, a ter em conta pelos arquitectos, para um projeto eficiente de construções resistentes ao radão.

Palavras-chave: rádón (ou radão, ou radónio), radiação ionizante, cancro, qualidade do ar, arquitetura ecológica.

## ABSTRACT

One of the risk factors related to lung cancer is the inhalation of accumulated radon gas inside enclosed spaces. According to the World Health Organization, radon gas is the second leading cause of death from lung cancer behind tobacco.

Government agencies elaborate predictive maps of radon concentration that allow to determine the prevalence of a determined zone to reach the high concentrations of radon gas. Thus, they are able to establish norms that force (or recommend) to the architectonic intervention in those constructions that surpass the reference levels. Note that in Spain that reference levels are of 300 bq/ m<sup>3</sup> for the workspaces.

In this study, based on the experimentation of three models by scale, the influence that architectural design has on the accumulation of radon gas inside constructions, is investigated. The paper is structured in four chapters that explain the research methodology, the execution of the experiment and the results obtained, concluding that the design of the settlement of the construction is determinant in the behavior of the radon gas and therefore the architects must contemplate this aspect in the design of the constructive mitigation solutions.

Galicia (Spain) has been the geographical area in which this research was carried out. The reason why this area has been chosen is because it is actually of one of the most likely areas of exposure to radon gas in the European Union.

In the conclusions, I develop a list of recommendations to take into account by the architects for the efficient design of the constructions resistant to radon gas.

Key words: Radon gas, ionizing radiation, cancer, air quality, green architecture.

## RESUMEN

La inhalación de gas radón acumulado en el interior de espacios cerrados constituye un factor de riesgo de cáncer pulmonar. Según la Organización Mundial de la Salud, el radón es la segunda causa de defunción por cáncer pulmonar detrás del tabaco.

Las administraciones elaboran mapas predictivos de concentración de radón, que permiten determinar la prevalencia de una zona determinada a alcanzar altas concentraciones de radón, estableciendo normativas que obligan o recomiendan la intervención arquitectónica en las construcciones que superen los niveles de referencia, que en España es de 300 bq/m<sup>3</sup> para los espacios de trabajo.

En este estudio se investiga, mediante la experimentación de tres modelos a escala, la influencia que el diseño arquitectónico tiene en la acumulación de gas radón en su interior. El documento se estructura en cuatro capítulos en los que se explica la metodología de investigación, la ejecución del experimento y los resultados obtenidos, concluyendo que el diseño del asentamiento de la construcción resulta determinante en el comportamiento del radón y por lo tanto los arquitectos deben contemplar este aspecto en el diseño de las soluciones constructivas de mitigación.

El área geográfica en la que se ha realizado la investigación es la Comunidad Autónoma de Galicia (España), por tratarse de una de las áreas de mayor probabilidad de exposición al radón de la Unión Europea.

En las conclusiones se realizan una serie de Recomendaciones a tener en cuenta por los arquitectos para el diseño eficiente de construcciones resistentes al radón.

Palabras clave: Radón, radiación ionizante, cáncer, calidad del aire, arquitectura ecológica.



# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 Acotación del ámbito del estudio y justificación de la problemática	9
1.2 Objetivos	21
1.3 Metodología de investigación	22
1.4 Estructuración del trabajo	26

## CAPÍTULO 2

2.1 MARCO TEÓRICO	31
2.1.1 Radón en interiores y sus consecuencias para la salud	33
2.1.2 Factores que influyen en la concentración del gas radón	54
2.1.3 Soluciones constructivas a la acumulación de gas radón	60
2.1.4 Marco legal	64
2.1.5 Caracterización de la tipología edificatoria objeto de estudio	71
2.2 ESTADO DEL ARTE	77
2.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	89

## CAPÍTULO 3

3 EXPERIMENTO	89
3.1 Elección del territorio y de la ubicación del experimento	91
3.2 Elementos de registro y metodología de la medida.	108
3.3 Tratamiento de la información y resultados por modelo.	111

## CAPÍTULO 4

4.1 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS Y CONCLUSIONES	121
4.1 Análisis de los datos ambientales recogidos durante el experimento.	124
4.2 Análisis de los datos procedentes de los modelos ensayados.	138
4.3 Conclusiones finales sobre la forma en el diseño en las construcciones.	131
4.4 Recomendaciones Técnicas.	134
4.5 Propuestas de nuevas líneas de investigación.	143

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ANEXOS





# INTRODUCCIÓN

Anverso Fig. 1 -  
**Pallozas de Os Anca-**  
**res, Lugo.**

*Fuente: Pedro de Lla-*  
*no, (1989). p. 219.*

# 1 . INTRODUCCIÓN

## 1.1. Acotación del ámbito del estudio y justificación de la problemática

La arquitectura desempeña un papel fundamental en la construcción del hábitat, mediante la transformación del entorno para adecuarlo a las necesidades del ser humano. Es el arte de conformar el espacio, de crear formas que corresponden a una fase de la evolución intelectual y material. Cada vez de forma más consciente y responsable, se constituye en un elemento esencial en el proceso de cambio hacia un mundo más sostenible y humanizado. Es, pues, deber ético del arquitecto y misión de la arquitectura ecológica, crear entornos de bienestar y salubridad, y es este proceso de humanización del medio, que constituye el hecho arquitectónico, donde el confort aparece como un elemento esencial (Neila, 2004) a tener en cuenta por el arquitecto a la hora de proyectar un espacio para habitar.

“Hacer más humana la arquitectura significa hacer mejor arquitectura y conseguir un funcionalismo mucho más amplio que el puramente técnico“(Aalto, 1940, p.47).

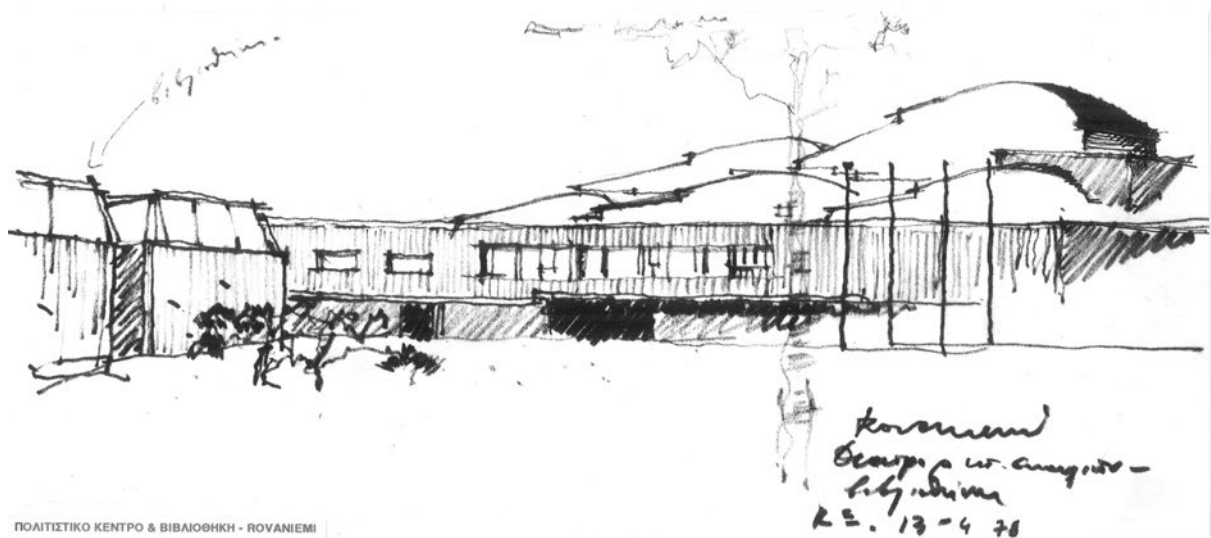


Fig. 2 - Croquis original de Alvar Aalto para el centro administrativo de Rovaniemi, 1968.

Fuente: Web oficial del ayuntamiento de Rovaniemi. [www.vi-sitrovaniemi.fi](http://www.vi-sitrovaniemi.fi)

De acuerdo con esta definición el confort arquitectónico debe entenderse desde la más amplia concepción del mismo, que persigue no sólo crear las condiciones idóneas de iluminación, temperatura, humedad; sino que además debe proporcionar placer y bienestar a los sentidos.

Para Le Corbusier (1975, p.101), “la arquitectura es el juego sabio, correcto y magnífico de los volúmenes bajo la luz”, también es el resultado de un conjunto de variables, unas captadas mediante los órganos sensoriales, otras no y todas ellas de una u otra forma no solo afectan al confort, sino también a la salud de sus habitantes.

En el hecho arquitectónico cobra todo su sentido un elemento fundamental, el bienestar, que requiere que el entorno reúna las condiciones idóneas para garantizar el confort y la salud de sus habitantes.

Se torna pues función primordial del arquitecto, la planificación, el diseño de ese hábitat y la interpretación de nuestras necesidades para plasmarlas en un espacio y en una forma. Es en esta comprensión de la evolución intelectual de la naturaleza humana donde se revela la gran necesidad de la conformación del espacio, transformándolo en símbolo, emblema, arte..., estudiar la relación entre el

individuo y su hábitat; conocer los factores que puedan incidir tanto en el confort como en la salud de los habitantes, hace que la arquitectura adquiera un papel fundamental para encontrar soluciones, muchas de ellas innovadoras que puedan contribuir a la mejora de la calidad de vida.

Es necesario comprender y determinar los cambios ambientales que actúan en ese proceso de búsqueda de bienestar, a través del confort. A medida que se avanza en el conocimiento de la ecología humana se hace más necesario establecer el papel de la arquitectura en todos estos procesos y relacionarla con otras disciplinas hasta ahora ignotas en el fenómeno arquitectónico. Este proceso implica, una aproximación a otras ramas del conocimiento, para entender el papel del arquitecto como agente dinamizador de soluciones ambientales y su relación en una sociedad cada vez más sostenible.

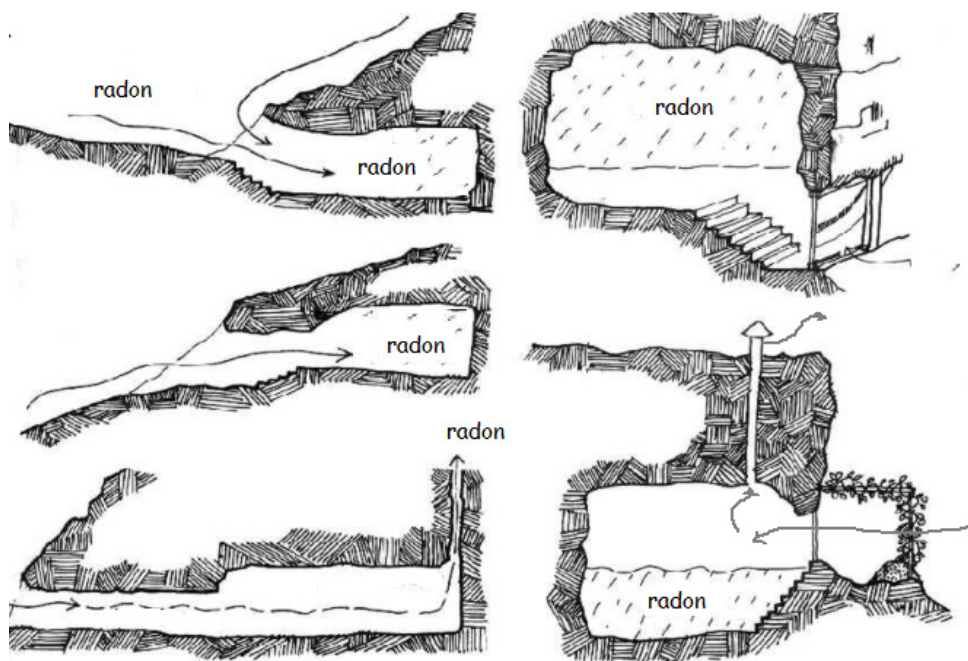
Si bien estudios de autores como Javier Neila (2004), reducen el bienestar global de un espacio cerrado al sumatorio de factores tales como el índice de Bienestar Lumínico, el índice de Bienestar Acústico, el índice de Bienestar Hígro-Térmico y el índice de Bienestar Olfativo.

La relación del hombre con el entorno es básicamente una relación de intercambio de energía (temperatura, humedad) debidos en gran parte a que el cuerpo humano tiende a mantener unas condiciones interiores estables frente a un entorno cambiante. Esta estabilidad de las condiciones interiores, fenómeno conocido como homeostasis, comporta toda una serie de sofisticaciones en la estructura del cuerpo humano, como la existencia de órganos específicos que actúan como reguladores de la relación interior-exterior, que llamamos mecanismos homeostáticos. Su misión es regular la respuesta del cuerpo frente al stress ambiental, que puede tener origen climático, lumínico, acústico y, en términos más generales, psíquico (Neila, 2004).

Existen también otros factores que no son captados por los órganos sensoriales de forma explícita, dificultando la activación de los mecanismos homeostáticos y que por ello pueden tener consecuencias negativas al no generar ningún tipo de respuesta defensiva.

Un factor determinante del bienestar y la salubridad es la calidad del aire. Pueden existir en el aire componentes no deseados (contaminación) tales como partículas procedentes de humos de combustión, gases procedentes de fugas o de emanaciones naturales del terreno, que al acumularse en los espacios cerrados pueden llegar a adquirir concentraciones nocivas para la salud.

Uno de estos elementos contaminantes, de origen natural, es un gas radiactivo denominado Radón. Este gas es altamente nocivo para la salud hasta el punto que ha llegado a denominarse el “asesino silencioso”, tiende a acumularse en el interior de cuevas y recintos cerrados.



**Fig. 3 - Diferentes situaciones de acumulación de gas radón en recintos subterráneos.**

*Fuente: Infografía del autor basada en Barros-Dios. (2012).*

En los últimos años se ha desarrollado una creciente preocupación entre las autoridades y población en general de Galicia y norte de Portugal, debido a la presencia de radón en edificios y viviendas,

por la incidencia negativa, que la exposición a este gas puede tener en la salud de sus habitantes.

Este problema se ha visto agravado por la introducción de nuevas técnicas constructivas. El diseño de edificios cada vez más herméticos y equipados con sistemas de ventilación y aire acondicionado, tienden a disminuir la ventilación natural en beneficio de la eficiencia energética, lo que conlleva en muchos casos una situación que favorece la acumulación de alérgenos y patógenos que perjudican la salud.

Para valorar la calidad del aire inhalado es necesario analizar la composición del mismo, pues solamente una parte de los elementos nocivos presentes en el aire son detectados de forma evidente por los sentidos. Este es el caso del radón, un contaminante cancerígeno no detectable organoelectricamente y que constituye un problema de salud pública.

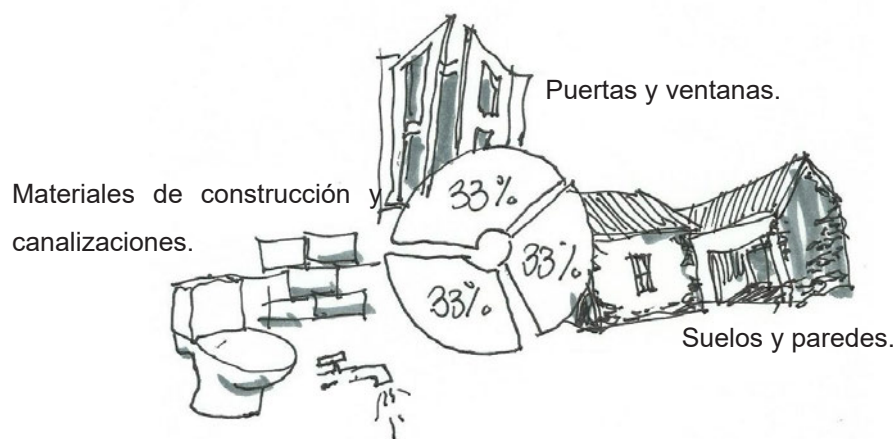


Fig. 4 - Vías de infiltración del radón.

Fuente: Infografía del autor.

Según los expertos Barros-Dios (2012) y Quindós (2015), no existen dudas de que la acumulación de gas radón en el interior de los edificios tiene una negativa incidencia en la salud, es ahí donde el arquitecto tiene un papel fundamental, en el diseño y rehabilitación de las edificaciones, para mitigar los negativos efectos producidos por la concentración de dicho gas.

La conexión entre la calidad del aire de una edificación y la aparición de molestias y síntomas en sus habitantes, es una realidad científicamente probada. La deficiente calidad del aire interior es un factor determinante en el deterioro de la salud de los usuarios. Resulta crucial, realizar una correcta identificación de los elementos contaminantes presentes en el aire, para garantizar la salubridad de los edificios

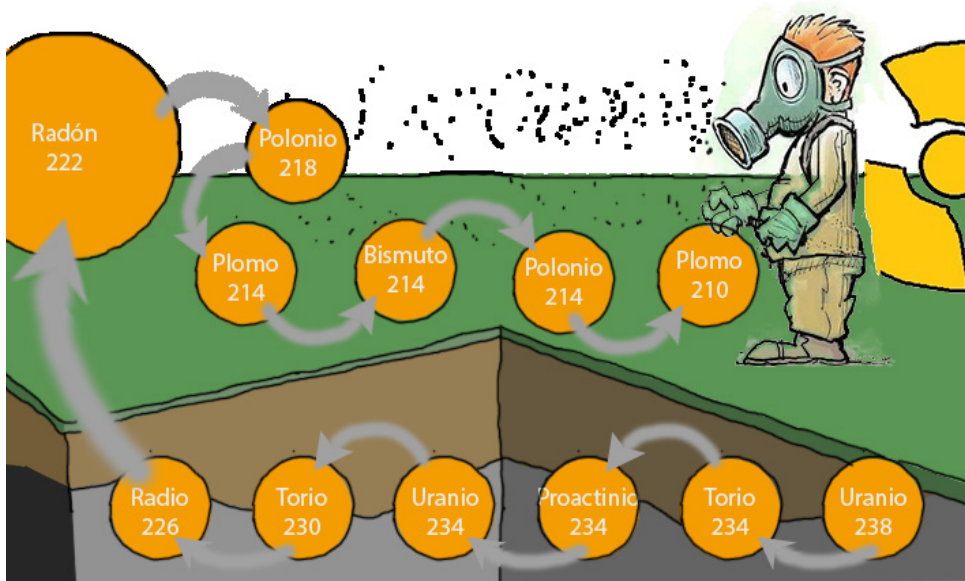


Fig. 5 - Cadena de desintegración del radón.  
Fuente: Infografía del autor.

Uno de estos elementos contaminantes es el radón ( $Rn222$ ), un gas noble que se caracteriza por ser incoloro, inodoro, insípido e invisible; es un gas soluble en agua y otros líquidos y más denso que el aire. Su vida media o período de desintegración es de 3.8 días y sus descendientes son metales pesados como el polonio ( $Po214$  y  $Po218$ ), el bismuto ( $Bi214$ ) y el plomo ( $Pb210$ ). En el proceso de desintegración se emiten partículas radiactivas  $\alpha$  (dos protones y dos neutrones).

Este gas radiactivo, constituye un riesgo para la salud cuando penetra en el organismo humano a través de heridas o si se ingiere o inhala, de ahí la trascendencia para la salud pública del papel del radón domiciliario, ya que es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población en general, después del tabaco (Barros-Dios, 2002) y (Sarah & David, 2003).

## El caso de Galicia

En Galicia se ha estimado que se produce una muerte diaria por cáncer pulmonar a consecuencia de la exposición a radón residencial (Pérez-Ríos et al. 2010).

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Santiago de Compostela bajo la dirección del profesor Barros-Dios (2014) titulado “El radón: un problema de Salud Pública”, concluye que de 211 sujetos, 25 personas (11%) desarrollaron otros cánceres diferentes al de pulmón y 5 (2,4%) desarrollaron cáncer pulmonar. El consumo de tabaco fue semejante en ambos grupos (enfermos y no enfermos) y la concentración mediana de radón fue de 225 Bq/m<sup>3</sup> entre los que desarrollaron cáncer y de 52 Bq/m<sup>3</sup> entre los restantes. Todos los sujetos con cáncer mantuvieron su domicilio hasta el fin del seguimiento.

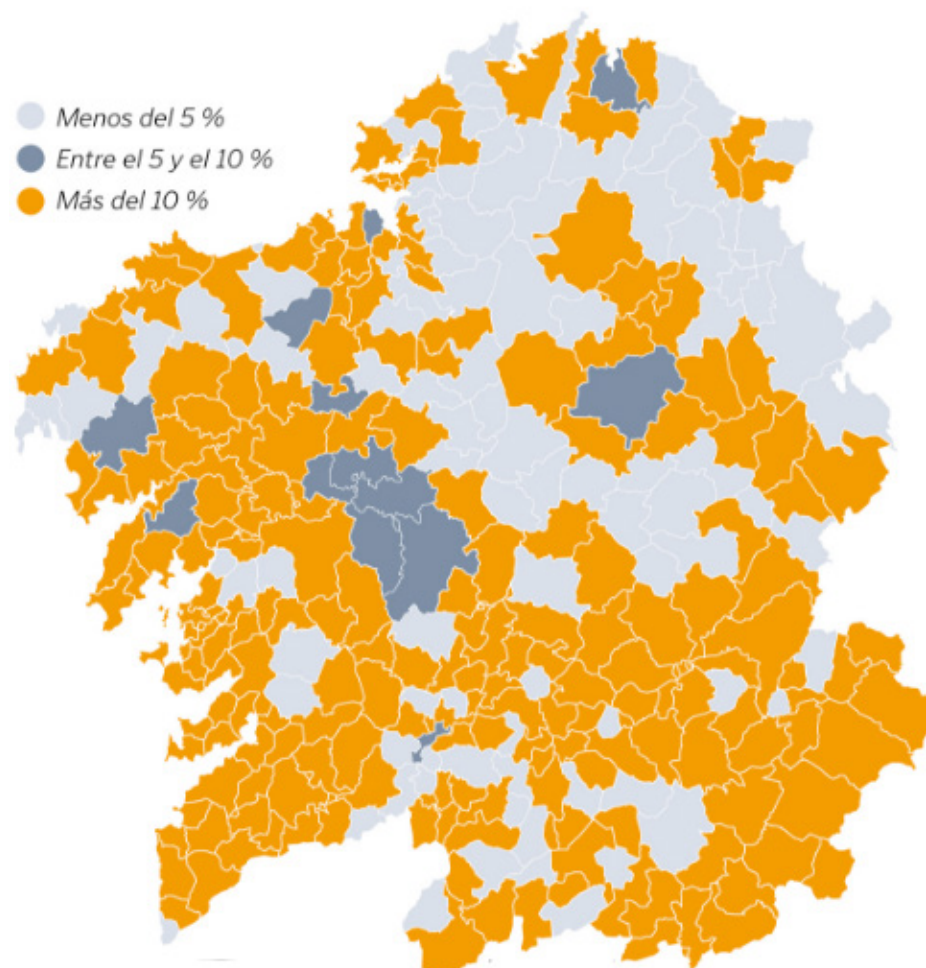


Fig. 6 - Presencia de radón, medidas de más de 200Bq/m<sup>3</sup>.  
Fuente: La Voz de Galicia.

El riesgo relativo de cáncer de pulmón entre sujetos con exposición al radón  $> 148 \text{ Bq/m}^3$  fue de 6.6 (1.2 – 38), por lo tanto se confirma la existencia de asociación entre la exposición al radón residencial y la aparición de cáncer.

Recientemente, el Laboratorio del Radón de Galicia bajo la dirección de los profesores de la Universidad de Santiago de Compostela, Ruano-Raviña y Barros-Dios (2016), acaba de publicar un mapa de la comunidad gallega en el que se puede apreciar que dos de cada tres ayuntamientos están expuestos a niveles muy altos de gas radón. La mayor concentración está en la Provincia de Orense (33 %), seguida de Pontevedra (28 %), A Coruña (19 %) y Lugo (15 %).

Para dilucidar las consecuencias que la exposición al gas radón residencial puede tener sobre los habitantes de Galicia, es necesario comprender las magnitudes relacionadas con la actividad radiactiva del radón (este tema se trata con detalle en el capítulo 2). Basta con decir que una radiación equivalente a  $300 \text{ bq/m}^3$  es semejante al nivel de radiación existente, actualmente, en la ciudad de Prypiat próxima a la tristemente célebre central nuclear de Chernovyl (Ucrania) donde el 26 de abril de 1986 se produjo el más grave accidente nuclear de la historia y que a día de hoy, continúa abandonada por causa de la radiación presente en la zona (Ver figura 8)



**Fig. 7 - Vista general de la ciudad de Prypiat.**

*Fuente: Scott, [www.blog.impossibleliving.com](http://www.blog.impossibleliving.com)*

## Valores de radiación registrados en la ciudad de Prypiat en el año 2009.

Location	uSv/h	Bq/M3
"Lazurny" swimming pool	0,90	464
Pripyat kindergarten "Golden Key"	0,80	412
Zone checkpoint	0,30	155
Pripyat 1970 monument	11,50	5926
Pripyat checkpoint	0,60	309
Hospital No 126	0,70	361
Palace of culture	0,80	412
Pripyat fairground	1,30	670
Middle School Number 3	0,70	361
Middle School Number 1	0,70	361
Reactor 4/5	0,30	155
Cooling towers	1,50	773
16 storey tower block	0,90	464
Duga-3 array	0,50	258
Fish laboratory	1,60	824
Fish laboratory (inside)	0,70	361
Fish laboratory (by the fire engine)	1,30	670
Jupiter factory (outside)	0,50	258
Jupiter factory (inside)	0,70	361
Police station	0,70	361
Vehicle dump	1,60	824
Yanov Railway Station	0,30	155
Dock cranes	0,70	361
Reactor 4	2,40	1237
Pripyat cemetery	14,00	7214
Chernobyl cemetery	0,20	103
Abandoned village	0,30	155
Residential houses Chernobyl	0,20	103
Cafe Pripyat	13,00	6699

Fig. 8 - **Tabla de valores de radiación en el entorno de la ciudad de Prypiat.**

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de <http://chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/radiation-levels/>*

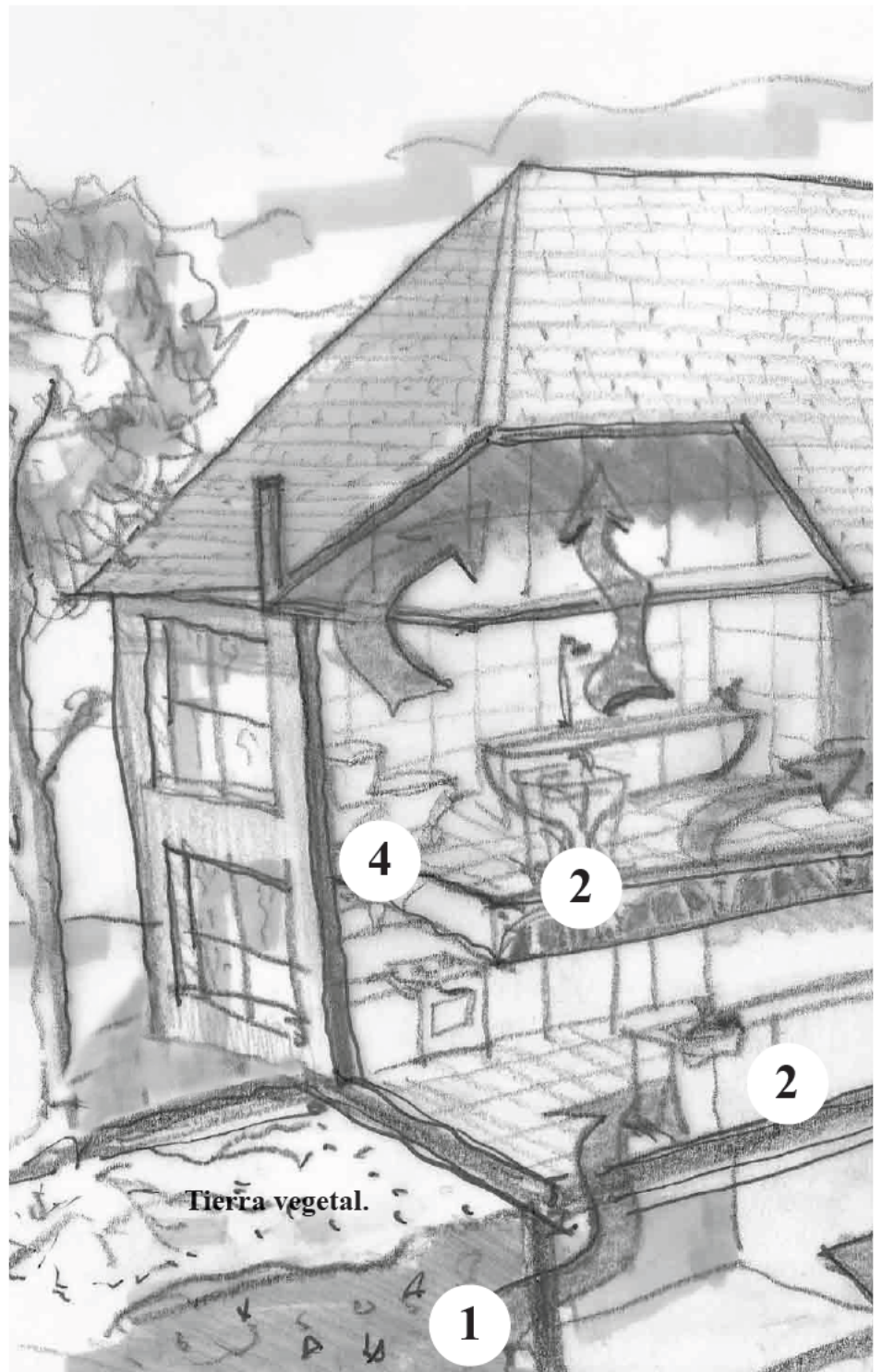
El radón domiciliario se acumula en las construcciones a partir de su exhalación desde el subsuelo del entorno y en particular, desde el solar sobre el que se ha construido la edificación, en mayor proporción, si las rocas del mismo son ricas en uranio, elemento origen del radón. Su presencia por lo tanto es discontinua, en función de las características morfológicas del suelo que sustenta la edificación (grado de porosidad, presencia de grietas o cuevas subterráneas...).

Una vivienda situada junto a otra puede estar libre de radón, mientras que la vecina presenta una grave acumulación del gas (Akiba et al., 2015). En conclusión, la presencia de gas radón en el interior de las edificaciones, supone un grave peligro para la salud y es necesario verificar en cada caso la presencia de dicho gas; especialmente en aquellos lugares que presentan una mayor probabilidad de concentración del mismo.

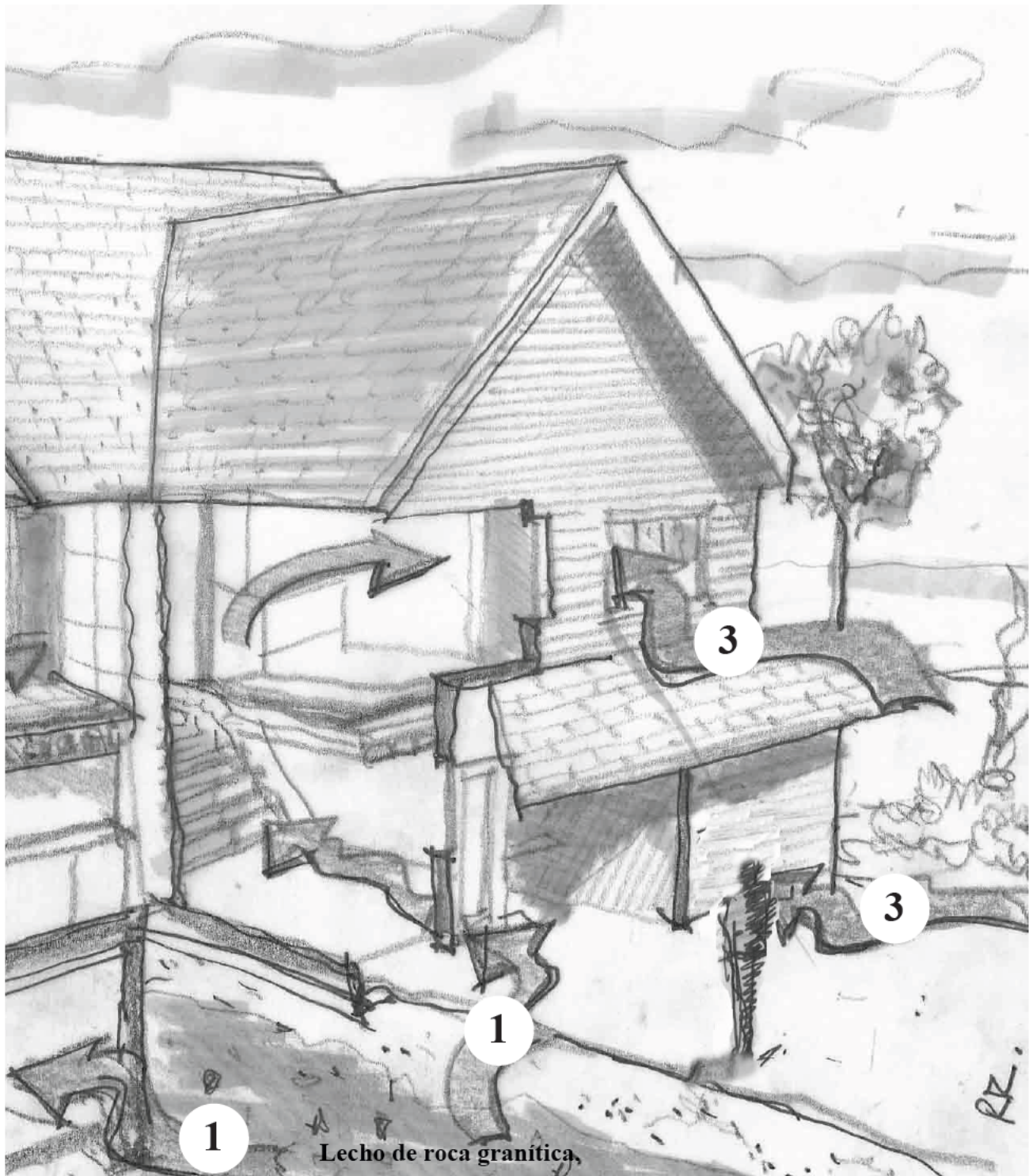
**Fig. 9 - Vías de entrada del radón.**

*Fuente: Infografía del autor.*

1. Escapes de radón procedentes de fisura en el lecho de roca que se filtran a través del suelo permeable y la cimentación.
2. Acometida de agua potable, el gas se infiltra a través de los grifos.
3. El radón procedente del exterior se infiltra a través de puertas y ventanas.
4. El gas se irrumpe a través de desagües y conducciones subterráneas.



Así como se hacen mediciones de la resistencia del terreno para el estudio previo a la construcción de una edificación, igualmente deberían realizarse mediciones sobre la presencia de gas radón para determinar las soluciones arquitectónicas a implementar, dada la grave trascendencia que la presencia del gas tiene para el confort y la salud.



El ámbito del presente trabajo es el estudio de las concentraciones de gas Radón en los edificios situados en zonas de alta concentración en la Comunidad Autónoma de Galicia y en la búsqueda de soluciones constructivas adecuadas a las tipologías predominantes. En concreto, en lo que se refiere al diseño de su implantación sobre el terreno.



Fig. 10 - Algunos dispositivos de alerta doméstica de radón disponibles en internet.

Fuente: [www.radiansa.com](http://www.radiansa.com)

# 1.2 OBJETIVOS

## Objetivo General

El objetivo de este trabajo científico es determinar, de acuerdo con el estado actual del conocimiento, la influencia del diseño de las soluciones constructivas más comunes de implantación en el terreno, de las edificaciones ubicadas en zonas de Galicia con alta probabilidad de acumulación de gas radón.

Dotar al arquitecto de herramientas conceptuales para proyectar edificios que no tengan riesgos de acumulación de gas radón

## Objetivos Específico

1º Evaluar el impacto de los distintos modos de asentamientos en el terreno en la concentración de gas radón.

Mediante la medición comparativa y cuantificada de los valores de concentración asociados a cada tipología, determinar cuál es la más propensa a alcanzar altas concentraciones de radón.

2º Verificar la eficiencia de las medidas constructivas de mitigación contempladas en la legislación española.

Analizar la conveniencia de la aplicación de unas u otras medidas prestando especial atención a la incidencia de las mismas sobre el desplazamiento y concentración del gas radón.

3º Realizar recomendaciones técnicas de intervención para los arquitectos, sobre edificaciones situadas en terrenos con riesgo de emanaciones de radón, proporcionando criterios contrastados para la adopción de soluciones de proyecto que tengan presentes las variables que favorecen la dispersión del gas radón.

# 13 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

## Naturaleza del Método y descripción de las técnicas empleadas

El estudio de las concentraciones del gas radón interior y las soluciones de diseño para su dispersión se aborda realizando en primer lugar, un análisis documental cualitativo, histórico y contextual de la problemática (García & Matos, 2014) para posteriormente y mediante la realización de un ensayo experimental de carácter cuantitativo y el análisis de los datos obtenidos, verificar la hipótesis formulada.

Mediante el análisis de la documentación disponible se persigue determinar de forma holística, las amenazas y las soluciones de mitigación del gas radón en el interior de los edificios construidos en la Comunidad Autónoma de Galicia.

Mediante la realización del experimento se analizan las fortalezas y debilidades de las distintas tipologías edificatorias mediante la comparación de los resultados cuantitativos de los diferentes diseños ensayados, para extraer conclusiones generales de aplicación en el diseño arquitectónico.

Se opta por un método de naturaleza experimental por ser éste el más adecuado para verificar la hipótesis formulada, dado que la variable que está siendo investigada es una variable física y cuantificable, la mayor o menor concentración de radón en el interior de las construcciones.

Se conduce el experimento en condiciones de laboratorio con el objetivo de garantizar que se consiguen neutralizar los efectos de las múltiples variables intervinientes sobre el resultado, también denominadas variables de confusión (Groat & Wang, 2002), como son; las precipitaciones, la presión, los materiales, la saturación, la permeabilidad y el índice diferencial de exhalación del terreno.

En el ensayo experimental descrito en el Capítulo 3, se estudia el efecto de la variable independiente, que es la variable manipulada en el experimento en este caso la “FORMA”, aislándose esta variable de cualquier otro factor, lo que permite su manipulación para obtener resultados comparables.

Se estudia la incidencia de la variable independiente sobre la variable dependiente que es aquella que se pretende investigar, en este caso, el nivel de concentración de radón en el interior de las construcciones de las tipologías estudiadas.

El tratamiento dado a la variable independiente consistió en modificar la condición de forma del asentamiento sobre el terreno de tres modelos a escala, de idénticas dimensiones y materiales, que representan las tres tipologías más extendidas de asentamiento sobre el terreno empleadas en las construcciones de la Comunidad Autónoma de Galicia.

Las condiciones de tratamiento son idénticas para las tres unidades ensayadas que están constituidas por paralelepípedos de PVL de 50x45x40 cm con cubierta plana del mismo material (Ver figuras 52, 53, 54 y 56 ).

La unidad de asignación escogida a la que se ha aplicado el tratamiento experimental es el modelo a escala de una unidad residencial con paredes y techos impermeables al gas y con elementos de ventilación calibrados.

La unidad de medida empleada es el becquerelio/m<sup>3</sup>.

## Obtención, tratamiento y valoración de los resultados

En el experimento se registraron minuciosamente los valores de concentraciones de gas radón en el interior de cada uno de los modelos.

La mayoría de los estudios experimentales miden el impacto de los tratamientos contra una comparación o grupo de control, en este caso se emplearon ambas estrategias.

La comparación en el presente estudio se logra situando los modelos a ensayar en un mismo terreno, de forma tal, que estos modelos son ensayados simultáneamente en condiciones de laboratorio y los tratamientos diferentes en cuanto al asentamiento sobre el terreno son comparados en los resultados individualizados de cada modelo.

La condición de control se define como una condición a la que el tratamiento no se aplica (Groat & Wang, 2002). En el estudio que nos ocupa, este papel lo desempeñó la “estación de control”. Una unidad de medición establecida en el emplazamiento y diseñada de tal forma que garantizase condiciones de ventilación natural y presión ambiental. Esta unidad se dotó de un dispositivo de medida de concentración de la misma clase que los ubicados en los modelos de ensayo. La estación contaba además, con otro dispositivo de medición en tiempo real (RadonEye) que permitió controlar la evolución del nivel de radón ambiental a lo largo de todo el desarrollo del experimento.

El tratamiento de los datos obtenidos ha sido realizado por el Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), con el número 1204-LE2219 en la norma de referencia UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 de Protección Radiológica en la especialidad de radioactividad ambiental: calidad del aire. Categoría I.

Se aplicó el procedimiento de ensayo de toma de muestra y medi-

da de concentración y exposición de radón, para exposición de radón  $\geq 50$  KBq h/ m<sup>3</sup>, el procedimiento de ensayo aplicado es el I-ENS01 (ver anexo 3).

La toma de datos se realizó en condiciones de ensayo ciego, para prevenir que los resultados pudiesen estar influidos por el sesgo del observador, de tal manera que los investigadores responsables del tratamiento, desconocían el diseño del experimento y la relación entre los modelos y las probetas, así como tampoco conocían que probeta pertenecía al grupo de control, solamente una vez concluido el experimento los investigadores conocen que probeta pertenece a cada modelo.

El empleo de un laboratorio independiente y certificado para el tratamiento de los datos garantiza la no contaminación y el rigor de los resultados obtenidos.

Mediante el análisis comparativo de los datos cuantitativos procedentes de cada uno de los modelos se determinó la capacidad de los diseños ensayados para la concentración del gas radón, los datos en Bq/m<sup>3</sup> obtenidos de cada uno de los modelos se confrontaron con las estimaciones de concentraciones de radón perjudiciales para la salud, establecidas en la legislación vigente.

Los instrumentos y testigos empleados han sido calibrados para medir tales efectos y por el laboratorio responsable del tratamiento. Dadas las condiciones mencionadas, puede validarse la relación causa- efecto, estableciendo una relación causal entre la forma de los modelos ensayados y la concentración de radón en el interior de los mismos, verificando la hipótesis formulada y permitiendo extraer conclusiones al efecto.

La metodología empleada permite determinar de forma inequívoca la influencia de la variable independiente Forma sobre la dependiente Concentración de Radón, dando así respuesta a los objetivos pre-

establecidos en el estudio y contribuyendo de forma determinante al conocimiento del comportamiento del gas radón en el interior de las edificaciones y de qué manera el diseño del edificio puede influir en el resultado.

En la tercera y última etapa se realizó el análisis de los datos obtenidos elaborándose las conclusiones, se procedió a la caracterización de la solución constructiva del forjado sanitario y se redactaron las recomendaciones orientativas para los arquitectos al respecto del diseño de nuevas construcciones resistentes al radón.

## 1.4 ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO

Las etapas mencionadas estructuran el documento de resultado del trabajo científico, que se concreta en los siguientes capítulos

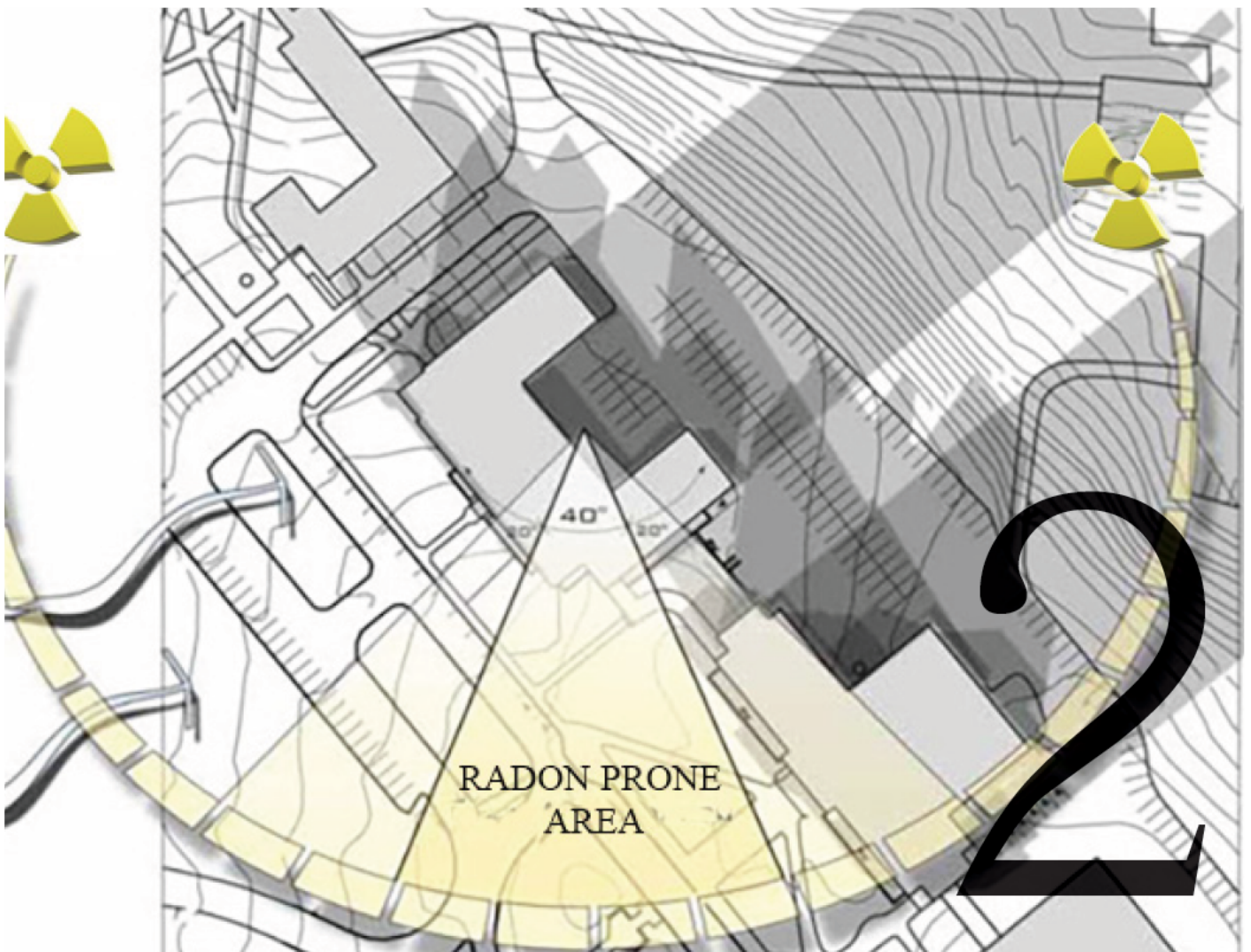
**Capítulo 1.** Objeto de la investigación: Definición del ámbito de estudio y justificación de la problemática, objetivos, estructuración del trabajo y explicación de la metodología aplicada.

**Capítulo 2.** Marco teórico: contextualización histórica, antecedentes, documentación de la medición de la radiactividad natural y los riesgos inherentes de la exposición a radiaciones ionizantes, factores que influyen en la concentración de gas radón, soluciones constructivas vigentes a la acumulación de gas radón en el interior de las viviendas, programas de actuación gubernamental en materia de gas radón, análisis de la legislación, reflexión crítica, estado del arte se analizan una serie de artículos científicos de reciente publicación que sientan las bases a partir de las cuales se desarrolla la experimentación detallada en el capítulo 3. El estado del arte se ha situado a continuación del marco teórico con el objeto de facilitar la lectura y comprensión del mismo de forma tal que permitiese llegar a una conclusión y la formulación de la hipótesis de trabajo.

**Capítulo 3.** Experimento: contempla el desarrollo del experimento realizado, detallando los elementos determinantes a tener en cuenta, el diseño e instalación de los modelos experimentales, incluyendo planos a escala y fotografías del montaje de la instalación, caracterización de los elementos de registro y la metodología de la medida, así como el tratamiento de la información y los resultados por modelo, incluyendo el análisis comparativo de los resultados y la interpretación de los índices obtenidos y sus potenciales efectos para la salud.

**Capítulo 4.** Conclusiones y futuras líneas de investigación: se establece un análisis comparativo, que cualifica los resultados obtenidos de cada modelo, estableciendo las posibles conexiones con el fenómeno investigado. Se propone a través del análisis y discusión de las conclusiones, las posibles aplicaciones en el campo del diseño arquitectónico, así como recomendaciones técnicas sobre los forjados sanitarios; señalando en las conclusiones finales la idoneidad de usar una u otra forma, en el diseño de construcciones resistentes al radón, así como conclusiones específicas sobre la ejecución del forjado sanitario. Como resultado de las conclusiones el análisis de los datos obtenidos del experimento, se presentan interrogantes que definen futuras líneas de investigación





MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE  
E HIPÓTESIS DE TRABAJO.

Anverso Fig. 11 -  
**Radon prone área.**  
*Fuente: Infografía  
del autor.*

# 2

## .1. MARCO TEÓRICO

El Gas Radón fue descubierto en 1900 por Friederich Ernst Dorn. Si se realiza un breve repaso histórico, se puede constatar la evidencia del riesgo para la salud. Ya en 1500, cronistas de la época, observaron un mayor índice de mortalidad por enfermedad respiratoria en las minas de Erz (Este de Europa) y posteriormente Karting y Hesse (1879, citado por Barros-Dios, 2010) identificaron la enfermedad como cáncer pulmonar.

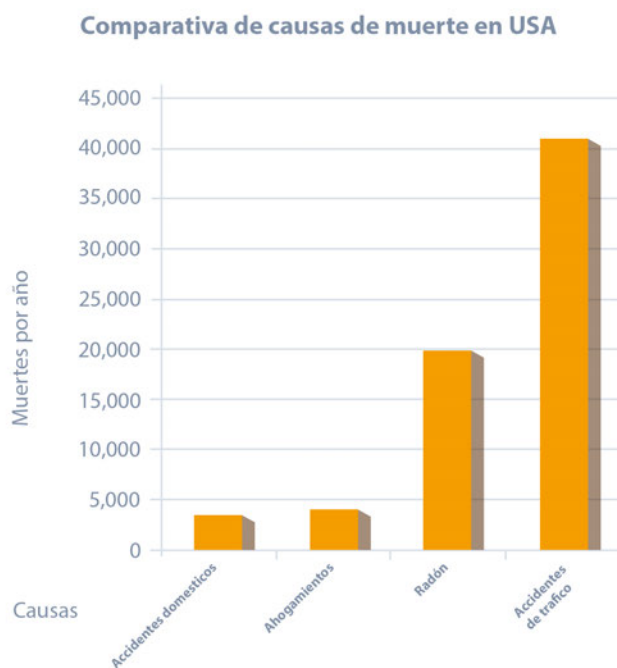
Uhling (1921) relaciona las emanaciones de radio con el cáncer pulmonar, pero no será hasta los años 70 del pasado siglo, cuando se publiquen los primeros estudios científicos que relacionan la exposición a radón con cáncer pulmonar en mineros.

En 1979 la Organización Mundial de la Salud a través de un grupo de trabajo europeo sobre la calidad del aire en interiores, llamó por primera vez la atención acerca de los efectos para la salud de la exposición residencial al radón.

A partir de los estudios sobre mineros-trabajadores, realizados en los años 80 entre los que se encontró alta incidencia de cánceres, sobre todo de pulmón, donde se estableció que la exposición a la radiación del radón, concentrado a niveles extremadamente altos supone un factor de riesgo para el cáncer de pulmón.(Barros-Dios, 2010, p. 8).

En 1988 el radón es calificado como carcinógeno humano por el Centro Internacional sobre Investigaciones sobre el Cáncer.

Aunque será a lo largo del primer quinquenio del presente siglo cuando verán la luz diferentes estudios y publicaciones científicas que ponen especial atención a esta realidad (Bull Wld Hlth Org, 2003, Pooling study Darby et al.Br Med J. 2004/05, Pooling study americano, USA-Canadá, Krewski et al. Epidemiology, 2005). A partir de entonces se da inicio al “International Radon Project” de la Organización Mundial de la Salud para la elaboración de un manual de recomendaciones para implantar Programas de Reducción de Radón por los Gobiernos miembros, (Genève, marzo 2005; Genève, 2006; München, 2007). Los resultados de este proyecto se publican finalmente en el “Handbook of radon” (OMS, 2009)



**Fig. 12 - Comparativa de causas de muerte.**

*Fuente: Datos del National Safety Council.(1999). Elaboración propia.*

# 2.1.1 RADÓN EN INTERIORES Y SUS CONSECUENCIAS PARA LA SALUD

El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), según datos del propio Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), afirma que “la dosis de radiación media que recibe una persona al año es de 3,71 mSv, de esta cantidad, 2,40 mSv se deben únicamente a la radiación natural.” (García-Talavera et al., 2010). Estos datos indican que un alto porcentaje de la dosis de radiación recibida por las personas se debe a fenómenos naturales (Quindós, 2002).

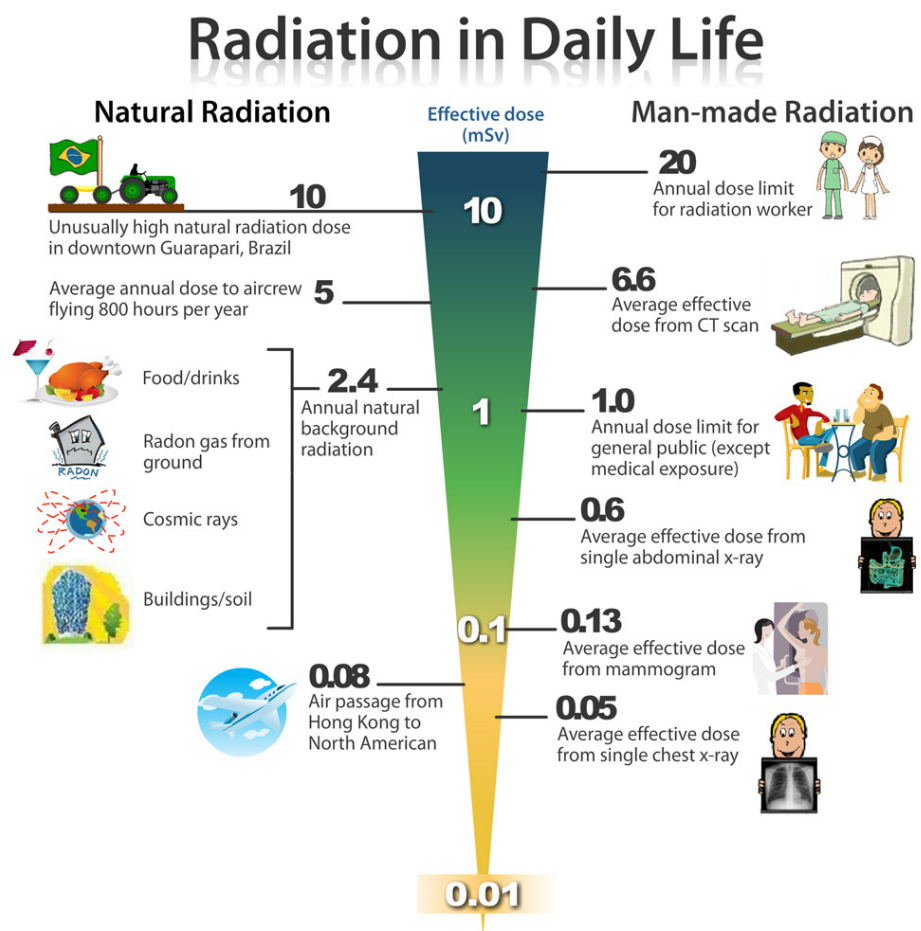
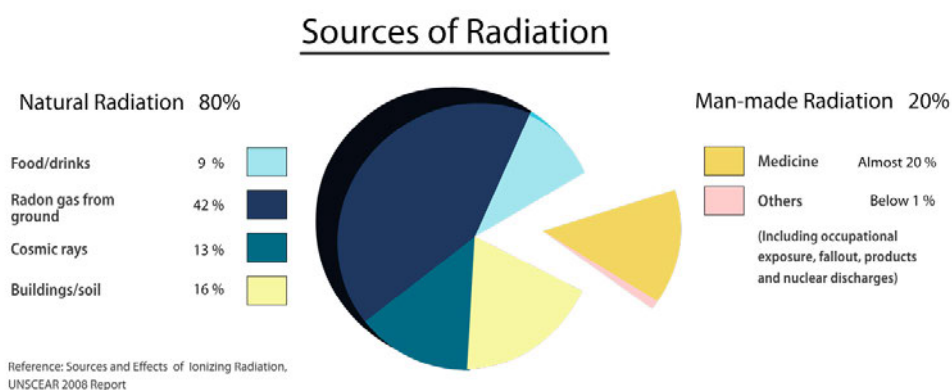


Fig. 13 - Orígenes de la radiación absorbida.  
 Fuente: Gobierno de la region especial administrativa de Hong Kong, [www.dbcp.gov.hk](http://www.dbcp.gov.hk).

La contribución efectiva del radón y sus descendientes a la dosis efectiva (media), es de 1.420  $\mu\text{Sv}/\text{año}$  por Inhalación y de 180  $\mu\text{Sv}/\text{año}$  por Ingestión, lo que representa más del 50% de la dosis recibida por la población debida a fuentes naturales de radiación. Estos valores, que no tienen efectos importantes sobre la salud, nos dan una idea cualitativa de la dosis de radiación que no implica riesgos.

*Para valores más altos, los posibles efectos solo pueden confirmarse en estudios sobre la población... Los datos disponibles, a partir de los cuales se han establecido los valores aceptables y se han cuantificado los efectos de la radiación, son principalmente los que provienen de los pocos casos en que grandes poblaciones han sido irradiadas. Los estudios en los sobrevivientes de las bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki proveen los principales datos.*

*En mucha menor medida, el accidente de Chernobyl y otros han permitido obtener datos estadísticos acerca de los efectos de la radiación sobre la salud. (González Sprinberg & Rabin Lema, 2011 p.68).*



**Fig. 14 - Fuentes de radiación.**  
*Fuente: UNS-CEAR 2008 Report.*

## Medición de la radiactividad natural en las edificaciones

El radón 222 constituye un problema para la salud de las personas, ya que se ha revelado como un factor de riesgo del cáncer pulmonar, suponiendo más del 80% de todo el radón ambiental y alrededor del 50% de toda la radiación que recibe el ser humano durante su vida (Organización Mundial de la Salud, 2001). En Europa, los diferentes agentes implicados (personal sanitario, administraciones, consumidores, constructores y por supuesto, los arquitectos), se implican en una búsqueda activa de soluciones para minimizar las consecuencias nocivas de la exposición a este agente radiactivo.

En 2005, la Organización Mundial de la Salud creó el “Proyecto Internacional del Radón”, destinado a identificar estrategias eficaces para reducir el impacto del radón sobre la salud. Participantes y colaboradores de más de 30 países trabajaron conjuntamente para impulsar internacionalmente la comprensión de un amplio abanico de asuntos relacionados con el radón en interiores.

En España, “los estudios pioneros de medidas ambientales en domicilios, a finales de la década de los 80, pusieron de manifiesto las altas concentraciones de radón 222 en Galicia, en la Sierra del Guadarrama y en Extremadura, entre otras áreas geográficas.” (Quindós et al., 1991).

Para comprender en qué medida afecta el radón a los usuarios de una construcción, es necesario definir algunos conceptos relativos a la dosis efectiva recibida y a las unidades de medición de la misma. Se llama dosis absorbida a la cantidad de energía que deposita la radiación por cantidad de masa radiada. De acuerdo al tipo de radiación y según cuál sea el órgano o tejido que la ha absorbido, los efectos biológicos serán distintos. La magnitud que tiene en cuenta estos factores es la dosis efectiva, cuya unidad es el sievert (Sv).

Se identifica como «Actividad» (A) a la actividad de una cantidad de un radionucleido en un determinado estado energético en un momento dado. Se calcula como el cociente entre  $dN$  y  $dt$ , donde  $dN$  es el valor esperado del número de transformaciones nucleares que se producen desde dicho estado energético en el intervalo de tiempo  $dt$ .  
 $A = dN / dt$ .

La cantidad de Actividad (A) presente en un lugar se mide en unidades denominadas «Bequerelios» (Bq): Unidad de actividad. Un bequerelio es igual a una transición nuclear por segundo:  $1 \text{ Bq} = 1 / \text{s}$ . (R.D. 783-2001, Anexo 1).

Una de las principales líneas de actuación frente al problema sanitario, es la prevención que plantea la necesidad de minimizar los valores de actividad de radionucleicos y, por lo tanto, de bequerelios en las edificaciones, hasta reducirlos a valores que no supongan un riesgo para la salud de sus habitantes.

Pero ¿cuáles son los valores que se pueden considerar SEGUROS para la salud?. En la actualidad no existe un consenso entre la comunidad científica en este punto. Los estudios epidemiológicos realizados en la última década del siglo pasado evidenciaron la relación entre altos niveles de actividad radioactiva en los domicilios (superiores a los  $200 \text{ Bq/m}^3$ ) y la incidencia estadística del cáncer de pulmón entre la población, por lo que la Organización Mundial de la Salud dictó recomendaciones al respecto y, la Unión Europea y los Estados Unidos de América entre otros países, legislaron sobre los valores límites admisibles de concentraciones de radón residencial y en espacios cerrados.

En 1987 la Environmental Protection Agency de Estados Unidos de América establece los  $148 \text{ Bq/m}^3$  como concentración límite a partir de la cual se deben realizar reducciones de radón en los domicilios.

En 1990, la Unión Europea publicó la Recomendación 90/143/EU-RATOM en la que se insistía en no superar los 400 Bq/m<sup>3</sup> en casas ya construidas ni los 200 Bq/m<sup>3</sup> en las de nueva construcción, aunque no será hasta la divulgación de diversos estudios científicos en los que se evidencia y constata la relación sobre exposición residencial al radón y cáncer pulmonar cuando la Unión Europea publicará en 1996 la Directiva 96/29 EURATOM. En esta normativa de obligado cumplimiento, se ordena a los estados miembros establecer un plan de acción a nivel nacional, para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo para cualquier vía de entrada del radón. Esta Directiva fija un límite genérico de concentración en recintos cerrados que no se supere los 300 Bq/ m<sup>3</sup>.

La OMS (2015) establece que un nivel de referencia de 100 Bq/m<sup>3</sup> de concentración de radón, ya constituye un importante riesgo para la salud.

Existe gran variación de concentración de radón (radón-222) en una vivienda, o en un edificio en general, dependiendo de su situación geográfica. Hay muchos factores implicados y es difícil saber si los niveles del gas serán elevados en una determinada vivienda, pero se pueden hacer predicciones fiables de zonas en que hay mayor probabilidad de que existan viviendas con altas concentraciones de gas radón.

El método más fiable y directo para identificar las zonas es medir la concentración del gas radón en el interior de un muestreo de viviendas y la elaboración de mapas a partir de estas mediciones. Este método requiere una densidad considerable de medidas en todo el territorio, por eso, se han desarrollado métodos indirectos que utilizan otras magnitudes correlacionadas con la concentración de radón en las viviendas.

En el mapa predictivo de radón en España (2013) se identifican las

zonas con mayor riesgo de exposición al gas radón. Para realizar este mapa predictivo se calculó la tasa de exposición (TRa) que produce a una distancia de 1 m sobre el suelo. Un suelo infinito con una concentración homogénea de 1 Bq kg<sup>-1</sup> de radio-226 (CRa). La relación obtenida, utilizando el código Microshield 5.0.5 es la siguiente:

$$TRa = 0,051 CRa.$$

TRa se mide en  $\mu R h^{-1}$  y 0,051 es el factor de conversión de actividad a tasa de exposición ( $\mu R h^{-1} Bq^{-1} kg$ ).

Al final se obtiene una ecuación matemática que relaciona la concentración de radón en el interior de viviendas con la tasa de exposición  $\lambda$  debida a la radiación natural de la siguiente forma:

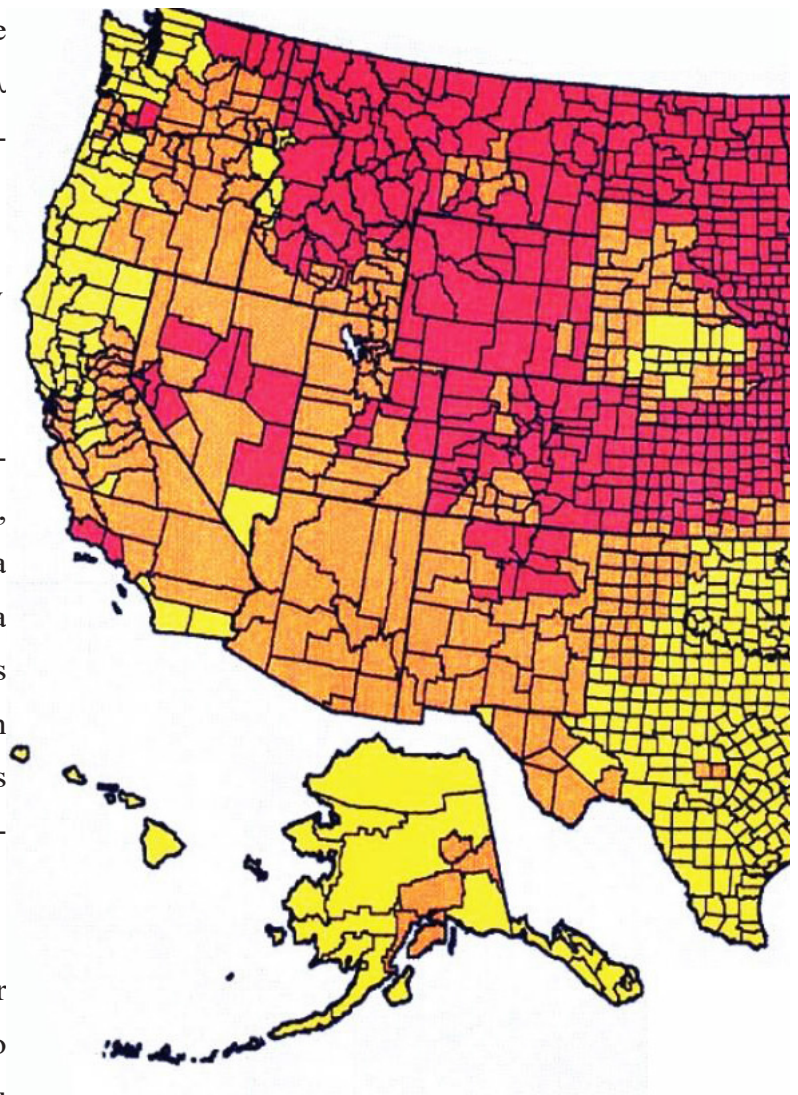
$$Tasa\ total = 0,1887 CRn H \lambda + t ( ) v \\ E \rho \lambda D + 0 ,4510$$

Las concentraciones de radón pueden variar entre casas adyacentes, dentro de una misma casa, de un día para otro o, incluso, de una hora para otra. Debido a esas fluctuaciones, es preferible calcular la concentración media anual en el aire de interiores midiendo las concentraciones de radón al menos durante tres meses.

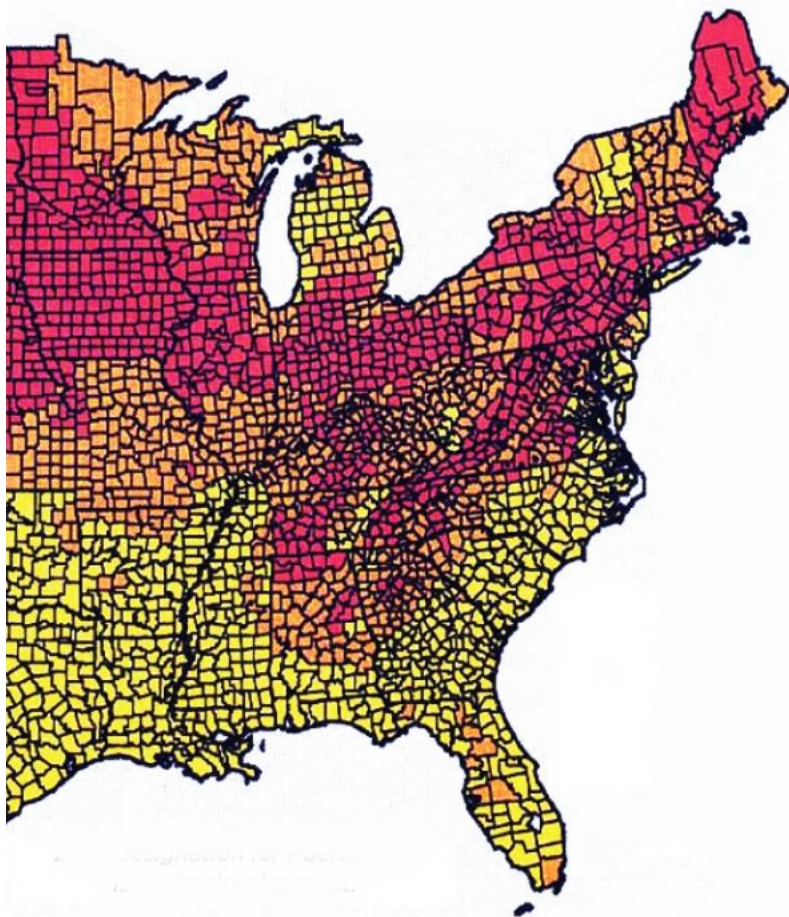
Estas mediciones se han de realizar conforme a protocolos nacionales o internacionales, a fin de garantizar su uniformidad y su fiabilidad a la hora de tomar decisiones.

Fig. 15 - Mapa del radón en EUA.

Fuente:  
[www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon).



En España la norma de referencia para la medición de la concentración de radón es el estándar UNE-EN ISO 11665-1 Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 1: Orígenes del radón y sus productos de desintegración de vida corta y métodos de medición asociados. (ISO 11665-1:2012). Es la norma española, versión oficial, de la europea EN ISO 11665-1:2015 que a su vez adopta la Norma Internacional ISO 11665-1:2012, publicada en 2015 por la Asociación Española de Normalización (AENOR), siendo su última revisión corregida de Septiembre de 2016. Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 73 Energía Nuclear, Tecnologías Nucleares y Protección Radiológica, y tiene por objeto "...la medición de la actividad de radón-222 y la concentra-



- **Zone 1** counties have a predicted average indoor radon screening level greater than 4 pCi/L (pico curies per liter)
- **Zone 2** counties have a predicted average indoor radon screening level between 2 and 4 pCi/L
- **Zone 3** counties have a predicted average indoor radon screening level less than 2 pCi/L

ción de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta en el aire.”(AENOR 2016,pp.9).

En la primera década del presente siglo se han venido elaborando mapas de radón en numerosos países como: USA, Japón, Reino Unido y Australia.

La Unión Europea y al Agencia Internacional de Energía Atómica, tras el accidente de la central nuclear de Chernóbil, han promovido elaborar Atlas Dosimétricos Nacionales, para poder estimar la exposición a fuentes radiactivas de origen natural.

En otros países, como es el caso de Suecia, se han hecho mapas basados en la medida del denominado “Potencial Geogénico de Radón”, el cual indica el nivel de riesgo de los edificios, estimado a partir de la concentración de radón-222 en el terreno a 1 m de profundidad. Se consideran terrenos con bajo riesgo los que tienen valores inferiores a 10 kBq m<sup>3</sup>, de riesgo intermedio los comprendidos entre 10 y 50 kBq m<sup>3</sup> y de riesgo alto los que tienen más de 50 kBq m<sup>3</sup> (Reimer & Tanner, 1991). Permite rebajar en un nivel la categoría de riesgo asociada en suelos de baja permeabilidad y por el contrario, subirlo en suelos muy permeables. También se fundamenta en esto mismo el método checo para determinar el riesgo de radón (denominado Índice de Radón, IR) asociado a los terrenos en los que se pretende edificar (Neznal et al., 2004) En Francia, el mapa nacional se ha elaborado a partir de mapas geológicos y del contenido medio en uranio de cada unidad geológica. En Alemania se ha elaborado el mapa usando el “Potencial Geogénico de Radón”, calculado a partir del contenido de radón-222 a 1 m de profundidad y de la permeabilidad del terreno (Kemski et al., 2001).

En España el proyecto de elaboración del mapa de radón se denominó “Proyecto MARNA”, que se basó inicialmente en los resultados obtenidos en el Plan Nacional de Exploración e Investigación de Uranio, que se ha ido ampliando con nuevas medidas de toda España.

El Proyecto Marna (Mapa de Radiación Gamma Natural), es un proyecto I+D, el cual evalúa los niveles de radiación gamma natural en España. Es un acuerdo de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y Enuse; en el que también han colaborado las Universidades de Salamanca, la Universidad de Extremadura, la Universidad Politécnica de Extremadura y actualmente la Xunta de Galicia, la Universidad de Vigo y el Instituto Tecnológico y Geominero de España en la zona de Huelva.

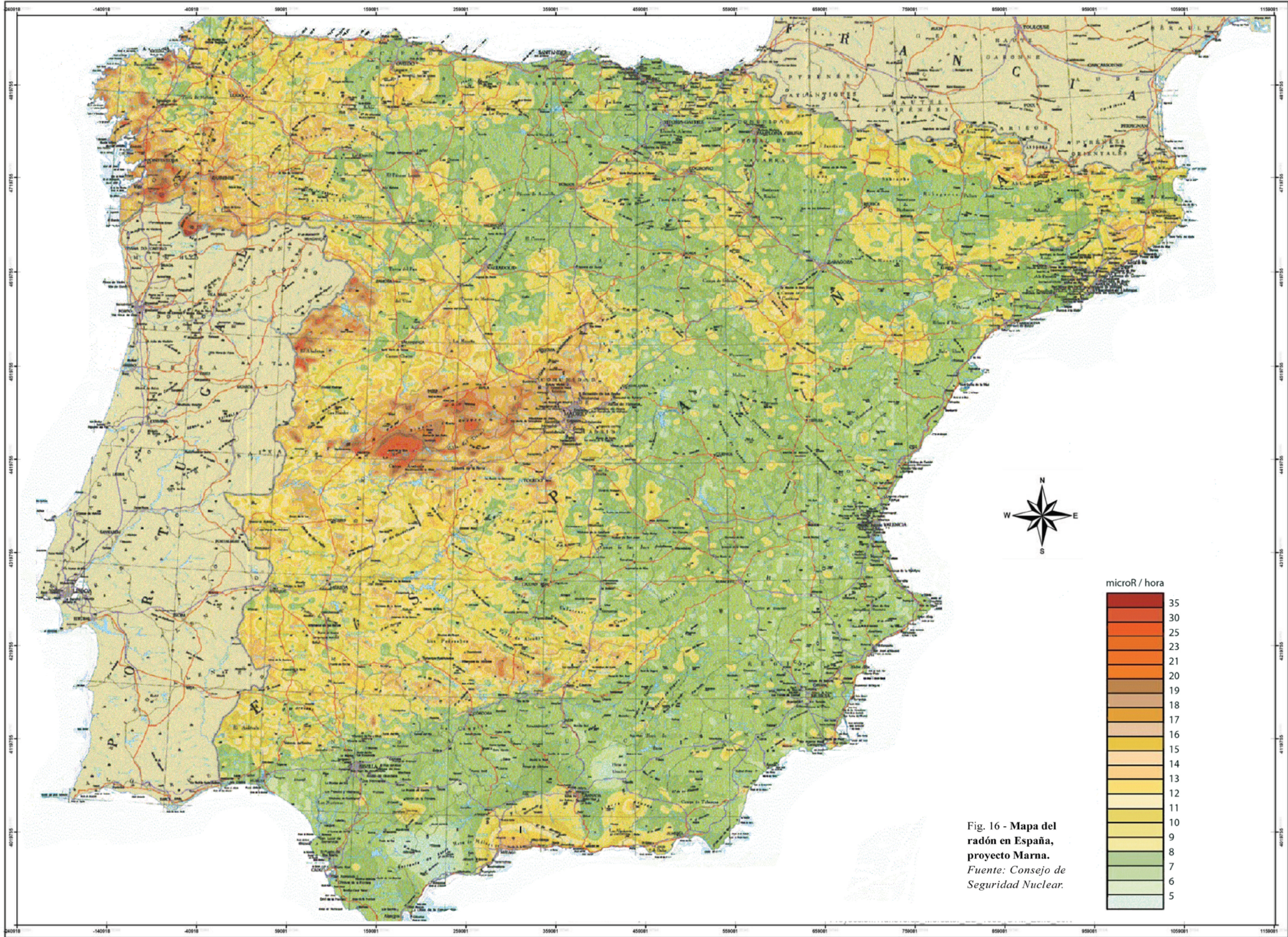
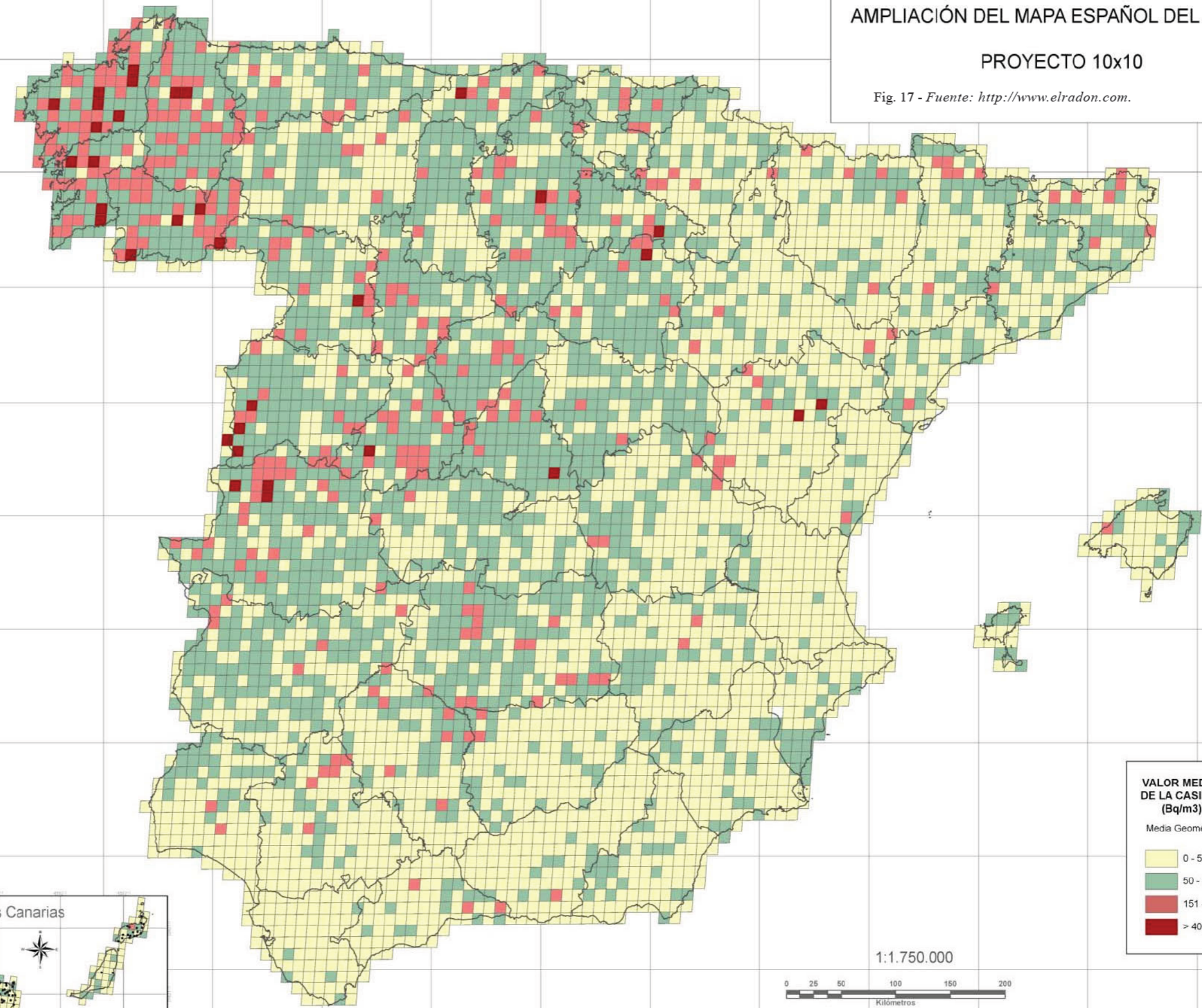


Fig. 16 - Mapa del radón en España, proyecto Marna.  
Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear.

# AMPLIACIÓN DEL MAPA ESPAÑOL DEL RADÓN

## PROYECTO 10x10

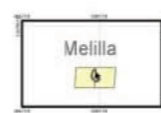
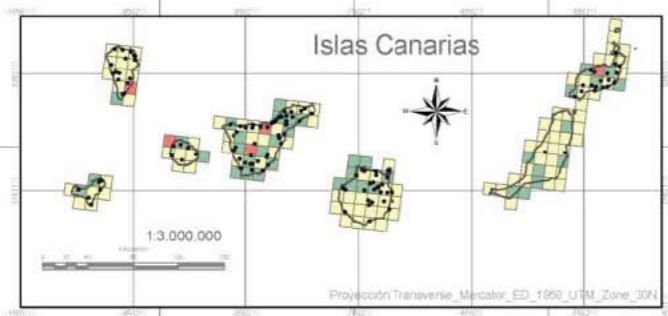
Fig. 17 - Fuente: <http://www.elradon.com>.



**VALOR MEDIO DE LA CASILLA (Bq/m3)**

Media Geométrica

0 - 50
50 - 150
151 - 400
> 400



1:1.750.000

Proyección: Transverse Mercator ED 1950 UTM Zone 30N

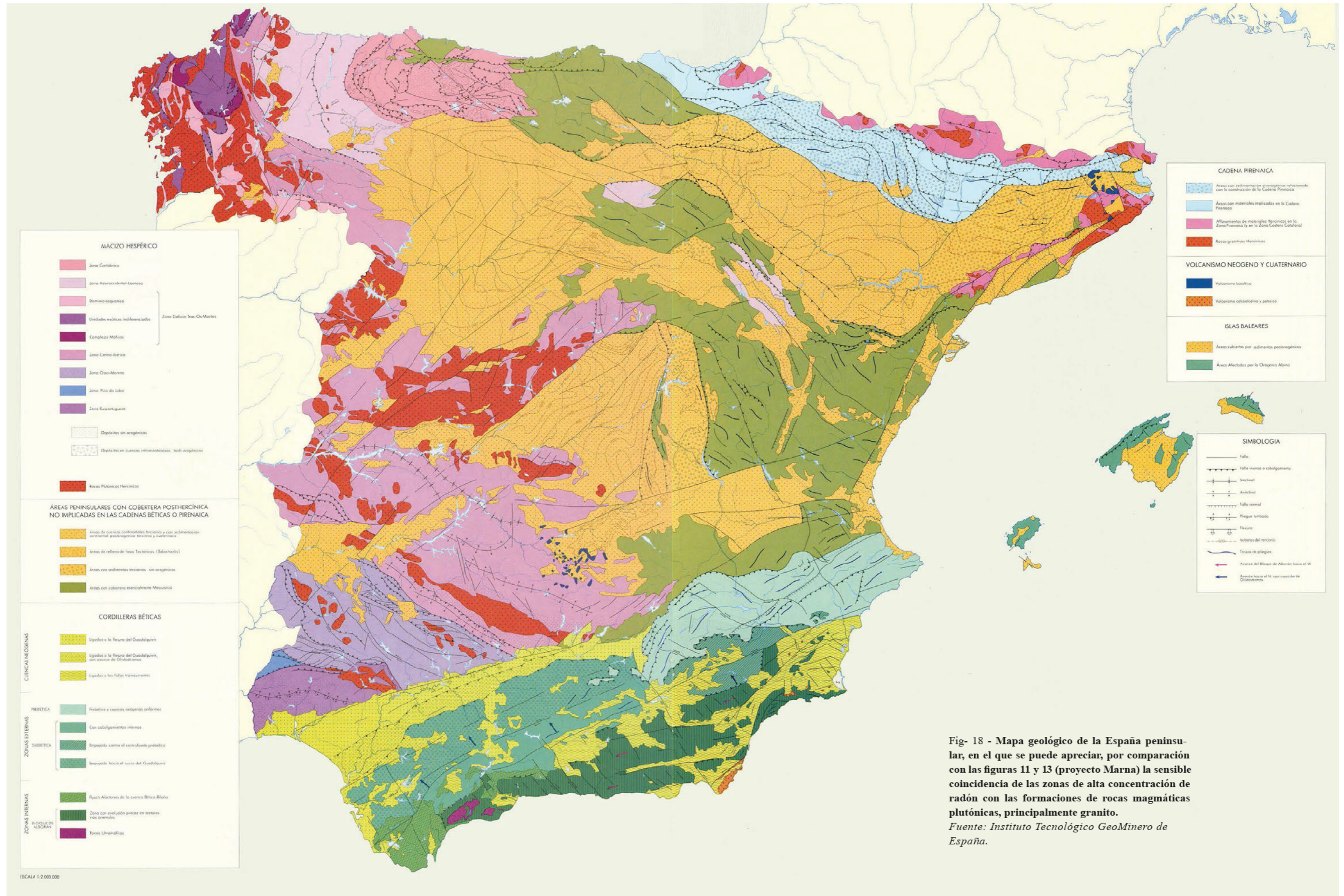


Fig- 18 - Mapa geológico de la España peninsular, en el que se puede apreciar, por comparación con las figuras 11 y 13 (proyecto Marna) la sensible coincidencia de las zonas de alta concentración de radón con las formaciones de rocas magnéticas plutónicas, principalmente granito.  
Fuente: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Los resultados del Proyecto Marna son útiles para estudios epidemiológicos, diseñados para analizar los efectos que produce la exposición al radón y para optimizar la selección del emplazamiento adecuado para equipos de medida de radiación, así como para estimar el potencial de emisión de radón por un terreno en función de la información geológica y meteorológica que se posea.

Desde el punto de vista geológico, el principal factor que gobierna la concentración del radón en el terreno es la distribución geoquímica del uranio en los distintos tipos de rocas. Las rocas ricas en uranio presentan mayores concentraciones del gas, aunque también pueden encontrarse valores elevados en materiales que, a pesar de no cumplir esa característica, presenten una intensa fracturación, lo que favorece la migración del radón desde formaciones geológicas adyacentes o más profundas y, por tanto, más ricas en uranio.

La relación con la geología del mapa predictivo de exposición al radón en España es muy marcada. A las distintas formaciones graníticas situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central) y en el Oeste de las provincias de Salamanca y Zamora, les corresponden las medias de radiación  $\gamma$  más altas (17,5  $\mu\text{R/h}$ ), con lo que quedan clasificadas en la categoría de exposición alta (2) en cuanto a su potencial de radón. Algunos granitos de Cataluña, Badajoz, Córdoba y Sevilla, con una radiometría media similar, también se engloban en esta categoría.

En las zonas metamórficas del oeste peninsular y del sistema Ibérico y en los afloramientos pirenaicos y formaciones de la zona mediterránea meridional se aprecian zonas de categoría 2, con tasas de dosis de unos 15  $\mu\text{R/h}$ . Las Islas Canarias, por otra parte, son islas de origen volcánico y se han dado condiciones favorables para que los magmas primarios evolucionen al detenerse temporalmente en cámaras magmáticas emplazadas a pocos kilómetros de la superficie

El Proyecto Marna se inició en el año 1991 y, según los datos que figuran en el Informe del Proyecto, se ha desarrollado en 3 fases:

En la Fase 1 se dibujó un mapa piloto a escala 1/1.000.000 de la Tasa de Exposición al Radón de la España peninsular, así como diversos mapas a escala 1/200.000 para las Comunidades de Castilla y León y Extremadura, abarcando una superficie de 130.000 km<sup>2</sup>.

En la Fase 2 se continúa la cartografía a 1/200.000 ampliándose la zona 90.000 km<sup>2</sup> más, quedando cubiertos un total de 220.000 km<sup>2</sup>.

La fase 3 alcanza una zona de 160.000 km<sup>2</sup> y a su término habrá información de 380.000 km<sup>2</sup>.

En la actualidad se han realizado ya más de 450.000 medidas, esperando alcanzar las 700.000.

El Grupo Radón de la cátedra de física médica de la Universidad de Cantabria, bajo la dirección del profesor Luís Quindós ha desarrollado el proyecto 10x10, consistente en la creación de una malla de 10x10 km en la que se valora el riesgo de concentración de gas radón en las viviendas, analizando la geología del terreno sobre el que se asienta la vivienda con el objeto de mejorar la calidad del Mapa Español del Radón del CSN, aplicando para ello los criterios superficiales (10x10), poblacionales, realizando mediciones en todas las poblaciones de más de 50.000 habitantes e incrementando el número de medidas en localidades con una exposición  $\gamma$  mayor que 4 $\mu$ R/h, concluye que las características de la vivienda marcarán una mayor o menor concentración de radón en su interior, pero se tienen que tener en cuenta la incidencia de otros factores, como, la geología (factor principal), la permeabilidad, el estado de las rocas, las vías de entrada del radón al interior de las viviendas, la meteorología y topografía del área y la tasa de intercambio del aire entre el interior y el exterior.

La evolución geoquímica da lugar a magmas enriquecidos en gases y de composición félsica (traquitas y fonolitas, precisamente, las zonas con mayor tasa de exposición a la radiación  $\gamma$  de esta islas (correspondientes a la categoría 2), se han detectado en la caldera de Tejeda y en la mitad suroccidental de la Isla de Gran Canaria.

En Galicia, las formaciones graníticas de la Dorsal Gallega y las sierras de Os Ancares San Mamede y A Queixa, presentan altas tasas de radiación  $\gamma$  superiores a ( $17,5 \mu\text{R/h}$ ), categoría 2. Según Barros Dios, profesor titular de Medicina preventiva y Salud pública de la Universidad de Santiago de Compostela y Director del Laboratorio de Radón en Galicia: “Galicia es un área de elevada exhalación de gas radón debido a la naturaleza granítica del subsuelo, rico en Uranio” (Barros-Dios, 2012).

El riesgo de exposición al gas radón viene determinado por la geocalización del domicilio. En los mapas de las Fig. 2.5 a 2.9 se puede apreciar que la Comunidad Autónoma de Galicia es una de las zonas de la península con mayor riesgo potencial de acumulación de gas radiactivo en las viviendas.

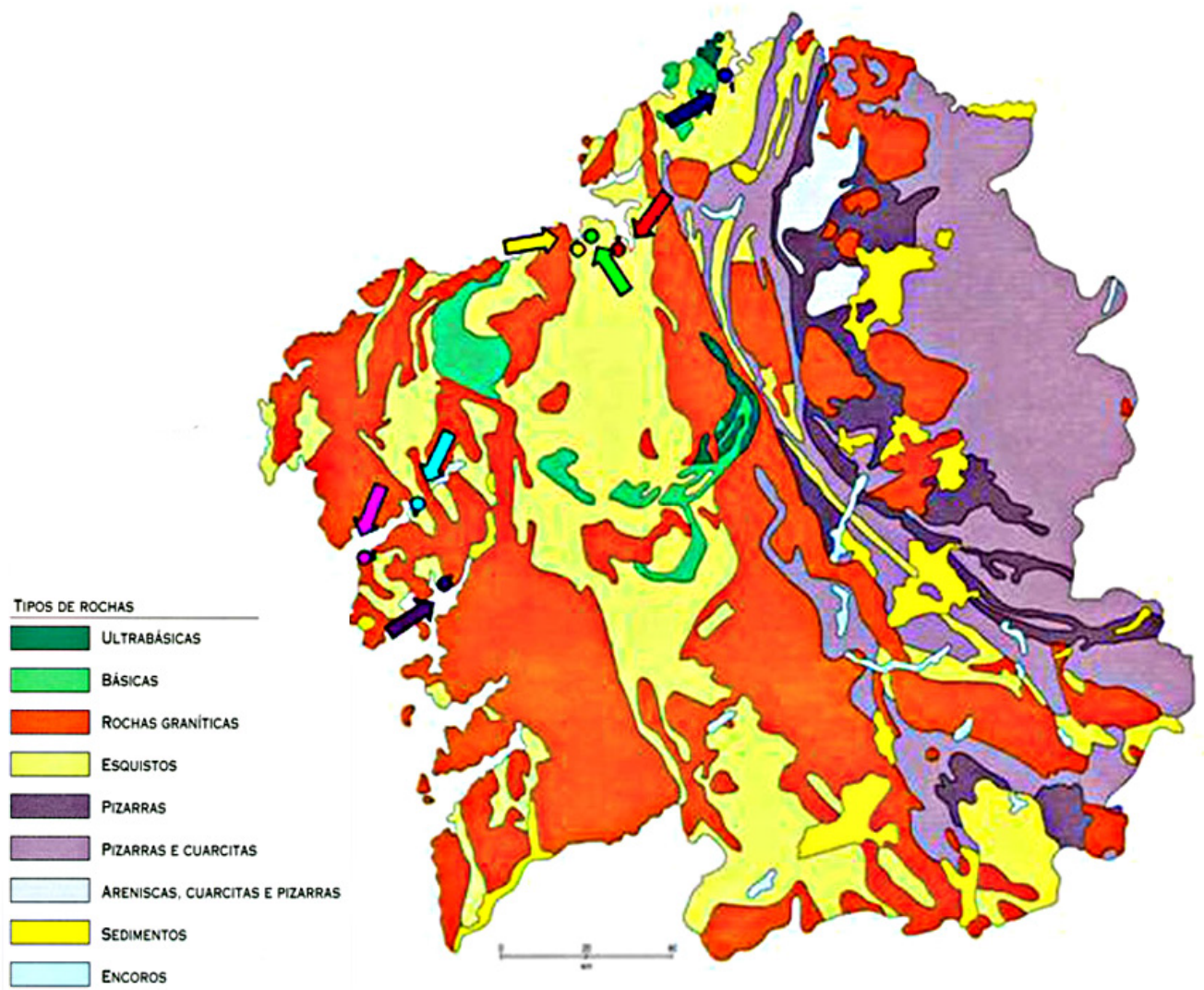


Fig. 19 - Mapa de suelos de Galicia.  
Fuente: Macías et al.(2004).

La Universidad de Cantabria realiza un estudio sobre la “Evaluación de niveles de radón en edificios en zonas de diferentes tasas de exposición a la radiación gamma”, dirigido por el Dr. Quindos Poncela, cuyos objetivos son la validación del Proyecto Marna, el estudio de la radiactividad en suelos, la evaluación de los niveles de radón en casas, el análisis del gas radón en profundidad (permeabilidad) y, finalmente, el estudio de correlaciones entre ellos.

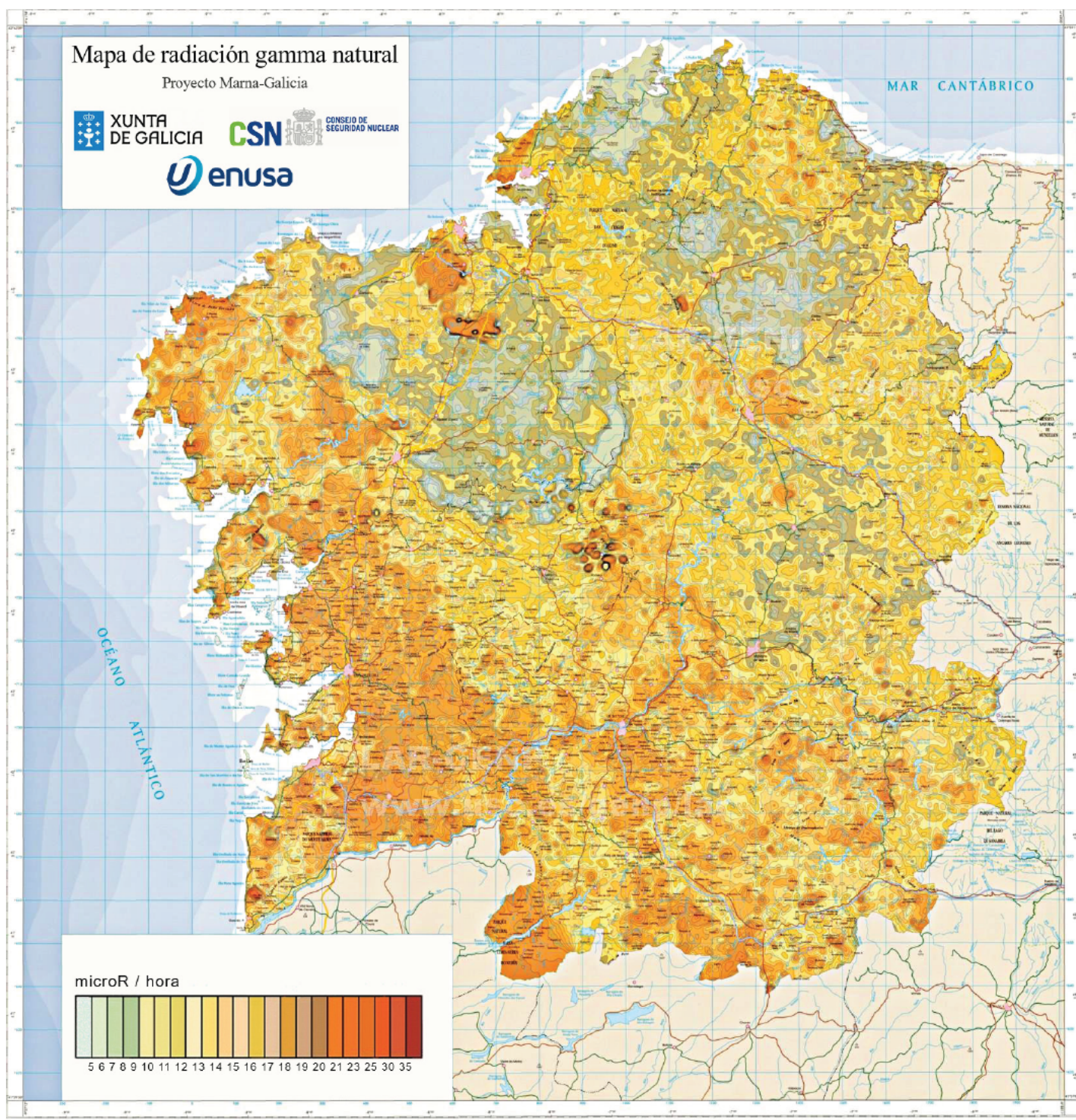


Fig. 20 - Mapa del radón en Galicia, proyecto Marna  
Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear.

El presente trabajo emplea los protocolos de medición del grupo de radón de la universidad de Cantabria apoyándose en el mismo para la realización de las mediciones de la fase experimental.

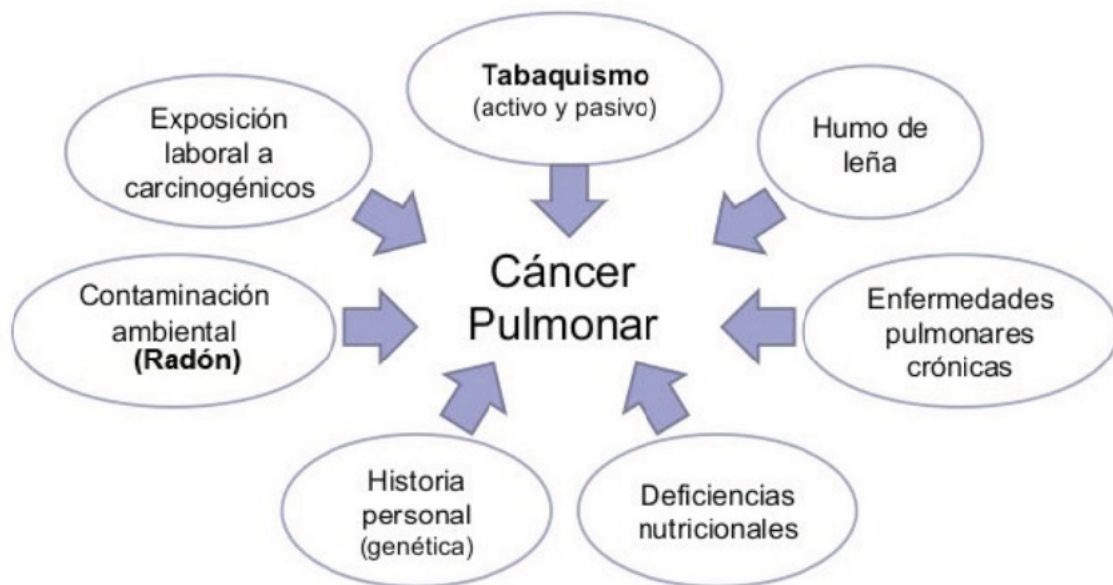
## Riesgos inherentes a la exposición a radiaciones ionizantes

Juan M. Barros Dios (2012) explica que el cáncer de pulmón es un importante problema sanitario, que en el año 2010 supuso la tercera causa de muerte en España, la segunda en hombres y la duodécima en mujeres (Instituto Nacional de Estadística, 2012), entre las que la incidencia está aumentando. La supervivencia a esta grave dolencia apenas ha mejorado en los últimos 30 años, siendo del 12-13% a los 5 años del diagnóstico (EUROCORE IV, 2009). La detección en estadio I aumenta mucho la supervivencia que puede llegar al 55-60% a los cinco años (registro SEER USA, 2012).

El cáncer de pulmón, es de etiología multifactorial y el principal factor de riesgo es el tabaco, al que se le atribuye el 79% de todos los casos en hombres y el 47% de todos los casos en mujeres (López et al. 2006). Otros factores de riesgo son: la ocupación, la dieta, las enfermedades respiratorias previas, la realización de ciertas actividades de tiempo libre (Prini-Guadalupe et al., 2012) y, sobre todo, la exposición a radón residencial.

Como se puede comprobar en los mapas de radón de Galicia (Barros-Dios et al., 2016), aproximadamente el 35% de todos los domicilios superan el nivel admisible de las autoridades norteamericanas, cerca del 20% de los municipios superan el 10% de casas con más de 200 Bq. Se ha estimado que una muerte diaria por cáncer pulmonar se atribuye a la exposición a radón residencial (Pérez-Rios et al., 2010).

A partir de concentraciones bajas de gas radón, el riesgo de cáncer pulmonar se duplica (Barros-Dios, 2012).



**Fig. 21 - Factores de riesgo de cáncer pulmonar.**

*Fuente: <https://es.slideshare.net/mobile/AlmiuxAs/strate-de-tx-ca-pulmon-02-oct-2014>. Croquis del autor.*

## 2.1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN EL INTERIOR DE LAS EDIFICACIONES

El radón se genera principalmente en el subsuelo por la presencia y desintegración del radio. Es exhalado hacia la superficie y penetra en los espacios huecos de las construcciones, debido fundamentalmente a la porosidad del suelo y a la diferencia de presiones existente entre el terreno y el interior de los edificios (proceso convectivo) (Frutos & Olaya, 2011).

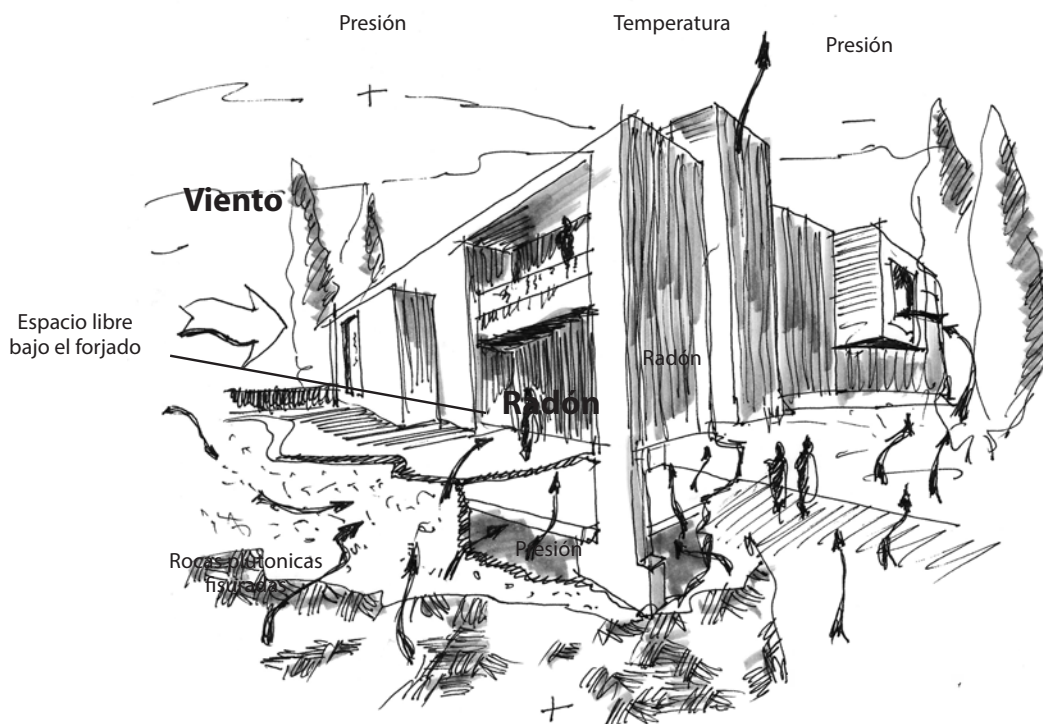


Fig. 22 - Esquema de movilidad del gas radón.  
Fuente: Croquis del autor.

La mayor exposición al radón suele producirse en el hogar y en el trabajo. La concentración de gas radón en una construcción destinada a albergar personas depende de la cantidad de uranio que contengan las rocas y el terreno del subsuelo; la porosidad del suelo, la permeabilidad, los fenómenos atmosféricos, las vías que el radón encuentra para filtrarse en la construcción los fenómenos convecti-

vos y la tasa de intercambio de aire entre el interior y el exterior, que depende del tipo de construcción, los hábitos de ventilación de sus habitantes y la estanqueidad del edificio. El radón suele alcanzar concentraciones más elevadas en los sótanos, en las bodegas y en general en aquellas zonas en contacto directo con el terreno (Chinchón, Morales, Piedecausa, & Sanjuán-Barbudo, 2011).

## Elementos determinantes a tener en cuenta en la concentración del gas radón

Los elementos determinantes en la concentración del gas radón en los edificios son

**La composición del terreno.** Según Barros Dios el gas se acumula en el interior de los edificios a partir de la exhalación desde el subsuelo sobre el que se asienta la construcción, en mayor proporción si las rocas del mismo son ricas en uranio (Barros-Dios, 2017).

**La situación de la construcción,** será otro factor a tener en cuenta. Para conocer el nivel de riesgo de la zona territorial donde se ubica, se recurre a los mapas del radón, que permiten estimar la concentración de radón a la que pueden estar expuestos los ciudadanos en función de su lugar de residencia. En Galicia, los mapas de radón residencial por municipios pueden consultarse a través de la web [http://www.usc.es/radongal/mapa\\_med.html](http://www.usc.es/radongal/mapa_med.html).

El tercer factor a tener en cuenta son **los mecanismos de flujos del gas**, que se desplaza por incidencia diferencial de las presiones atmosféricas (Quindós et al, 2015) y de las precipitaciones (Frutos, 2009).

**Los materiales de construcción,** cuya incidencia si bien no es determinante, si pueden constituir un aporte adicional a la concentración de gas radón interior, según el profesor Luis Quindos (2016) puede pasar que los materiales de construcción contengan uranio o radio y por tanto exhale radón,

de manera que afecte a todo el edificio; pero son casos excepcionales.

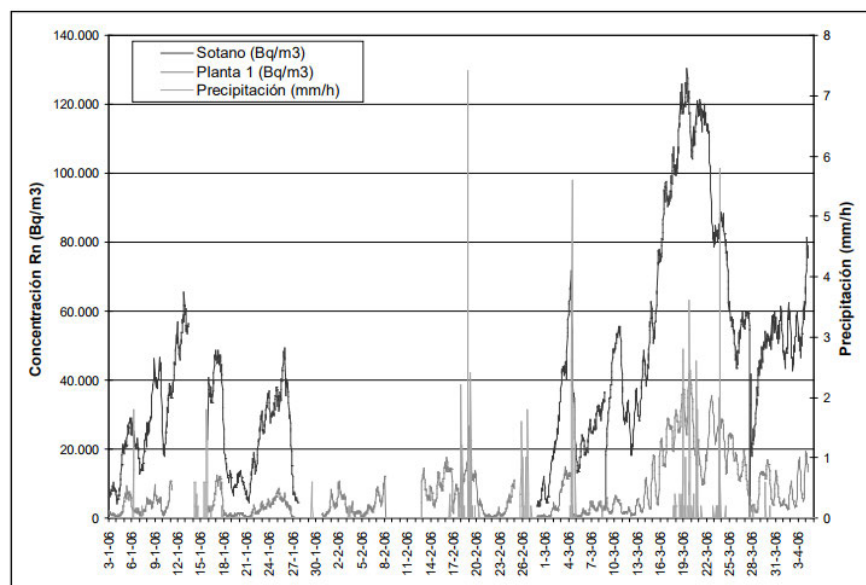
**La influencia de la presión atmosférica y las precipitaciones en la concentración de gas radón (Humedad y saturación).**

Los cambios en las variables atmosféricas como el viento, la lluvia, las presiones atmosféricas o la temperatura, son determinantes en el cambio de esa diferencia de presiones entre el terreno y el interior y, por tanto, causantes de que el flujo de radón hacia el interior no sea constante (Frutos & Olaya, 2011).

Las condiciones meteorológicas predominantes juegan un importante papel cuando se está considerando el riesgo al que puede estar sometida la población ante la concentración de radón. Ante una bajada de presión atmosférica, se produce un mayor flujo de radón hacia los espacios interiores por procesos convectivos, debido al aumento de las diferencias de presión entre el subsuelo y el interior de la edificación. A medida que baja la presión atmosférica, se produce un descenso de presión casi instantáneo en los espacios vacíos del interior de las construcciones, mientras que en los poros del terreno este descenso no se manifiesta hasta pasado un lapso de tiempo mayor, que dependerá de la porosidad del terreno. Durante este desfase se establece un mayor flujo de radón hacia el interior debido a que la presión del terreno aún no se ha igualado a la del edificio y por tanto es superior (proceso convectivo), por el contrario; al producirse una brusca subida de la presión atmosférica, la inmisión de radón a la superficie se verá reducida durante el período de tiempo que tardan en aproximarse las presiones del terreno y la atmósfera (García-Tobar, 2014).

El gas radón que se emite a la atmósfera por exhalación desde el subsuelo, es transportado por el viento y tiende a ser depositado en la superficie terrestre por deposición húmeda o seca. La deposición seca tiende a elevar los niveles de radón y se produce por efecto de la gravedad al ser el gas más denso que el aire, tiende a concentrarse en oquedades y espacios interiores.

La deposición húmeda se produce por arrastre por agua de lluvia, nieve o niebla. Como estas precipitaciones normalmente tienen una distribución espacial muy heterogénea, la sedimentación suele presentar grandes variaciones en su localización territorial. Al producirse una precipitación moderada, inicialmente, su efecto será la mitigación de los índices de concentración, pues se produce un efecto lavado que diluye la concentración del gas en el aire. Si bien posteriormente se producirá un notable incremento de las concentraciones en el interior de las construcciones, se ha comprobado por el Instituto Eduardo Torroja (Frutos, Olaya & Esteban 2011), que estas precipitaciones producen la saturación de los poros del terreno expuesto, mientras que en las zonas a cubierto, en el interior o debajo de los edificios, el terreno permanecerá seco y por lo tanto más permeable; produciéndose un efecto convectivo de evacuación del radón hacia los poros no saturados. Esta correlación se muestra en el siguiente gráfico



**Fig. 23 - Gráfico de correlación convección-saturación.**  
*Fuente: Frutos (2011).*

El gas presente en el aire también puede ser diluido por procesos de difusión atmosférica (difusión turbulenta).

Otro proceso convectivo, que afecta al comportamiento de los flujos de radón, es el que se produce por la diferencia de presión entre el interior y el exterior de las construcciones y que tiene sus propios factores:

El primer factor es la diferencia de presiones que se produce entre un lado y su opuesto en una construcción a causa de la geometría de la construcción y de los edificios cercanos. Pues la depresión formada a sotavento y en el interior de la construcción, provocará que el flujo del radón se encamine hacia las zonas de menor presión

El segundo de los factores que indican la motilidad del gas, es el producido por el gradiente de temperaturas habitualmente existente entre exterior e interior de una construcción en uso. A mayor temperatura del aire interior, se producirá una depresión en el interior del edificio que favorecerá el transporte del gas por convección hacia el interior.

Tipo de material	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)
Hormigón	18 – 67	3 – 43	16 – 1100
Hormigón ligero	10 – 60	6 – 66	51– 870
Ladrillo	7 – 140	8 – 127	227 – 1140
Yeso	1 – 67	0,5 – 190	22 – 804
Cemento	13 –107	7 –62	48 –564

Fig. 24 - **Tabla de concentraciones de gas radón en materiales de construcción.**  
*Fuente: Elaboración propia, a partir de Chinchón et al. (2011).*

## Los materiales de construcción y su incidencia en la concentración de gas radón en el edificio.

El radón se filtra en las casas a través de grietas en los suelos o en la unión del piso con las paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables, pequeños poros que presentan las paredes construidas con bloques de hormigón huecos, o por los sumideros y desagües. Las actividades como la minería subterránea o la explotación de las aguas termales, conlleva un riesgo significativo por la exposición a este gas (Martín-Matarranz, 2004).

Una parte de la concentración de gas radón puede proceder de los materiales con los que está construido el edificio que por sus propiedades físicas determinadas por su origen y composición, pueden contribuir al incremento de las concentraciones de radón interior, que se estima entre un 15% y un 20% del total acumulado de acuerdo con varios estudios (Ruano Raviña et al, 2002 & Chinchón, et al.,2011), esto supone una cantidad de aproximadamente 10Bq/m<sup>3</sup> a 20Bq/m<sup>3</sup> lo que no representa una exposición relevante como fuente aislada, si bien contribuye al sumatorio global de concentración de gas interior.

Algunos materiales de construcción liberan gas radón debido a su composición, principalmente aquellos que contienen piedras naturales de origen plutónico, como el granito, pero también exhalan radón los que tienen en su composición escorias de altos hornos, cenizas volcánicas o puzolánicas o materiales tan habituales como los ladrillos, el cemento portland, la arena, la grava, el yeso natural e incluso en pequeña proporción, la madera (Chinchón, et al.,2011).

Los materiales de construcción no constituyen de por sí, una fuente de exposición determinante de concentraciones peligrosas de radón, si bien en combinación con otros factores, tales como la localización geográfica, la forma de la edificación, las condiciones atmosféricas o las condiciones de ventilación, pueden contribuir a incrementar las concentraciones de radón interior.

## 2.13 SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS A LA ACUMULACIÓN DE GAS RADÓN EN EL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS

Las mayores concentraciones de radón, se producen principalmente en sótanos y plantas bajas de locales con deficiente o escasa ventilación, si bien dependiendo de la zona geográfica donde se ubique la construcción se pueden alcanzar concentraciones importantes incluso en plantas superiores o en locales suficientemente ventilado .

Los expertos proponen diferentes soluciones para la reducción o mitigación de las concentraciones del gas en el interior de las construcciones basadas en contrarrestar los mecanismos de entrada del radón estudiados en los apartados anteriores, estas estrategias pueden resumirse en la aplicación de tres mecanismos básicos, como son, la ventilación, la despresurización del terreno bajo la construcción o la interposición de barreras de estanqueidad (Frutos Vázquez & Muñoz Lorenzo, 2016).

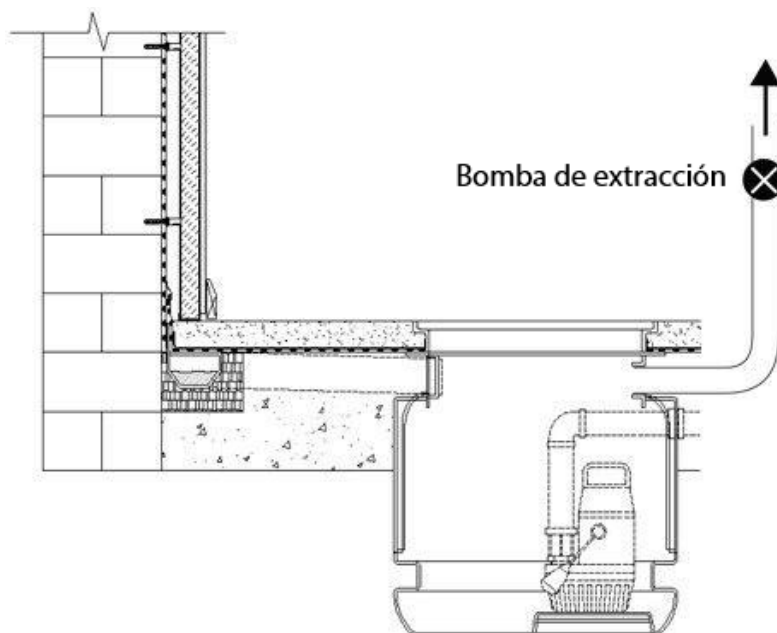


Fig. 25 - Detalle constructivo de instalación de sistema de despresurización por pozo de extracción con tiro forzado.  
Fuente: [www.safeguardeurope.com](http://www.safeguardeurope.com)

Los mecanismos basados en sistemas de extracción o despresurización se pueden clasificar según las condiciones de evacuación en sistemas de tiro natural o de tiro forzado. Los de tiro natural aprovechan la configuración natural del campo de presiones mediante el vaciado de huecos o espacios bajo la edificación ventilados que actúan como elementos de canalización del gas, minimizando así su entrada en el interior de los espacios habitables.



**Fig. 26 - Detalle de instalación de canalizaciones de despresurización.**  
*Fuente: [www.cavitytrays.com](http://www.cavitytrays.com)*

Los sistemas de tiro forzado son aquellos que cuentan con elementos extractores mecánicos que generan depresiones en una red de tuberías de drenaje situadas en diversos puntos de la edificación, ambos sistemas pueden realizarse mediante construcción in-situ o

mediante el empleo de elementos prefabricados y son indicados para su aplicación en grandes áreas.

Las estrategias de ventilación se organizan por su funcionamiento en dos mecanismos diferenciados, el primero pretende la dilución de la concentración del gas mediante el intercambio de aire con el exterior. El aire exterior suele presentar concentraciones siempre por debajo de los 70Bq/m<sup>3</sup> y ordinariamente no supera los 20Bq/m<sup>3</sup> por lo que, al combinarse con el aire interior que presenta mayores concentraciones de radón, del orden de más de 300Bq/m<sup>3</sup> el sumatorio de ambos produce una proporcional disminución de la concentración.

Los mecanismos de ventilación que actúan mediante la modificación del estado de presiones en el interior de la construcción, se basan en estrategias de redireccionamiento de los flujos de inmisión y ventilación, mediante la modificación del gradiente de presiones.

Actuando sobre la forma de la construcción (ubicación de huecos de ventilación-convección) se modifica el estado de presiones  $\Delta$  entre el terreno y el interior de la construcción, variando su signo, de negativo a positivo, y de esta forma se consigue minimizar la penetración del gas en el interior de la construcción y a su vez, se favorece su excreción hacia el exterior (Frutos-Vázquez, García-Ortega, Linares-Alemparte y Olaya-Adán, 2016).

Los sistemas de barreras consisten en la aplicación de una membrana estanca al paso del gas con un bajo coeficiente de difusión, estas barreras resultan eficientes siempre y cuando se garanticen las condiciones de aplicación, fundamentalmente lo que respecta a su continuidad, con especial atención a las juntas, tanto de dilatación como perimetrales y a las características del material empleado que debe presentar una alta resistencia al desgarro y al puncionamiento, gran elasticidad y alta durabilidad compatible con agresiones químicas y biológicas.

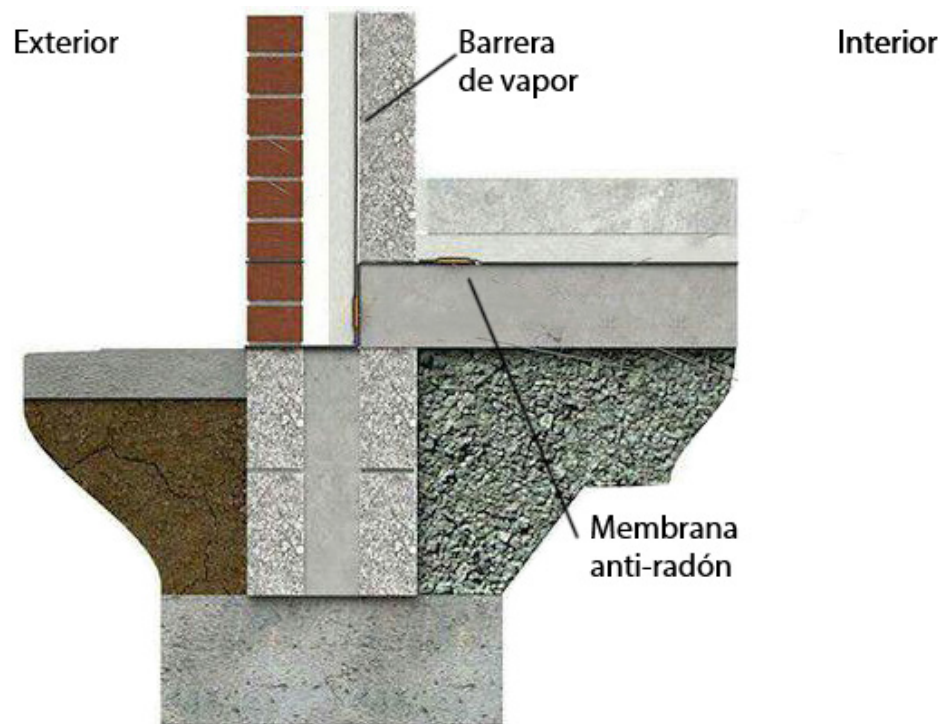


Fig. 27 - Detalle constructivo de colocación de membrana anti-radón en obras de rehabilitación.  
Fuente: Infografía del autor modificada a partir de [www.necoflex.ie](http://www.necoflex.ie)

La aplicación de estas soluciones de interposición se puede realizar mediante elementos prefabricados, paneles o en rollo, así como in-situ mediante proyección. Son indicadas para pequeñas superficies y como complemento de otras estrategias (Frutos & Olaya, 2010). Estas membranas son indicadas tanto para proyectos de nueva construcción, en cuyo caso se ubicarán bajo la solera, como para proyectos de rehabilitación, en estos casos irán colocadas sobre la solera.



Fig. 28 - Detalle constructivo de colocación de membrana anti-radón en obras de nueva construcción.  
Fuente: Infografía del autor.

## 2.1.4 MARCO LEGAL

A continuación se realiza un breve repaso del estado actual de la normativa a nivel internacional, nacional y autonómico con respecto al control de la exposición al radón.

En los albores del presente milenio, en EEUU entran en vigor en varios estados una serie de leyes y normativas con el objetivo de minimizar la incidencia del radón en la calidad del aire interior. La EPA (Environmental Protection Agency) publica “Assesment of Risk from Radon” (2003), recomendando hacer mediciones de radón en las viviendas y limitando la compraventa de inmuebles a la certificación del índice de radón por un técnico autorizado. Por otro lado, también publica “Building Radon Out”: A Step-by-Step Guide on How to Build Radon-Resistant Homes”, un manual técnico para arquitectos y constructores, donde se indican las técnicas existentes para la eliminación del gas radón que se basan en las estrategias relacionadas en el epígrafe anterior.

En Noruega, Suiza, el Reino Unido y los EE. UU., las mediciones del radón ya se tienen en cuenta como parte del proceso de compraventa de una vivienda (OMS 2007).

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) emitió en noviembre de 2009 un comunicado “ICRP Statement on Radon” que recoge las nuevas recomendaciones sobre la exposición doméstica al radón. Según estas, el coeficiente de riesgo se incrementa en un factor de aproximadamente 200% con respecto al propuesto en la publicación anterior (ICRP, 1993). En consecuencia, la ICRP propone sustituir el antiguo valor de 600 Bq m<sup>3</sup> de concentración media anual, establecido como límite superior del intervalo de concentración para fijar niveles de referencia en viviendas, por un nuevo valor de 300 Bq m<sup>3</sup> ( 18 mSv).

Se introduce el concepto “nivel de referencia” que representa un valor de dosis o de riesgo por encima del cual se considera inadecuado permitir ninguna exposición, y por debajo del cual debe aplicarse el principio de optimización, hasta este momento solo se instaba a emprender acciones cuando se superaba el “nivel de actuación”.

Los nuevos Basic Safety Standards (BSS) del ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL de los ESTADOS AMERICANOS (OIEA, 2011) adoptan el nuevo enfoque de la ICRP, tanto en el concepto de nivel de referencia como en los valores numéricos propuestos para viviendas ( $300 \text{ Bq m}^3$ ) y puestos de trabajo ( $1.000 \text{ Bq m}^3$ ).

También a partir de los recientes descubrimientos acerca de los efectos sobre la salud de este agente cancerígeno, la OMS lanzó un proyecto internacional que culminó con la publicación de un documento (WHO Handbook on indoor radon, 2009). Entre sus principales conclusiones, recomienda fijar niveles de referencia nacionales de  $100 \text{ Bq m}^3$  o, en caso de que este valor no se considere factible por las particularidades del país, de  $300 \text{ Bq m}^3$ .

En Europa La Directiva EURATOM (2013) del Consejo Europeo, tiene por objetivo que los estados aseguren la protección efectiva de los trabajadores y la población contra los riesgos de las radiaciones ionizantes y pretende el establecimiento de normas de seguridad uniformes en los países miembros.

La Unión Europea publicó en 2013 la DIRECTIVA 2013/59/EURATOM que deroga la Directiva 96/29 /EURATOM y complementarias, revisando los requisitos establecidos en las mismas, consolidando la legislación europea sobre protección radiológica y adoptando el concepto de nivel de referencia establecido por la ICRP.

Tiene como objetivo la protección sanitaria de los trabajadores, de la población, de los pacientes y de otras personas garantizando un nivel de umbral de protección uniforme.

En esta normativa de obligado cumplimiento, se ordena a los estados miembros establecer un plan de acción a nivel nacional, para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo para cualquier vía de entrada del radón. Esta Directiva fija en el art. 74 un nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superará los 300 Bq m<sup>3</sup>, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional

Respecto de los materiales de construcción establece que se deben determinar las concentraciones de actividad de una serie de materiales especificados en el Anexo 8 de la Directiva.

En cuanto a las responsabilidades, la Directiva establece que los estados miembros garantizarán que sean las empresas las responsables de evaluar y aplicar las medidas de protección radiológica de los trabajadores expuestos, requiriendo que las mediciones de radón se lleven a cabo en lugares de trabajo que estén ubicados en áreas identificadas por sus valores elevados de radón. Esta Directiva está en vigor desde 6.2.2014 y tiene que ser transpuesta por los estados miembros antes del 6.2.2018.

En España la protección contra las exposiciones a la radiación natural se incluye por primera vez en la legislación en el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes(RPSRI), modificado por el Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre y por la Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011 (BOE Núm. 22 Jueves 26 de enero de 2012) donde se establece que el nivel para la protección de los trabajadores frente a la exposición al Rn-222 en sus puestos de trabajo debe ser de 600 Bq/m<sup>3</sup> de concentración media anual de Rn-222, durante la jornada laboral. Este se considera un nivel de referencia por encima del cual deben aplicarse las correspondientes medidas de protección radiológica, en el caso de que una vez realizadas acciones de remedio no se consiguiera reducir la concentración de

radón. Se entiende por acciones de remedio aquellas destinadas a disminuir la concentración de radón.

En el caso de los lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público el nivel de intervención será de 300 Bq/m<sup>3</sup> de concentración media anual de Rn-222. Se entiende por lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público aquellos en que los que los miembros del público pueden permanecer un número de horas superior al de permanencia de los trabajadores (hospitales, centros penitenciarios, etcétera). Se incluyen en esta categoría los centros de educación infantil, primaria y secundaria.

Pero expertos como el profesor Quindós Poncela son de la opinión que a la hora de fijar dichos valores no se tuvieron en cuenta criterios exclusivamente científicos, sino que influyeron condicionantes políticos y sociales tales como no crear alarma entre la población y que en realidad, valores incluso inferiores a los 100 bq/m<sup>3</sup> ya constituyen un importante riesgo para la salud. Las condiciones de salubridad en la edificación para España, están recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE). En la actualidad, esta normativa no contempla la protección de usuarios/as de los edificios frente al riesgo de radón.

La protección contra el radón en viviendas se aborda asimismo en la Guía de Seguridad 11.02 del CSN. En ella, de acuerdo con las disposiciones internacionales se recomienda un nivel de referencia nacional de 300 Bq/m<sup>3</sup> de concentración media anual de radón, y un nivel objetivo de diseño para edificios de nueva planta o para viviendas en las que vayan a acometerse acciones de mitigación de 100 Bq/m<sup>3</sup>. A los edificios de uso público de larga estancia (como hospitales, residencias, etc.) les aplica el mismo nivel de referencia que a las viviendas; al igual que a los centros de educación infantil, primaria y secundaria (IS-33), con la finalidad de proteger especialmente a los niños.

## LA LEGISLACIÓN DEL RADÓN EN GALICIA

Curiosamente la Ley 18/2008, de 29 de diciembre, de Vivienda de Galicia (vigente hasta el 13 de Agosto de 2012) en su art. 11 apartado c) establecía que:

*...La obtención y el mantenimiento de ambientes saludables en el interior del edificio, mediante la prevención de las emisiones nocivas, especialmente las de gas radón, y de la contaminación del aire, y la protección contra el ruido, así como la adecuada ventilación de los espacios habitables.*

Sin embargo, la disposición que deroga la Ley 8/2012, de 29 de junio, de Vivienda de Galicia, no hace mención alguna a la problemática del radón.

En las normas del Hábitat de la comunidad Autónoma de Galicia en el apartado I.A.1.3. Calidad ambiental y sostenibilidad, señala que:

*... Deberá garantizarse que, como consecuencia del diseño del edificio, así como la implantación en el mismo de otros usos o actividades complementarias de la edificación, la calidad del aire exterior utilizado en la renovación del aire interior de las viviendas no se encuentra contaminado. Asimismo, se tendrá especial consideración en la eliminación de la posible contaminación de las viviendas por gas radon... En la configuración de la vivienda y con objeto de mejorar el diseño de la calidad ambiental de las viviendas deberá potenciarse la implantación de la ventilación cruzada que*

*favorezca la renovación del aire interior de la misma, independientemente del cumplimiento de la normativa DB HS 3 Calidad del aire interior del CTE.*

Y en el apartado I.D.2.3.1 Salubridad. Dice:

*...Toda vivienda unifamiliar aislada deberá separarse del terreno con un espacio mínimo de 60 cm desde el nivel inferior del forjado y garantizar un nivel de ventilación cruzada suficiente que minimice el riesgo de penetración del aire exterior contaminado en el interior de la vivienda, así como el riesgo de humedad procedente del terreno. Asimismo, se tendrá especial consideración en la eliminación de la posible contaminación de las viviendas por gas radón.*

(Decreto 262/2007 de 20 de Diciembre, Diario Oficial de Galicia, Nº 12 de 17 de Enero de 2008, pp. 1110)

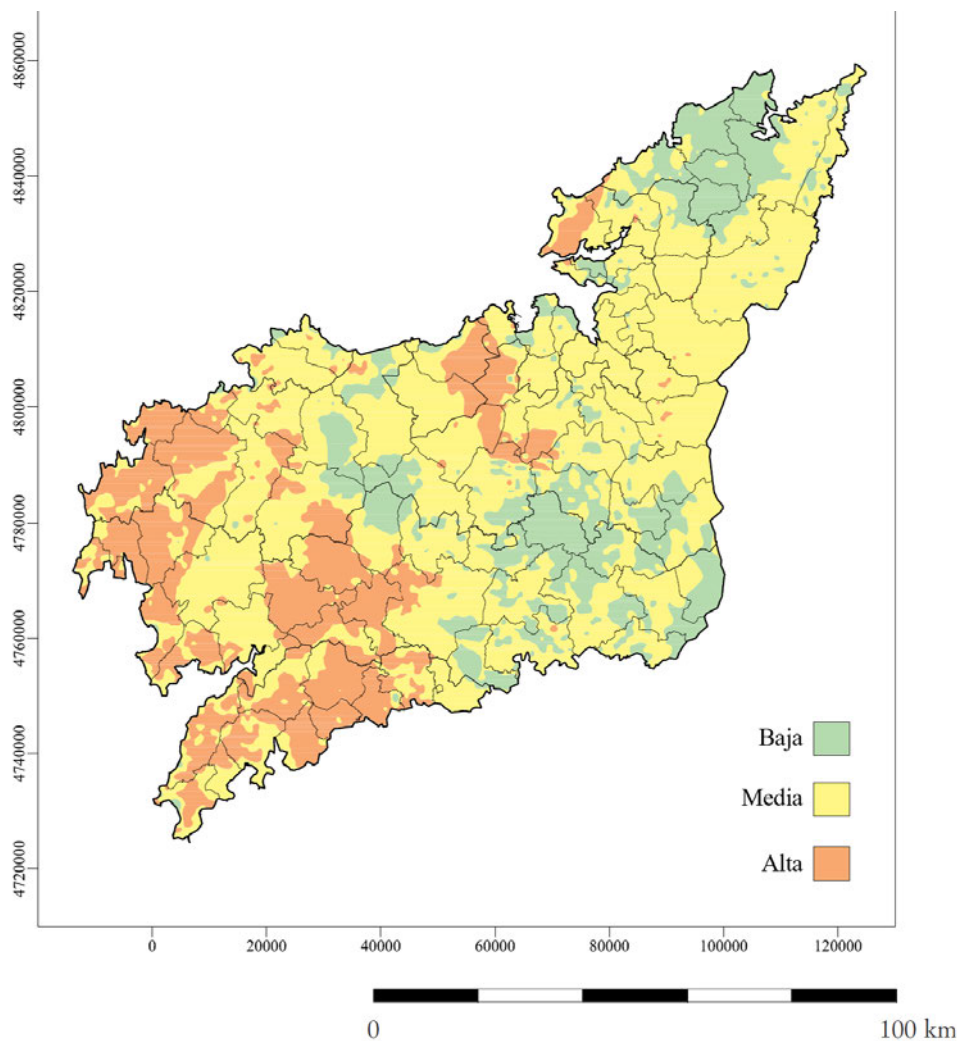
Pero de nuevo, en el Decreto 29/2010 por el que se aprueban las normas de Habitabilidad de las Viviendas en Galicia, que deroga las anteriores, se obvian las garantías justificándose el legislador al señalar en el preámbulo que:

*...el presente decreto pretende limitarse estrictamente a la regulación de las exigencias mínimas de habitabilidad, acotando su campo de competencia, y dejando para la normativa sectorial la reglamentación de asuntos que, si bien se consideran de extraordinaria importancia, se encuentran fuera del ámbito que una normativa de habitabilidad de viviendas*

*debe regular. Tal es el caso de las exigencias constructivas, reciclaje de aguas residuales, ahorro energético, protección frente a las posibles emanaciones de gas radón, etc.*

(Decreto 29/2010, de 4 de marzo, Diario Oficial de Galicia, N° 53 de 18 de marzo de 2010, pp. 3.670)

Hasta la fecha ni el parlamento ni el gobierno de Galicia , a pesar de considerarlo de “extraordinaria importancia”, han aprobado ninguna reglamentación sectorial que transponga las directrices de la normativa europea y estatal, lo que deja “huérfanos” a los profesionales gallegos frente a las posibles responsabilidades y consecuencias legales que podrían derivarse de su actuación en esta materia.



**Fig. 29 - Cate-  
gorías de exposición  
potencial al radón  
en la provincia de A  
Coruña.**

*Fuente: Cadierno  
et al.(2013).*

## 2.1.5 CARACTERIZACIÓN DE LA TIPOLOGÍA EDIFICATORIA OBJETO DE ESTUDIO

De acuerdo con la definición del Manual de la Organización Mundial de la Salud sobre el radón en interiores:

*El radón es un gas radiactivo que emana de rocas y suelos y tiende a concentrarse en espacios cerrados como minas subterráneas o casas. La infiltración de gases del suelo está reconocida como la fuente más importante de radón residencial. (Organización Mundial de la Salud, 2015, p. 10).*

En el manual divulgativo de la Universidad de Santiago de Compostela sobre el radón residencial disponible en [www.usc.es/radongal](http://www.usc.es/radongal), nos dice que es en sótanos o entresuelos en los que se acumula mayor cantidad de radón que posteriormente se difunde hacia los pisos superiores. (Barros Dios, 2010).

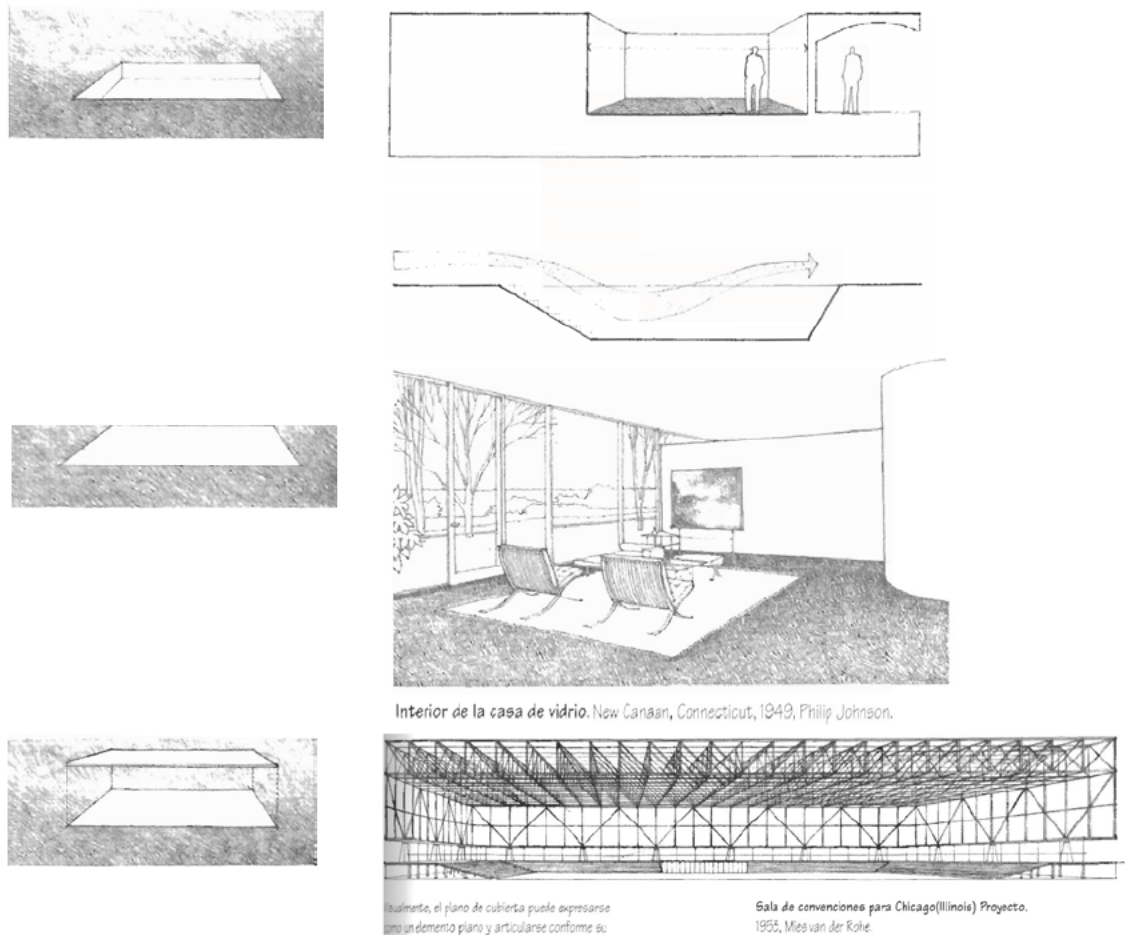
En las derogadas Normas del Hábitat de la Comunidad Autónoma de Galicia, las únicas con referencia a la problemática del radón se indica la conveniencia de que toda vivienda deberá separarse del suelo una distancia no inferior de 60 cm mediante una cámara de aire ventilada (DOG N° 12 de 17 de Enero de 2008), esta consideración fue modificada en el Decreto 29/2010 que si bien no hace mención expresa al gas radón, porque lo deja pendiente de una legislación sectorial específica, si mantiene la obligatoriedad del criterio de diseño de salubridad en las viviendas que carezcan de sótano, de formalizar la separación con el terreno mediante una cámara de aire, convenientemente ventilada, de 0,20 m de altura mínima (DOG, N° 53 de 18 de marzo de 2010). En ambos casos se trata de sistemas de ventilación no forzada mediante gradiente de presión.

Esta investigación se centra en el análisis de los elementos constructivos de contacto con el terreno, por constituir éstos un elemento esencial en la concentración del radón en el interior de las construcciones y el único contemplado en la normativa española, tanto desde el punto de vista del diseño como desde el de las especificaciones de ejecución.

Como se puede observar, la normativa de la Comunidad Autónoma de Galicia exige implementar soluciones de diseño basadas en la ejecución de forjados sanitarios o cámaras de aire ventiladas de separación con el terreno, sin embargo, en algunas ocasiones como es el caso de la existencia de sótanos, la norma no lo exige, y por lo tanto, no queda claro cual constituye la mejor solución de diseño para evitar la acumulación del gas radón en el interior de las construcciones, planteándose las siguientes preguntas: ¿es conveniente, recurrir siempre a los forjados sanitarios y cámaras ventiladas despresurizadas?, o ¿existen otras soluciones de contacto con el terreno tales como sótanos o la simple cimentación directa mediante losa continua, que puedan resultar igualmente eficaces para la protección frente al gas radón?

El número de soluciones posibles de las distintas modalidades de contacto con el terreno de las edificaciones es grande y resulta difícil su clasificación.

Francis Ching, en su obra titulada “*Arquitectura, forma, espacio y orden*”, considera el plano base un elemento primario de la arquitectura, este plano según sea su posición respecto del terreno, puede clasificarse como Plano Base Deprimido, cuando el plano horizontal se sitúa bajo el plano del terreno, Plano Base Elevado, “un plano horizontal que se eleva por encima del plano del terreno... que refuerza la separación visual entre el campo y el terreno circundante” (Ching, F., 1982 p. 99). y plano base predominante cuando define un volumen espacial entre el mismo y el terreno.



**Fig. 30 - Elementos horizontales de contacto con el terreno según F. Ching.**  
*Fuente: Ching. (1982). pp. 99-117.*

En general y desde el punto de vista morfológico las edificaciones se podrían dividir según la forma de contacto con el terreno: en edificios con cimentación excavada que da lugar a espacios útiles, habitables o no (con sótano), y edificios con cimentación en superficie sin sótano. Estos últimos, se dividen a su vez en los que disponen de cámara de aire ventilada bajo las estancias habitables y los que no. Si bien, desde el punto de vista de las presiones, y en consideración a la apreciable influencia que éstas tienen en la concentración del gas radón, también se pueden clasificar según la tendencia provocar o no diferencias de presión entre el terreno y las estancias habitables en el interior de la edificación

Por simplificación y teniendo en cuenta la combinación de ambos conceptos (morfológico y gradiente de presiones), podemos clasificar la mayoría de las soluciones constructivas existentes en tres grandes tipos dependiendo de su elevación relativa sobre la cota natural del terreno:

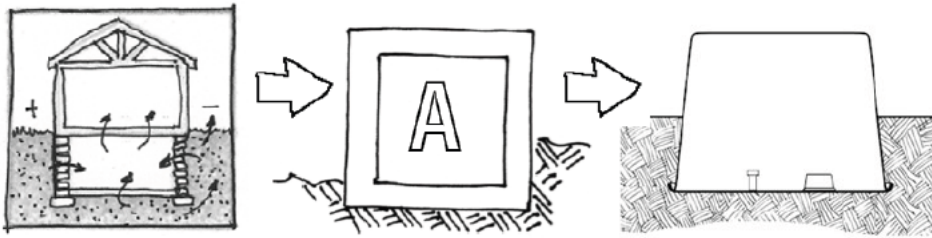


Fig. 31 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo A.

Fuente: Infografía del autor.

TIPO A o “De elevación negativa”. Construcciones con sótano excavado en el terreno y por lo tanto tendentes a generar una diferencia de presión negativa en el espacio resultante. En este grupo se podrían incluir tanto las edificaciones dotadas de estancias situadas total o parcialmente bajo la cota natural del terreno (sótanos y semi-sótanos) como a aquellas que careciendo de las mismas, poseen cámaras de aire situadas total o parcialmente bajo la cota del terreno y que están parcial o deficientemente ventiladas, de tal manera que no garantizan un equilibrio de presiones con su entorno, presentando la misma tendencia que los sótanos a generar áreas de baja presión bajo las edificaciones

Fig. 32 - Construcción tradicional gallega de las agras coruñesas correspondiente al Tipo A.

Fuente: De Llano, P. (1981).

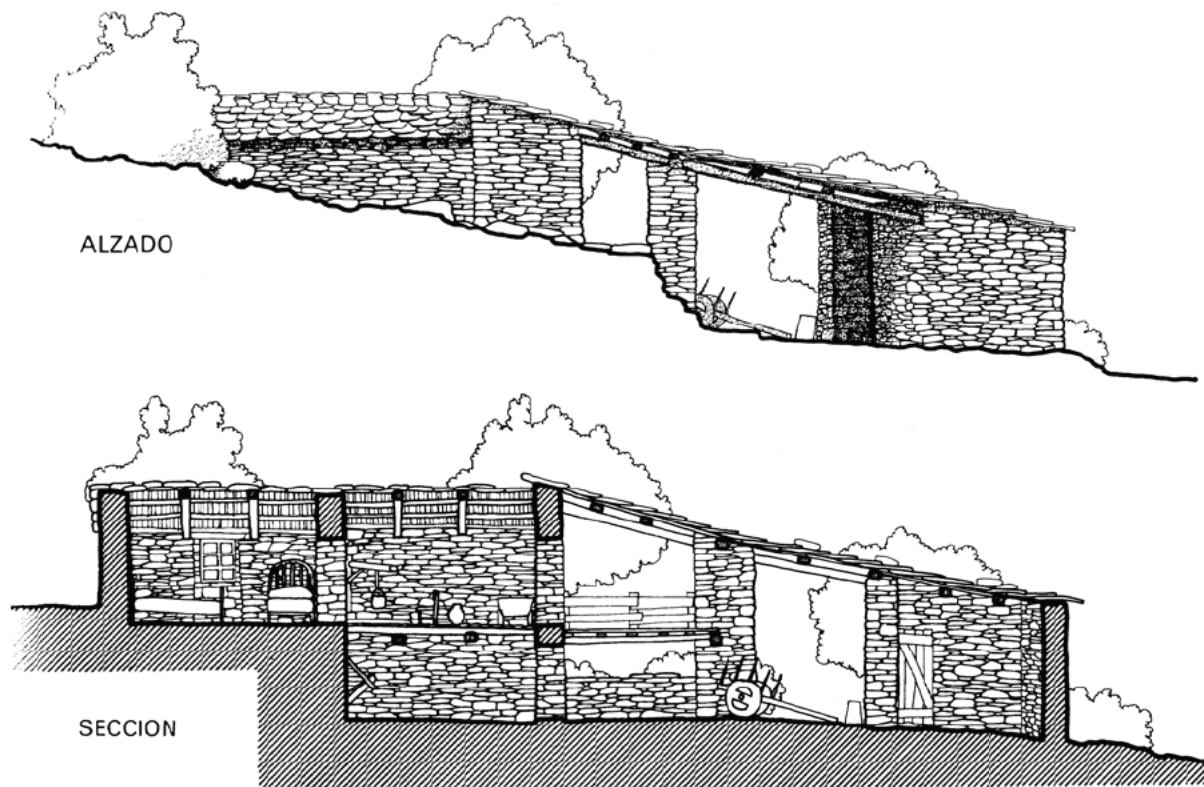
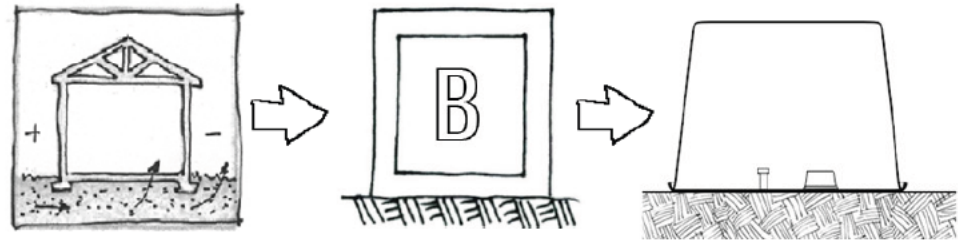


Fig. 33 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo B.  
Fuente: Infografía del autor.



TIPO B. o “De elevación neutra”. Construcciones sin sótano excavado, en las que estancias situadas en la planta inferior se encuentran prácticamente a nivel con el terreno sin que exista bajo el suelo espacio vacante que pueda generar diferencias significativas de presión, el caso más habitual es la losa o zanja de cimentación.

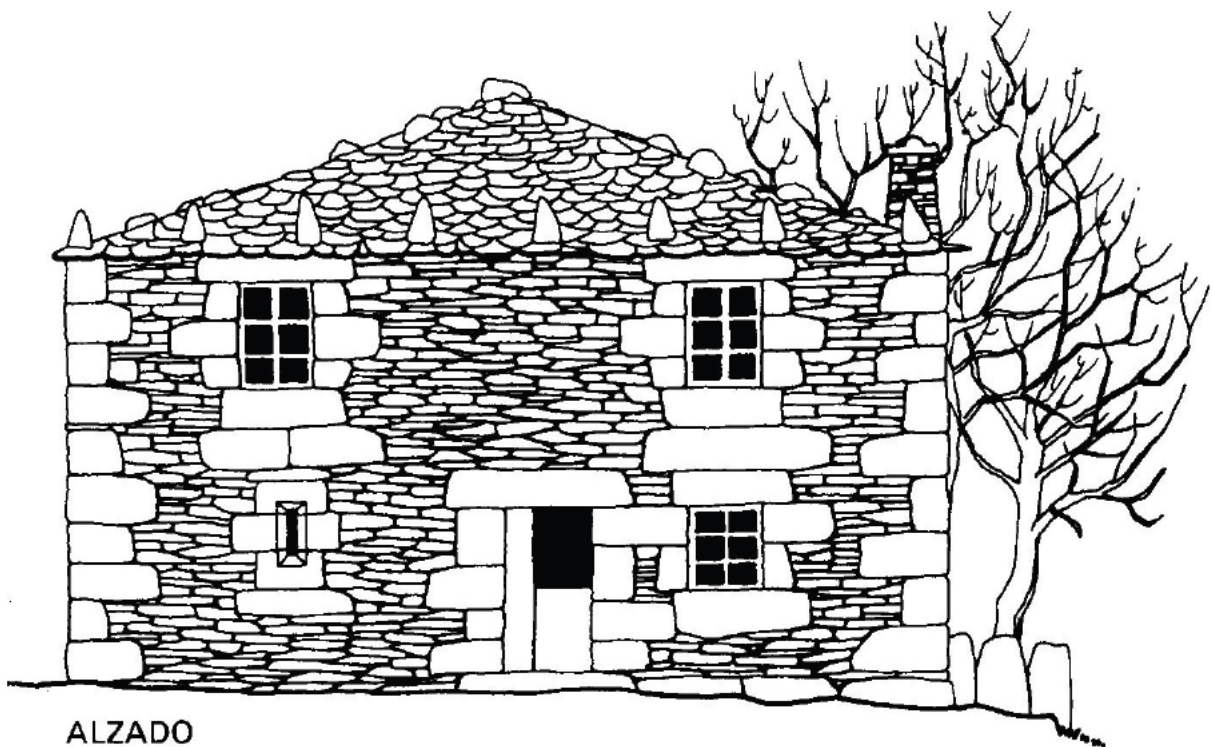


Fig. 34 - Construcción tradicional gallega de las Terra Chá correspondiente al Tipo B.  
Fuente: De Llano, P. (1981). p. 127.

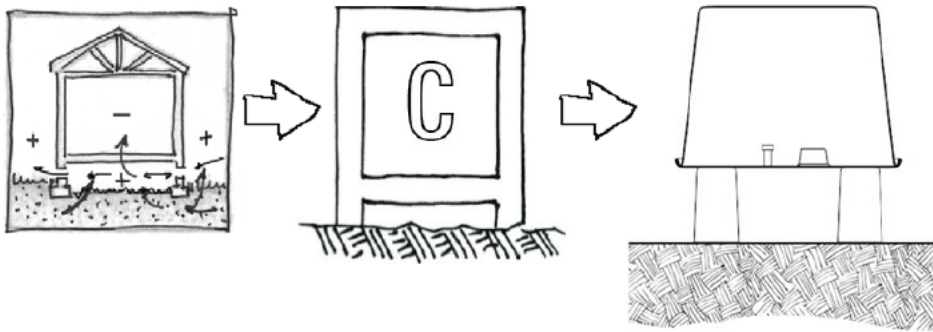
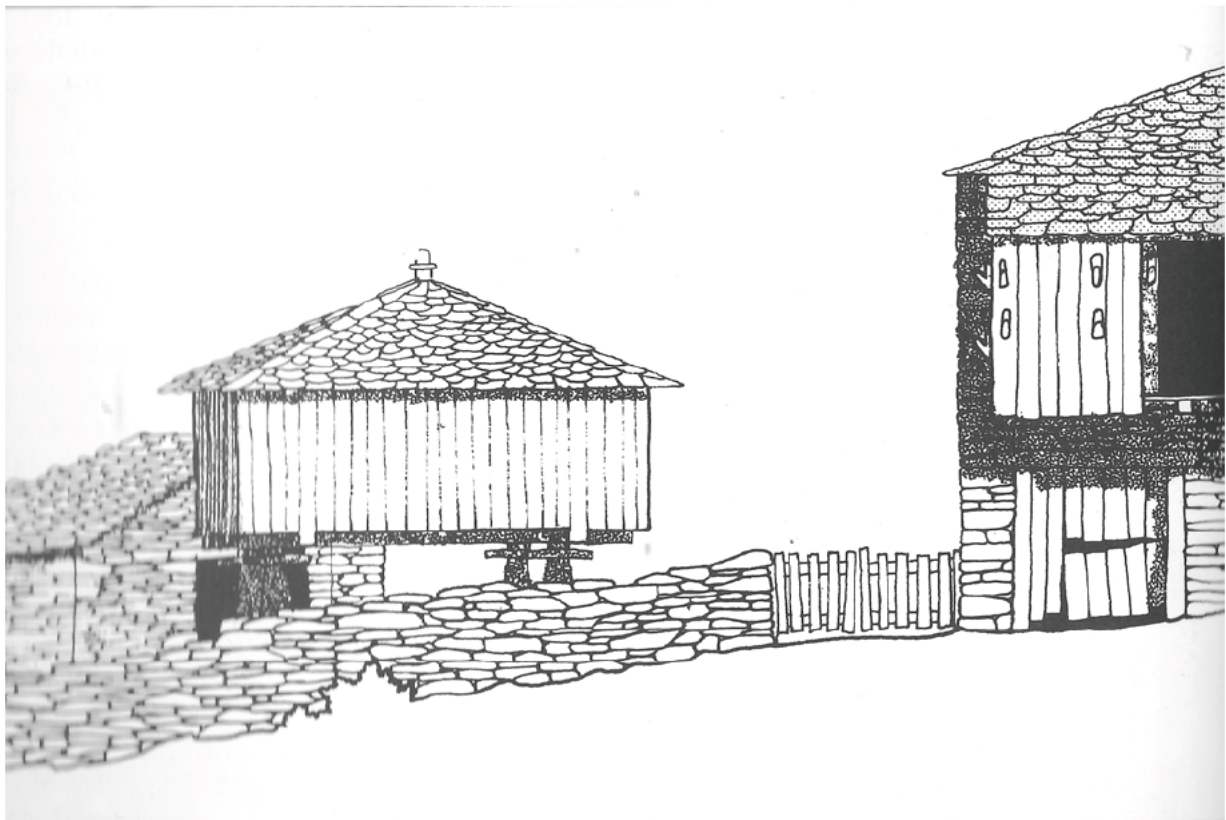


Fig. 35 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo C.  
Fuente: Infografía del autor.

TIPO C o “De elevación positiva”. Construcciones sin sótano excavado, en las que estancias situadas en la planta inferior se encuentran sobre-elevadas, mediante la ejecución de un forjado sanitario a cierta distancia sobre el terreno, elevándose sobre pilares o muros suficientemente ventilados, de forma tal que, al no crear depresión en el terreno garantizan el equilibrio de presiones con el exterior. La forma más habitual es la construcción de forjados sobre pórticos de pilares de hormigón apoyados en zapatas aisladas, combinadas o continuas.

Fig. 36 - Construcción tradicional gallega de la sierra de Ancares correspondiente al Tipo C.  
Fuente: De Llano, P. (1981).



## 2.2 ESTADO DEL ARTE

### Publicaciones de referencia: Textos Científico

A continuación se presentan una serie de artículos científicos seleccionados con el objeto de posicionar al lector en el origen del estudio. Cada uno de ellos muestra el estado actual del conocimiento al respecto de un enfoque concreto de la problemática, y que supusieron un punto de partida para avanzar en la investigación propuesta.

El primero, publicado por un grupo de investigadores del Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad Nacional de Educación a Distancia, bajo el título de “Mapping Radon-Prone Areas Using Radiation Dose Rate and Geological Information” analiza la problemática de la geolocalización de Prone-Areas (zonas propensas al radón) en España. El artículo resulta especialmente interesante ya que, además de proponer una metodología eficaz y de bajo coste para la realización de los mapas predictivos de radón, plantea la necesidad de tomar medidas de prevención en las construcciones ubicadas en estas zonas, y relaciona inequívocamente la información ambiental (como mapas geológicos o  $\gamma$ -radiación), la permeabilidad del suelo y las características propias de las construcciones locales, con la mayor probabilidad de concentraciones de radón en el interior. De aquí la selección para el experimento del Prone-área de Arteixo, en los mapas del radón de la Provincia de A Coruña y el estudio de la permeabilidad del suelo, así como de las características tipológicas de los sistemas constructivos propios de la zona.

La ventaja del enfoque propuesto es que disminuye el requisito de una alta densidad de mediciones haciendo uso de información comúnmente disponible.

Esto permite una más fácil implementación de estrategias de protección, preferencialmente orientadas a las zonas de riesgo mayor, optimizando así los recursos y reduciendo las cargas regulatorias.

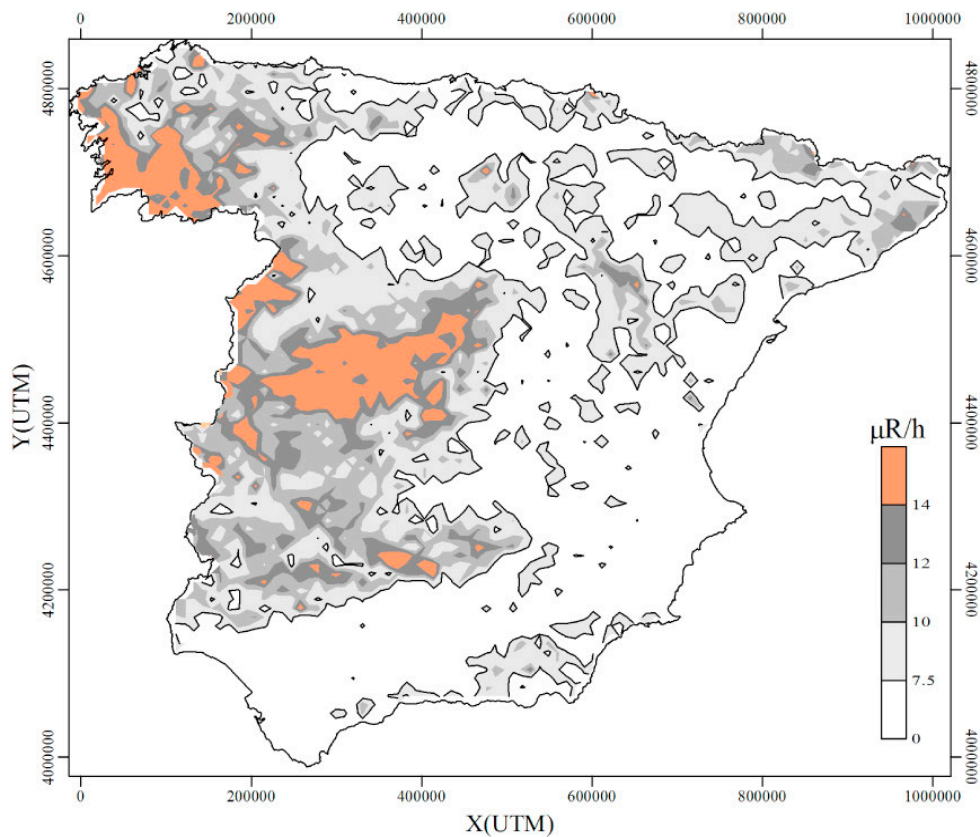


Fig. 37 - Mapa de exposición de rayos  $\gamma$  y a un metro sobre el suelo en España. Las áreas en blanco se clasifican como no Radon-Prone. Fuente: García-Talavera, García-Pérez, Rey y Ramos. (2013).

Reconocen los autores García-Talavera, García-Pérez, Rey y Ramos (2013) que el método propuesto presenta limitaciones en el sentido de la precisión espacial y que los mapas desarrollados sobre mediciones internas reales siempre proporcionarán una estimación más precisa.

En sus conclusiones, los autores destacan la necesidad de contar con mapas predictivos que permitan identificar las zonas propensas a la infiltración de radón, proponiendo un método de bajo coste para la delineación de los mapas, si bien; reconocen la escasa precisión del método, éste presenta ventajas de coste y reducción de los tiempos de elaboración, reduciendo el número necesario de mediciones de radón en interiores.

Proponen la creación de mapas predictivos dinámicos, que aumentan su precisión a medida que se disponen de nuevos datos georreferenciados de radón, procedentes de campañas específicas de muestreo y de pruebas de radón requeridas por la reglamentación, sugiriendo que en zonas por encima del punto de corte de 66 nGy/h,

las predicciones sobre la probabilidad de superar el nivel de referencia no deben hacerse a nivel municipal, sino a nivel de unidad lito-estratigráfica

En el artículo segundo titulado “Cálculo y medida de infiltraciones de aire en edificios” cuyo autor es el Profesor Moises Odriozola de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Minas y Obras Públicas de la Euskal Herriko Unibertsitatea, publicado en 2008 se detallan las técnicas de medición y las características de la infiltración de aire y radón en los edificios, a la vez que se definen con precisión algunos conceptos básicos y terminología relacionada con la materia. Procede en primer lugar clasificando las grietas en la edificación y estableciendo su analogía con los conductos para explicar posteriormente los fundamentos del movimiento del aire en la edificación y los efectos de la temperatura y el viento.

Explica el procedimiento de medición de las infiltraciones y de la estanqueidad, mediante el empleo de modelos empíricos y resulta de gran utilidad para comprender los flujos de inmisión y desplazamiento del gas radón en el interior de las edificaciones.

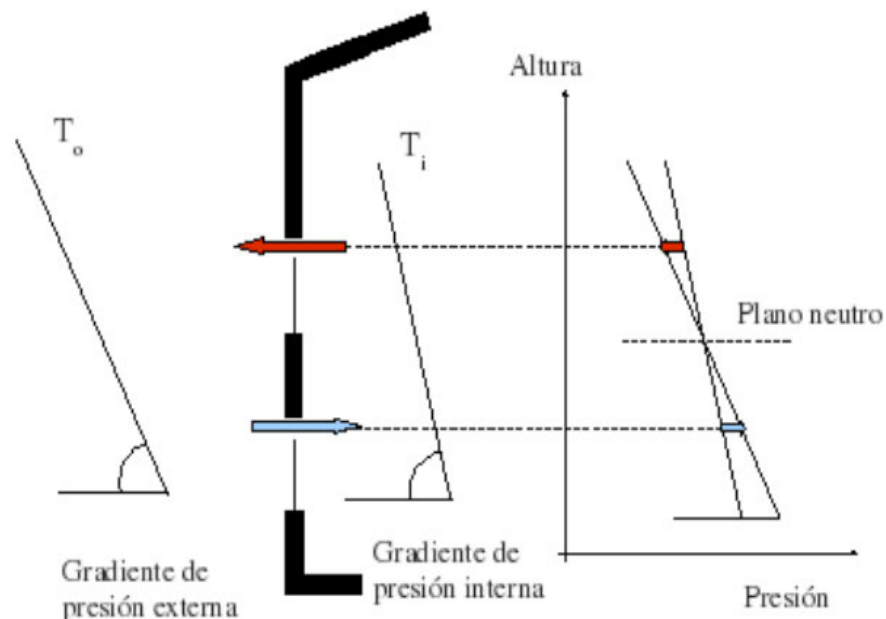


Fig. 38 - Fugas de aire por diferencia de temperatura interior/ exterior.  
Fuente: Odriozola.(2008).

En el tercer artículo titulado “Radioactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte 2. Radiación interna: el gas radón.” sus autores, Chinchón, Morales, Piedecausa y Sanjuán-Barbudo (2011), investigadores del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Alicante y del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), analizan aspectos relacionados con la radiactividad natural en el interior de las edificaciones, sus fuentes e influencias, en concreto, la radiactividad procedente del gas radón y es la segunda parte de otro artículo de los mismos autores (2011) sobre la radioactividad natural de los materiales de construcción.

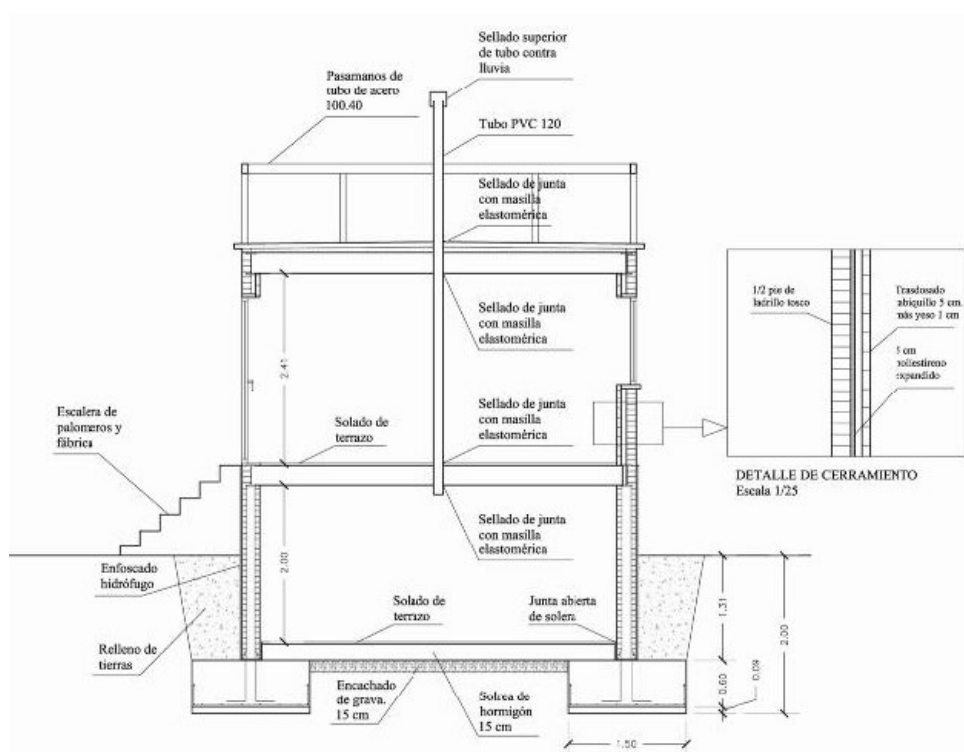


Fig. 39 - Sección del módulo experimental por el eje central. Fuente: Borja Frutos et al. (2011).

Entre otras interesantes aportaciones cuando analiza las fuentes de exposición al gas radón interior, identifica como primera fuente de origen del gas el terreno, destacando que las condiciones atmosféricas son uno de los factores que influyen en la emanación, y en concreto la existencia de bajas presiones atmosféricas contribuye a un aumento de la exhalación, así como las altas velocidades del viento, el aumento de las temperaturas, menciona también que la lluvia, nieve producen una reducción de la exhalación del gas radón.

En cuanto a los materiales de construcción, estima que pueden aportar aproximadamente, un 20% de la concentración total de gas radón en los domicilios, lo que representa una cantidad comprendida entre 10 y 20 Bq/m<sup>3</sup>, indicando que de no haber exhalación adicional del terreno, estos valores de radioactividad procedentes de los materiales de construcción están muy alejados de los valores límite aceptables recomendados por la Unión Europea. Identifica los materiales de construcción que liberan radón, diciendo que es posible encontrar materiales con contenidos de radón y torio de hasta 50 Bq/kg.

El aire exterior, por su baja concentración de radón, normalmente actúa como un factor de disolución, si bien en zonas de alta concentración de radón en el aire, puede actuar como una fuente más de aportación.

Estableciendo que la concentración de radón en el aire exterior está relacionada fundamentalmente con la presión atmosférica, y que en general, se alcanzan los valores más altos de concentración durante la noche, con unos valores medios de concentración de 10 Bq/m<sup>3</sup> en áreas continentales y de 0.1 Bq/m<sup>3</sup> en zonas costeras y oceánicas.

Identifica el agua como otra fuente de inmisión del radón en las construcciones, aclarando que si la misma procede de sistemas públicos de abastecimiento, su concentración suele ser menor de 0.4 Bq/l, pero que si procede de fuentes subterráneas el valor ronda los 20 Bq/l de media, advirtiendo que "... el grifo podría llegar a contribuir, en las condiciones más desfavorables, en aumentar la concentración de radón en el aire interior de ciertos espacios en unos 100-200 Bq/m<sup>3</sup>." (Chinchón, S. et al., 2011), afirman además que la concentración del radón interior depende de otros factores, que dependen de otros factores, como la localización geográfica, la altura del piso, la antigüedad de la construcción, el aislamiento y los hábitos de ventilación, señalando que el aumento del aislamiento, unido a la disminución de la ventilación, constituye una causa de incremento de las concentraciones de radón, pudiendo alcanzar niveles peligrosos en lugares de baja ventilación, como sótanos, semisótanos y garajes.

El cuarto artículo, titulado “Acciones de Rehabilitación Frente a la Entrada de Gas Radón”, cuya autoría corresponde a Frutos Vázquez, B., Olaya Adán, M., & Esteban Saiz, J.L. (2011), un grupo de investigadores del Centro de Investigaciones Científicas, describe la realización de un experimento de naturaleza similar al desarrollado en este trabajo, y ha sido fundamental en el diseño del experimento realizado, sirviendo para determinar las variables que era necesario neutralizar.

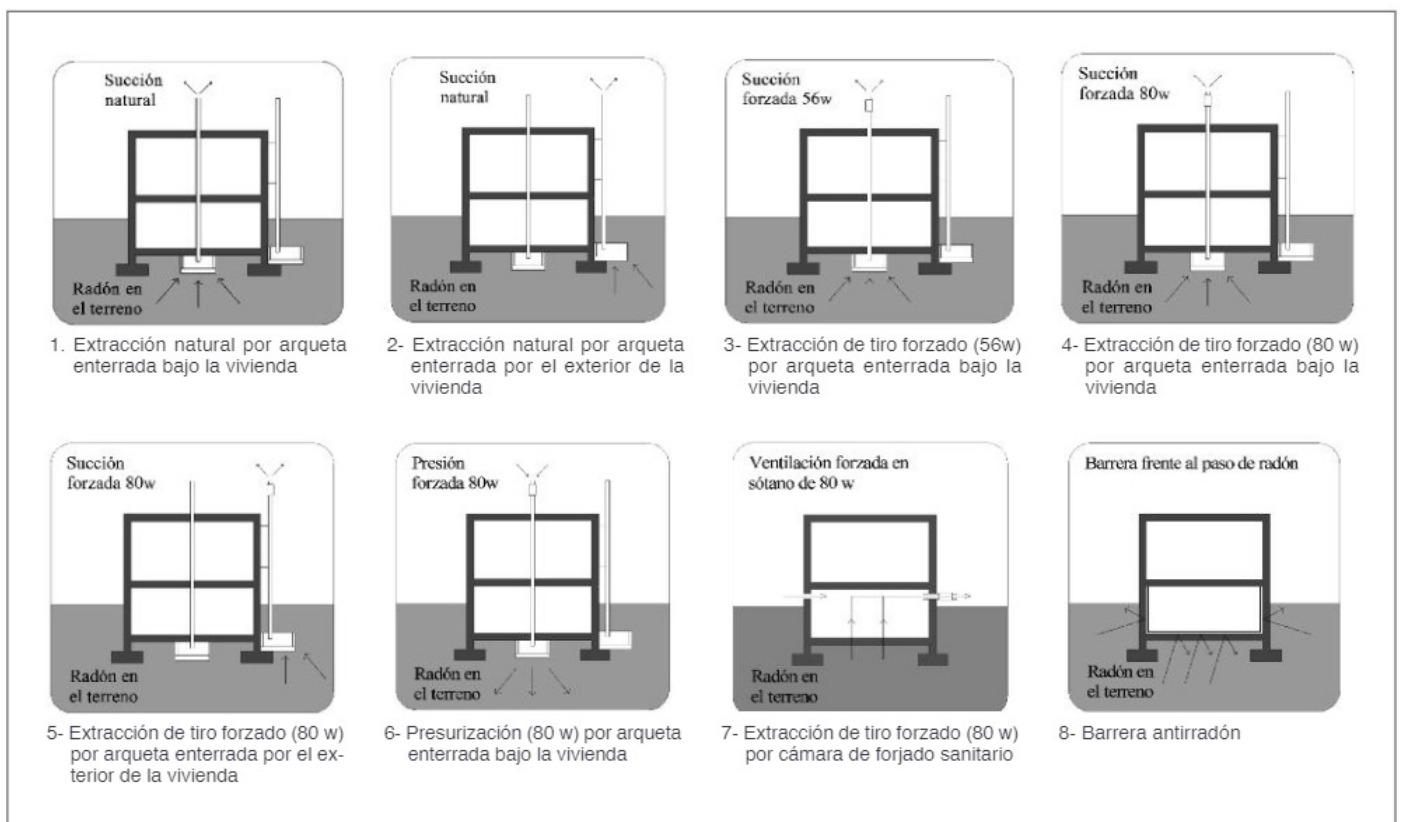


Fig. 40 - Esquemas de diferentes soluciones de mitigación de gas radón.

Fuente: Borja frutos et al.(2011).

En primer lugar, plantea la necesidad de que el sector de la edificación debe diseñar sistemas de protección, que garanticen que la inmisión del gas al interior de los espacios habitados, se encuentra dentro de los límites de seguridad, analizando las soluciones constructivas de rehabilitación disponibles para la mitigación del radón mediante la experimentación de un modelo, pero realiza los ensayos

sobre un único modelo, fijando pues la variable FORMA, origen de la investigación desarrollada en este trabajo científico. El artículo, en tanto en cuanto describe el experimento realizado, sirvió de gran ayuda en el diseño y planificación del experimento realizado en este trabajo.

Explica este artículo una serie de acciones que se pueden realizar para impedir la inmisión de este gas en los espacios habitados de edificios ya construidos

El objeto de este artículo, consiste en mostrar los resultados sobre reducciones de radón conseguidas por distintas soluciones constructivas que se han diseñado y ejecutado con el fin de frenar la inmisión de gas radón al interior del prototipo de vivienda construido al efecto.

Destaca que de acuerdo a los registros de concentraciones de radón en el modelo, parece que es la presión atmosférica el parámetro determinante de las variaciones en la concentración observadas en el interior del modelo. En cuanto a relación que pueda tener las precipitaciones en la concentración de radón en su interior, parece que se incrementan cuando aumentan las precipitaciones. Durante el periodo analizado de varios meses, no parece haber correlación entre ninguna de las temperaturas de mitigación de gas radón medidas y la concentración de radón interior.

El análisis de efectividades de las distintas medidas de rehabilitación ensayadas, muestran resultados satisfactorios en la ejecución de las distintas soluciones. En las concentraciones altas debidas a la localización, solo cumpliría la solución de extracción forzada. Sin embargo, es probable que en situaciones habituales de concentraciones de radón inferiores a 1000 Bq/m las soluciones estudiadas pueden ser suficientemente efectivas

El quinto artículo “Gestión De Riesgo. Soluciones Constructivas” (Frutos-Vázquez, B. & Olaya Adán, M., 2011), continuación del anterior y de los mismos autores, va un poco más allá de las acciones de rehabilitación, planteando la problemática no sólo de las construcciones existentes, sino también la de las que se encuentran en fase de construcción. Establece un protocolo de actuación, que ha sido implementado en este trabajo, especialmente, en lo referido al requerimiento de garantizar la precisión de la medida, encomendándose a un laboratorio certificado

Desde el punto de vista arquitectónico, se plantea la necesidad de proteger los espacios habitados de una excesiva concentración de gas radón. En muchas de las soluciones arquitectónicas ensayadas, se ha conseguido reducir la concentración de gas radón por debajo de concentraciones de 400 Bq/m<sup>3</sup> (recomendación europea).

Cuando se quiere dar una solución correctora a una vivienda con altos contenidos de gas radón, el protocolo que se debiera seguir constaría de los siguientes pasos: solicitar una medida de concentración a un laboratorio especializado, bien en la vivienda, si ésta se encuentra construida o, en el terreno, si se trata de una vivienda en fase de construcción. Con los datos de concentración de radón y permeabilidad de terreno, se debe contactar con especialistas en soluciones arquitectónicas enfocadas a reducir dicha concentración, para realizar un proyecto de actuación. Tras la actuación arquitectónica, un laboratorio especializado debe volver a medir para poder garantizar que se han reducido los niveles por debajo de los límites de seguridad.



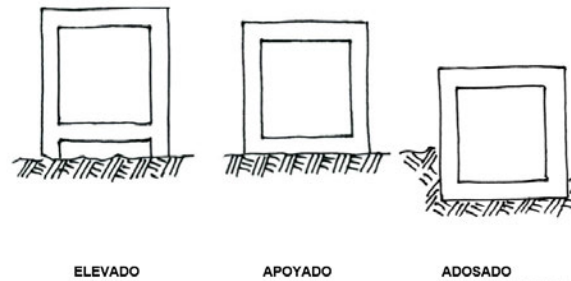
**Fig. 41 - . Fotografía del módulo de vivienda donde se han probado los diferentes sistemas de protección frente a radón.**  
*Fuente: Borja frutos et al.(2011).*

## 2.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Fig. 42 - Esquemas de diferentes opciones de colocación de la edificación respecto del terreno.

Fuente: Universidad Ramón Lull. <http://www.salleurl.edu/tecnologia/pdf/teoria/primerC/08.pdf>

COLOCACIÓN DE LA EDIFICACIÓN RESPECTO EL TERRENO



Conocer los factores desencadenantes asociados a las altas concentraciones de radón interior es clave para poder avanzar hacia el control de la problemática.

Para garantizar la calidad del aire interior es preciso adoptar una serie de medidas preventivas que se deben implementar desde el propio diseño de la obra arquitectónica. Estas medidas irán encaminadas a minimizar la exposición ambiental u ocupacional al gas contaminante en el interior de las edificaciones

Una de estas medidas responde a la pregunta, ¿cómo diseñar edificios resistentes al radón?, y en respuesta a la misma se formula la consiguiente hipótesis de investigación:

La FORMA de la implantación de las construcciones sobre el terreno constituye un factor determinante en la concentración del radón en el interior de las mismas y por consiguiente, unos diseños constructivos serán más adecuados que otros para favorecer la dispersión del gas contaminante.

La escasa información disponible para los arquitectos, en lo referente al diseño de edificaciones resistentes al radón, motivó la realización del presente trabajo de investigación, cuyo objetivo, como se define en el capítulo 1, fue investigar la relación entre la FORMA de las construcciones y su tendencia a la acumulación de grandes concentraciones de radón en su interior.



g



EXPERIMENTO

Anverso Fig. 43 -

**El experimento.**

*Fuente: Croquis del  
autor.*

# 3

## . EXPERIMENTO

En este capítulo se detalla el desarrollo del estudio experimental, que se centra en el análisis del tercer aspecto de los mencionados en el capítulo anterior: “las distintas soluciones de diseño arquitectónico para evitar la acumulación del gas”.

El experimento consiste en la construcción de maquetas a escala con el fin de realizar mediciones sobre diferentes soluciones de diseño para contrastar qué tipologías constructivas son más propensas a la concentración de gas radón en su interior.

Se describe la realización del experimento, detallando las actuaciones previas, los recursos empleados, los resultados obtenidos y las mediciones meteorológicas registradas durante el ensayo.

Para la realización del ensayo ha sido determinante la elección de un lugar donde ubicar los modelos a escala que garantizase unos índices altos de exhalación de radón en el terreno. Una vez seleccionada una parcela que reuniese estas características se han elaborado 3 prototipos que simulan construcciones a escala reducida empleando para la elaboración de los mismos idénticos materiales, con el objeto de neutralizar así la influencia que los materiales de construcción pudiesen tener en las concentraciones de gas radón. Mediante la colocación en su interior de unos dispositivos detectores idénticos, se han obtenido los registros de las concentraciones acumuladas en cada uno de los modelos a lo largo de un mes.

A continuación se explican los medios empleados para realizar la investigación y la metodología seguida en la misma.

Tras el análisis de los textos y la información disponible, así como de la legislación vigente, se pudo plantear la orientación que debía tener la investigación. La reflexión sobre los temas analizados planteó la necesidad de contrastar empíricamente la eficiencia de las medidas correctoras propuestas por los diferentes autores (ver capítulo 2).

Se observó que, hasta ahora, el estudio de efectividades de las medidas correctoras se basaba en un muestreo estadístico, haciendo mediciones en viviendas construidas con una problemática real. Estas evidencias que permiten verificar si las soluciones adoptadas resultaron de utilidad en casos concretos, no permiten conocer con exactitud su grado de eficacia al no ofrecer resultados cuantitativos comparables. Surge por tanto la necesidad de realizar una verificación empírica, con idénticas variables de partida, mediante el ensayo de modelos que reproduzcan a escala las características formales de una construcción real.

Para analizar la efectividad de las medidas de mitigación más extendidas y en concreto las de despresurización bajo la construcción mediante procedimientos convectivos no forzados así como las basadas en ventilación por gradiente de presión, (ver capítulo 2) los modelos se ensayan simultáneamente y en igualdad de condiciones en cuanto a concentraciones de radón en el suelo, ubicación y flujo del gas

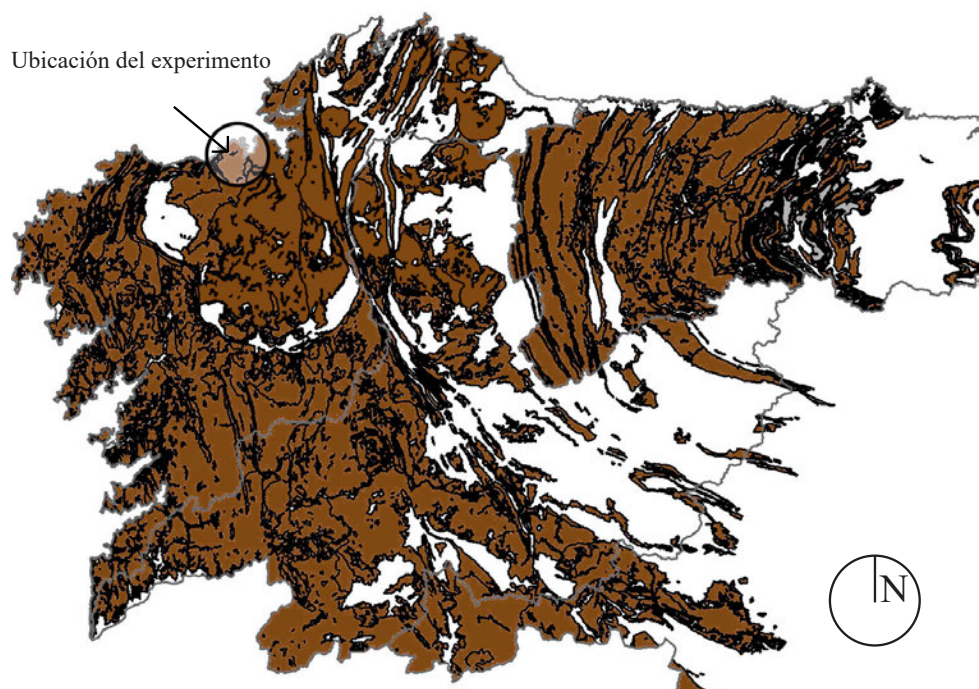
Teniendo en cuenta que Galicia posee unos índices muy elevados de concentración de radón, superiores al resto de las comunidades autónomas (Barros Dios et al, 2012) y a la mayoría de países europeos, no resulto difícil la elección un lugar donde realizar la investigación situado en una zona de riesgo ALTO.

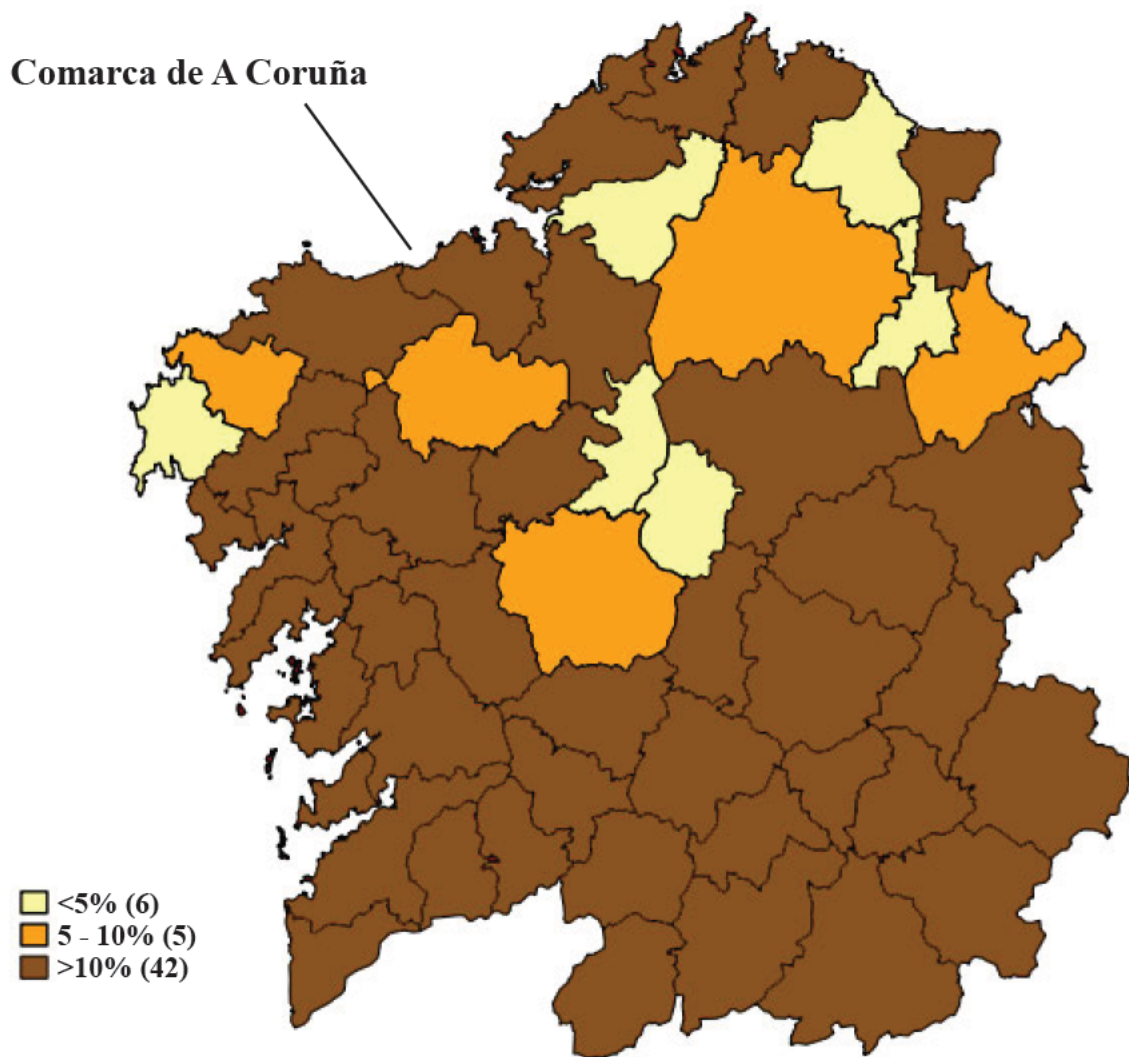
En el experimento realizado, se prueban distintas soluciones de contacto con el terreno instalando los modelos experimentales que simulan espacios de construcciones a escala 1/20, obteniéndose registros detallados de las variables meteorológicas concurrentes y de las concentraciones de radón tanto en el interior de los modelos como en el exterior.

## 3.1 Elección del territorio y de la ubicación del experimento

Para realizar la investigación ha sido necesaria la elección de un lugar donde ubicar los modelos experimentales que garantizase unos índices altos de exhalación de radón en el terreno. El lugar se ha elegido de acuerdo con el criterio de que la localización seleccionada se encontrase dentro del área de estudio y además, estuviese garantizada una alta presencia de radón, teniendo en cuenta los registros de mediciones anteriores realizadas en la zona y considerando que de éstas, se hubiesen obtenido valores tales que planteasen una situación de alto riesgo para los moradores, permitiendo minimizar los tiempos de medida. Por último, se tuvo en cuenta la disponibilidad del suelo y las facilidades para la ubicación de los modelos y la consulta de datos. Siguiendo pautas internacionales (Appleton & Miles, 2009), las áreas territoriales se distribuyen según su porcentaje de casas con más del límite que se recomienda no sobrepasar. El riesgo se considera Bajo cuando el 5% de las viviendas no sobrepasa los 200 Bq/m<sup>3</sup>, Riesgo Medio si el número de viviendas se sitúa entre el 5 y el 10% y, se define como Riesgo Alto si en el 10% de domicilios se supera ese nivel. De acuerdo con el estudio de los mapas del radón se seleccionó para desarrollar el experimento una ubicación situada en una zona de Riesgo Alto.

Fig. 44 - Mapa de zonas propensas al radón en Galicia. Las áreas sombreadas en color café son áreas con  $X \sim 0,9 > 300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Las líneas de división gris marcan las principales áreas de captación de agua. La zona del experimento se muestra resaltada en color más claro. Fuente: Elaboración propia a partir de mapa de García-Talavera, García-Pérez, Rey y Ramos. (2013).





A través de los mapas del proyecto Mapa de Radiación Gamma Natural (MARNA) y Laboratorio De Radón De Galicia, se observó que la Comarca de A Coruña, concretamente en el Municipio de Arteixo, Parroquia de San Esteban de Morás, poseía unos índices elevados de presencia de radón en el terreno.

Se seleccionó una parcela donde ya se tenía constancia de la existencia de gas radón, por haberse realizado con anterioridad mediciones que evidenciaban una elevada presencia de este según declaraciones de la propiedad.

**Fig. 45 - Mapa de riesgo de presencia radón por comarcas de Galicia, valores medidos para concentraciones superiores a 200Bq/m<sup>3</sup>.**

*Fuente: Laboratorio del Radón de Galicia. Disponible en [usc.es/radongal/mapa\\_comarcas.html](http://usc.es/radongal/mapa_comarcas.html)*

La finca se encuentra en un paraje de extensión urbana de la ciudad de A Coruña, en una zona que actualmente se encuentra sometida a un importante desarrollo urbanístico.



**Fig. 46 - Situación de la parcela y ubicación del experimento dentro de la misma.**

*Fuente: Elaboración propia.*

La parcela, situada a media ladera, se haya expuesta a los vientos dominantes SW, procedentes del mar. La zona de ubicación de los modelos de aprox. 300 m<sup>2</sup>, es sensiblemente horizontal y situada a cota 192 sobre el nivel del mar.

Debido a la composición del suelo de la finca, formado principalmente por granito con un alto grado de meteorización y escasa consistencia, el terreno presenta altos contenidos de mica (principalmente biotita), que es el origen del radón.

Por otro lado, la propiedad cuenta con una estación meteorológica propia que facilita la recogida de datos ambientales.

## Determinación de la composición y características del suelo

Sobre el suelo sin alterar se realizó una excavación con objeto de determinar visualmente la composición y espesor de las diferentes capas que lo componen, concluyendo que la primera capa, de unos 20 cm de espesor, está formada por mantillo de tierra vegetal en la que enraízan especies herbáceas, bajo la cual se encuentra la capa resistente compuesta por arcilla y silicatos, fragmentadas y meteorizadas.

Cabe destacar la elevada concentración de granito que contiene entre 10 y 20 ppm de uranio, por lo que se puede estimar que la concentración de radón sea alta ya que el uranio es una fuente de radio; es su predecesor en la cadena de desintegración.

### Estudio de la permeabilidad intrínseca del suelo

El alto contenido de radón en el terreno no es suficiente para obtener una alta tasa de exhalación, ya que depende también de la porosidad del terreno. Cuanto más permeable sea éste con mayor facilidad podrá el gas moverse entre sus poros y alcanzar la superficie.

La Permeabilidad Intrínseca es la propiedad física que poseen ciertos terrenos y rocas de dejar pasar a su través, líquidos y gases. La permeabilidad está asociada a la porosidad y la figuración. La permeabilidad intrínseca se considera BAJA: si  $< 4 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ , cuando su valor está entre  $4 \times 10^{-13}$  y  $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  se dice que la permeabilidad es MEDIA y se considera ALTA cuando  $> 4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  (Jirí Hulka & Josef Thomas, 2004 y Chinchón, et al., 2011). Este factor es determinante para obtener altas tasas de exhalación. Si la permeabilidad es baja, por mucho radón que se encuentre entre sus poros, no podrá escapar a la estructura compacta del suelo y permanecerá ocluido en su interior sin dar grandes tasas de exhalación (capacidad de un terreno en permitir el escape del gas de su estructura).

Según sea la permeabilidad del terreno baja, media o alta, la concentración de radón en el terreno podría considerarse con un determinado valor en Bq/m<sup>3</sup> según se indica en la Figura 47 y, por tanto, la exposición potencial al radón de una vivienda ubicada en ese lugar a su vez podría ser catalogada como baja, media o alta. (Chinchón, et al., 2011).

Fig. 47 - Clasificación checa del terreno a partir de las medidas de concentración de actividad de radón y la permeabilidad estimada del suelo a los gases.

Fuente: Neznal et al. (2004).

Categoría del índice de Radón	Concentración de actividad de radón en el suelo (kBq·m <sup>-3</sup> )		
<b>Bajo</b>	$C_{Rn} < 30$	$C_{Rn} < 20$	$C_{Rn} < 10$
<b>Medio</b>	$30 \leq C_{Rn} < 100$	$20 \leq CA < 70$	$10 \leq C_{Rn} < 30$
<b>Alto</b>	$C_{Rn} \geq 100$	$C_{Rn} \geq 70$	$C_{Rn} \geq 30$
	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
	<b>Permeabilidad</b>		

Al encontrarse el sustrato rocoso abundantemente fraccionado y meteorizado las rocas se fraccionan fácilmente, aumentando la permeabilidad del suelo. Con objeto de verificar el grado de permeabilidad del suelo se ha realizado un ensayo de permeabilidad de Lefranc (Salas et al, 1976). Mediante un sondeo se hincó en el terreno una camisa a profundidad de 50cm para posteriormente llenarla de agua hasta una altura h1 sobre el nivel del suelo, midiéndose el intervalo de tiempo que tardó en bajar la superficie de agua en la camisa desde la altura h1 hasta la altura h2 aplicando la siguiente fórmula  $K = ( 2\pi R / 11(t_2 - t_1) ) \ln(h_1 / h_2)$ ; R = radio de la camisa = 5.08cm. El agua descendió desde h1 = 1.29 hasta h2 = 1.26, en un intervalo  $\Delta t = t_1 - t_2 = 18s$ .  $K = ( 2\pi \times 5.08cm / 11 \times 18s ) \times \ln( 1.29 / 1.26 )$ ;

Coefficiente de permeabilidad:  $K = 8.89 \times 10^{-3} \text{ cm}$

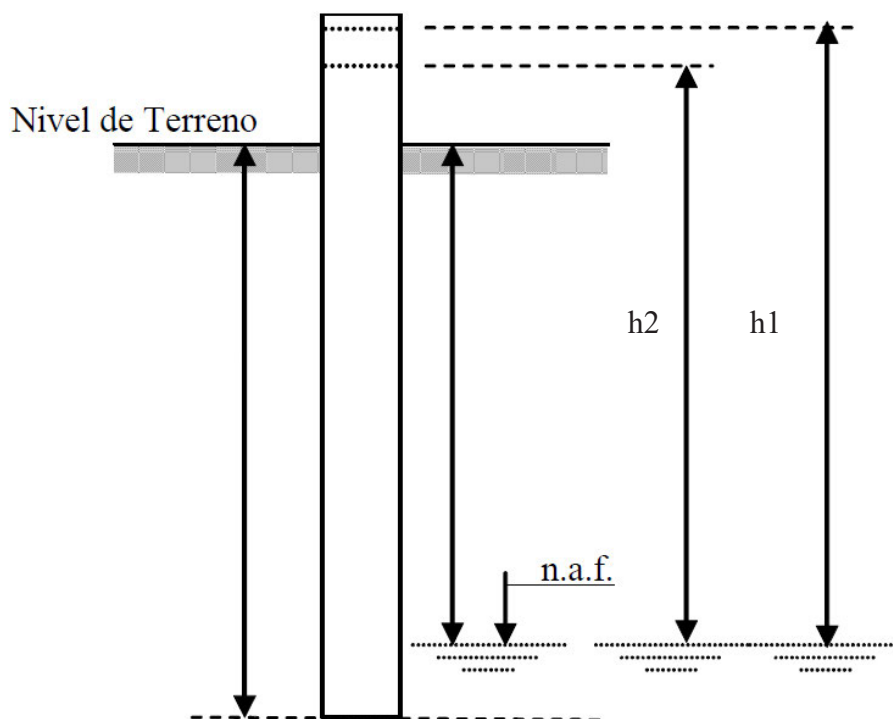


Fig. 48 - Esquema del ensayo de Lefranc.

Fuente: Jimenez Salas et al. (1976).

El ensayo se realizó con bulbo a nivel constante circulando agua en el borde superior de la camisa hasta verificar que se había llegado al estado de régi-men con caudal constante.

Para comprobar el grado de permeabilidad se entró con el coeficiente K en la siguiente tabla.

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/s)
Elevada	Superior a $10^{-1}$
Media	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Baja	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Prácticamente impermeable	Menor de $10^{-7}$

Fig. 49 - **Tabla de grados de permeabilidad.**

*Fuente:*

*Jimenez Salas et al. (1976).*

Resultando una permeabilidad MEDIA intrínseca del terreno (rango de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  cm/s).

Fecha de inspección visual y ensayos: 12/11/2016

De los datos obtenidos en el estudio del terreno se concluye que se trata de un terreno ubicado en una Prone-Area de Alta probabilidad de alcanzar concentraciones de radón por encima de los 200 Bq/m<sup>3</sup> (Barrios Dios, 2016), que por su composición mineralógica y grado de permeabilidad presenta unas características favorables a la exhalación de radón.

Por otro lado y de acuerdo con el estudio de Jirí Hulka y Josef Thomas (2004), se puede observar que entrando en la tabla con datos obtenidos del ensayo de permeabilidad del terreno, se obtiene una clasificación Alta de Exposición Potencial al Radón.

Los estudios del terreno donde se han ubicado los modelos muestran una alta probabilidad de tasas muy elevadas de exhalación de radón y una permeabilidad Media que facilita su salida al exterior, lo que lo hace idóneo para el experimento que se pretende realizar.

## 3.2 Diseño e instalación de los modelos experimentales

Se eligió una zona concreta dentro de la finca que permitiera un fácil acceso y que a su vez estuviese expuesta a los vientos dominantes, acorde con la orografía natural del terreno, que permitiese la libre circulación de los flujos naturales de aire sin interferencias tales como barreras vegetales u otras edificaciones

Se dispusieron los modelos de acuerdo con el plano de planta (Fig. 3.11), sobre un lecho de árido suelto de granulometría media.

### Fase de excavación y replanteo

Una vez seleccionado el emplazamiento se procedió al replanteo sobre el terreno de la ubicación de los modelos (ver fig. 52 planta del conjunto) y se realizó la excavación para el soterramiento del modelo A mediante medios manuales.

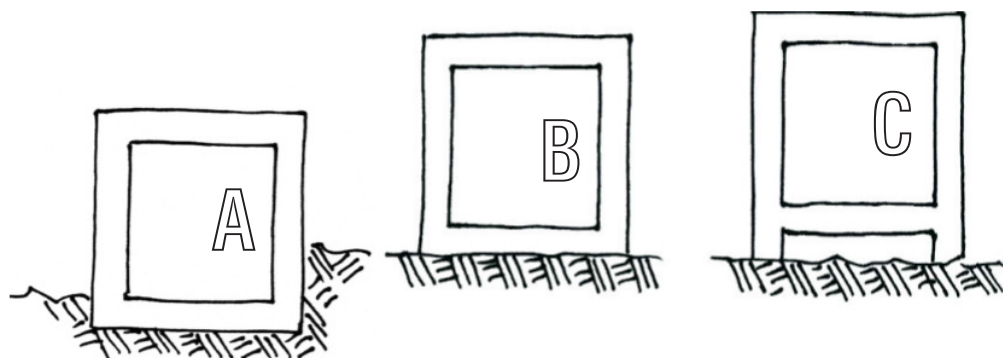


Fig. 50 - Excavación para la instalación del modelo A.  
Fuente: Fotografía del autor.

En la fotografía Fig. 50 se muestra la excavación para el modelo semienterrado, pudiéndose apreciar que el terreno está compuesto por un tipo de roca de escasa consistencia y muy disgregada.

Tras la excavación los modelos se asentaron sobre un lecho de unos 2cm de espesor de árido de machaqueo, con el objeto de proceder a su nivelado.

## Diseño de los modelos experimentales



Se han elegido como prototipos de viviendas a escala reducida (planta de 9 por 12 metros) unos contenedores prismáticos de 450 por 600 mm elaborados con polietileno tereftalato (PETE), material neutro e impermeable al radón, equipados con unas celdas de ventilación calibradas en la parte inferior de polipropileno (PP) que simulan las vías de entrada del radón en los edificios

Las dimensiones de los modelos y la idoneidad de los materiales fueron validadas, mediante consulta específica, en la entrevista realizada el 11-11-2016 con los profesores Luís Santiago Quindós Poncela<sup>1</sup> y Carlos Sainz Fernandez<sup>2</sup>, miembros del Grupo del Radón de la Universidad de Cantabria y expertos internacionales de reconocido prestigio en la materia.

### Identificación de los recursos a emplear

3 h Peón para la realización de la excavación e instalación de los modelos.

0.20 M<sup>3</sup> De árido medio de machaqueo.

3 Ud. De modelos a escala, de PLM.

1 Ud. Equipo de medida continuada de radón modelo RadonEye

1 Ud. De caja estanca ventilada para la protección de equipo de medición continuada.

4 Ud. De probetas para la medición del radón.

1 Ud. De cable de alimentación eléctrica para el equipo.

1 Ud. De Smartphone Android para conexión con equipo.

1 Ud. De estación meteorológica Weather Station Modelo 001073

1 Ud. De ordenador portátil con conexión wifi.

1 Ud. De consola inalámbrica para gestión remota Weather Station.

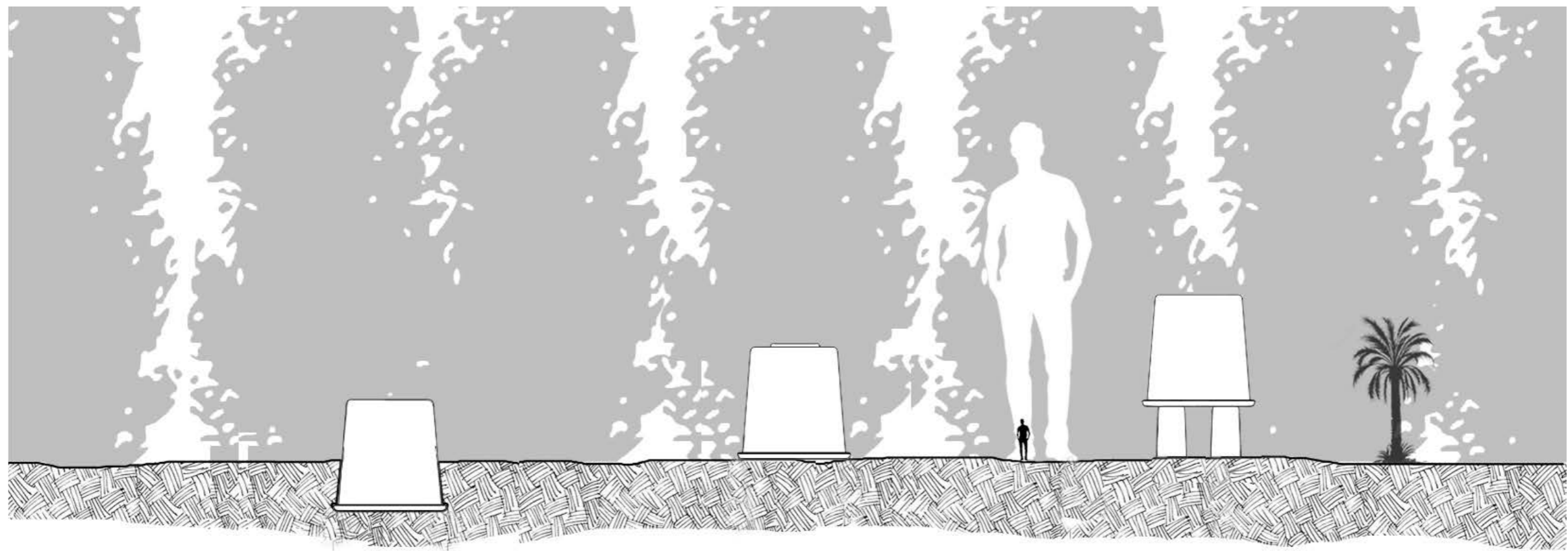
A continuación se muestran los planos del experimento con el detalle de cada uno de los modelos ensayados correspondientes a las 3 tipologías seleccionadas.

Fig. 51 - Esquemas de identificación de los 3 modelos ensayados.

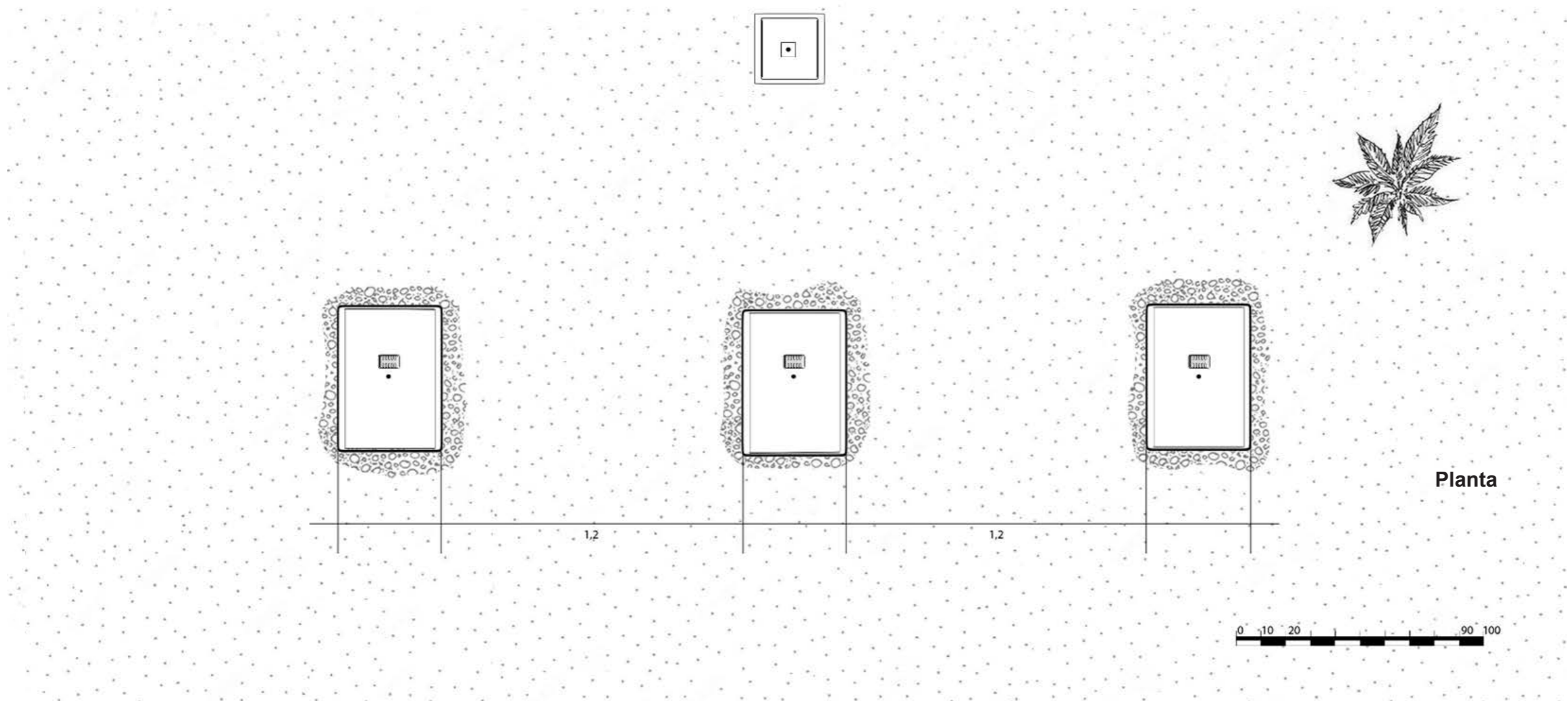
Fuente: Elaboración propia a partir de imagen obtenida de <http://www.salleurl.edu/>.

<sup>1</sup> - Catedrático numerario de física médica en la Universidad de Cantabria, director del Grupo del Radón, doctor en ciencias físicas y licenciado en ingeniería ambiental.

<sup>2</sup> - Profesor titular y doctor en ciencias físicas, co-director del proyecto WHO residencial radon risk.



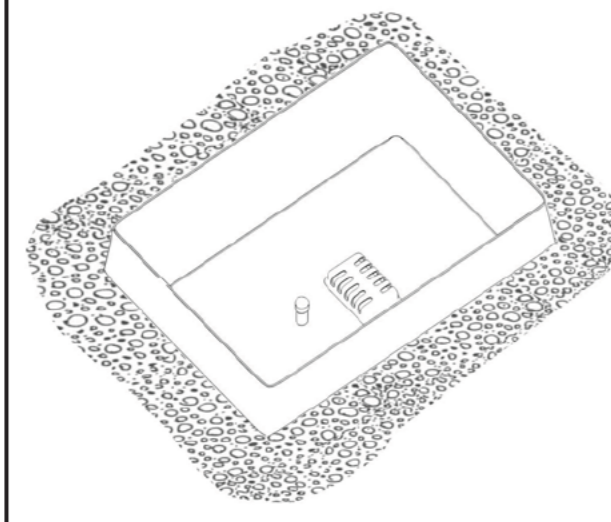
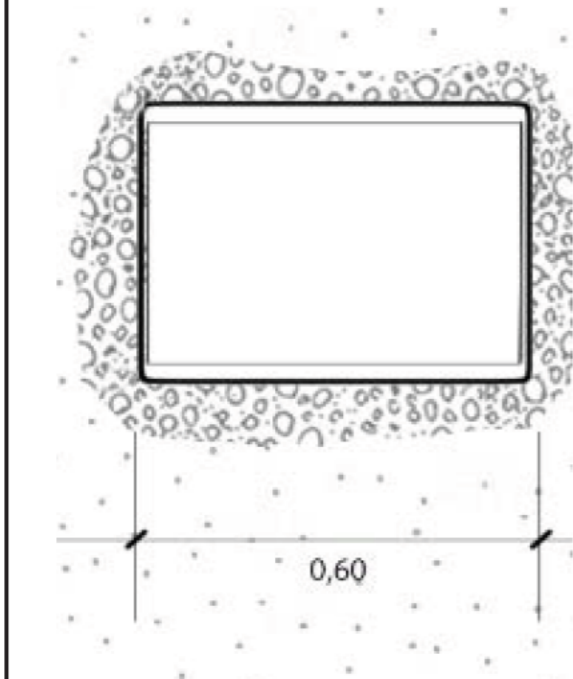
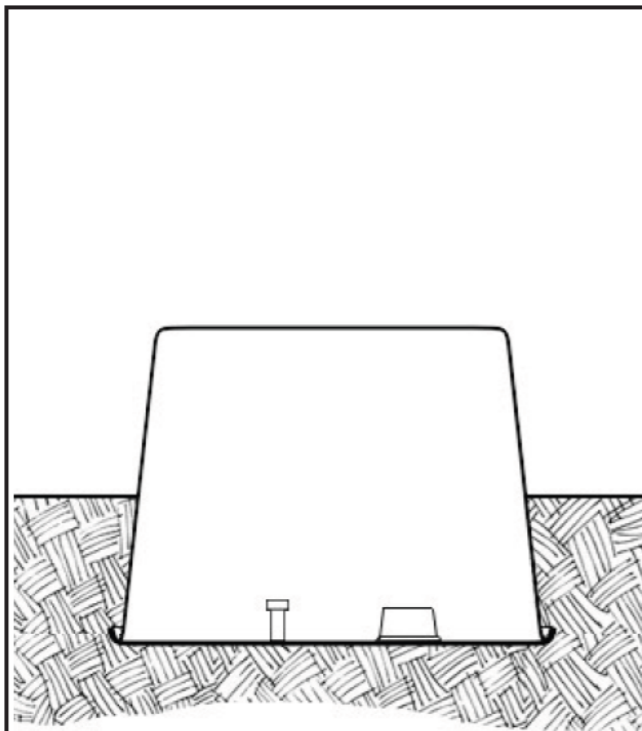
Alzado Sur



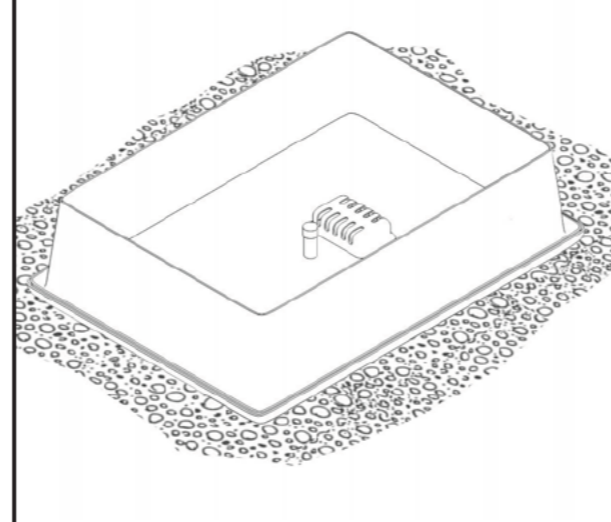
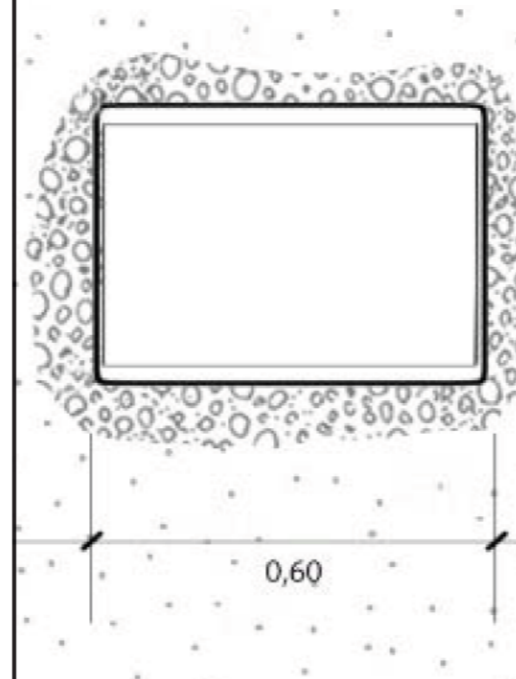
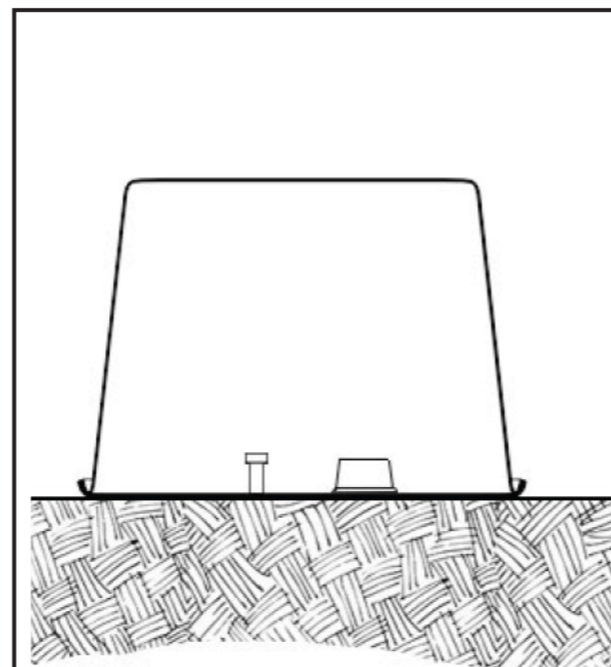
Planta



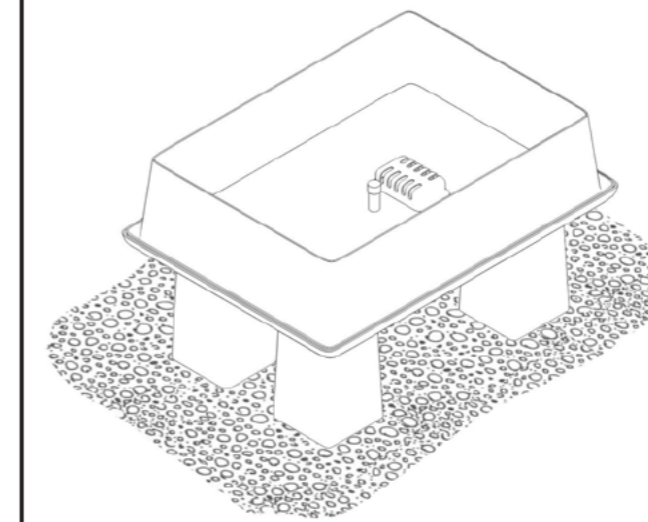
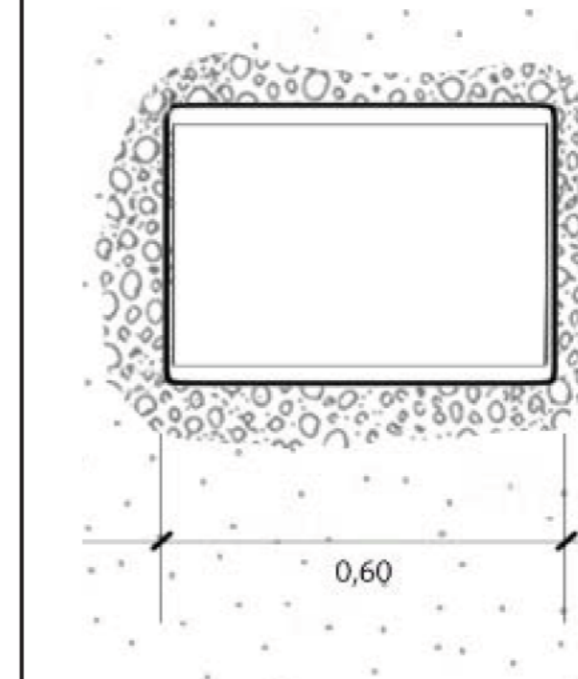
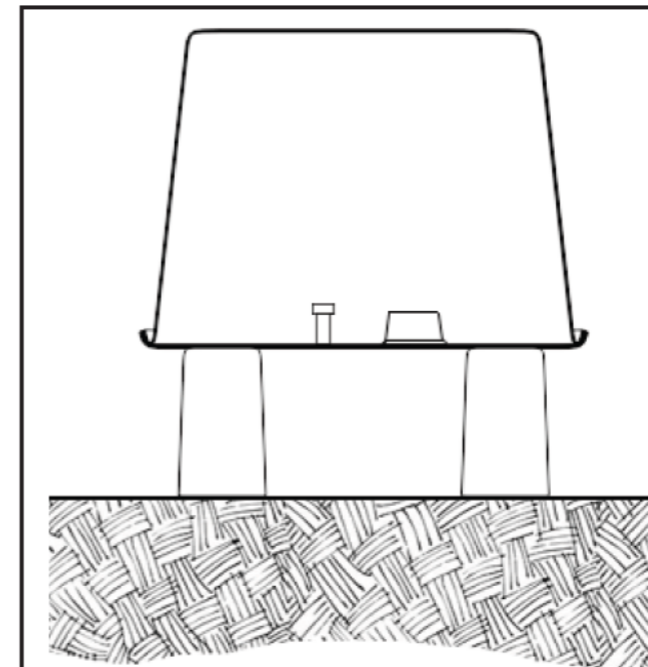
Fig. 52 - Plano de  
Planta de Distribución y  
Alzado Sur.  
Fuente: Elaboración  
propia.



**Modelo A**



**Modelo B**



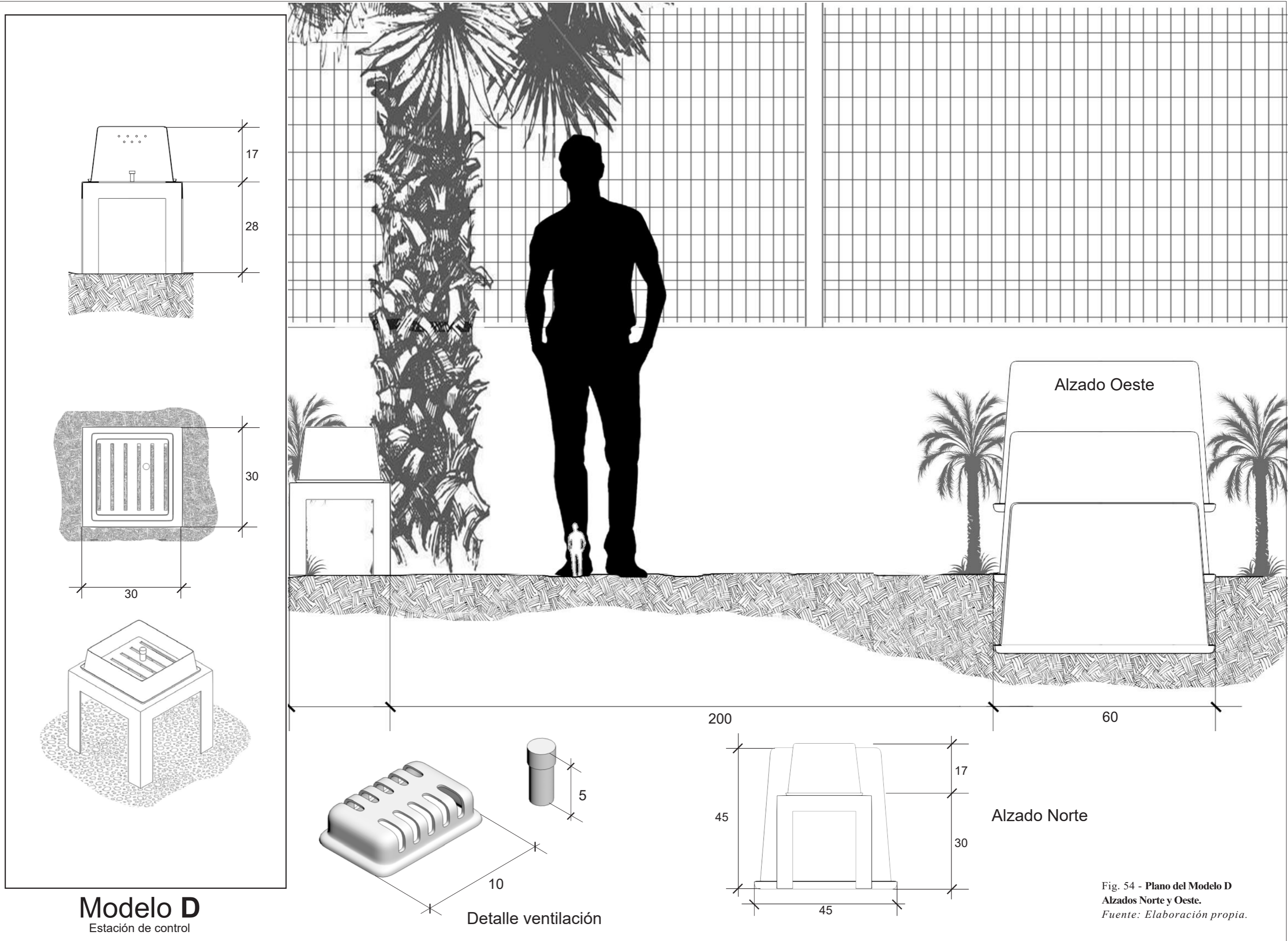
**Modelo C**

Sección longitudinal

Planta

Corte isométrico

Fig. 53 - Planos de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Elaboración propia.



**Modelo D**  
Estación de control

Fig. 54 - Plano del Modelo D  
Alzados Norte y Oeste.  
Fuente: Elaboración propia.

## Instalación de los modelos

Una vez preparada la base, se instalaron los tres modelos siguiendo la secuencia que se muestra en la imagen.

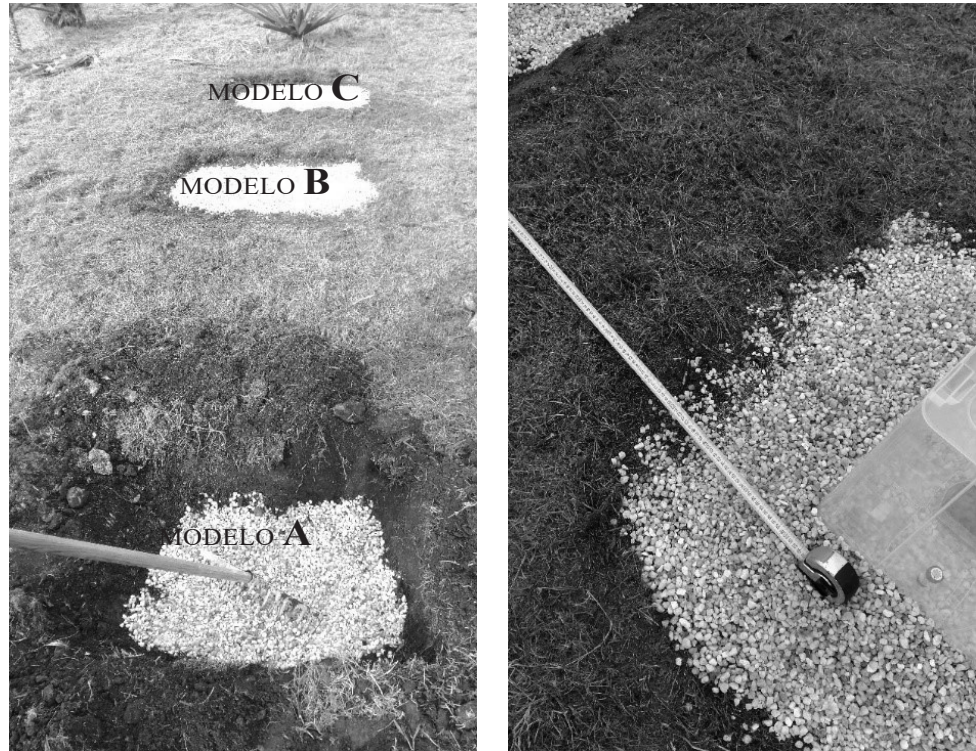


Fig. 55 - Preparación para la instalación de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Fotografía del autor.

Los modelos se colocaron en línea, orientados al Sur y con una separación entre caras opuestas de 120cm.

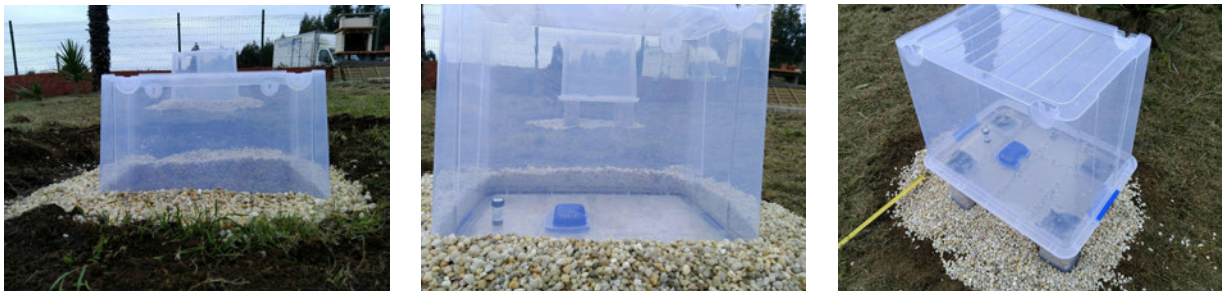


Fig. 56 - Instalación de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Fotografía del autor.

Tras la instalación de los modelos A, B y C se procedió a la instalación de la estación de control Modelo D, como puede apreciarse en la fig 57, cuya función consiste en medir la presencia de radón ambiental durante la realización del experimento con el fin de obtener datos comparables con las concentraciones de radón en el interior de los modelos.

Este equipo posee aberturas de ventilación por cinco de sus lados, las cuales garantizan el flujo constante de aire y el equilibrio de presiones con el exterior. Está dotado de dos sistemas de medida, uno mediante probetas pasivas idéntico a los empleados en los modelos a ensayar y el otro, un equipo de medición continuada Mod. Radon-Eye, un dispositivo que hace pasar un flujo constante de aire a través de un detector adecuado evaluando continuamente la concentración.



**Fig. 57 - Instalación del Modelo D.**

*Fuente: Fotografía del autor.*

El equipo de lectura continua proporciona mucha información y permite estudiar las fluctuaciones en tiempo real de las concentraciones ya que permite establecer la relación existente entre las emisiones radiactivas ambientales y los datos meteorológicos obtenidos de la estación ubicada en la parcela. El equipo requiere de alimentación eléctrica y transmite datos mediante conexión inalámbrica (bluetooth) a un smartphone Android, gracias al cual se pudo hacer un seguimiento en tiempo real de los valores aproximados de radón ambiental en la parcela.



**Fig. 58 - Colocación de los dispositivos pasivos.**

*Fuente: Fotografía del autor.*

Fig. 59 - **Vistas generales de la instalación finalizada**

*Fuente: Fotografías del autor.*

Finalmente, una vez concluida la instalación de los modelos se procedió a colocar en el interior de los mismos los dispositivos de medida, como puede apreciarse en la fig 58.



## 3.3 Elementos de registro y metodología de la medida

En general, la medida de la concentración de radón presente en un ambiente determinado se basa en el recuento de partículas  $\alpha$  emitidas tanto por el radón como por sus descendientes de vida corta. Para determinar la concentración de radón y de sus descendientes en el aire interior de los modelos se utilizó el método integrado. La elección del método vino condicionada por la fiabilidad de la medida, el instrumental disponible, por el coste y por la duración de la medida a efectuar.

Se seleccionó un método integrado por ser éste un método asequible, contrastado y el más utilizado; ya que es el más adecuado para estudios de inspección, reconocimiento y el que proporciona información fiable sobre la conveniencia de tomar acciones correctoras.



Fig. 60 - Un **Dispositivo de medida pasivo del tipo de los empleados en el experimento** .

*Fuente: Fotografía del autor.*

Se utilizaron detectores pasivos de carbón activo, como el de la fig. 60 basados en la capacidad del carbón para retener el radón y que permiten conocer el nivel de radón presente en el aire, midiendo la radiación  $\gamma$  emitida por el carbón activo con un detector adecuado, como el de yoduro sódico, proporcionando información sobre concentraciones promedio. El tiempo de muestreo empleado fue de un mes.

El método se clasifica como “de tipo pasivo” al no emplearse aire forzado para la captación de la muestra.

## Datos del laboratorio responsable del análisis

Entidad: Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC con acreditación N° 1204/LE2219)

Dirección: c/ Cardenal Herrera Oria s/n

Responsable: Dr. Luis Santiago Quindós Poncela, Catedrático de Radiología y Medicina Física de la Universidad de Cantabria.

Tel: (+34) 942 20 2207 Email: laruc@unican.es

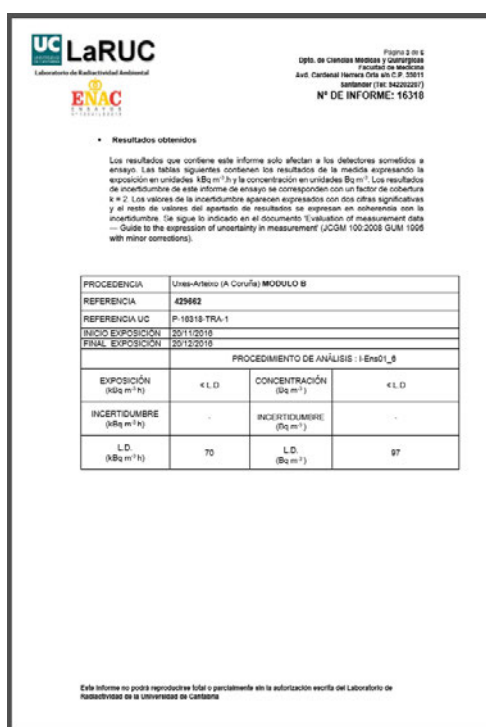


Fig. 61 - Imagen del certificado emitido por el laboratorio de La Ruc.

Fuente: Fotografía del autor.

## Características del ensayo

Ensayo a realizar: exposición de gas radón en aire a través de los análisis llevados a cabo en el Laboratorio de Radiactividad de la Universidad de Cantabria.

N° de detectores: 4

N° de medidas realizadas: 20

## Datos de las muestras objeto del ensayo

Las muestras han sido recogidas por LaRUC

Las condiciones de las muestras han sido aptas para su ensayo: SI

Lugar de colocación del detector/es: Uxes-Arteixo (A Coruña)

Fecha de colocación del detector/es: 20/11/2016 Fecha de retirada del detector/es: 20/12/2016

Fecha de recepción en el laboratorio: 21/12/2016

Fecha inicio ensayo: 21/12/2016

Fecha final ensayo 03/01/2017

Lugar de realización del ensayo: Instalaciones de LaRUC

Método de ensayo empleado: El método empleado ha sido el que se recoge en la documentación de calidad del laboratorio referencia I-Ens01\_6. Los resultados de incertidumbre de este ensayo se corresponden con un factor de cobertura  $k=2$ . Los valores de la incertidumbre aparecen expresados con dos cifras significativas y el resto de valores del apartado de resultados se expresan en coherencia con la incertidumbre. Se sigue lo indicado en el documento 'Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement' (JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections). Ver Anexos.

## 3.4 Tratamiento de la información y resultados por modelo

El 21 de Diciembre de 2016 transcurrido un mes desde la instalación de las probetas, se procedió a su retirada y remisión al laboratorio para su análisis, resultado del cual el laboratorio emitió el correspondiente informe que se adjunta como ANEXO II.

Los resultados que contiene este informe sólo afectan a los detectores sometidos a ensayo. Las tablas siguientes contienen los resultados de la medida expresando la exposición en unidades  $\text{kBq/m}^3/\text{h}$  y la concentración en unidades  $\text{Bq/m}^3$ .

A continuación, y con objeto de interpretar correctamente las fichas de registro de los modelos ensayados, procede aclarar que la medida de concentración se expresa en dos unidades equivalentes,  $\text{Bq/m}^3$ , que se corresponden con el número de partículas alpha emitidas por segundo y por metro cúbico, y su media equivalente en horas ( $\text{kBq/m}^3\text{h}$ ).

Para cada una de estas unidades se expresa el correspondiente nivel de incertidumbre que es el margen de error admisible en el experimento.

L.D. o Límite de Detección es el umbral mínimo de sensibilidad de la probeta, expresado también en ambas unidades, por debajo del cual no es posible la medición, que no resulta relevante por ser inferior a un nivel de concentración peligroso para la salud.

## MODELO A

PROCEDENCIA Arteixo (A Coruña)

REFERENCIA 429843

REFERENCIA UC P-16318-TRA-4

INICIO EXPOSICIÓN 20/11/2016

FINAL EXPOSICIÓN 20/12/2016

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01\_6

EXPOSICIÓN

(kBq m<sup>3</sup> h) **507** CONCENTRACIÓN

(Bq m<sup>3</sup>) **704**

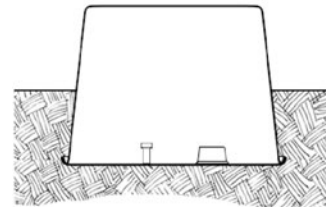
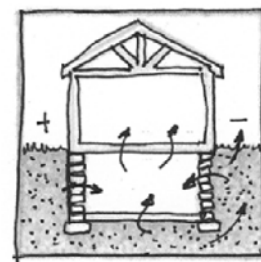
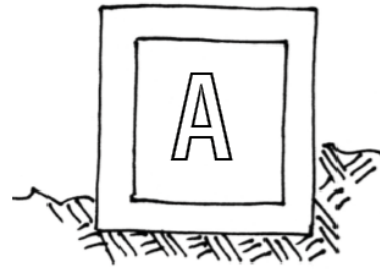
INCERTIDUMBRE

(kBq m<sup>3</sup> h) 58 INCERTIDUMBRE

(Bq m<sup>3</sup>) 81

L.D. (kBq m<sup>-3</sup> h) 70 L.D.

(Bq m<sup>-3</sup>) 97



El modelo ensayado corresponde a la edificación con sótano enterrado o semienterrado, los resultados obtenidos, 704 Bq/m<sup>3</sup>, suponen una emisión de partículas alpha radioactivas de rango superior al que actualmente presenta el entorno de la ciudad de Prypiat y más de 2 veces superior al límite legal establecido en la legislación vigente.

Fig. 62 - Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo A.

Fuente: Infografía del autor.

Si se tiene en cuenta que el modelo ensayado es un modelo a escala, y que la depresión producida en el terreno no excedía de los 20cm, y sabiendo que las condiciones en que se realizó el ensayo permiten descartar otras variables exógenas, resulta evidente que esta solución de sótano sin medidas de mitigación favorece de forma determinante la concentración de gas radón en cantidades que suponen un grave riesgo para la salud.

## MODELO B

PROCEDENCIA Arteixo (A Coruña)

REFERENCIA 429662

REFERENCIA UC P-16318-TRA-1

INICIO EXPOSICIÓN 20/11/2016

FINAL EXPOSICIÓN 20/12/2016

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01\_6

EXPOSICIÓN

(kBq m-3 h) < **L.D** CONCENTRACIÓN

(Bq m-3 ) < **L.D**

INCERTIDUMBRE

(kBq m-3 h) - INCERTIDUMBRE

(Bq m-3 ) -

L.D. (kBq m-3 h) 70

L.D. (Bq m-3 ) 97

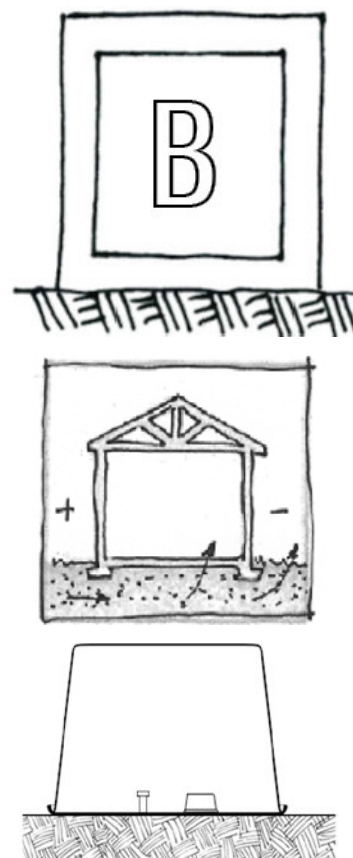


Fig. 63 - **Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo B.**

*Fuente: Infografía del autor.*

La forma ensayada se corresponde con la de una construcción apoyada directamente sobre el terreno, y a nivel con este. El resultado obtenido nos muestra que la concentración de radón en su interior se encuentra por debajo del límite de detección, es decir, es inferior a 97Bq/m<sup>3</sup>, cantidad esta que cumple con las exigencias normativas en vigor e incluso con la más exigente normativa norteamericana.

Si se analiza este resultado del modelo B comparado con el de los modelos A y C, se puede observar la gran diferencia de comportamiento con el primero, que acumuló radón muy por encima de los valores recomendados, y sin embargo los resultados no permiten apreciar diferencias significativas con la solución ensayada en el modelo C; por lo que, a priori, el modelo de asentamiento basado en losa corrida de cimentación, constituye una solución adecuada para la implantación sobre el terreno de las construcciones situadas en zonas propensas a altas concentraciones de gas radón.

## MODELO C

PROCEDENCIA Arteixo (A Coruña)

REFERENCIA 429722

REFERENCIA UC P-16318-TRA-2

INICIO EXPOSICIÓN 20/11/2016

FINAL EXPOSICIÓN 20/12/2016

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS:

I-Ens01\_6

EXPOSICIÓN

(kBq m<sup>-3</sup> h) < **L.D** CONCENTRACIÓN

(Bq m<sup>-3</sup>) < **L.D**

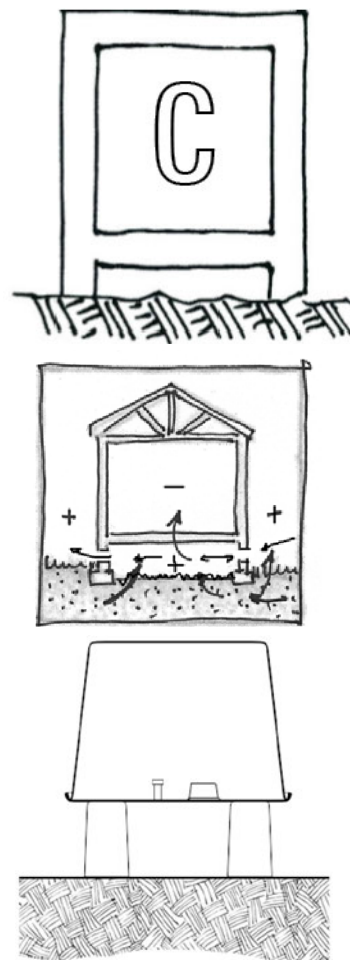
INCERTIDUMBRE

(kBq m<sup>-3</sup> h) - INCERTIDUMBRE

(Bq m<sup>-3</sup>) -

L.D. (kBq m<sup>-3</sup> h) 70

L.D. (Bq m<sup>-3</sup>) 97



El tercer modelo ensayado denominado C, simula una construcción del tipo plano base predominante, es decir, sobre-elevado en el terreno y que permite la libre circulación del aire bajo el volumen construido, sin llegar a generar diferencias de presión.

Fig. 64 - Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo C.  
Fuente: Infografía del autor.

El resultado de la medición realizada muestra valores por debajo del límite de detección (97Bq/m<sup>3</sup>), y por lo tanto, también resulta adecuada como modalidad de asentamiento sobre el terreno para las construcciones ubicadas en zonas con alta propensión a la concentración de gas radón.

Resulta llamativa la comparación de los valores obtenidos en este modelo C con los del modelo B (edificación asentada en contacto directo con el terreno) pues no presentan grandes diferencias, y sin embargo la normativa vigente contempla la solución de espacio ventilado bajo la edificación como una medida de mitigación. Los resultados obtenidos en el experimento parecen no confirmar la eficiencia de esta medida.

El modelo E es la estación de control y cumple una doble misión, en primer lugar, garantizar la objetividad de resultados en el experimento, mediante el establecimiento de una variable de control que permitiese obtener datos comparados con los de los 3 modelos a ensayar. Por otra parte, su misión también era la de medir datos de radón ambiental y para ello fue diseñada de forma tal que garantizase la libre circulación de aire en su interior, favoreciendo concentraciones de radón equivalentes a las del radón libre atmosférico. Para ello se dotó a la estación de aberturas de ventilación suficientes, tanto por la base como por los laterales.

Este modelo estaba equipado además de con la probeta de control, cuyos datos se presentan en la tabla superior, con una unidad de seguimiento en tiempo real del tipo RadonEye que permitió la verificación de las emisiones de radón ambiental a lo largo del experimento. Los datos obtenidos por este dispositivo se muestran en las páginas siguientes.



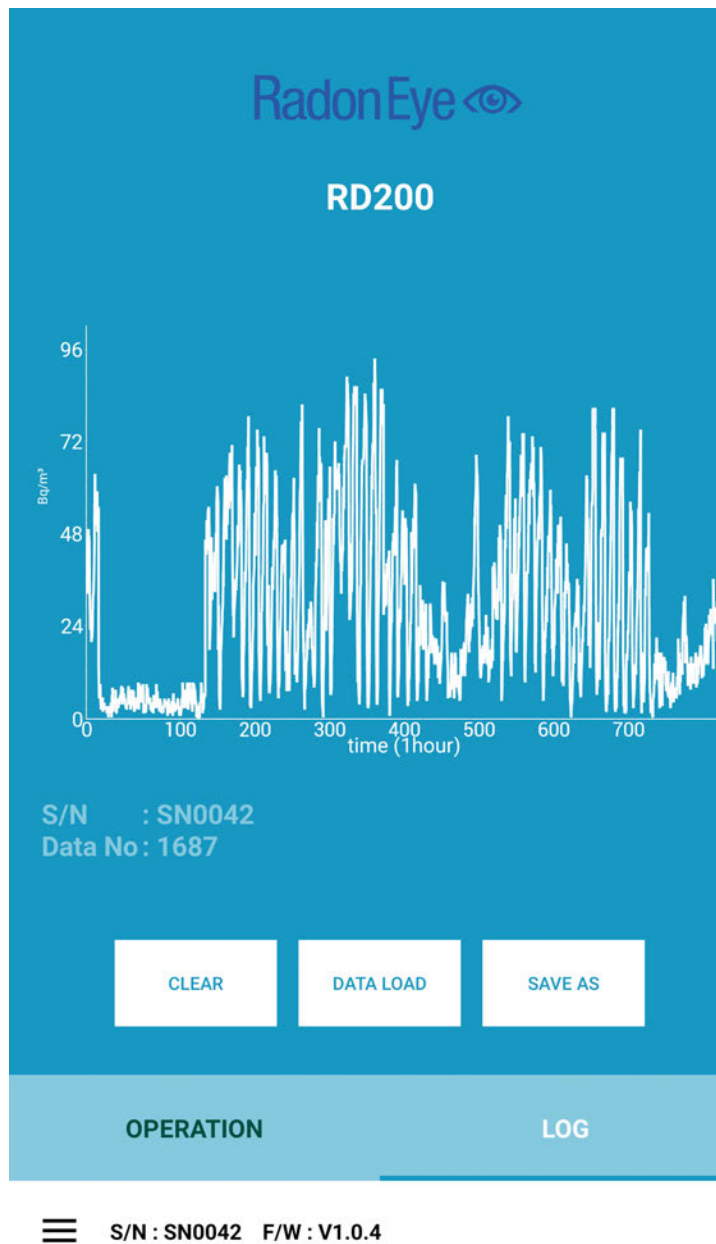
**Fig. 65 - Estación de control y dispositivo de medida RadonEye.**

*Fuente: Fotografía del autor.*

Por los resultados obtenidos de la probeta de control se verifica que estos se encuentran por debajo del límite de detección (L.D.) si bien, en este caso, el valor de 97 Bq/m<sup>3</sup> resulta demasiado alto para valores de radón exterior, por lo que este resultado debe ser considerado exclusivamente a los efectos de variable de control del experimento ciego, analizado por el laboratorio de la Universidad de Cantabria.

A lo largo de toda la duración del experimento y con objeto de obtener información comparable de los datos de radón ambiental con las condiciones meteorológicas, se dispuso en la estación de control un dispositivo de medición continua en tiempo real, el cual registró la medida de radón ambiental en intervalos de tiempo de una hora, desde el inicio al fin del experimento

Para la valoración de los datos de radón ambiental se emplearon los valores obtenidos del dispositivo RadonEye que son los que se muestran a continuación:



Fecha	Radon Bq/m <sup>3</sup>
20-11-2016	59
21-11-2016	70
22-11-2016	75
23-11-2016	40
24-11-2016	50
25-11-2016	62
26-11-2016	73
27-11-2016	70
28-11-2016	40
29-11-2016	50
30-11-2016	39
01-12-2016	24
02-12-2016	16
03-12-2016	26
04-12-2016	40
05-12-2016	50
06-12-2016	70
07-12-2016	58
08-12-2016	39
09-12-2016	51
10-12-2016	63
11-12-2016	71
12-12-2016	78
13-12-2016	70
14-12-2016	54
15-12-2016	50
16-12-2016	30
17-12-2016	19
18-12-2016	21
19-12-2016	24

Fig. 66 - Registros de radón del dispositivo RadonEye.  
 Fuente: elaboración propia.  
 Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo RadonEye.

La tabla de la figura 66 - Registros de radón del dispositivo RadonEye, muestran gráficamente los valores de radón ambiental a lo largo del experimento expresadas en Bq/m<sup>3</sup>, obtenidos en la estación de control. Obsérvese que en la gráfica el valor abscisas está expresado en horas, mientras que la tabla adjunta los valores de las concentraciones se establecen diariamente.

## Influencia de las condiciones meteorológicas en el desarrollo del experimento

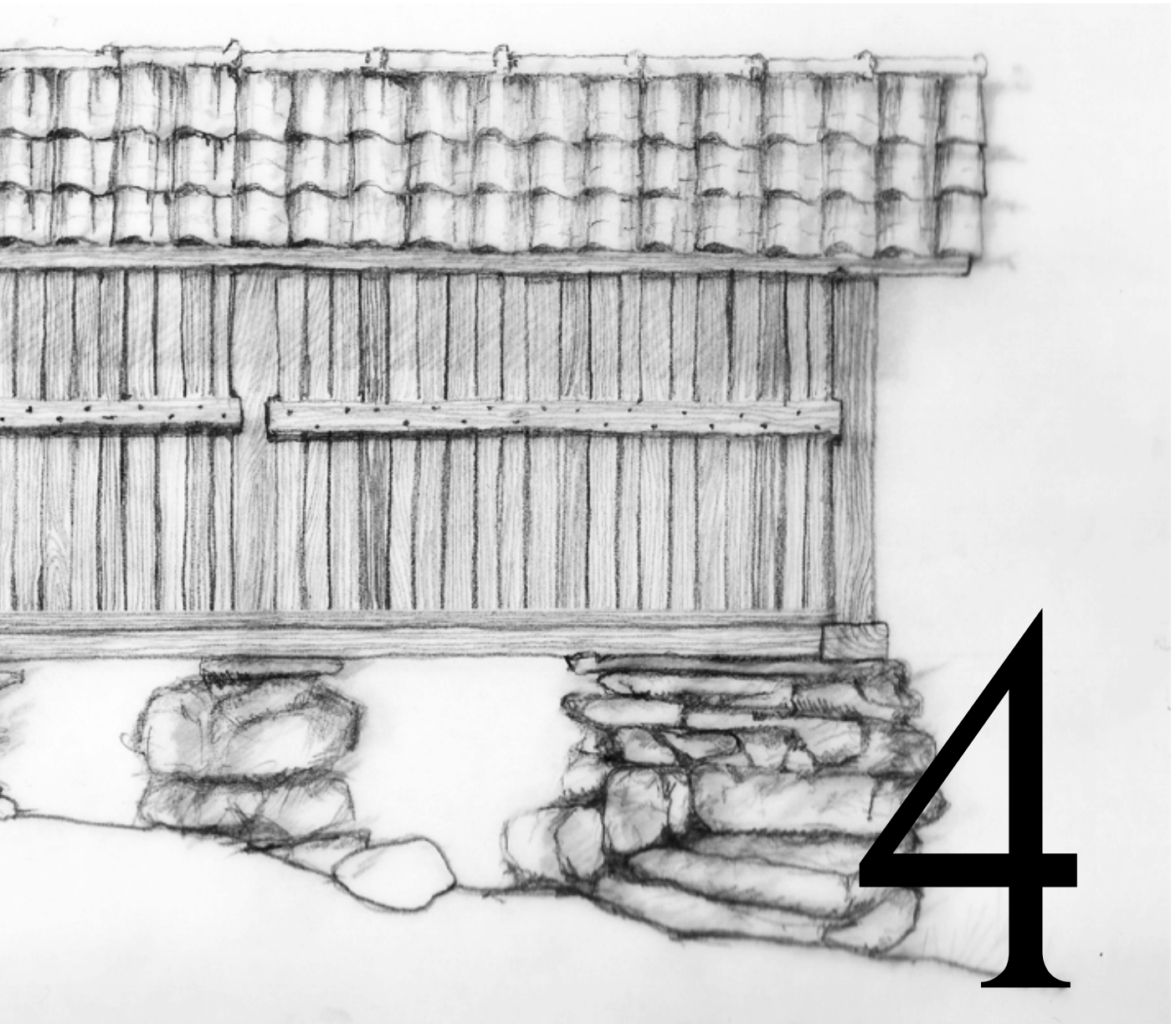
Mediciones de la estación meteorológica registradas in-situ:

Fecha	Presión Barométrica (hPa)	Humedad relativa media (%)	Dirección del viento predominante	Intensidad de precipitaciones (L/m <sup>2</sup> )
20/11/2016	994,9	87%	SW	30,2
21/11/2016	995,8	77%	SW	1,7
22/11/2016	1006,8	76%	NE	1,1
23/11/2016	1010,1	69%	NE	0,9
24/11/2016	1002	83%	SW	15,9
25/11/2016	1005	72%	SE	0
26/11/2016	1004,5	72%	SE	0
27/11/2016	1008,1	92%	SE	0
28/11/2016	1012,4	89%	SE	0
29/11/2016	1017,5	88%	SE	0
30/11/2016	1020,2	66%	SE	0
01/12/2016	1019,8	66%	SE	0
02/12/2016	1015,5	84%	SE	0
03/12/2016	1004,8	64%	E	0
04/12/2016	1005,3	71%	SE	0
05/12/2016	1015,4	72%	SE	0
06/12/2016	1022,3	73%	SE	0
07/12/2016	1023,9	71%	SE	0
08/12/2016	1025,1	67%	SE	0
09/12/2016	1024,6	61%	S	0
10/12/2016	1022,1	66%	S	0
11/12/2016	1023,4	77%	SE	0
12/12/2016	1021,8	84%	SE	0
13/12/2016	1016,6	72%	SE	0
14/12/2016	1015,6	79%	SW	14,9
15/12/2016	1014,4	79%	S	4,3
16/12/2016	1020,5	72%	NE	2
17/12/2016	1030,3	88%	SE	0
18/12/2016	1026,4	83%	SE	0
19/12/2016	1020,9	85%	NE	0

Fig. 67 - **Tabla de registros de información meteorológica recogida durante el desarrollo del experimento.** .  
Fuente: *Elaboración propia.*  
Procedencia de los datos: *Estación meteorológica WeatherStation.*

Como ya se ha mencionado anteriormente, los modelos fueron diseñados y ubicados con el objeto de garantizar que las variables exógenas, como la climatología, no supusiesen un elemento diferencial en las mediciones efectuadas en los distintos modelos, es decir, que afectasen a todos por igual.





CONCLUSIONES

Anverso Fig. 68 -  
Hórreo tradicional  
en Porreiras, cons-  
trucción idónea  
para la prevenir la  
concentración de  
gas radón.

*Fuente: Sánchez,  
(2016).*

# 4

## INTERPRETACION DE LOS DATOS Y CONCLUSIONES

Con el objetivo de facilitar la comprensión de las conclusiones obtenidas, en primer lugar, se resume someramente la situación actual de la problemática de la acumulación de gas radón.

La inhalación de gas radón acumulado en el interior de espacios cerrados constituye un factor de riesgo de cáncer pulmonar. Según la Organización Mundial de la Salud, el radón es la segunda causa de defunción por cáncer pulmonar detrás del tabaco, las muertes debidas al radón son equiparables a las ocasionadas por los accidentes de tráfico

A través de los estudios epidemiológicos citados en el Capítulo 2, queda demostrado que aumenta el riesgo de contraer cáncer pulmonar cuando se está expuesto a determinadas concentraciones de gas radón, si bien, no existe un consenso entre los expertos, parece que la exposición a concentraciones relativamente bajas de gas radón, supone un importante riesgo para la salud.

Las administraciones de numerosos países, entre ellos España, han financiado diversos proyectos con el fin de conocer y divulgar las consecuencias de la exposición al gas radón, identificando mediante los mapas del radón, aquellos lugares en los que existen mayores probabilidades de concentración del gas. Estos mapas, son muestreos estadísticos que clasifican el territorio en áreas de categoría Alta (Prone Áreas), Media y Baja según sea su probabilidad de concentración de gas radón en interiores.

En algunos países como Finlandia, Estados Unidos o Japón, la administración ha puesto en marcha actuaciones para la protección de la población frente al gas radón, mediante la aprobación de regulaciones y la difusión de soluciones constructivas de prevención y/o mitigación. En España, tan sólo se ha desarrollado normativa de protección de espacios de trabajo, el RD 783/2001, de 6 de julio establece un límite máximo de 300 Bq/m<sup>3</sup>.

En materia de técnicas o soluciones constructivas de protección, el Código Técnico de Edificación no realiza mención alguna a la problemática, limitándose el legislador a generalizar sobre la calidad de aire interior.

La Comunidad Autónoma de Galicia al cierre de esta publicación, se encuentra a la espera de una normativa específica que regule la problemática del gas radón residencial, a pesar de ser una de las regiones donde se registran las mayores concentraciones de radón ambiental de la Unión Europea. Los arquitectos gallegos no cuentan pues en la actualidad, con norma alguna que establezca seguridad técnica y jurídica para abordar el problema del Radón.

Existe en la profesión, un gran desconocimiento de la problemática, de las técnicas existentes para determinar el riesgo de radón, de los procedimientos de valoración y de las soluciones técnicas de mitigación. Mucho menos se conoce la incidencia que la elección de un determinado diseño arquitectónico pueda tener en las concentraciones de radón en el interior de las construcciones.

Con el fin de conocer la incidencia que unos determinados factores de diseño arquitectónico tienen sobre las concentraciones del gas, se ha desarrollado esta investigación; con el objetivo de valorar la influencia que el diseño de unas determinadas soluciones constructivas tiene sobre la acumulación de gas radón interior.

Basándose en la hipótesis de que la forma en que las construcciones se asientan sobre el terreno es un factor determinante en la concentración del radón, se han ensayado unos modelos a escala y el análisis de los resultados obtenidos, ha demostrado de forma concluyente, que el diseño de determinadas soluciones constructivas de asentamiento en el terreno, resulta más eficiente que el de otras para mantener libres las edificaciones del gas contaminante

# 4.1 Análisis de los datos

## ambientales recogidos durante el experimento

El radón se genera principalmente en el terreno por la presencia y desintegración del radio, que atraviesa los materiales de construcción penetrando en los espacios, por mor de las diferencias de presión entre el terreno y el interior de los edificios (proceso convectivo).

Los cambios en las variables atmosféricas (viento, lluvia, presiones o temperatura), son determinantes en la variación del gradiente de presiones entre el terreno y los espacios vacíos en el interior de las edificaciones, siendo estas las principales causantes de que el flujo de radón no sea constante (ver capítulos 2 y 3).

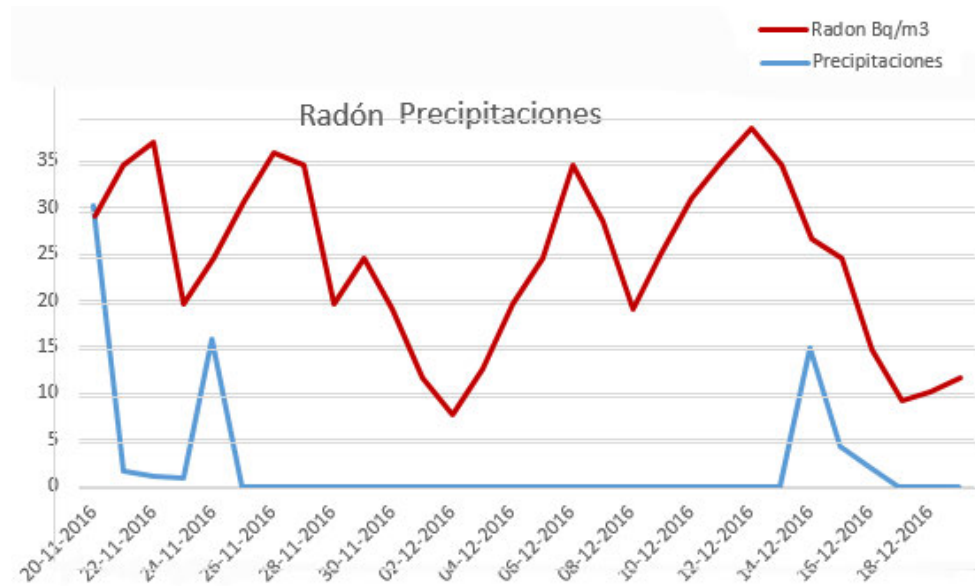
Otro factor atmosférico a tener en cuenta, son las precipitaciones, que producen la saturación de los poros del terreno provocando un aumento del flujo de radón hacia el interior de las construcciones. Los valores medios de radón ambiental registrados por la estación de control, no suponen, de acuerdo a los estudios que se manejan actualmente (ver capítulo 2), un riesgo importante para la salud, pero confirman que el terreno elegido para el experimento presenta importantes emanaciones de gas radón.

Como se puede observar, los datos obtenidos muestran grandes variaciones en el tiempo, que van desde los 4 a los 96 Bq/m<sup>3</sup> oscilando con una gran volatilidad, si bien la curva de Bezier asociada nos indica que existen períodos de varios días en que los valores se mantienen relativamente bajos y viceversa, teniendo en cuenta que se trata de datos referidos a radón ambiental es interesante comparar los valores indicados con los datos ambientales procedentes de la estación meteorológica ubicada en el terreno, para esclarecer si existe correlación entre las variaciones en la emisión de radón desde el subsuelo y las condiciones ambientales concurrentes.

La Estación Meteorológica se encuentra a 43° 17' 51" latitud y 8° 26' 06" de longitud y a una altura de 200 metros sobre el nivel del mar.

**Fig. 69 - Gráfica comparativa de los registros de concentración de radón ambiental y de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica.**

*Fuente: elaboración propia. Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo RadonEye y estación meteorológica WeatherStation.*



En la figura 69 la gráfica muestra la correlación entre la emisión de radón (en color rojo) y el índice de precipitaciones registradas. Las precipitaciones (en color azul) están expresadas en L/m<sup>2</sup> en el eje de ordenadas, el eje de abscisas representa las fechas de toma de datos, observamos como a medida que se produce un período de sequía, este coincide con una disminución de la exhalación de radón ambiental, pues según se va secando el terreno se liberan los poros incrementando la permeabilidad del mismo y favoreciendo la exhalación del radón desde el subsuelo. La llegada de las nuevas precipitaciones en torno al día 14/11/2016, provocará con una nueva disminución de la tasa de exhalación que alcanza el valor mínimo dos días después de finalizar las precipitaciones, demostrando claramente que la ausencia de precipitaciones favorece la inmisión del gas.

La dirección e intensidad del viento se mantuvo prácticamente constante a lo largo del experimento, coincidiendo con la orientación habitual de los vientos dominantes. La media de presiones sin embargo sí mostró diferencias significativas a lo largo del experimento,

como se puede observar en la gráfica (Fig. 70) donde se compara la exhalación de radón (en color rojo) con el gradiente de presiones registrado a lo largo del experimento (color azul).

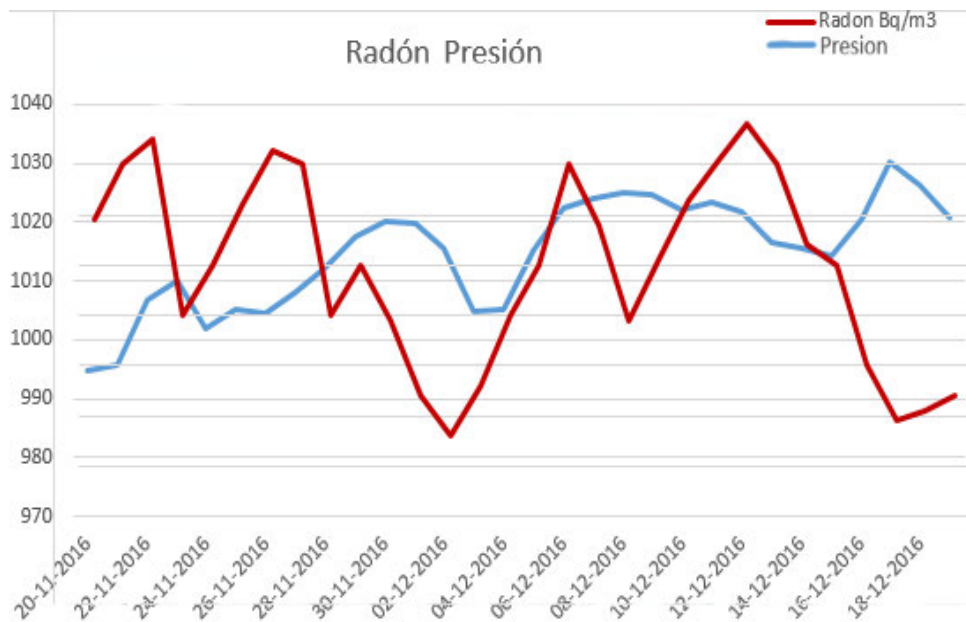


Fig. 70 - Gráfica comparativa de los registros de presión ambiental y de concentración de radón.

Fuente: elaboración propia. Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo RadonEye y estación meteorológica WeatherStation.

Para la correcta interpretación de estos datos debe tenerse en cuenta que la procedencia de los mismos, los datos de concentraciones de radón se obtienen de la estación de control y por tanto, miden radón ambiental exterior a los modelos ensayados.

En el eje de ordenadas se muestran los datos de presión en milibares (una atmósfera equivale a 1013.25 milibares), mientras que el eje de abscisas representa las fechas de toma de datos.

En la gráfica de la figura 70 se puede observar que existe una relación inversa entre los valores de presión atmosférica y las emanaciones de gas radón ambiental, a mayor presión, menos radón y viceversa, esto viene producido por la mayor o menor dificultad que encuentra el gas para expandirse en la atmósfera (Chinchón, 2011). De la comparativa de ambas curvas se deduce que cuando se produjo una disminución de la presión atmosférica supuso un incremento de la exhalación de radón.

Respecto de las variables climatológicas que pueden afectar al índice de exhalación y concentración del radón podemos concluir que, durante el desarrollo del experimento no se dieron las condiciones óptimas para lograr grandes concentraciones de radón en el interior de los modelos, pues el grado de precipitaciones fue escaso lo que no favorece la exhalación debido a la poca saturación de los poros del terreno en el exterior de los modelos.

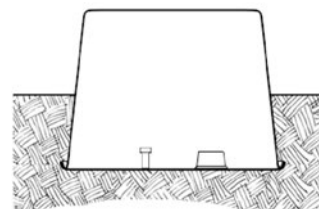
Se constata que existe una importante fluctuación en los valores de radón ambiental. Estos valores sin duda vienen originados por procesos convectivos, puesto que al disminuir la permeabilidad del terreno; bien sea por causa del incremento de la presión atmosférica o por la saturación de los poros del mismo (incremento de las precipitaciones), el gas radón procedente del subsuelo, de acuerdo con las leyes que rigen el comportamiento de los fluidos, tiende a buscar salida desplazándose de un lugar a otro más favorable, y en muchos casos se dirige hacia el interior de las construcciones a través del suelo seco situado bajo las mismas, concentrándose en los espacios vacíos inmediatos, tales como sótanos, espacios libres bajo forjados o plantas inferiores de las construcciones.

Los registros de precipitaciones durante el período del ensayo son de escasa entidad y por lo tanto, debemos de considerar que durante el ensayo no se dieron las condiciones más favorables para alcanzar acumulaciones máximas. No obstante, se observa una importante diferencia entre la concentración de radón en el Modelo A y la del resto de los modelos que es inferior al establecido en  $80 \text{ Bq/m}^3$ .

## 4.2 Análisis de los datos procedentes de los modelos ensayados.

Para dar respuesta al objetivo general de la investigación y conocer hasta qué punto las diferentes soluciones en el diseño del asentamiento de las construcciones sobre el terreno, influyen en la acumulación de radón en su interior, se desarrolló el experimento. Los resultados obtenidos fueron concluyentes para la confirmación de la veracidad de la hipótesis de investigación formulada, pues el análisis comparado de los datos obtenidos en condiciones controladas confirma que el tratamiento de la variable independiente Forma condiciona el resultado de la variable dependiente niveles de concentración de radón interior. Esto es, el diseño del asentamiento de la edificación resulta determinante en el comportamiento del gas radón en su interior y por lo tanto, los arquitectos deben contemplar este aspecto en el diseño de las soluciones constructivas.

Los resultados obtenidos resultan concluyentes en cuanto a la determinación de la solución más propensa a alcanzar mayores concentraciones de gas radón interior, en el experimento representada por el Tipo 1 (Modelo A, Fundación y espacio libre bajo la cota superficial del terreno) que alcanza unas concentraciones en el periodo estudiado de  $700 \text{ bq/m}^3$ , que superan el doble de las concentraciones máximas permitidas por la legislación española para centros de trabajo.



Modelo A

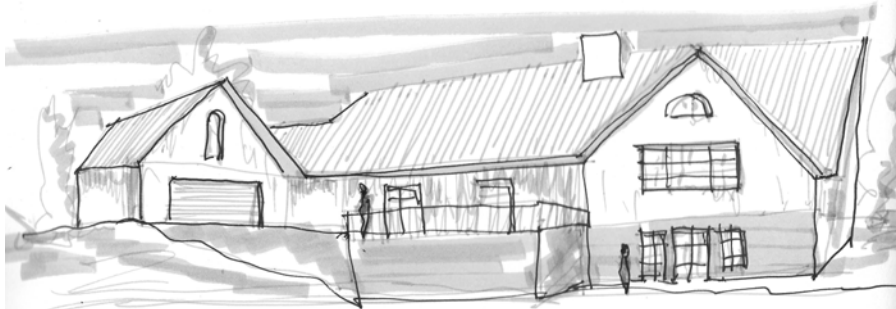


Fig. 71 - Tipología correspondiente al Modelo A.

Fuente: Elaboración propia.

La comparativa con los valores obtenidos por los Modelos B (losa) y C (sobre pilares) en las mediciones realizadas por el laboratorio de la Universidad de Cantabria, permiten verificar, con independencia de las variables atmosféricas (las mismas para los cuatro modelos ensayados), que no existen entre ellos variaciones significativas, pues los dos se encuentran por debajo del límite de detección (L.D.), en gran contraste con las altas concentraciones interiores que se obtuvieron en las mediciones resultantes del Modelo A.



Fig. 72 - Tipología correspondiente al Modelo B.

Fuente: Elaboración propia.

El Modelo B, que reproducía las condiciones de una edificación asentada sobre la cota natural del terreno y apoyada en una losa de cimentación, se mostró tan eficaz frente a la inmisión del gas como la ensayada en el Modelo C, el cual representaba una construcción apoyada sobre pilares exentos, elevada sobre la cota natural del terreno lo suficiente para garantizar una perfecta ventilación y la inexistencia de gradiente diferencial de presiones bajo la construcción.

Los valores obtenidos por los Modelos C y B, no mostraron diferencia significativa a pesar de ensayar dos situaciones distintas en lo que a diseño de la cimentación se refiere. Si bien se debe tener en cuenta la información relativa al escaso índice de precipitaciones registradas durante el experimento, es posible que en un escenario de mayores precipitaciones, en el que se alcanzase la saturación de los poros del terreno, el Modelo C presentase un mejor comportamiento que el Modelo B

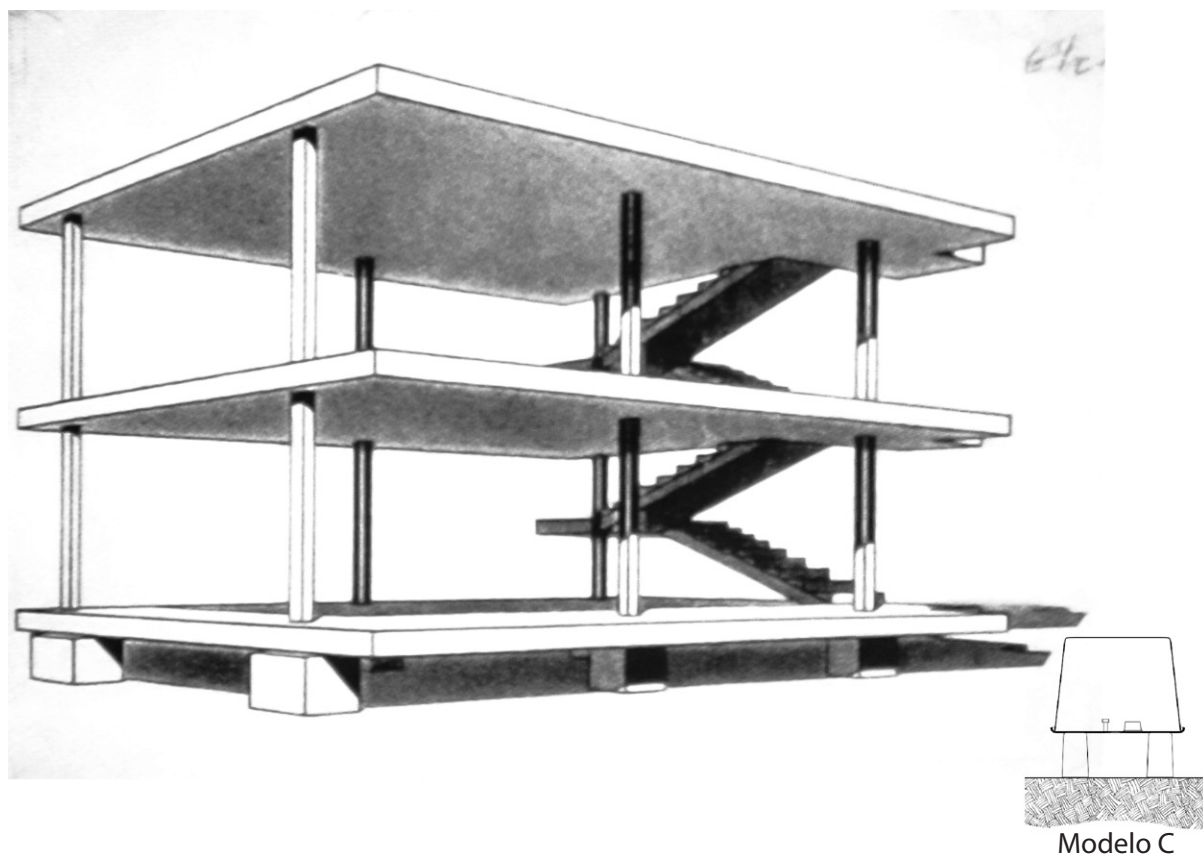


Fig. 73 - Croquis original la estructura Dominó de Le Corbusier y Pierre Jeanneret que se corresponde con la tipología ensayada en el Modelo C.

Fuente: *Elaboración propia, a partir del croquis original.*

## 4.3 Conclusiones finales

### sobre la forma en el diseño en las construcciones

En el objetivo específico N° 1 se proponía evaluar el impacto de las distintas tipologías constructivas de contacto con el terreno en la concentración de gas radón, mediante la medición comparativa y cuantificada de los valores de concentración asociados a cada tipología, para determinar cuál de ellas es la más propensa a alcanzar altas concentraciones de radón.

Por lo tanto, como consecuencia del experimento realizado y del análisis de los datos obtenidos (ver cap. 2 y 3), se concluye que aquellos diseños de construcciones que dispongan espacios libres (vacíos) a cota inferior al nivel del terreno, favorecen de forma determinante y en un porcentaje superior al 700% la concentración del gas radón en su interior y por lo tanto debería limitarse su utilización o condicionar su empleo a que se adopten medidas correctoras cuando sean proyectados en edificios ubicados en zonas de medio o alto riesgo de exposición.

En el 2º Objetivo específico se pretendía verificar la eficiencia de las medidas constructivas de mitigación contempladas legislación española. Analizando la conveniencia de la aplicación de unas u otras medidas, prestando especial atención a la incidencia de las mismas sobre el desplazamiento y concentración del gas radón.

El resultado obtenido por estos dos Modelos B y C, por otra parte altamente inesperado, descarta la idea ampliamente difundida de que el simple contacto con el terreno (origen del gas) favorece la inmisión y acumulación de gas radón en el interior de las construcciones.

A tenor de la información recabada y de los resultados obtenidos en el experimento, no ha sido posible verificar si las soluciones constructivas basadas en la separación del solado con el terreno resultan más eficaces que las basadas en cimentaciones continuas (losas) en contacto directo sobre el terreno, por lo que sería recomendable realizar nuevas investigaciones que permitiesen ampliar los conocimientos sobre este aspecto concreto.

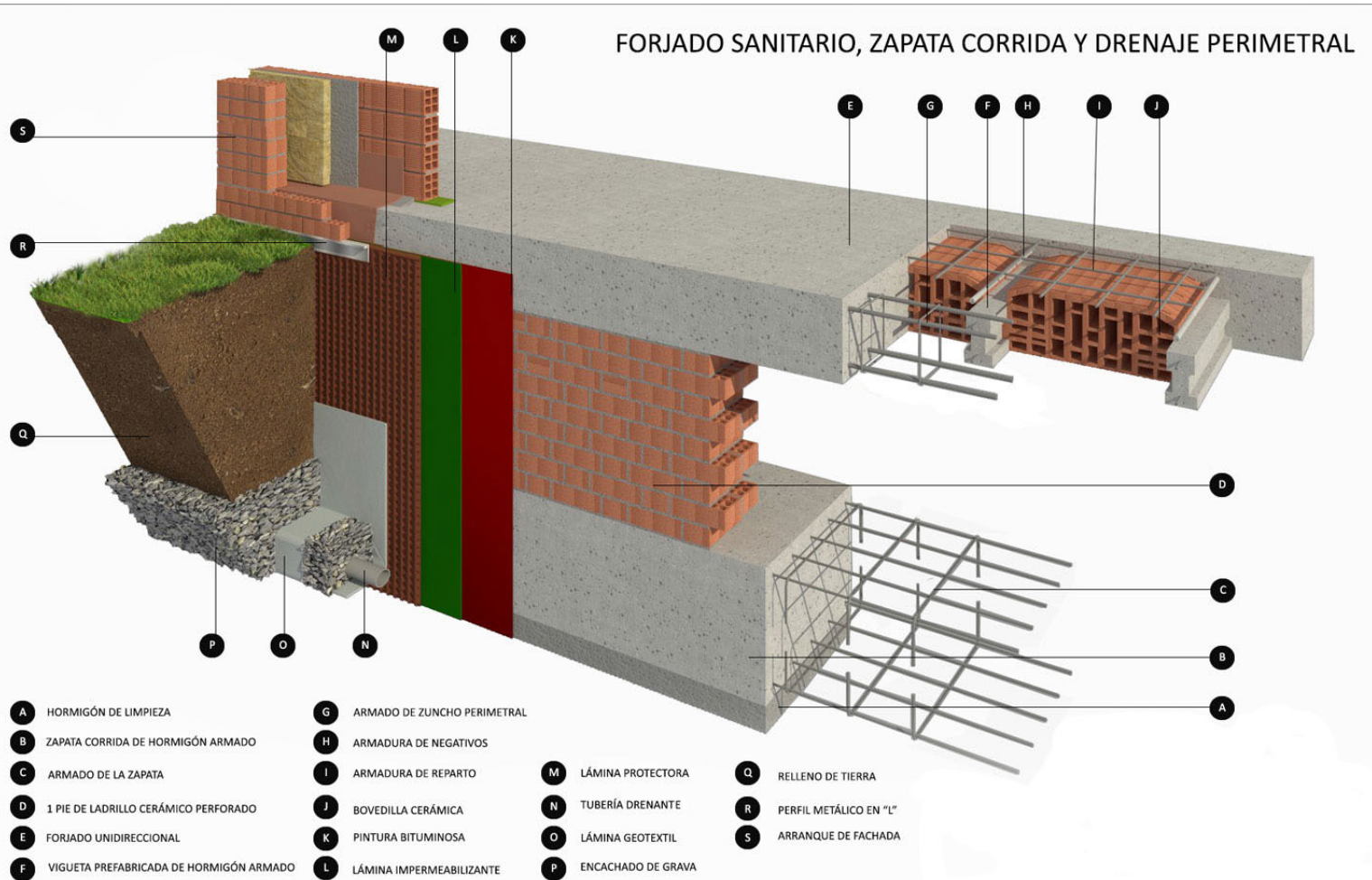
El análisis de los resultados obtenidos en los tres modelos pone en cuestión la eficacia de una medida correctora ampliamente difundida, en su día recogida como tal en las derogadas normas del hábitat gallego, que consiste en la ejecución de un forjado sanitario, como medida de protección sanitaria y contra la acumulación del gas.



Fig. 74 y 75 - **Fotografías del espacio existente bajo el forjado sanitario de una construcción local.**  
*Fuente: Fotografía del autor.*

En las fig 74 y 75 Podemos apreciar la ejecución habitual de un forjado sanitario en una construcción local. Normalmente estas soluciones constructivas consisten en la ejecución de un forjado de piso en la planta inferior de la construcción, separándola del terreno sobre el que se asienta una distancia no menor de 60 cm. Si este espacio no está suficientemente ventilado, tenderá a acumular radón por convección y lo hará con mayor intensidad si su cota inferior se

encuentra por debajo del nivel del suelo exterior, solución esta que suele darse en la mayoría de los casos como puede apreciarse en el detalle constructivo de la Fig 76



**Fig. 76 - Detalle constructivo habitual de forjado sanitario en el que puede apreciarse el nivel del terreno exterior.**

Fuente: [www.inobisa.com](http://www.inobisa.com).

Así mismo, al encontrarse cubierto, el terreno situado bajo el forjado mantendrá los poros secos en época de precipitaciones, favoreciendo el flujo de radón hacia el interior de la edificación, dado que el gas tenderá a desplazarse por los poros libres evitando los del terreno exterior saturados por las precipitaciones.

Si estos espacios vacíos no se dotan de medidas de mitigación adicionales, sin duda actuarán como elementos favorecedores de la inmisión del radón en el interior de la edificación y de desaconseja su utilización.

## 4.4 Recomendaciones Técnicas

En cumplimiento del Objetivo 3, a continuación se muestran una serie de recomendaciones derivadas de la investigación realizada, dirigidas a los arquitectos y destinadas a facilitar el abordaje de la problemática del diseño de construcciones resistentes a la concentración de gas radón.

En base a la implantación de las mismas sobre el terreno, proporcionando criterios contrastados para la adopción de soluciones de proyecto que tengan presentes las variables que favorecen la dispersión del gas radón.

En primer lugar debe considerarse la ubicación de la construcción en el territorio y su posicionamiento respecto de la orografía natural del terreno, pues unas ubicaciones resultarán más favorables que

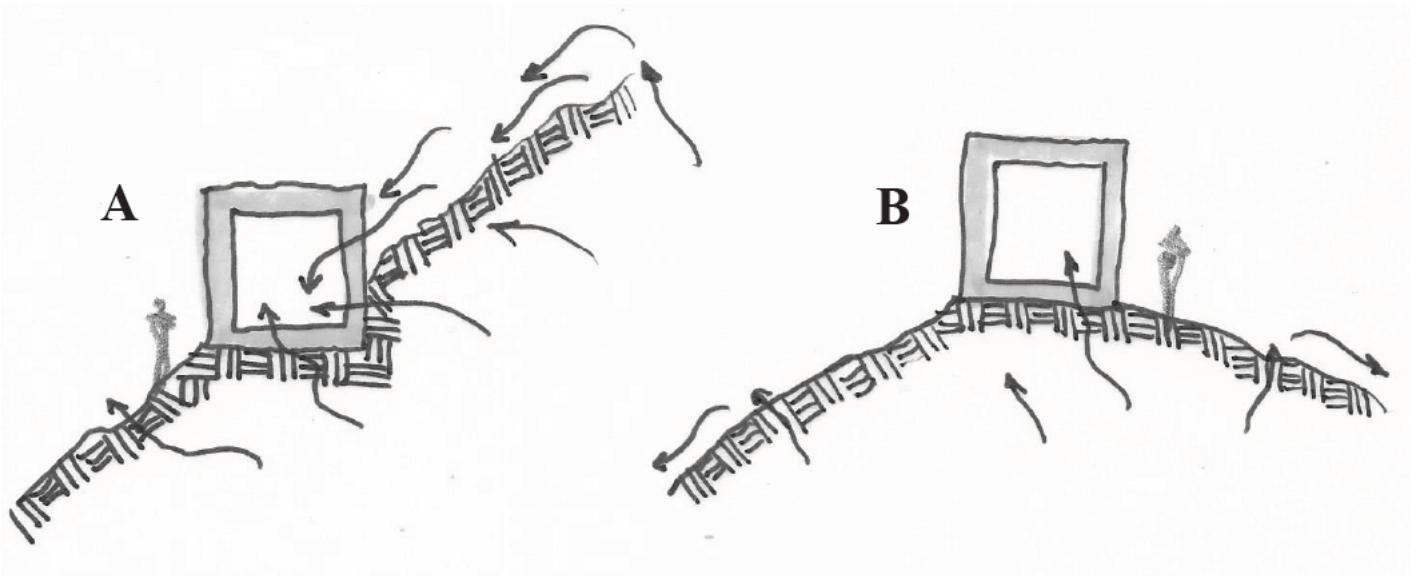


Fig. 77 - Estudio de la inmisión diferencial de radón respecto de la implantación sobre el terreno.

Fuente: Croquis del autor.

Así pues una construcción A, ubicada en el fondo de un valle o a media ladera, resultara más propensa a la in-misión del gas que otra B situada en la cima de una colina (figura 77)

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados del experimento ponen de manifiesto que debe prestarse especial atención cuando se diseñen espacios vacíos bajo una construcción. Estos espacios deben concebirse con el objetivo de garantizar un caudal de ventilación suficiente que minimice el diferencial de presiones con el exterior, pues en caso contrario pueden tener un efecto negativo, facilitando la convección del radón hacia la edificación, dado que el gas tenderá a concentrarse en estos espacios vacíos para, posteriormente, filtrarse a las estancias adyacentes.

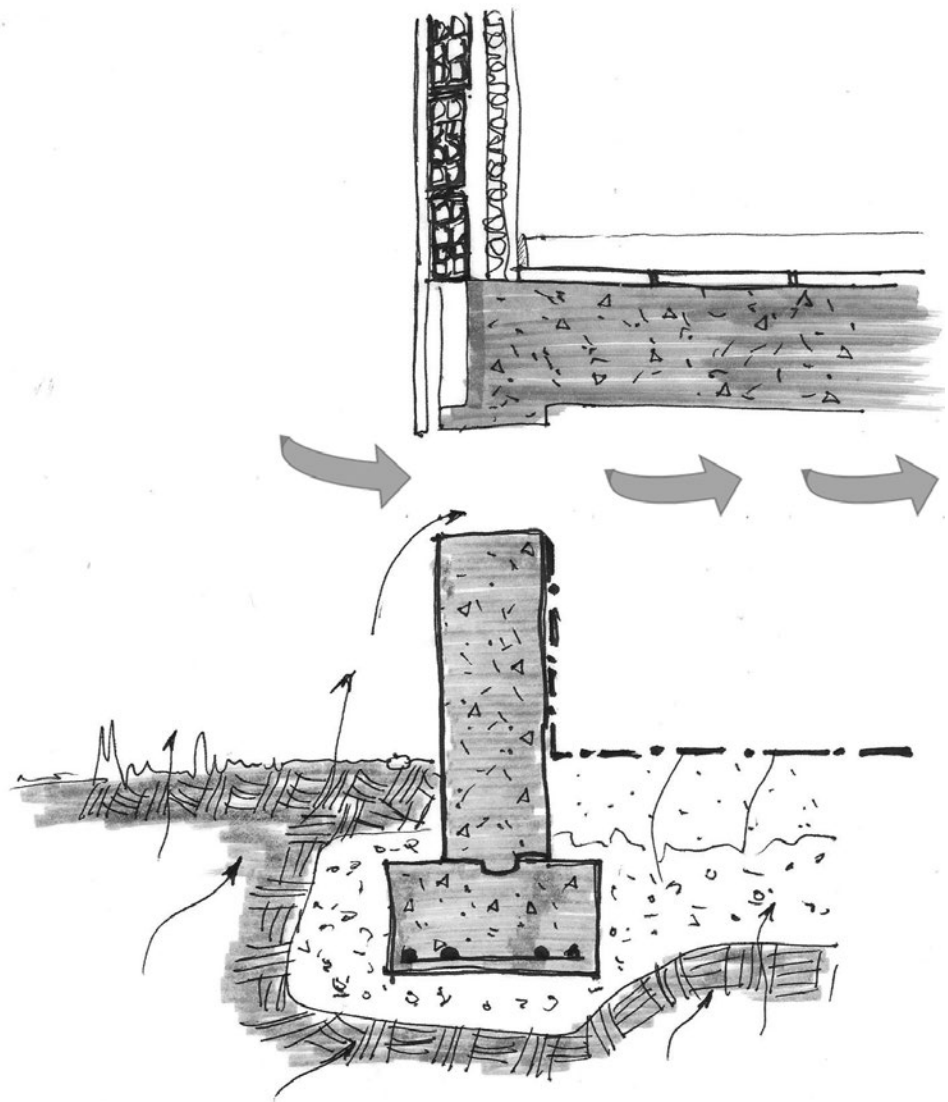


Fig. 78 - Detalle constructivo de forjado sanitario ventilado.

Fuente: Croquis del autor.

En todo caso estos espacios existentes bajo el forjado, por el simple hecho de estar cubiertos y por lo tanto protegidos de la saturación que producen las precipitaciones, ya suponen un lugar favorable a la inmisión del gas, y deben ser dotados de una membrana impermeable al radón situada directamente en contacto con el terreno.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta en el diseño de la solución de forjado sanitario es que este espacio inferior se encuentre necesariamente sobre la cota natural del terreno o a nivel con esta, nunca inferior a dicha cota. La depresión generada en el terreno en caso contrario sin duda constituye un importante foco de acumulación del radón, como se desprende de los valores obtenidos en el ensayo del Modelo A, de ahí que la solución propuesta en las normas galegas do hábitat (decreto 262/2007, Xunta de Galicia) no pueda considerarse adecuada respecto de la prevención de acumulación de gas radón en el interior.

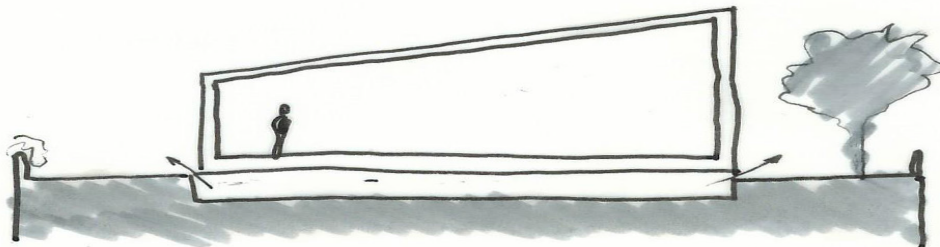


Fig. 79 - Detalle de ejecución de forjado sanitario tal y como aparece reflejado en las normas galegas do hábitat. Solución incorrecta.

*Fuente: Elaboración propia.*

La solución correcta sería la reflejada en la fig. 80.

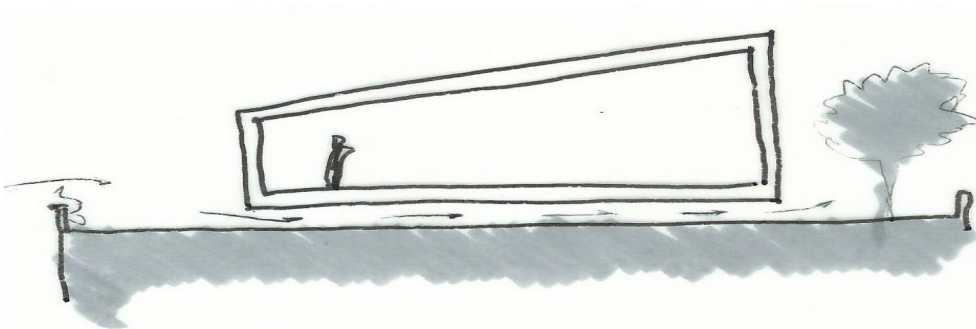


Fig. 80 - Detalle de ejecución de forjado sanitario a nivel con el terreno, Solución correcta.

*Fuente: Elaboración propia.*

A través de este proyecto de investigación se ha demostrado que la elección de una adecuada tipología de implantación de la vivienda sobre el terreno, dará como resultado altas reducciones en los niveles de concentración de radón interior; haciendo innecesaria la adopción de medidas adicionales, a pesar de hallarse situada la construcción en una zona de Alta concentración de radón.

Fig. 81 - Detalle de las soluciones constructivas más utilizadas.

Fuente: *Elaboración propia a partir de Frutos et al. (2011), p. 182.*

Por el contrario, optar por un diseño de implantación menos eficiente (vivienda con sótano) conlleva necesariamente la adopción de medidas extraordinarias de mitigación y/o prevención.

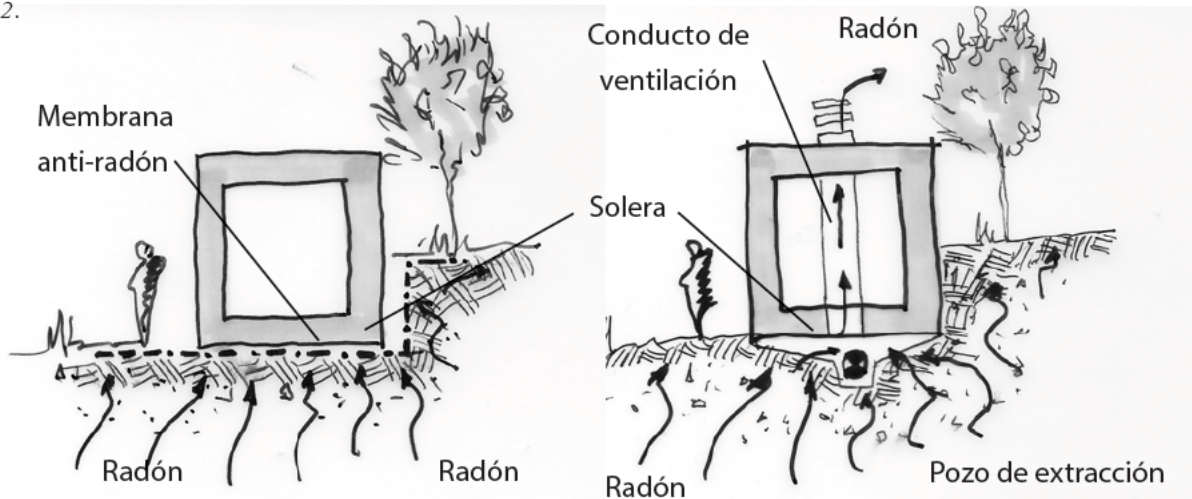
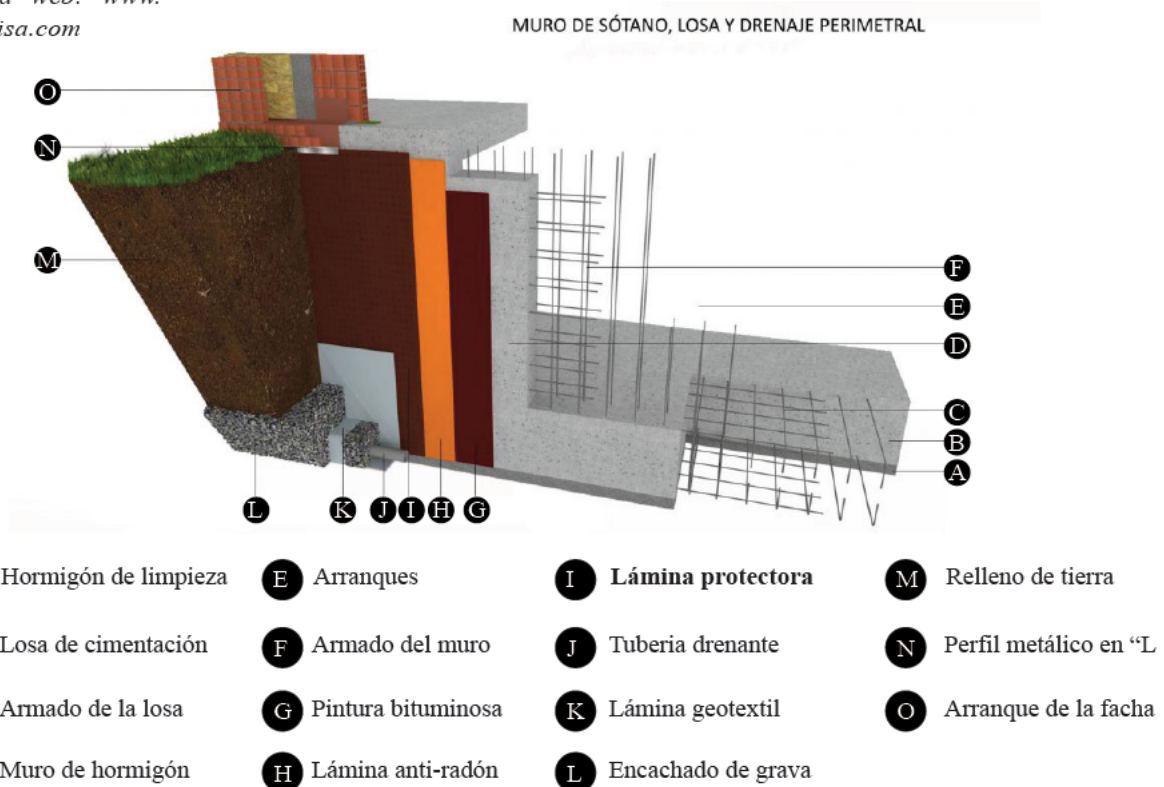


Fig. 82 - Detalle constructivo de lámina anti-radón en edificación con sótano.

Fuente: *infografía del autor a partir de detalle extraído de la web: www.inobisa.com*

Una solución de mitigación muy extendida es la de colocar una membrana continua anti-radón bajo la edificación, como puede apreciarse en el detalle constructivo de la fig. 82.



El arquitecto debe tener en cuenta que esta medida por sí sola no es suficiente, pues si bien puede resultar eficaz para prevenir la infiltración del radón a través del suelo y las fisuras, no resuelve el resto de vías de infiltración (ver capítulo 2) y por lo tanto el radón que consiga penetrar en el interior del edificio por las restantes vías de infiltración, al ser más denso que el aire tenderá igualmente a concentrarse el espacio del sótano bajo vivienda.

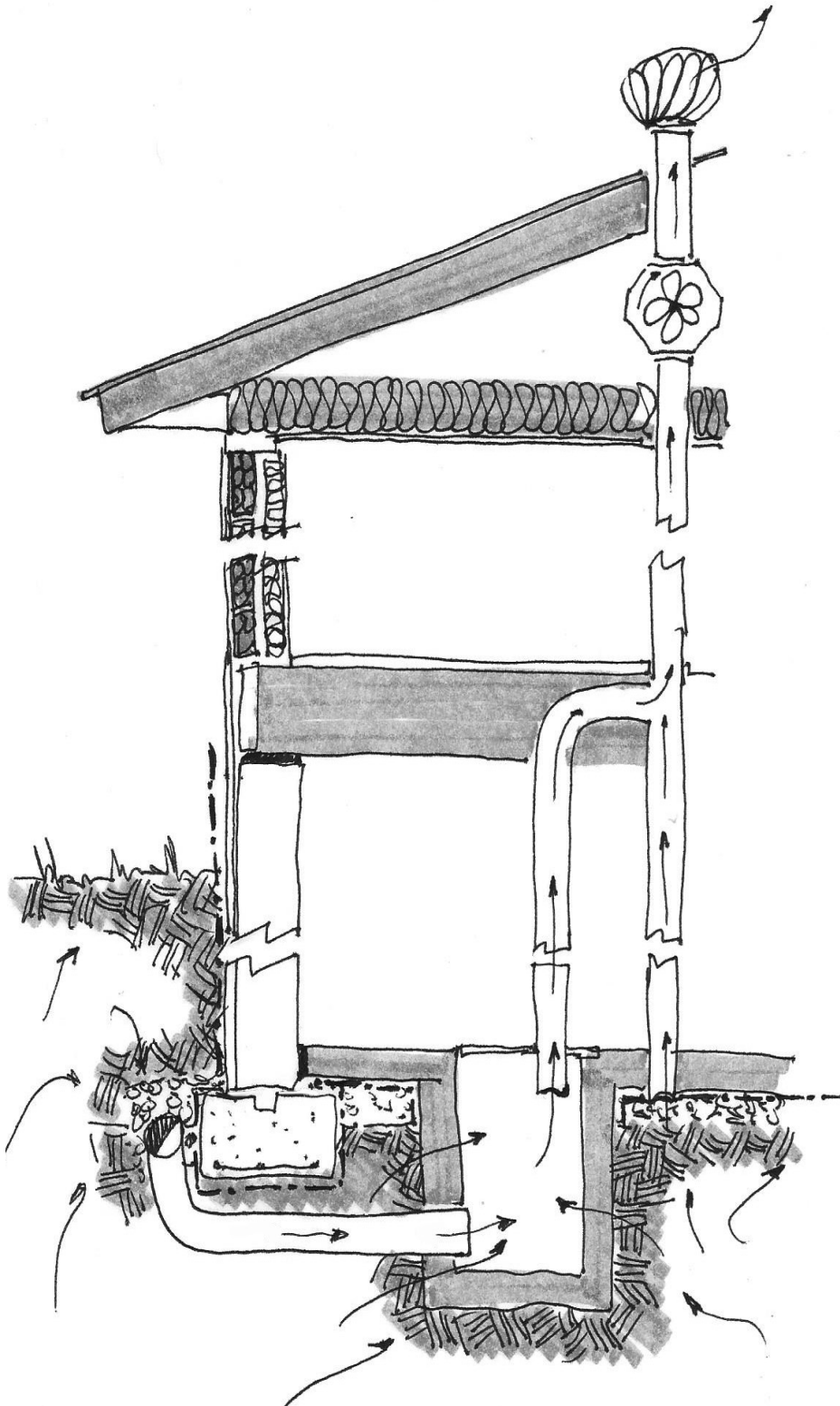


Fig. 83 - Diseño de un sistema de extracción VENTURI con arqueta SUMP.  
Fuente: Croquis del autor.

Para mitigar la presencia del gas, garantizando el mantenimiento de valores de concentración dentro de los límites recomendados, existen en el mercado diversas soluciones como la succión natural mediante sistema VENTURI y gradiente de temperaturas, o la arqueta SUMP. No obstante, es al arquitecto a quien corresponde valorar las diferentes alternativas, teniendo en cuenta los condicionantes expuestos y los costes de implementación de las medidas extraordinarias.

Otra recomendación importante a considerar a la hora de diseñar edificios destinados a albergar personas en zonas de categoría Alta de riesgo de acumulación de radón es la de dotarlos de un sistema de alerta y monitorizado continuo de las concentraciones del gas, a semejanza de los que ya existen para la alerta de humos procedentes de incendios o de acumulación de CO<sub>2</sub>. Estas soluciones del tipo Radon Eye empleado en este experimento están disponibles en el mercado a bajo coste, y pueden constituirse en soluciones eficaces para la prevención de los fatídicos efectos de la contaminación por radón.

## Roadmap

Con el objetivo de facilitar la toma de decisiones a adoptar por los arquitectos durante el proyecto, relativas a las medidas correctoras a implementar a fin de garantizar la calidad del aire interior respecto de concentraciones de radón compatibles con los límites máximos establecidos en la normativa de aplicación, los proyectistas deberán tener en cuenta la siguiente hoja de ruta (Roadmap).

El propósito de este Roadmap, es mediante un diagrama de flujo, servir de guía para reducir la incertidumbre ante distintas alternativas, permitiendo a los técnicos alcanzar una elección razonable y proporcionada de acuerdo con la dimensión del problema estudiado.

Constituye un plan de acción que combina los datos disponibles del lugar con la implementación de soluciones tecnológicas específicas y facilita a los arquitectos la toma de decisiones, estableciendo objetivos alcanzables y sobre todo medibles respecto al planteamiento y la evolución del problema. En otras palabras, sistematiza y define las estrategias generales de actuación que debe adoptar el arquitecto para abordar la problemática de la contaminación del aire interior a consecuencia del gas radón.

Como puede verse en el gráfico para evaluar el riesgo de concentración de radón, se parte de una pregunta básica ¿se encuentra la edificación situada en una Prone- Area? (ver cap. 2), partiendo de la respuesta a esta pregunta, el arquitecto debe seguir el sentido de las flechas implementando las acciones recomendadas en cada caso

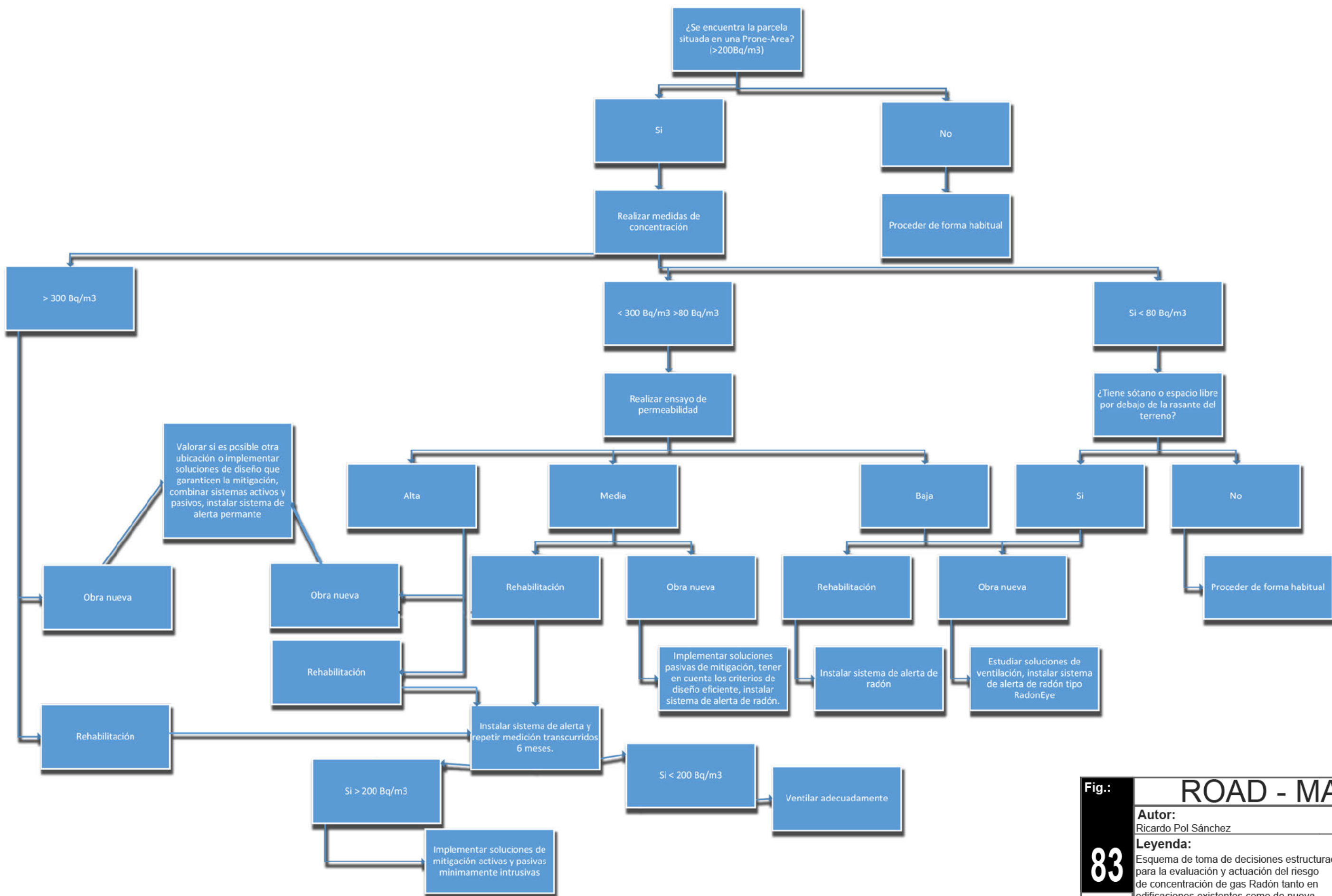


Fig.: ROAD - MAP

**Autor:**  
Ricardo Pol Sánchez

**Leyenda:**  
Esquema de toma de decisiones estructurada para la evaluación y actuación del riesgo de concentración de gas Radón tanto en edificaciones existentes como de nueva construcción.  
El diagrama debe leerse partiendo de la casilla superior y en el sentido indicado por las flechas.

## 4.5 Propuestas de nuevas líneas de investigación

De los resultados obtenidos en el experimento se pudo concluir que unas soluciones de asentamiento sobre el terreno resultan más eficaces que otras a la hora de mitigar la presencia de gas radón en el interior de las edificaciones, si bien los resultados comparados de los modelos B (losa de cimentación) y C (ventilado sobre pilares) no ofrecieron diferencias significativas, lo que sugiere que sería conveniente profundizar en la investigación del caso del modelo C para verificar si la losa de cimentación continua, por sí misma o combinada con una membrana anti-radón, puede constituir una solución idónea y económica para proyectar edificaciones libres de radón



Fig. 85 - Edificio “typus Palafitta” en la costa da morte.

Fuente: *Elaboración Ramil y Ferreiro (2009).*

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos del Modelo C (ventilado sobre pilares), que confirman que las construcciones elevadas sobre pilares presentan un buen comportamiento frente a la acumulación de gas radón en su interior, aportando un nuevo enfoque a un fenómeno extendido por toda la geografía gallega que ya Pablo Ramil y Javier Ferreiro en su obra “Guía de campo para la interpretación del feísmo en el paisaje gallego” denominaron “typus Palafitta” (Ramil y Ferreiro, 2015,p.10) consistente en la tendencia a elevar las construcciones sobre pilares que recuerda a los palafitos

Ya el historiador Luis Montegudo García, en su obra “Palafitos. Problemas y leyendas” (1957), plantea la hipótesis de que los antiguos gallegos vivían en palafitos. ¿Es posible que tanto los primitivos palafitos imaginados por Moteagudo como los actuales “Typus palafitta” que afean el actual paisaje gallego tengan su origen en una solución constructiva encaminada a proteger a sus habitantes de las nocivas consecuencias que tiene la acumulación de gas radón en su interior? Esta pregunta abre una interesante vía de investigación de carácter etnohistórico.



Fig. 86 - Reconstrucción de la aldea palafítica propuesta por el historiador Luis Montegudo García.  
*Fuente: Croquis del autor.*

# REFERENCIAS

## F u e n t e s   c o n s u l t a d a s

Biblioteca de la European Radon Association (ERA) [www.radoneurope.org](http://www.radoneurope.org)  
Bases de datos de las Bibliotecas Universitarias de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y Universidad de A Coruña (UDC). Artículos de revistas indexadas con factor de impacto.

Laboratorio de radón de Galicia [www.usc.es/radongal/](http://www.usc.es/radongal/)

Entrevistas exploratorias con profesionales y grupos de investigación académica en España :

Universidad de Cantabria: Dr. Luis Quindos Poncela, catedrático de Física Médica

Teléfono: 942 202207 Fax: 942 201903 Correo electrónico: [quindosl@unican.es](mailto:quindosl@unican.es)

Universidad de Cantabria: Dr. Carlos Sainz Fernández, profesor titular de Radioactividad Ambiental

Teléfono: 942 202207 Fax: 942 201903 Correo electrónico: [sainzc@unican.es](mailto:sainzc@unican.es)

Arquitecto: D. Vicente Rivas Negreira, Teléfono: 981 730560 Correo electrónico: [vrivasarquitecto@gmail.com](mailto:vrivasarquitecto@gmail.com)

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia de los Estados Unidos para la protección ambiental (Septiembre 1993). *El Radón: guía para su protección y la de su familia*. N° 402-K93-005. Disponible en internet en: <http://www.epa.gov/iaq/radon/pubs/elradon.html> [con acceso el 24-07-06].

Aitchison, J., & Brown, J. A. (1969). *The lognormal distribution with special reference to its uses in economics*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge at the University Press.

Akiba, S., Angel, W. J., Arvela, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., ... , Zunic, S. (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores*. Organización Mundial de la Salud, Ginebra. Suiza.

Alvar Aalto, H. (1940). The Humanizing of Architecture. *The Technology Review*.

Appleton, J.D. & Miles, J.C. (2009) A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 799-803. doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.06.002.

Barros-Dios, J.M. (2014). El radón: un problema de Salud Pública. *Conference paper USC. Torrelodones. España*. Recuperado de <http://www.elradon.com/web/wp-content/uploads/2014/05/El-radon-un-problema-de-salud-publica11.pdf>.

Barros-Dios, J.M., Barreiro, M.A., Ruano-Ravira, A., & Figueiras, A. (2002). Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: A population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156 (6), pp. 548-555.

Barros-Dios, J.M., Ruano-Raviña, A., Gastelu-Iturri, J. & Figueiras, A. (1995). Factors underlying residential radon concentration. Results from Galicia, Spain. *Environ Res*, 103, pp. 185-190. Doi:10.1016/j.envres.2006.04.008.

Barros-Dios, J.M., Ruano-Ravina, A., Pérez-Ríos, M., Castro-Bernárdez, M., Abal-Arca, J. & Tojo-Castro, M. (2012). Residential radon exposure, histological types and lung cancer risk. A case-control study in Galicia, Spain *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, 21, 951-958. Doi:10.1158/1055-9965.EPI-12-0146-T.

Chinchón, S., Morales, M. A., Piedecausa, B. & Sanjuán-Barbudo, M. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *Revista Técnica Cemento Hormigón*. Nº 946, pp. 34-50.

Comisión de las Comunidades Europeas (1997). Radiation Protection 88. Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BBS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources. European Commission. Directorate-General. *Environment, Nuclear Safety and Civil Protection*. Recuperado en Internet en: [http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/publication/doc/088\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/publication/doc/088_en.pdf).

Consejo de las Comunidades Europeas (1990). 90/143/Euratom: Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios.. *D.O.C.E. n° L 080 de 27/03/1990* p. 0026-0028. Recuperado en: [http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!Celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31990H0143&model=guichett](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!Celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=ES&numdoc=31990H0143&model=guichett).

Consejo de las Comunidades Europeas (1996). 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. *D.O.C.E. n° L 159 de 29/06/1996*, 0001 - 0114. Disponible en Internet en: <http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0029:ES:HTML>.

Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M. et al. (2006). Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 subjects with lung cancer and 14,208 subjects without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand Work Environ Health* N° 32:suppl 1,1-84.

Darby,S., Hill,D., Auvinen,A., Barros-Dios,J.M., Baysson,H. & Bochicchio,F. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330, 223-225. Doi:10.1136/bmj.38308.477650.63.

Decreto 262/2007 de 20 de Diciembre, *Diario Oficial de Galicia*, N° 12 de 17 de Enero de 2008, pp. 1110.

Decreto 29/2010 de 4 de Marzo, *Diario Oficial de Galicia*, N° 53 de 18 de Marzo de 2010, pp. 3.670 y 3.684.

Frutos-Vázquez, B. y Olaya, M. (2010). Las prestaciones en construcción de las barreras anti radón. La evaluación técnica de membranas. *Conference paper II Congreso Nacional de Investigación en Edificación*. UPM. Madrid.

Frutos-Vázquez, B. y Olaya-Adán, M. (2011, Abril). Gestión De Riesgo. Soluciones Constructivas. *Revista de salud ambiental*. N° 26. pp. 38-45, Recuperado On-line de <http://docplayer.es/18603572-Gestion-de-riesgo-soluciones-constructivas.html>.

Frutos Vázquez, B., Olaya Adán, M., & Esteban Saiz, J.L. (2011). Acciones de rehabilitación frente a la entrada de gas radón. *Revista ingeniería de construcción*, 26(1), 95-121. Doi:10.4067/S0718-50732011000100006

Frutos-Vázquez, B., García-Ortega, S., Linares-Alemparte, P. & Olaya-Adán, M. (2016). Estrategias y criterios de actuación para evitar la presencia de radón en edificios. *Revista tecnológica del Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España*. N° 23.

Frutos-Vázquez, B., Olaya, M., & Esteban, J.L. (2011). Sistemas de extracción como técnicas constructivas para evitar la entrada de gas radón en las viviendas. *Informes de la construcción Vol. 63, 251*, pp. 23-36. doi: 10.3989/ic.09.056.

García-Talavera, M., García-Pérez, A., Rey, C. & Ramos, L. (2013). Mapping radon-prone areas using  $\gamma$ -radiation dose rate and geological information. *J Radiol Prot. 2013 Sep; 33(3)*: 605–620. Doi: 10.1088/0952-4746/33/3/605.

García-Tobar, J. (2014). Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el nivel de radón a corto plazo en un laboratorio subterráneo. *Nova scientia, 6(12)*, 78-107. Doi:10.1088/0952-4746/33/3/605.

Hulka, J., & Thomas, J. (2004). *National Radiation Protection Institute, PRAHA*, República Checa.

Jimenez Salas et al. (1976). *Geotécnia y cimientos II*. Madrid. España: Ed. Rueda.

Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., & Valdivia-Manchego, M., (2001). Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Ed. Total Environ. Vol. 272, 217 y 230*. Doi:10.1016/S0048-9697(01)00696-9.

Llorca, J., Bringas-Bollada, M. & Quindós-Poncela, L.S. (2007). Falta de asociación entre las concentraciones de radón en el domicilio y el cáncer de pulmón en Cantabria. *Arch Bronconeumol, 43*, 695-696.

Lopez, A. & Murray C. (1996). The global burden of disease and injury series. Cambridge. Reino Unido: Ed. *The Harvard School of Public Health By Harvard University Press*.

Martín Matarranz, J.L. (2008). *Recomendaciones de protección radiológica frente la radiación nuclear*. CSN.

Martín Matarranz, J.L. (2004). Concentraciones de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural. *Colección Informes Técnicos 13*, CSN.

Ministerio de la Vivienda. RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el *Código Técnico de Edificación*. BOE, n.º 74, de 28 de marzo de 2006.

Monteagudo, L. (1957). Palafitos, problemas y leyendas. *Revista de Dialectología y Tradiciones Populares*. pp. 77-136. Madrid. España.

Naciones Unidas (2000). UNSCEAR 2000 Report Vol. I: Sources and effects of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*. Disponible en internet en: [http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html).

Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid. España: Ed. Munillalera.

Neznal, M. & Neznal, M. et al. (2004). The new method for assessing the radon risk of building sites. Czech. *Geol. Survey special papers p.47*, CGS Praga.

Odrizola-Maritorea, M. (2008). *Cálculo y medida de infiltraciones de aire en edificios*. Ed. Euskal Herriko Unibertsitatea. Álava.

Prini-Guadalupe, L., Pérez-Ríos, M., Ruano-Ravina, A., Abal Arca, J. & Barros-Dios, J.M. (2012). Leisure time activities and risk of lung cancer. A case-control study. *Epidemiology*, 23, 352-353. Doi: 10.1097/EDE.0b013e3182458992.

Pérez-Ríos, M., Barros-Dios, J.M., Montes-Martínez, A. & Ruano-Ravina, A. (2010). Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem?. *BMC Public Health*, 10, 256. Doi: 10.1186/1471-2458-10-256.

Quindós, L (2016, 10 Octubre) Entrevista por Pol, R. [archivo .WAP] Santander.

Quindós, L. S., et al (2015). *Manual de la Organización Mundial de la Salud sobre el Radón en Interiores*, Ed. Publicaciones de la Organización Mundial de la Salud Ginebra, Suiza Recuperado en: [http://www.who.int/about/licensing/copyright\\_form/en/index.html](http://www.who.int/about/licensing/copyright_form/en/index.html).

Quindós, L.S., Fernández, P., & Soto, J. (1991). National survey on indoor radon in Spain. *Environ Internat* N° 17, 449-53.

Quindós, L.S., Fernández, P.L. & Soto, J. (1995). Study of areas of Spain with high indoor radon. *Rad Measurements*,24, 207-210.

Quindós, L.S., Fernández, P.L., Soto, J., Ródenas, C. & Gómez, J. (1994). Natural radioactivity in Spanish soils. *Health Phys*, 66, 194-200.

Le Corbusier & Jeanneret, P. (1975) *Five points towards a new architecture, Programs and Manifestoes on 20th Century Architecture*, ed. U. Conrads Cambridge, Massachusets: MIT Press, 99–101.

Ramil-Rego, P., & Ferreiro da Costa, J. (2015). *Guia de campo para la interpretación del feísmo en el paisaje gallego*. Ed. Horreum Lugo, pp.10-12.

Real Ferrer, G. (2002). *El radón tratamiento Jurídico de un enemigo invisible* ed. Gamma Alicante.

Reimer G. M. & Tanner A. B. (1991). Radon in the geological environment. In encyclopedia of Earth System Science, *W. A. Nierenberg, Vol. 3*. Ed. Academic press inc., San Diego, pp. 707-712.

Ruano-Ravina, A., (2013) Radón residencial un problema de salud pública en Galicia. *Discurso de ingreso como Académico Correspondiente en la Academia de Farmacia de Galicia*. Ed. NINO-Centro de Impresión Digital, Santiago de Compostela.

Ruano-Ravina,A., Figueiras, A. & Barros-Dios, J.M. (2002). Noxious exposures in leisure time and risk of lung cancer: A neglected exposure?. *Epidemiology*, 13, 235236.

Ruano-Ravina,A., Figueiras,J.M. & Barros-Dios, J.M. (2003). Lung cancer and related risk factors: an update of the literature. *Public Health N° 117*, 149-156. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0033-3506\(02\)00023-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0033-3506(02)00023-9).

Sarah & David (2003). *Radón y medioambiente*. Santiago de Compostela.

Schwarz, M. (2013). *Marco teórico vs Estado del Arte en la investigación científica*. Disponible en: <http://max-schwarz.blogspot.com/2013/01/marco-teorico-vs-estado-del-arte-en-la.html>

Suminory Akiba et al. (2009). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective* [Internet]. Geneva: World Health Organization; Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143216/>.

AENOR (2016) *UNE-EN ISO 11665-1 Revisión Septiembre 2016* pp.9 disponible en <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0056595>.

Vargas,A. & Ortega, X. (2007). Influence of environmental changes on integrating radon detectors: results of an intercomparison exercise. *Radiat Prot Dosimetry*, 123, 529-536 . Recuperado en <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncl161>.

# ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

Fig. 1 - Fotografía de pallozas en Os Ancares, Lugo.

Fuente: Pedro de Llano (1989).

Páginas 6-7.

Fig. 2 - Croquis original de Alvar Aalto para el centro administrativo de Rovaniemi (1968).

Fuente: Web oficial del ayuntamiento de Rovaniemi. [www.visitrovaniemi.fi](http://www.visitrovaniemi.fi)

Página 10.

Fig. 3 - Diferentes situaciones de acumulación de gas radón en recintos subterráneos.

Fuente: Infografía del autor.

Página 12.

Fig. 4 - Vías de infiltración del radón

Fuente: Infografía del autor. Página

13.

Fig. 5 - Cadena de desintegración del radón.

Fuente: Infografía del autor.

Página 14.

Fig. 6 - Presencia de radón, medidas de más de 200Bq/m<sup>3</sup>.

Fuente: La Voz de Galicia.

Página 15.

Fig. 7 - Vista general de la ciudad de Prypiat.

Fuente: Scott, [www.blog.impossibleliving.co](http://www.blog.impossibleliving.co).

Página 16.

Fig. 8 - Tabla de valores de radiación en el entorno de la ciudad de Prypiat.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de <http://chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/radiation-levels/>

Página 17.

Fig. 9 - Vias de entrada del radón.

Fuente: Infografía del autor.

Páginas 18-19.

Fig. 10 - Algunos dispositivos de alerta domestica de radón disponibles en internet.

Fuente: [www.radiansa.co](http://www.radiansa.co).

Página 20.

Fig. 11 - Radon prone área.

Fuente: Infografía del autor.

Páginas 28-29.

Fig. 12 - Comparativa de causas de muerte.

Fuente: Datos del National Safety Council, 1999.

Elaboración propia.

Página 32.

Fig. 13 - Origenes de la radiación absorbida.

Fuente: Gobierno de la region especial administrativa de Hong Kong, [www.dbcp.gov.hk](http://www.dbcp.gov.hk).

Página 33.

Fig. 14 - Fuentes de radiación.

Fuente: UNSCEAR 2008 Report.

Página 34.

Fig. 15 - Mapa del radón en EUA.

Fuente: [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon).

Páginas 38-39.

Fig. 16 - Mapa del radón en España, proyecto Marna.

Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear.

Página 41.

Fig. 17 - Ampliación del mapa español del radón proyecto 10x10.

Fuente: <http://www.elradon.com>.

Página 43.

Fig- 18 - Mapa geológico de la España peninsular, en el que se puede apreciar, por comparación con las figuras 11 y 13 (proyecto Marna) la sensible coincidencia de las zonas de alta concentración de radón con las formaciones de rocas magmáticas plutónicas, principalmente granito.

Fuente: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Página 45.

Fig. 19 - Mapa de suelos de Galicia.

Fuente: Macías et al., 2004. Página 50.

Fig. 20 - Mapa del radón en Galicia, proyecto Marna Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear.

Página 51.

Fig. 21 - Factores de riesgo de cáncer pulmonar. Fuente: <https://es.slideshare.net/mobile/AlmiuxAs/estrategia-de-txca-pulmon-02-oct-2014>. Croquis del autor.

Página 53.

Fig. 22 - Esquema de movilidad del gas radón.

Fuente: Croquis del autor.

Página 54.

Fig. 23 - Gráfico de correlación convección-saturación

Fuente: Frutos (2011).

Página 57.

Fig. 24 - Tabla de concentraciones de gas radón en materiales de construcción.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Chinchón et al. (2011).

Página 58.

Fig. 25 - Detalle constructivo de instalación de sistema de despresurización por pozo de extracción con tiro forzado.

Fuente: [www.safeguardeurope.co](http://www.safeguardeurope.co).

Página 60.

Fig. 26 - Detalle de instalación de canalizaciones de despresurización.

Fuente: [www.cavitytrays.co](http://www.cavitytrays.co).

Página 61.

Fig. 27 - Detalle constructivo de colocación de membrana anti-radón en obras de rehabilitación.

Fuente: Infografía del autor modificada a partir de [www.necoflex.i](http://www.necoflex.i).

Página 63.

Fig. 28 - Detalle constructivo de colocación de membrana anti-radón en obras de nueva construcción.

Fuente: Infografía del autor.

Página 63.

Fig. 29 - Categorías de exposición potencial al radón en la provincia de A Coruña.

Fuente: Cadierno et al., 2013.

Página 70.

Fig. 30 - Elementos horizontales de contacto con el terreno según F. Ching. Fuente: Ching. (1982).

Página 73.

Fig. 31 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo A.

Fuente: Infografía del autor.

Página 74.

Fig. 32 - Construcción tradicional gallega de las agras coruñesas correspondiente al Tipo A.

Fuente: De Llano.

Página 74.

Fig. 33 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo B.

Fuente: Infografía del autor.

Página 75.

Fig. 34 - Construcción tradicional gallega de las Terra Chá correspondiente al Tipo B.

Fuente: De Llano.

Página 75.

Fig. 35 - Gráfico explicativo de la relación entre la tipología y el modelo C.

Fuente: Infografía del autor.

Página 76.

Fig. 36 - Construcción tradicional gallega de la sierra de Ancares correspondiente al Tipo C.

Fuente: De Llano.

Página 76.

Fig. 37 - Mapa de exposición de rayos  $\gamma$  a un metro sobre el suelo en España. Las áreas en blanco se clasifican como no Radon-Pron .

Fuente: García-Talavera, García-Pérez, Rey y Ramos (2013). Página 78.

Fig. 38 - Fugas de aire por diferencia de temperatura interior/exterior.

Fuente: Odriozola (2008).

Página 79.

Fig. 39 - Sección del módulo experimental por el eje central.

Fuente: Borja Frutos et al. 2011.

Página 80.

Fig. 40 - Esquemas de diferentes soluciones de mitigación de gas radón.

Fuente: Borja frutos et al 2011

Página 82.

Fig. 41 - Fotografía del módulo de vivienda donde se han probado los diferentes sistemas de protección frente a radón.

Fuente: Borja frutos et al.(2011).

Página 84.

Fig. 42 - Esquemas de diferentes opciones de colocación de la edificación respecto del terreno.

Fuente: Universidad Ramón Llull. <http://www.salleurl.edu/tecnologia/pdf/teoria/primerC/08.pd>.

Página 85.

Anverso Fig. 43 - El experimento.

Fuente: Croquis del autor.

Páginas 86-87

Fig. 44 - Mapa de zonas propensas al radón en Galicia.

Fuente: García-Talavera, García-Pérez, Rey y Ramos. (2013).

Página 91.

Fig. 45 - Mapa de riesgo de presencia radón por comarcas de Galicia, valores medidos para concentraciones superiores a 200Bq/m<sup>3</sup>.

Fuente: Laboratorio del Radón de Galicia. Disponible en [usc.es /radongal/ mapa\\_comarcas.htm](http://usc.es/radongal/mapa_comarcas.htm).

Página 92.

Fig. 46 - Situación de la parcela y ubicación del experimento dentro de la misma.

Fuente: Elaboración propia.

Página 93.

Fig. 47 - Clasificación checa del terreno a partir de las medidas de concentración de actividad de radón y la permeabilidad estimada del suelo a los gases.

Fuente: Neznal et al.(2004).

Página 95.

Fig. 48 - Esquema del ensayo de Lefranc.

Fuente: Jimenez Salas et al, 1976. Página 95.

Fig. 49 - Tabla de grados de permeabilidad.

Fuente: Jimenez Salas et al, 1976. Página 96.

Fig. 50 - Excavación para la instalación del modelo A.

Fuente: Fotografía del autor.

Página 97.

Fig. 51 - Esquemas de identificación de los 3 modelos ensayados.  
Fuente: Elaboración propia a partir de imagen obtenida de <http://www.salleurl.edu/>. Página 98.

Fig. 52 - Plano de Planta de Distribución y Alzado Sur.  
Fuente: Elaboración propia.  
Página 99.

Fig. 53 - Planos de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Elaboración propia.  
Página 101.

Fig. 54 - Plano del Modelo D y Alzados Norte y Oeste.  
Fuente: Elaboración propia.  
Páginas 103.

Fig. 55- Preparación para instalación de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Fotografía del autor.  
Página 105.

Fig. 56 - Instalación de los Modelos A, B y C.  
Fuente: Fotografía del autor.  
Página 105.

Fig. 57 - Instalación del Modelo E.  
Fuente: Fotografía del autor.  
Página 106.

Fig. 58 - Colocación de los dispositivos pasivos.  
Fuente: Fotografía del autor. Página 106.

Fig. 59 - Vistas generales de la instalación finalizada  
Fuente: Fotografías del autor.  
Página 107.

Fig. 60 - Un Dispositivo de medida pasivo del tipo de los empleados en el experimento .

Fuente: Fotografía del autor.

Página 108.

Fig. 61 - Imagen del certificado emitido por el laboratorio de La Ruc.

Fuente: Fotografía del autor.

Página 109.

Fig. 62 - Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo A.

Fuente: Infografía del autor.

Página 112.

Fig. 63 - Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo B.

Fuente: Infografía del autor.

Página 113.

Fig. 64 - Ficha resumen de los datos recogidos en el modelo C.

Fuente: Infografía del autor.

Página 114.

Fig. 65 - Estación de control y dispositivo de medida RadonEye.

Fuente: Fotografía del autor.

Página 115.

Fig. 66 - Registros de radón del dispositivo RadonEye.

Fuente: elaboración propia. Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo RadonEye.

Página 116.

Fig. 67 - Tabla de registros de información meteorológica recogida durante el desarrollo del experimento.

Fuente: Elaboración propia.

Página 117.

Fig. 68 - Hórreo tradicional en Porreiras, construcción idónea para la prevenir la concentración de gas radón.

Fuente: Sánchez, (2016).

Página 118-119.

Fig. 69 - Gráfica comparativa de los registros de concentración de radón ambiental y de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica. Fuente: elaboración propia.

Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo. RadonEye y estación meteorológica WeatherStation.

Página 125

Fig. 70 - Gráfica comparativa de los registros de presión ambiental y de concentración de radón.

Fuente: elaboración propia.

Procedencia de los datos: Experimento - Estación de control dispositivo RadonEye y estación meteorológica. WeatherStation.

Página 126.

Fig. 71 - Tipología correspondiente al Modelo A.

Fuente: elaboración propia.

Página 128.

Fig. 72 - Tipología correspondiente al Modelo B.

Fuente: Elaboración propia.

Página 129.

Fig. 73 - Croquis original la estructura Dominó de Le Corbusier y Pierre Jeanneret que se corresponde con la tipología ensayada en el Modelo C.

Fuente: Elaboración propia, a partir del croquis original.

Página 130.

Fig. 74 y 75 - Fotografías del espacio existente bajo el forjado sanitario de una construcción local.

Fuente: Fotografía del autor.

Página 132.

Fig. 76 - Detalle constructivo habitual de forjado sanitario en el que puede apreciarse el nivel del terreno exterior.

Fuente: [www.inobisa.com](http://www.inobisa.com).

Página 133.

Fig. 77 - Estudio de la inmisión diferencial de radón respecto de la implantación sobre el terreno.

Fuente: Croquis del autor.

Página 134.

Fig. 78 - Detalle constructivo de un forjado sanitario ventilado.

Fuente: Croquis del autor.

Página 135.

Fig. 79 - Detalle de ejecución de forjado sanitario tal y como aparece reflejado en las normas galegas do hábitat. Solución incorrecta.

Fuente: Elaboración propia.

Página 136.

Fig. 80 - Detalle de ejecución de forjado sanitario a nivel con el terreno. Solución correcta.

Fuente: Elaboración propia.

Página 136.

Fig. 81 - Detalle de las soluciones constructivas más utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Página 137.

Fig. 82 - Detalle constructivo de lámina anti-radón en edificación con sótano.

Fuente: infografía del autor a partir de detalle extraído de la web: [www.inobisa.com](http://www.inobisa.com).

Página 137.

Fig. 83 - Diseño de un sistema de extracción VENTURI con arqueta SUMP.

Fuente: Croquis del autor.

Página 138.

Fig. 84 - Road Map.

Fuente: Elaboración propia.

Página 141.

Fig. 85 - Edificio “typus Pal fitta” en la costa da morte

Fuente: Elaboración Ramil y Ferreiro (2009). Página 143.

Fig. 86 - Reconstrucción de la aldea palafítica propuesta por el historiador Luis Monteagudo García.

Fuente: Elaboración propia.

Página 144.





A NEXOS

## INFORME DE ENSAYO

### DETERMINACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A RADÓN EN AIRE

## DETERMINACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE GAS RADÓN EN AIRE.

### ▪ Datos del cliente

- **Entidad:** Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria
- **Dirección:** c/ Cardenal Herrera Oria s/n
- **Persona de contacto:** Luis Santiago Quindós Poncela
- **Tel:** (+34) 942 20 22 07
- **Email:** [laruc@unican.es](mailto:laruc@unican.es)

### ▪ Objeto del informe

- **Ensayo a realizar:** Exposición de gas radón en aire a través de los análisis llevados a cabo en el laboratorio de radiactividad de la Universidad de Cantabria.
- **Nº de detectores:** 4
- **Nº de medidas realizadas:** 20

### ▪ Datos de las muestras objeto del ensayo

- **Las muestras han sido recogidas por** LaRUC
- **Las condiciones de las muestras han sido aptas para su ensayo SI**
- **Lugar de colocación del detector/es:** Uxes-Arteixo (A Coruña)
- **Fecha de colocación del detector/es:** 20/11/2016
- **Fecha de retirada del detector/es:** 20/12/2016
- **Fecha de recepción en el laboratorio:** 21/12/2016
- **Fecha inicio ensayo:** 21/12/2016
- **Fecha final ensayo:** 03/01/2017

### ▪ Método de ensayo

- **Lugar de realización del ensayo:** Instalaciones de LaRUC
- **Método de ensayo empleado:** El método empleado ha sido el que se recoge en la documentación de calidad del laboratorio referencia I-Ens01\_6.

### ▪ Normativa que afecta a este ensayo

El cliente no indica ninguna normativa específica referente a este tipo de ensayo.

### ▪ Incidencias durante la captación, retirada, transporte y/o ensayo

No aplica.

### ▪ Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC con acreditación Nº 1204/LE2219

▪ **Resultados obtenidos**

Los resultados que contiene este informe solo afectan a los detectores sometidos a ensayo. Las tablas siguientes contienen los resultados de la medida expresando la exposición en unidades  $\text{kBq m}^{-3}\cdot\text{h}$  y la concentración en unidades  $\text{Bq m}^{-3}$ . Los resultados de incertidumbre de este informe de ensayo se corresponden con un factor de cobertura  $k = 2$ . Los valores de la incertidumbre aparecen expresados con dos cifras significativas y el resto de valores del apartado de resultados se expresan en coherencia con la incertidumbre. Se sigue lo indicado en el documento 'Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement' (JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections).

PROCEDENCIA	Uxes-Arteixo (A Coruña) <b>MODULO B</b>		
REFERENCIA	<b>429662</b>		
REFERENCIA UC	P-16318-TRA-1		
INICIO EXPOSICIÓN	20/11/2016		
FINAL EXPOSICIÓN	20/12/2016		
	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01_6		
EXPOSICIÓN ( $\text{kBq m}^{-3}\cdot\text{h}$ )	< L.D	CONCENTRACIÓN ( $\text{Bq m}^{-3}$ )	< L.D
INCERTIDUMBRE ( $\text{kBq m}^{-3}\cdot\text{h}$ )	-	INCERTIDUMBRE ( $\text{Bq m}^{-3}$ )	-
L.D. ( $\text{kBq m}^{-3}\cdot\text{h}$ )	70	L.D. ( $\text{Bq m}^{-3}$ )	97

PROCEDENCIA	Uxes-Arteixo (A Coruña) <b>MODULO C</b>		
REFERENCIA	<b>429722</b>		
REFERENCIA UC	P-16318-TRA-2		
INICIO EXPOSICIÓN	20/11/2016		
FINAL EXPOSICIÓN	20/12/2016		
	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01_6		
EXPOSICIÓN (kBq m <sup>-3</sup> h)	< L.D	CONCENTRACIÓN (Bq m <sup>-3</sup> )	< L.D
INCERTIDUMBRE (kBq m <sup>-3</sup> h)	-	INCERTIDUMBRE (Bq m <sup>-3</sup> )	-
L.D. (kBq m <sup>-3</sup> h)	70	L.D. (Bq m <sup>-3</sup> )	97

PROCEDENCIA	Uxes-Arteixo (A Coruña) <b>MODULO E</b>		
REFERENCIA	<b>429834</b>		
REFERENCIA UC	P-16318-TRA-3		
INICIO EXPOSICIÓN	20/11/2016		
FINAL EXPOSICIÓN	20/12/2016		
	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01_6		
EXPOSICIÓN (kBq m <sup>-3</sup> h)	< L.D	CONCENTRACIÓN (Bq m <sup>-3</sup> )	< L.D
INCERTIDUMBRE (kBq m <sup>-3</sup> h)	-	INCERTIDUMBRE (Bq m <sup>-3</sup> )	-
L.D. (kBq m <sup>-3</sup> h)	70	L.D. (Bq m <sup>-3</sup> )	97

PROCEDENCIA	Uxes-Arteixo (A Coruña) <b>MODULO A</b>		
REFERENCIA	<b>429843</b>		
REFERENCIA UC	P-16318-TRA-4		
INICIO EXPOSICIÓN	20/11/2016		
FINAL EXPOSICIÓN	20/12/2016		
	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : I-Ens01_6		
EXPOSICIÓN (kBq m <sup>-3</sup> h)	507	CONCENTRACIÓN (Bq m <sup>-3</sup> )	704
INCERTIDUMBRE (kBq m <sup>-3</sup> h)	58	INCERTIDUMBRE (Bq m <sup>-3</sup> )	81
L.D. (kBq m <sup>-3</sup> h)	70	L.D. (Bq m <sup>-3</sup> )	97

▪ **Fin del informe**

– **Fecha de emisión y firma (Dirección Técnica):**



**ANEXO TÉCNICO  
 ACREDITACIÓN Nº 1204/LE2219**

**Entidad:** Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LARUC)

**Dirección:** Avda. Cardenal Herrera Oria s/n; 39011 Santander

**Norma de Referencia:** UNE-EN ISO/IEC 17025:2005

**Título:** Protección radiológica

**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: MUESTRAS LÍQUIDAS Y MUESTRAS SÓLIDAS. Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)** ..... 1  
 Aguas de consumo y aguas continentales ..... 1  
 Suelos, sedimentos, lodo y cenizas ..... 1

**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: CALIDAD DEL AIRE. Categoría I (Ensayos "In situ") y Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)** ..... 2  
 Aire ..... 2  
 Detectores de trazas de radón ..... 2

**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: SUELOS. Categoría I (Ensayos "In situ") y Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)** ..... 2  
 Suelos ..... 2

**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: MUESTRAS LÍQUIDAS Y MUESTRAS SÓLIDAS. Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)**

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Aguas de consumo y aguas continentales</b>	
Actividad alfa total por evaporación y medida por contador proporcional ( $\geq 0,03$ Bq/l)	I-Ens02
Actividad beta total por contador proporcional ( $\geq 0,06$ Bq/l)	I-Ens02
Actividad de emisores gamma por espectrometría gamma (30 - 3000 keV)	I-Ens03
Actividad de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por espectrometría gamma ( $\geq 20$ Bq/l)	I-Ens03

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Suelos, sedimentos, lodo y cenizas</b>	
Actividad de emisores gamma por espectrometría gamma ( $\geq 30$ keV)	I-Ens03



**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: CALIDAD DEL AIRE. Categoría I (Ensayos "In situ") y Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)**

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Aire</b>	
Toma de muestra y medida de concentración y exposición de Radón <i>Exposición de Radón: <math>(\geq 50 \text{ kBq. h/m}^3)</math></i>	I-Ens01

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Detectores de trazas de radón</b>	
Medida de exposición de Radón <i><math>(\geq 50 \text{ kBq. h/m}^3)</math></i>	I-Ens01

**RADIOACTIVIDAD AMBIENTAL: SUELOS. Categoría I (Ensayos "In situ") y Categoría 0 (Ensayos en el laboratorio permanente)**

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Suelos</b>	
Toma de muestra y posterior medida de la exhalación de radón <i><math>(\geq 40 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h})</math></i>	I-Ens00

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/242332885>

# Mapping radon-prone areas using: Radiation dose rate and geological information

Article in *Journal of Radiological Protection* · June 2013

DOI: 10.1093/rad/33/3/605 Source: PubMed

CITATIONS

15

READS

46

4 authors, including:



[Alfonso García-Pérez](#)

National Distance Education University

30 PUBLICATIONS 119 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Robustness in Spatial Data [View project](#)

## Mapping radon-prone areas using $\gamma$ -radiation dose rate and geological information

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 37.139.14.251

This content was downloaded on 09/10/2013 at 18:50

Please note that [terms and conditions apply](#).

# Mapping radon-prone areas using $\gamma$ -radiation dose rate and geological information

M García-Talavera<sup>1</sup>, A García-Pérez<sup>2</sup>, C Rey<sup>1</sup> and L Ramos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), C/Justo Dorado, 11, E-28040 Madrid, Spain

<sup>2</sup> Departamento de Estadística, I. O y C. N., Universidad Nacional de Educación a Distancia,

P.º Senda del Rey, 9, E-28040 Madrid, Spain

E-mail: [mgm@csn.es](mailto:mgm@csn.es)

Received 8 February 2013, in final form 14 May 2013, accepted for publication 17 May 2013

Published 27 June 2013

Online at [stacks.iop.org/JRP/33/605](http://stacks.iop.org/JRP/33/605)

## Abstract

Identifying radon-prone areas is key to policies on the control of this environmental carcinogen. In the current paper, we present the methodology followed to delineate radon-prone areas in Spain. It combines information from indoor radon measurements with  $\gamma$ -radiation and geological maps. The advantage of the proposed approach is that it lessens the requirement for a high density of measurements by making use of commonly available information. It can be applied for an initial definition of radon-prone areas in countries committed to introducing a national radon policy or to improving existing radon maps in low population regions.

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

## 1. Introduction

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) exposure indoors is recognised by the World Health Organization as the second most important cause of lung cancer in many countries. The main authorities in the radiological protection field have strengthened radon provisions in their principles or standards (ICRP 2009, IAEA 2011, EC 2012), driven to some extent by the epidemiological evidence made available from radon domestic exposure studies (Darby *et al* 2005, Krewski *et al* 2006, Lubin *et al* 2004). In Europe, for example, radon exposure in the home has been estimated to account for over 9% of all lung cancer deaths (Darby *et al* 2006).



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

From a national public health perspective, the magnitude of the radon problem largely depends on geology, specifically on the  $^{226}\text{Ra}$  content and the permeability of the rock formation. Other factors that play an important role include the construction methods of buildings, and the climate.

A strategy to control radon exposure should address the whole population, both at home and in the workplace, while devoting special efforts and resources to the individuals most at risk, namely those with exposures in the right tail of the lognormal distribution that typically describes radon indoor concentrations. A very high radon level can be found in a building regardless of its location, but certain areas are much more prone to give rise to high concentrations in dwellings. Consequently, the identification of such areas is a key issue in an effective regulatory control of radon exposure.

There is no consensus definition of a radon-prone area. Generically, the 2007 Recommendations of the ICRP define it as an area in which the concentration of radon in buildings is likely to be higher than the national average. In some countries, this definition is based on a given fraction of dwellings exceeding a regulatory reference level.

The most straightforward method to delineate radon-prone areas is based on actual in-house radon measurements (see, for instance, Miles 1997, Andersen *et al* 2001, Friedmann 2012). Because it requires a relatively large number of indoor radon measurements and a sampling density that is representative of the building stock, this method is only achievable nationwide when a significant fraction of all dwellings across the country has been monitored for radon.

An alternative to map radon hazard is to measure radon in soil gas. This is a good predictor of indoor radon because soil usually is by far the main entry path of radon into buildings (Nazaroff *et al* 1988). Both the Swedish and the German systems are based on the assessment of geogenic radon potential, which is derived from soil gas measurements at one metre depth and soil permeability (Åkerblom 1986, Kemski *et al* 2001).

Other indirect methods are based on the positive correlation of  $^{238}\text{U}$  or  $^{226}\text{Ra}$  concentration in surface rock or soils with radon in soil gas (Agard and Gundersen 1992), and, in turn, with radon in dwellings. Ielsch *et al* (2010) mapped the geogenic radon potential in Bourgogne (France), applying a classification scheme of geological units according to their uranium content determined by means of rock sample analysis. The suitability of equivalent uranium (eU) derived from airborne surveys of  $\gamma$ -rays to map radon-prone areas has also been demonstrated in regions of Canada, Northern Ireland and Norway (Ford *et al* 2000, Appleton *et al* 2011, Smethurst *et al* 2008). In addition, the US EPA map of radon zones (US EPA 2013) includes aerial radiometric data on eU as one of the factors contributing to radon potential in a given area.

In Spain, although several regional surveys have identified areas of high radon exposure (Matarranz 2004), a nationwide delineation of radon-prone areas cannot be achieved by analysis of the in-house radon measurements alone because these present gaps in spatial coverage and are insufficient in number compared to the housing stock.

However, such areas need to be identified throughout the country, applying a uniform methodology, in order to prompt legislative action aimed at reducing the exposures of people residing in risk areas. As radon regulation is enacted at national level, it would be unacceptable to create regulation that is binding in some parts of the territory while setting aside other areas that are subject to similar or greater risk. In addition, it would be advantageous to delineate radon-prone areas at the smallest administrative level (which in Spain is the municipal one) since this would allow for a better use of public resources and a more efficient distribution of regulatory burdens.

In this paper, we present a methodology to map areas countrywide where 10% of residential buildings and houses exceed the reference level of  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  set in national legislation (CSN 2011). This methodology makes use of the current radon measurement database and other available surrogate information, including the natural  $\gamma$  radiation map of Spain at 1:1000 000 scale (Suárez *et al* 2000). We show that outdoor  $\gamma$ -ray exposure at 1 m above ground can contribute to successfully delineate radon-prone areas. We choose an outdoor absorbed dose rate in air of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$  as the cut-off point below which municipalities are considered non-radon-prone. Above this value, we take into account geological information and group radon measurements by lithostratigraphic unit. Each of these units is classified as radon prone or non-radon-prone based on a hypothesis test on the 90th percentile for the corresponding distribution of radon levels.

The method is proven to work well over a surface of about  $500\,000 \text{ km}^2$  (mainland Spain) of very diverse geology and precipitation regime, ranging on average from less than  $300 \text{ mm yr}^{-1}$  in the southeast to more than  $2000 \text{ mm yr}^{-1}$  on the northern coast.

## 2. Input data

In order to produce the map of radon-prone areas, we merged the following data sources using ESRI ArcGis v. 10.0 (ESRI 2011):

- The national indoor radon database.
- The natural  $\gamma$ -radiation map.
- Geological (lithostratigraphic and metallogenic) maps.

### 2.1. Indoor radon database

The national radon database currently has over 11 000 records of in-house radon measurements grouped by municipality. Several research groups have contributed to the database (Quindós *et al* 1991, Gutiérrez *et al* 1992, Amorós *et al* 1995, Baixeras *et al* 1996, Pérez *et al* 1996, Baeza *et al* 2003, Quindós *et al* 2011), the bulk of measurements having been collected by the University of Cantabria through different projects sponsored by CSN. The resulting sampling density is spatially heterogeneous, tending to be higher in regions with elevated radon level and at the most densely populated areas.

Roughly 90% of measurements were made with solid-state nuclear track detectors exposed for a period from three to six months, whereas the remaining 10% were obtained with charcoal canisters exposed over three days. Although, on a house-by-house basis, short-term measurements do not provide as reliable estimates of the annual radon level as the several-month-long measurements, an overall good agreement was found in surveys conducted in all municipalities where the two types of result could be compared (García-Talavera *et al* 2013). Furthermore, because our scope was to quantify risk rather than actual population exposure, we selected measurements made at ground or first floors.

The current radon database suffers from some limitations that hamper modelling approaches: it neither reports precise measurement location (only name of the village, town or city is provided) nor contains information on relevant dwelling characteristics (such as year of construction or type of foundation). Moreover, there are a limited number of measurements in comparison to the building stock. Out of the approximately 7900 municipalities in peninsular Spain, radon measurements have been made in 1170. Yet, for roughly one-third of them, the number of available measurements ( $n$ ) is 1 or 2; 452 have  $7 \leq n < 26$ ; and 25 have  $n \geq 27$ .

## 2.2. The natural $\gamma$ -radiation map

Many countries have developed  $\gamma$ -radiation maps of their territories, as such maps are cost effective and have manifold applications: information on population radiation doses, documented baseline for accident and emergency situations, aid to raw materials or mineral exploration, etc.

The MARNA (Map of Natural Radiation of Spain) was undertaken as a collaborative project of CSN and ENUSA and joined later by several universities (Suárez *et al* 2000). Its main objective was to draw up a map of natural  $\gamma$ -radiation expressed as microroentgens per hour ( $\mu\text{R h}^{-1}$ ) at 1 m above ground.

It combined information from various sources.

- Over 150 000 aerial measurements from uranium deposit exploration obtained in radiometric flights at an altitude of 120 m between 1967 and 1981. The detectors used were large volume NaI scintillators with an energy window from 0.4 to 2.8 MeV.
- Ground-based measurements, static and car-borne, also obtained in uranium exploration campaigns covering an energy window from 0.4 to 2.8 MeV.
- Over 450 000 ground-based static and car-borne measurements from project-specific campaigns using Saphimo SRAT and ES3 S equipment for total counting and an Exploranium GR-1300 for spectrometric measurements.

After correcting the airborne data for cosmic radiation, a good agreement was found between airborne and ground measurements (linear correlation coefficient greater than 0.92). To draw up the map to 1:1000 000 scale, mean radiometric values (corresponding to a nominal cell size of 7 km $\times$ 5 km) were used. The 7 km $\times$ 5 km grid of regularly spaced values was submitted to a kriging interpolation using Golden Software Surfer 7. In this step, an anisotropic variogram model was specified whose parameters were locally varied to describe the orientation of geological structures. The performance of the kriging model was verified by standard cross-validation.

## 2.3. Geological maps

Lithostratigraphic (LS) information was extracted from the 1:200 000-scale national map developed by the Institute of Geology and Mineral Exploration (IGME 2012a). This map represents cartographic units that are delimited mainly on the basis of lithic characteristics and stratigraphic position.

The metallogenic map at 1:200 000 scale (IGME 2012b) showing the nature and distribution of mineral resources was used to establish the location of uranium deposits and occurrences. The most important of the several tens of known uranium mineralised zones are located in the Schist–Greywacke Complex, a geological structure of the Central Iberian Hercynian belt. They mainly occur in fracture and breccia zones of Palaeozoic slates and granitic plutons.

## 3. Statistical framework

We classify an area as radon prone when the 90th percentile of indoor radon concentration in its building stock is greater than the reference level. In practice, nevertheless, classification has to be done under uncertainty, as only a small sample of the dwellings in an area would typically have been measured for radon and, consequently, the point estimate of the percentile would differ from the true value of the population percentile.

There are many ways of calculating percentiles, but, given that the shape of the distribution is known, a parametric estimate would in principle be subject to less error. Because radon measurements in dwellings most often conform to a lognormal distribution, the parametric estimate is usually preferred. For a lognormal distribution, this can be obtained as a function of the sample geometric mean and the sample geometric standard deviation. If the geometric standard deviations of the areas in question do not differ statistically, the geometric means can be used instead of the percentiles for area classification.

Point estimates, however, do not provide a piece of information that hypothesis testing does: whether there are significant differences between the true value of a parameter and its estimate. Therefore, the most consistent approach to area classification is to acknowledge uncertainty by basing the decision on a statistical hypothesis test. Specifically, we have developed a hypothesis test that uses the upper bound on the 90th percentile as the critical value.

As for the rest of statistical tests included in this paper, we have used SPSS v. 19.0 (IBM Corp 2010) and the R software (R Development Core Team 2008).

### 3.1. The radon-prone hypothesis test

If we denote by  $X_{0.9}$  the 90th percentile of indoor radon concentration,  $X$ , in a given area, the problem of classifying it as radon prone or not can be formalised as a hypothesis test problem where the null hypothesis,  $H_0: X_{0.9} \geq 300 \text{ Bq m}^{-3}$ , is tested against the alternative hypothesis,  $H_1: X_{0.9} < 300 \text{ Bq m}^{-3}$ . The critical point for rejecting  $H_0$  is  $\tilde{X}_{0.9}$ , the upper bound on  $X_{0.9}$ , at the  $\alpha$ -significance level.

As it is customary, we assume that indoor radon data,  $X$ , follow a lognormal distribution. We denote by  $m_g$  the sample geometric mean and by  $s_g$  the sample standard geometric deviation. Then, the random variable  $Y = \log X$  is normally distributed with mean  $\mu_y$  and standard deviation  $\sigma_y$ .

Given a random sample  $\{x_i\}$ , the upper bound on the 90th percentile of  $Y$ ,  $Y_{0.9}$ , can be obtained as (Hahn and Meeker 2011)

$$\tilde{Y}_p = \bar{y} + g'_{(1-\alpha;p;n)} S_y,$$

where  $\bar{y}$  is the sample mean of  $\{y_i\} = \{\log x_i\}$ ,  $S_y = \sqrt{n/(n-1)}s_y$ ,  $n$  is the sample size,  $s_y$  is the standard deviation of  $\{y_i\}$ , and the factors  $g'_{(y;p;n)}$  are given in table 1 of Odeh and Owen (1980).

Because of the relationship between the theoretical percentiles of  $X$  and  $Y$ ,  $P\{Y < Y_{0.9}\} = 0.9 \Leftrightarrow P\{X < e^{Y_{0.9}}\} = 0.9$ , the upper bound on the 90th percentile of  $X$  is

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{0.9} &= \exp\{\tilde{Y}_p\} = \exp\{\bar{y} + g'_{(1-\alpha;0.9;n)} S_y\} = \exp\{\bar{y}\} \exp\{g'_{(1-\alpha;0.9;n)} S_y\} \\ &= m_g s_g \exp\left\{g'_{(1-\alpha;0.9;n)} \sqrt{\frac{n}{n-1}}\right\}. \end{aligned}$$

At the  $\alpha$ -significance level, the null hypothesis can be rejected (thus concluding that a particular area is not radon prone) if and only if  $\tilde{X}_{0.9} < 300 \text{ Bq m}^{-3}$ . In particular, we set  $\alpha = 0.10$  (probability of type-I error), which allows for a 10% probability of failing to identify a true radon-prone area.

The above equation can be applied for  $n > 2$ , but small sample sizes would result in large probabilities of type II error (incorrect non-rejections of  $H_0$ ). To control this effect, Faulkenberry and Weeks (1968), suggested that the sample size be large enough so that

- (i) there is a large probability  $(1 - \alpha)$  that the tolerance bound will be exceeded by at least 100p% of the normal population, and

- (ii) the probability ( $\delta$ ) that more than  $100p^*$ % of the population will exceed the said tolerance bound is small, where  $p'$  and  $p^*$  are specified proportions, and  $p^* > p'$ .

The probability of a successful demonstration is  $p_{\text{DEM}} = \Pr(p > p') \geq 1 - \delta$ . For  $p' = 0.90$ ;  $p^* = 0.98$  and  $\delta = 0.10$ , we get a minimum sample size of 27. Consequently, we established this figure as the minimum sample size to apply the radon-prone hypothesis test.

#### 4. Results and discussion

Delineating radon-prone areas at municipal level requires data on the probability of exceeding the radon reference level for every municipality in the country. Such a probability, however, cannot be based on in-house measurements alone, since these are only available at a small percentage of municipalities, with barely a few tens of them reaching the minimum sample size established to apply the radon-prone hypothesis test.

Hence it was necessary to identify whether, on a country-size scale, other environmental variables might be good surrogates for indoor radon so as to make reasonably accurate predictions at unsampled or poorly sampled locations. Specifically, we investigated outdoor  $\gamma$ -dose rate and geology.

##### 4.1. Modelling indoor radon as a function of $\gamma$ -dose rate

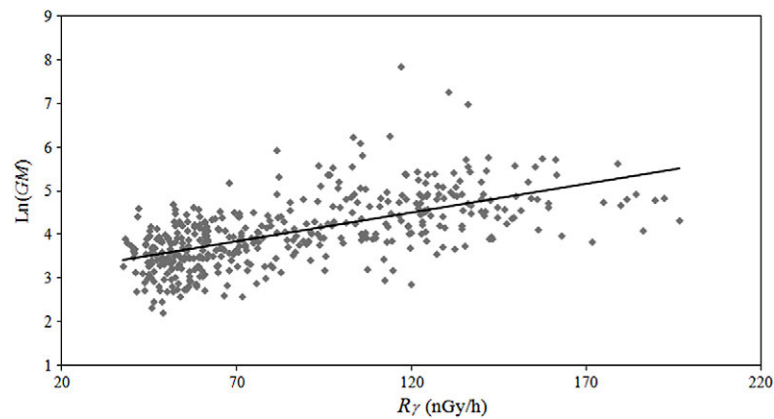
Previous research (Cascón *et al* 2002) had shown that  $\gamma$ -dose rate across the country exhibits a linear relationship with  $^{226}\text{Ra}$  in soil, which, in turn, is known to be correlated with  $^{222}\text{Rn}$  indoors (Nason and Cohen 1980). This fact prompted a study on the usability of the  $\gamma$ -radiation map of Spain to predict radon levels directly in a northwestern granitic region (Quindós *et al* 2008). Three areas with different  $\gamma$ -radiation levels ( $<65\text{--}87\text{ nGy h}^{-1}$ ,  $65\text{--}130\text{ nGy h}^{-1}$ , and  $87\text{--}>130\text{ nGy h}^{-1}$ ) were measured for radon indoors. Based on the main statistical parameters for the three corresponding radon distributions, this study concluded that  $\gamma$ -radiation dose rate is a qualitative indicator of high indoor radon level rather than a good quantitative predictor.

We analysed the relationship between indoor radon concentration and  $\gamma$ -dose rate using data from the whole Spanish mainland. In particular, for each municipality, we considered the geometric mean ( $m_g$ ) and the geometric standard deviation ( $s_g$ ) of the measured radon concentrations, provided that there were more than six available measurements<sup>3</sup>. The corresponding average  $\gamma$ -dose rate was obtained from the MARNA map as follows: the built-up area of the municipality was determined using information provided by the National Centre for Geographic Information in a  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  grid. By a bilinear interpolation from the MARNA surfaces, the program Surfer 7 provided the  $\gamma$ -exposure value at the centre of every grid cell over which the built-up area spreads. We then computed the average of these values and converted it to absorbed dose in air using  $1\text{ R} = 0.00876\text{ Gy}$ .

Our analysis showed that there is a statistically significant but rather weak correlation between radon geometric mean (GM) and average  $\gamma$ -dose rate ( $R_\gamma$ ): Pearson  $r = 0.30$ ,  $p = 0.001$ ; Spearman  $\rho = 0.65$ ,  $p = 0.000$ .

Radon geometric standard deviation (GSD), on the other hand, is not linearly correlated either to GM ( $r = 0.087$ ;  $p = 0.082$ ) or to  $R_\gamma$  ( $r = -0.060$ ;  $p = 0.229$ ), although it exhibits a weak but significant rank correlation with the former variable ( $\rho = 0.108$ ,  $p = 0.030$ ). The distribution of GSD for all municipalities with  $n > 6$  has a median value of 2.05, and a range going from 1.13 to 6.93.

<sup>3</sup> For  $n = 6$  the error associated with the geometric mean estimate is around 50% (Hewett 1995).



**Figure 1.** Linear least-squares regression fit for average  $\gamma$ -dose rate ( $R_\gamma$ ) in  $\text{nGy h}^{-1}$  and natural log of geometric mean (GM) of radon concentrations in  $\text{Bq m}^{-3}$ .

The natural logarithm of GM is better correlated with  $R_\gamma$  ( $r = 0.61$ ;  $p = 0.000$ ). We performed a minimum least-squares analysis for  $R_\gamma$  versus  $\ln(\text{GM})$  (see figure 1), obtaining an  $R^2$  value of 0.37. A very poor fit ( $R^2 = 0.05$ ) was achieved when, instead of geometric means, 90th percentiles ( $X_{0.9}$ ), assessed by the maximum likelihood parametric estimate, were considered.

None of these regression models can explain a sufficient amount of variation to allow the construction of radon maps that carry an acceptable confidence of accuracy. Yet the relevant information to label an area as radon prone is not actually  $m_g$  nor  $X_{0.9}$ , but the probability of them exceeding a certain threshold value. This means that, to this purpose, radon indoors can be expressed as a categorical rather than as a quantitative variable, as presented in section 4.2.

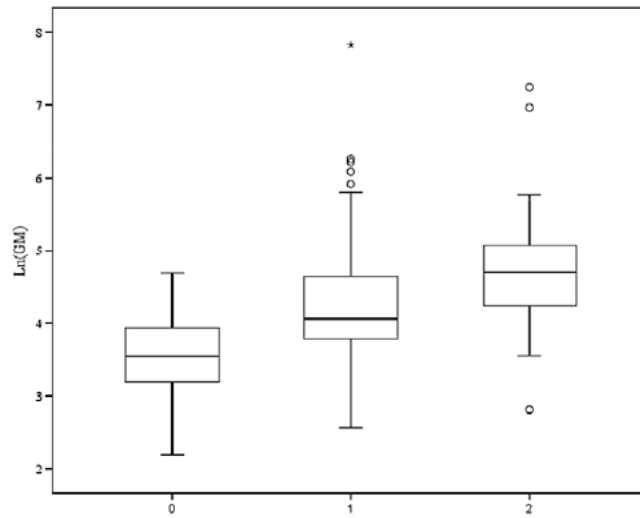
#### 4.2. Correspondence between categorical variables

First, we investigated the role of  $\gamma$ -dose rate as a categorical variable using the same dataset as in section 4.1: we selected cut-offs of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$  ( $\sim 7.5 \mu\text{R h}^{-1}$ ) and  $123 \text{ nGy h}^{-1}$  ( $\sim 14.0 \mu\text{R h}^{-1}$ ) for the  $\gamma$ -dose rate because the categories defined by these values provide a good division of geological units (the  $>7.5 \mu\text{R h}^{-1}$  surface roughly corresponds to the Pre-Mesozoic geological setting of peninsular Spain, whereas the  $14.0 \mu\text{R h}^{-1}$  contour line encloses some granitic outcrops and westernmost distinct metamorphic areas of the Iberian Massif—see figure 4).

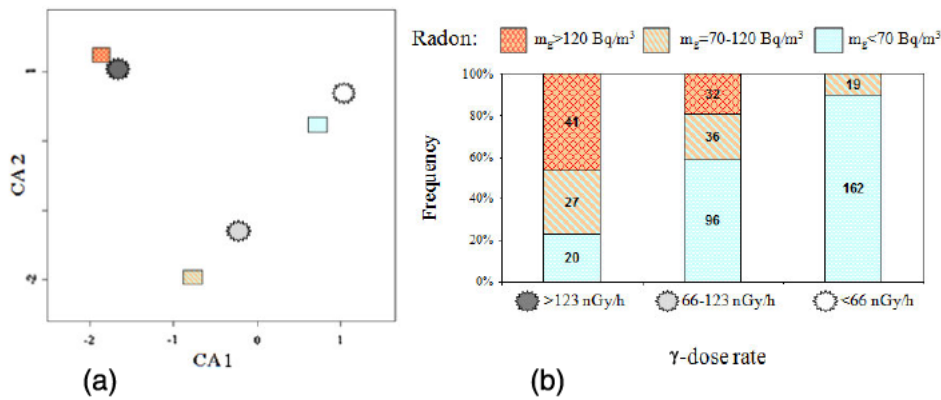
We considered the distribution of radon geometric means for each group of municipalities defined according to the  $\gamma$ -dose rate categories established above (see box plot in figure 2). The three of them can be described by a lognormal distribution (Kolmogorov–Smirnov test:  $Z_0 = 0.514$ ;  $p_0 = 0.954$ ;  $Z_1 = 1.161$ ;  $p_1 = 0.135$ ;  $Z_2 = 1.089$ ;  $p_2 = 0.186$ ). Levene’s test, performed on the log-transformed data, showed heterogeneous variances ( $W = 5.303$ ;  $p = 0.005$ ). Thus, we applied the Kruskal–Wallis test, which revealed that the three groups are statistically different ( $\chi^2 = 151.4$ ;  $p < 0.05$ ).

Next we carried out a correspondence analysis to explore the degree of association between the following categories of  $\gamma$ -dose rate and indoor radon (GM).

- $<66 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $<70 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- $66\text{--}123 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $70\text{--}120 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- $>123 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $>120 \text{ Bq m}^{-3}$ .



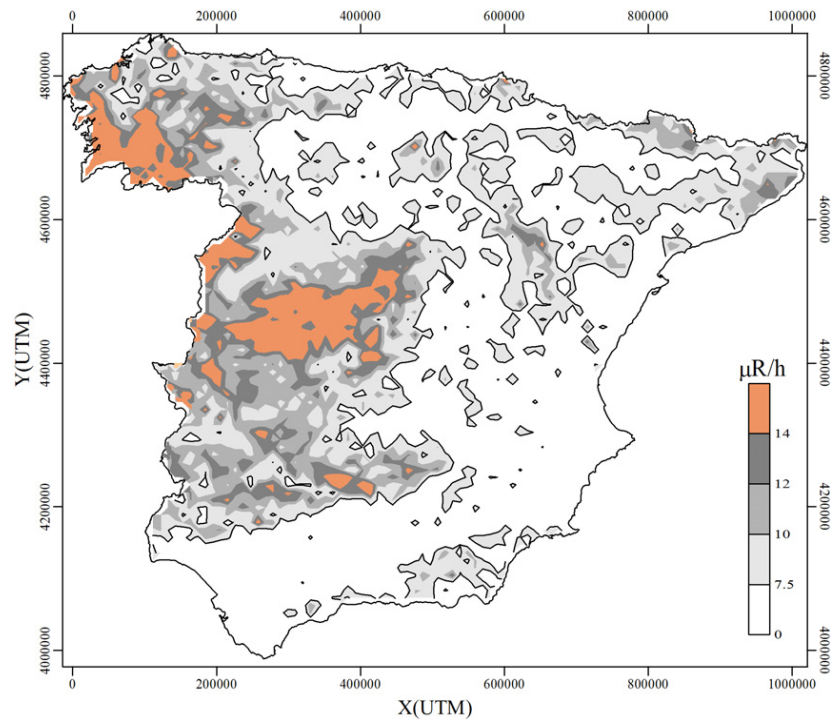
**Figure 2.** Box plot of natural log of radon geometric mean for municipalities subjected to the following average  $\gamma$ -dose rates: (0)  $<66 \text{ nGy h}^{-1}$ ; (1)  $66\text{--}123 \text{ nGy h}^{-1}$ ; (2)  $>123 \text{ nGy h}^{-1}$ .



**Figure 3.** (a) Two-dimensional correspondence map showing a close association between the following categories of  $\gamma$ -dose rate and radon concentration:  $<66 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $<70 \text{ Bq m}^{-3}$ ;  $66\text{--}123 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $70\text{--}120 \text{ Bq m}^{-3}$ ;  $>123 \text{ nGy h}^{-1}$  and  $>120 \text{ Bq m}^{-3}$ . (b) Segmented bar chart representing the relationship between  $R_\gamma$  and GM. It compares the percentage (and number of cases) that each radon category contributes to a total across categories of  $R_\gamma$ .

A good association was found for the three pairs (see figure 3(a)). Figure 3(b) shows a graphic representation of the associated contingency table. A geometric mean of  $70 \text{ Bq m}^{-3}$  corresponds (for  $n = 27$  and  $s_g = 2.37$ , namely, the 75th percentile for the GSD distribution) to a 90% confidence upper bound on  $X_{0.9}$  of approximately  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . The  $120 \text{ Bq m}^{-3}$  cut-off was selected because it achieves the closest association to the  $>123 \text{ nGy h}^{-1}$  category.

Out of 181 municipalities with average  $\gamma$ -dose rate  $< 66 \text{ nGy h}^{-1}$ , nearly 90% (95% CI = (0.85, 0.94) estimated by the modified Wald method; Agresti and Coull 1998) have radon geometric means lower than  $70 \text{ Bq m}^{-3}$ . A higher proportion, 97% (95% CI = (0.93, 0.99), likewise calculated), have 90th percentiles lower than  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ .



**Figure 4.** Map of  $\gamma$ -ray exposure at one metre above the ground ( $R_\gamma$ ) for mainland Spain. Blank areas are directly classified as non-radon-prone.

**Table 1.** Positive predictive value (PPV) and negative predictive value (NPV) of a test with a cut-off point of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$   $\gamma$ -dose rate for screening municipalities with radon  $m_g \geq 70 \text{ Bq m}^{-3}$  and municipalities with radon  $X_{90} \geq 300 \text{ Bq m}^{-3}$ .

	PPV	NPV
$m_g \geq 70 \text{ Bq m}^{-3}$	0.54	0.90
$X_{90} \geq 300 \text{ Bq m}^{-3}$	0.25	0.97

Therefore, selecting a cut-off point of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$  for a screening test based on  $\gamma$ -dose rate can be a valid option to discriminate non-radon-prone municipalities. We considered two such screening tests using the following criteria, respectively, to define radon-prone areas: (i)  $m_g \geq 70 \text{ Bq m}^{-3}$ ; (ii)  $X_{0.9} \geq 300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Table 1 shows their positive predictive value (PPV, probability that a municipality is radon prone given that the test result is positive) and their negative predictive value (NPV, probability that the municipality is non-radon-prone given that the test result is negative). Both tests have a poor PPV but achieve a high NPV, notably for  $X_{0.9}$ .

Because of the high NPV, regardless of the selected point estimate, all areas with  $\gamma$ -dose rate lower than  $66 \text{ nGy h}^{-1}$  ( $\sim 7.5 \mu\text{R h}^{-1}$ ) were directly classified as non-radon-prone—see map in figure 4. Most of these correspond to Tertiary and Quaternary soils developed over calcareous sedimentary rocks.

Conversely, for areas with  $\gamma$ -dose rate in excess of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$ ,  $\gamma$ -radiation does not exhibit a strong enough control on radon indoors to make a reliable classification (see the first two bars in figure 3(b)). Even the highest  $\gamma$ -dose category contains a significant proportion ( $\sim 20\%$ ) of non-radon-prone municipalities.

**Table 2.** Statistical parameters of radon levels and average  $\gamma$ -dose rate ( $\hat{R}_\gamma$ ) in lithostratigraphic units within regions of  $\gamma$ -dose rate values predominantly higher than 66 nGy h<sup>-1</sup>. Those whose upper bound on the 90th percentile ( $\tilde{X}_{0.9}$ ) of measured radon concentrations exceeds 300 Bq m<sup>-3</sup> are classified as radon prone.

Unit description	Sample size	$\hat{R}_\gamma$ (nGy h <sup>-1</sup> )	$m_g$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$s_g$	$\tilde{X}_{0.9}$ (Bq m <sup>-3</sup> )
Hercynian acid plutonic rocks (Palaeozoic)	770	131	118.0	2.7	452.5
Hercynian arkosic sandstone and schist (Palaeozoic)	96	121	57.6	2.8	261.9
Sedimentary deposits of Tertiary age (Guadiana basin)	164	117	55.7	1.8	130.9
Slates, metagraywacke and mica-schist (Precambrian–Palaeozoic)	331	114	98.0	2.7	375.4
Metamorphic rocks (Precambrian–Cambrian–Ordovician)	85	110	131.9	2.3	459.6
Tertiary siliciclastic deposits, mainly arkosic sandstone and mudstone (Tagus–intra-Betic–Guadalquivir)	131	110	70.1	2.0	185.8
Precambrian slates and greywacke (Schist–Greywacke Complex)					
SC	119	107	105.1	2.9	493.9
SCb	94		53.1	2.0	150.6
Conglomerate/lutite/coal (Palaeozoic)	31	96	83.1	1.7	203.2
Olot volcanic rocks (Quaternary)	68	83	62.1	2.3	218.1
Palaeozoic microconglomerate, sandstone and shale (Cantabrian and Western Astur–Leonian Zones)	82	80	70.7	2.0	207.7
Alluvial basin-fill deposits of Tertiary age (Douro basin)	95	78	44.5	2.1	130.5
Quaternary basin-fill deposits along stream flood plains, salt marshes, estuaries, etc	491	75	43.6	2.5	152.7
Flysch sandstone and lutite alternations (Ebro basin and Pyrenees)	45	68	44.7	2.3	170.6
Alluvial basin-fill deposits of Tertiary age (Guadalquivir basin)	60	64	30.0	2.6	129.5

#### 4.3. Merging geological information

The control of geology on indoor radon levels is well recognised (Miles and Ball 1996, Mikšová and Barnet 2002, Kemski *et al* 2002, Appleton and Miles 2010, Friedmann and Gröller 2010). Consequently, for those parts of the country with  $\gamma$ -dose rate in excess of 66 nGy h<sup>-1</sup> (i.e., >7.5  $\mu$ R h<sup>-1</sup> surface from map in figure 4), we included geological information in the analysis in order to establish radon-prone areas at geological-formation level rather than at municipality level. Specifically, we considered the lithostratigraphic (LS) map of Spain.

To analyse radon data, we selected all LS units that intersected in more than 10% of their surface with populated regions exhibiting  $\gamma$ -dose rate >66 nGy h<sup>-1</sup>. Some of these units were further regrouped based on composition, age and permeability (see table 2). The LS unit has, on the one hand, a characteristic range of <sup>226</sup>Ra concentration and, on the other hand, a typical permeability<sup>4</sup> value, both of which have a link to indoor radon. Yet, even within the same

<sup>4</sup> To a certain extent, permeability is determined by LS unit. However, where the predominant flow mechanism is through fractures (e.g. igneous or metamorphic rocks), local permeability can be very variable, up to several orders of magnitude, whereas more permeable lithologies, dominated by inter-granular flow, present a rather homogeneous local permeability.

LS type, a substantial variability of indoor radon levels could be found due to the influence of unaccounted-for variables (such as climate, dwelling characteristics, or depth to the water table).

We first analysed whether radon variability within every LS unit is a random fluctuation about the mean or conforms to a spatially structured pattern. In the former case, the radon-prone hypothesis test could be directly applied on the combined raw data. The latter case would possibly require a different approach, since spatial patterns in the data could impair the performance of the standard statistical test of a hypothesis (Legendre 1993).

Because no geo-referenced information on individual radon measurements was available, we examined the variability of aggregate data expressed as the municipalities' geometric means (considering only those calculated from more than six measurements). Besides, to avoid bias in the results due to lack of precise measurement location, we excluded municipalities whose built-up area spreads over more than one LS unit. Within every LS unit, data are consistent with a lognormal distribution, as verified by the Shapiro–Wilk test at  $p = 0.05$ . We thus obtained the log-transformed geometric means in order to achieve normally distributed attribute data.

Unfortunately, in most LS units, the small number of municipalities, together with an irregular spatial configuration, made it impossible to conduct reliable spatial statistical analyses (it is, for instance, difficult to properly estimate a variogram with fewer than 50 data points; Olea 2006). Visual inspection did not reveal any global pattern except for slates and schist (SC) of the Schist–Greywacke Complex (see figure 5). As for the other LS units, the lack of spatial structure may be statistically confirmed on the most extensive ones (namely Hercynian acid plutonic (AP) rocks and Quaternary (Q) sedimentary material) for which sample sizes are large enough ( $>50$  municipalities).

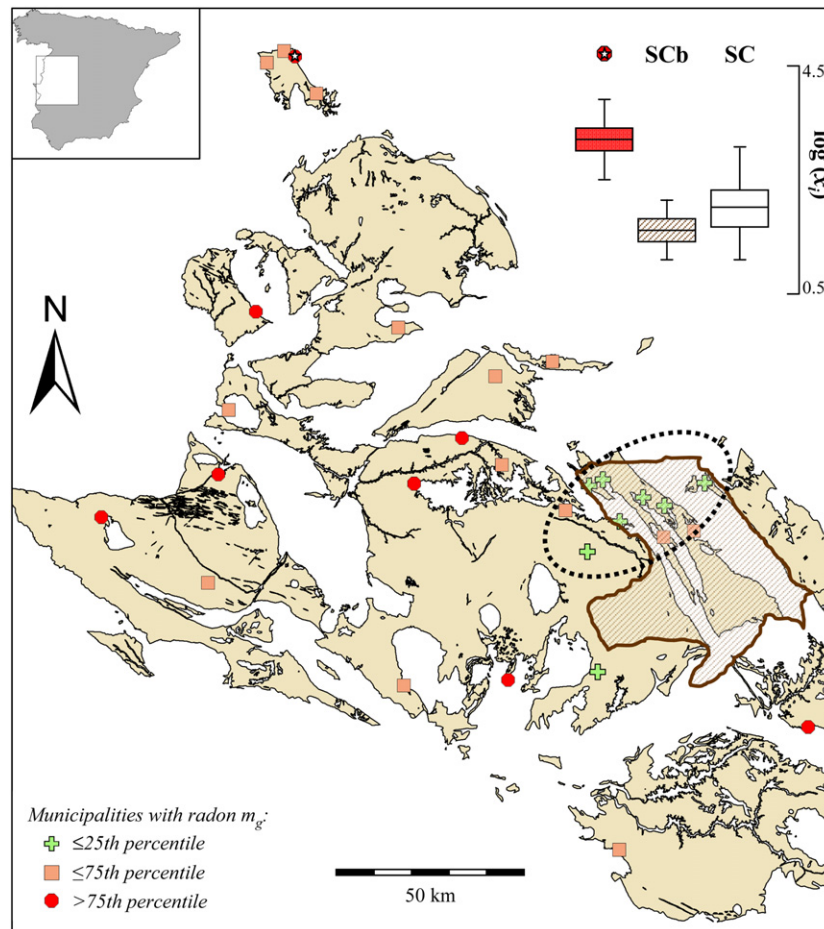
We obtained the experimental variograms for units AP and Q (figure 6). Both of them correspond to a pure nugget effect, as can be seen from the theoretical model fit. This model entails a complete lack of auto-correlation at distances larger than the lag bin size.

The same results were confirmed by means of Moran's  $I$  (Cliff and Ord 1973). Moran's  $I$  ranges between  $-1$  (perfect negative auto-correlation at global level) and  $1$  (perfect positive global auto-correlation), with values close to  $0$  indicating a random distribution. We used an inverse-distance weight matrix to compute the statistic, and a Monte Carlo permutation test ( $i = 1000$ ) to assess its statistical significance. For plutonic rocks, we obtained  $I_{\text{obs}} = 0.066$  ( $p = 0.051$ ), whereas for Quaternary materials  $I_{\text{obs}} = 0.039$  ( $p = 0.142$ ). Both  $I_{\text{obs}}$  and  $p$  values indicate a lack of global auto-correlation.

The lack of a global spatial pattern (gradients or large-scale patches) suggests that precipitation and temperature regimes, which exhibit marked gradients N–S/SE through these two extensive LS units, do not exert a noticeable influence on radon indoors. Furthermore, given that the two units exhibit opposite behaviour regarding radon transport (impermeable matrix with highly permeable fracture zones versus highly permeable homogeneous material), it is reasonable to assume that this result may be extrapolated to all LS units excepting unit SC, which needs further analysis.

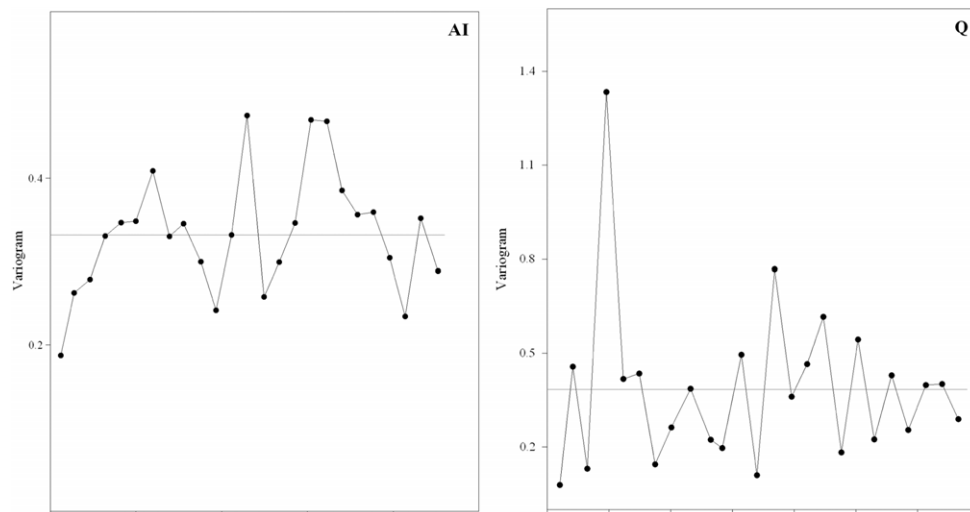
There are two issues regarding radon data from unit SC. First, one of the sampled municipalities displays a clearly anomalous behaviour (see box plot in figure 5) and was thus excluded from the study. The very high radon values (up to  $15\,000\text{ Bq m}^{-3}$ ) measured in this municipality can be attributed to the existence of an underlying uranium deposit (Arribas *et al* 1983).

Although this is a unique situation, other municipalities have close uranium deposits that could potentially increase indoor radon levels. The diffusion length of this gas in soil is only about  $1.2\text{ m}$ , but advective transport by carrier gas also occurs at long distances (several hundred metres) (Etiope and Martinelli 2002). In addition, surface soils in the proximity of uranium



**Figure 5.** Regional map showing lithostratigraphic unit SC (Schist–Greywacke Complex slates and greywacke). According to the rank of their radon geometric means, sampled municipalities are displayed as follows: green crosses (<25th percentile); orange squares (25th–75th percentile); or red circles (>75th percentile). A star marks a municipality considered anomalous due to its high radon values. The ellipse with the dotted line highlights the patch of low radon values. The shaded area marks the extension of the local mountain range. The box plot represents the individual radon concentration values measured at the following types of municipality: municipality with anomalous radon data, municipalities over slates and greywacke within the shaded area (unit SCb), and the rest of the municipalities in unit SC.

deposits show enhanced  $^{226}\text{Ra}$  concentrations (up to two orders of magnitude higher than background levels), although this is a very local effect (Baeza *et al* 1994). For unit SC, we compared indoor radon data  $\{x_i\}$  from five municipalities near uranium deposits (0.3–2 km) with those from the rest of the locations. The  $F$  test indicates equal variances for both groups ( $F = 0.5821$ ;  $p = 0.094$ ), whereas the two sample  $t$ -test proves equal means ( $t = 0.5346$ ;  $p = 0.5929$ ). Similar results are actually obtained when the analysis is replicated for unit AP, which also hosts several uranium deposits:  $F = 0.5841$  ( $p = 0.062$ );  $t = 0.6405$  ( $p = 0.522$ ). Based on these results, we concluded that uranium deposits in granite and schistose rock do not have an influence on indoor radon levels at nearby population centres, at least when located at distances larger than 0.3 km (from the built-up area to the boundary of the ore deposit).



**Figure 6.** Experimental variograms for lithostratigraphic units AP and Q. The solid line represents the fitted pure nugget effect model.

The second issue regarding radon levels in unit SC is the presence of a visually apparent large patch of minima that can be observed in figure 5. Most of the municipalities forming this patch are located in an isolated mountain range that forms a series of alternating ridgelines and valleys. They were considered as a distinct LS unit (SCb) solely in order to detrend the data and prevent bias in statistical inference.

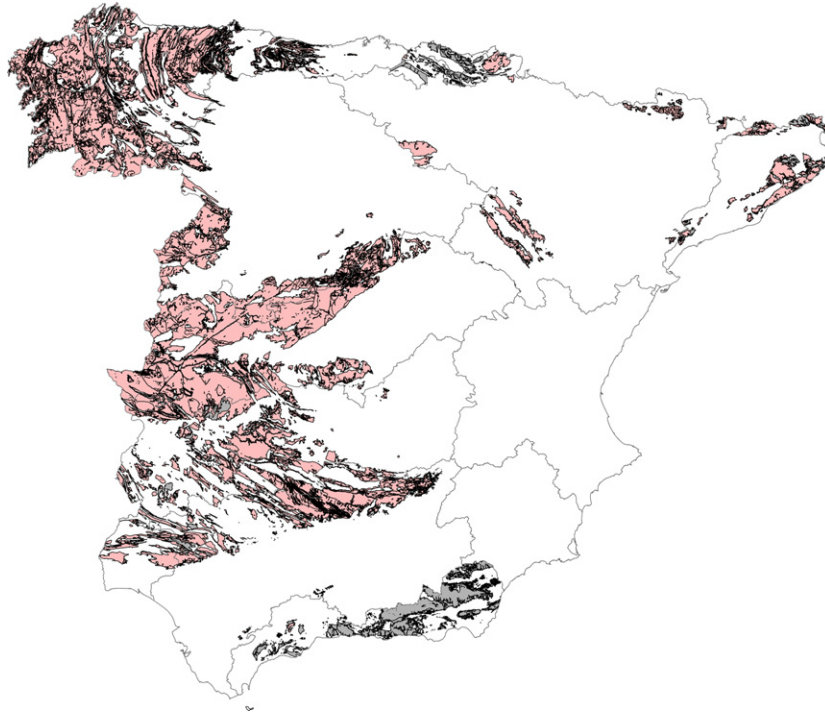
We then grouped the individual  $\sum_{j=1}^{k_m} \sum_{i=1}^{n_j} n_{i,j}$  radon measurements made in dwellings at the  $k_m$  municipalities in each LS unit,  $m$ . For each of these data samples,  $\{x_i\}_m$ , we performed a normality test on the log-transformed values. If the sample size was larger than 50, we used the Kolmogorov–Smirnov test. Otherwise, we applied the Shapiro–Wilk test. All data sets follow lognormal distributions and, thereby, the statistical hypothesis test described in section 3.1 was performed. Table 2 shows  $\tilde{X}_{0.9}$  for the different LS units, as well as other relevant statistical parameters.

The resulting map of currently identified radon-prone areas is shown in figure 7. All units classified as radon prone have average  $\gamma$ -dose rates greater than  $100 \text{ nGy h}^{-1}$ , whereas some units with average values as high as  $120 \text{ nGy h}^{-1}$  are not radon prone. Also, at the geological unit level,  $\gamma$ -dose rate plays a role in determining radon risk but is not a good indicator above a certain threshold.

## 5. Future developments

Grey areas on the map (figure 7) indicate those LSs that exhibit  $R_\gamma > 66 \text{ nGy h}^{-1}$  and lack enough measurements ( $n < 27$ ) to allow calculation of the 90th percentile of radon in dwellings. With an envisaged running time of three years, the following developments are underway with the aim of completing the map shown in figure 7 and verifying its consistency with the intended application.

- Carry out a sampling campaign started in 2013 to retrieve the necessary data from all LS units in order to cover the whole territory of Spain (including the Balearic and the Canary Islands).



**Figure 7.** Map of radon-prone areas (shaded in pink), i.e. areas with  $\bar{X}_{0,9} > 300 \text{ Bq m}^{-3}$ , for mainland Spain. Areas pending classification due to insufficient sample size are coloured in grey. The grey division lines mark the major water catchment areas.

- Expand the study on radon spatial variability within LS units using precisely geo-reference measurements.
- Evaluate the performance of the approach presented in this paper in relation to methods based on a high density of measurements in two Spanish regions of different climates and geologies.

On the basis of such a map, CSN will launch regulation addressing the problem of populations geographically associated with high radon levels in Spain. In the long term, the radon-prone area delineation will be subject to periodic review by CSN as the radon measurement database grows, driven forward by national and local radon protection policies.

## 6. Conclusions

The method presented in this paper to delineate radon-prone areas is, from a cost-effectiveness point of view, an advantageous approach in developing a national radon policy. Because it makes use of frequently available environmental information (such as geological or  $\gamma$ -radiation maps), it requires a relatively small number of indoor radon measurements. This allows a more prompt implementation of protection strategies, preferentially targeted to the areas most at risk, thus optimising resources and reducing regulatory burdens.

It also shows limitations in the sense of spatial accuracy and that maps developed on actual in-house measurements would always provide the most reliable estimate. More

elaborate predictive models accounting for effects such as local soil permeability or dwelling characteristics could also perform better. As conceived here, the radon-prone area map is the first version of a long-term dynamic project to be corroborated and improved as new precisely geo-referenced radon data become available from specific sampling campaigns and from radon testing required by regulation. The continuous input of radon measurements is essential to improve the accuracy of the defined areas and, consequently, to ensure better protection for individuals.

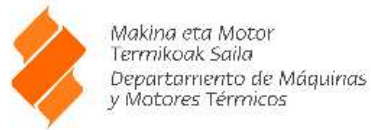
External  $\gamma$ -dose rate has been proved to discriminate non-radon-prone municipalities excellently. Above the cut-off of  $66 \text{ nGy h}^{-1}$ , predictions on the probability of exceeding the reference level must be made not at the municipality level but at the lithostratigraphic unit level. We have proposed a hypothesis test on the 90th percentile for the radon indoors distribution that controls the probability of both false positive and false negative results. This implies acknowledging the uncertainty on making the right decision on area classification rather than relying on a point estimate.

## References

- Agard S S and Gundersen L C S 1992 The geology and geochemistry of soils in Boyertown and Easton Pennsylvania *Field Studies of Radon in Rocks* ed L C S Gundersen and R B Wanty (Boca Raton, FL: CRC Press)
- Agresti A and Coull B A 1998 Approximate is better than 'exact' for interval estimation of binomial proportions *Am. Stat.* **52** 119–26
- Åkerblom G 1986 Investigation and mapping of radon risk areas *Geology for Environmental Planning* ed F C Wolff (Trondheim: GSN)
- Amorós R, Bolta J M, Navarro E and Roldán C 1995 Radon levels in the Valencian community (Spain) *J. Environ. Rad.* **27** 125–31
- Andersen C E, Ulbak K, Damkjær A, Kirkegaard P and Gravesen P 2001 Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey *Sci. Total Environ.* **272** 231–41
- Appleton J D and Miles J C H 2010 A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk *J. Environ. Radioact.* **101** 799–803
- Appleton J D, Miles J C H and Young M 2011 Comparison of Northern Ireland radon maps based on indoor radon measurements and geology with maps derived by predictive modelling of airborne radiometric and ground permeability data *Sci. Total Environ.* **409** 1572–83
- Arribas A, Martín-Izard A and Montes J 1983 Las mineralizaciones de uranio en la zona de la Alameda de Gardón y su posición en el contexto geotectónico y metalogénico de las pizarras del oeste de la provincia de Salamanca *Studia Geol. Salmant* **18** 201–24
- Baeza A, Del Río M, Miró C and Paniagua J 1994 Natural radionuclide distribution in soils of Cáceres (Spain): dosimetry implications *J. Environ. Radioact.* **23** 19–37
- Baeza A, Navarro E, Roldán C, Ferrero J L, Juanes D, Corbacho J A and Guillén F J 2003 Indoor radon levels in buildings in the autonomous community of Extremadura (Spain) *Radiat. Prot. Dosim.* **103** 263–8
- Baixeras C, Font L, Robles B and Gutiérrez J 1996 Indoor radon survey in the most populated areas in Spain *Environ. Int.* **22** S671–6
- Cascón M C, Suárez E, Quindós L, Villaseca C, García D and Fernández J A 2002 Estimación de la concentración de radón: Proyecto MARNA *ERICCA Project Meeting (Suances, 2002)*
- Cliff A D and Ord J K 1973 *Spatial Autocorrelation* (London: Pion)
- CSN 2011 *Guía de Seguridad 11.02. Control de la exposición a fuentes naturales de radiación* (Madrid: CSN)
- Darby S *et al* 2005 Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies *Br. Med. J.* **330** 223–7
- Darby S *et al* 2006 Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe *Scand. J. Work Environ. Health* **32** 1–84
- ESRI 2011 *ArcGIS Desktop: Release 10* (Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute)
- Etiopie G and Martinelli G 2002 Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview *Phys. Earth Planet. Int.* **129** 185–204
- European Commission 2012 *Draft Euratom Basic Safety Standards Directive* Version December (Luxembourg: EC)
- Faulkenberry G D and Weeks D L 1968 Sample size determination for tolerance limits *Technometrics* **10** 343–8
- Ford K L, Savard M, Dessau J C, Pellerin E, Charbonneau B W and Shives R B K 2000 The role of gamma-ray spectrometry in radon risk evaluation; a case history from Oka, Quebec *Geosci. Canada* **28** 59–64

- Friedmann H 2012 The Austrian Radon Project (ARP), [http://homepage.univie.ac.at/harry.friedmann/Radon/onrap\\_e.htm](http://homepage.univie.ac.at/harry.friedmann/Radon/onrap_e.htm) (Retrieved 30/07/2012)
- Friedmann H and Gröller J 2010 An approach to improve the Austrian Radon Potential Map by Bayesian statistics *J. Environ. Radioact.* **101** 804–8
- García-Talavera M, Matarranz J L M, Gil de Mingo R, Cadierno J P and Suárez E 2013 *El mapa predictivo de exposición al radón en España Colección Informes Técnicos* (Madrid: CSN)
- Gutiérrez J, Baixeras C, Robles B, Saez J C and Font L 1992 Indoor radon levels and dose estimation in two major Spanish cities *Radiat. Prot. Dosim.* **45** 495–8
- Hahn G J and Meeker W K 2011 *Statistical Intervals: A Guide for Practitioners* (New York: Wiley)
- Hewett P 1995 Sample size formulae for estimating the true arithmetic or geometric mean of lognormal exposure *Am. Indust. Assoc. J.* **56** 219–25
- IBM Corp 2010 *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 19.0* (Armonk, NY: IBM)
- Ielsch G, Cushing M E, Combes P H and Cuney M 2010 Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne *J. Environ. Rad.* **101** 813–20
- IGME 2012a *Mapa Litoestratigráfico de España a escala 1/200.000* <http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME.Litoestratigrafico200> (Retrieved 20 Jan 2012)
- IGME 2012b *Mapa Metalogenético de España a escala 1:200.000 (Serie antigua)* [www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/metalogeneticoA200.asp](http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/metalogeneticoA200.asp) (Retrieved 20 Jan 2012)
- International Commission on Radiological Protection 2009 Statement on Radon Approved by the Commission in November ICRP Ref 00/902/09
- International Atomic Energy Agency 2011 *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim))* (Vienna: IAEA)
- Kemski J, Klingel R, Siehl A and Stegemann R 2002 Radon transfers from ground to houses and prediction of indoor radon in Germany based on geological information. 7th International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII) Rhodes, 2002; *Radioact. Environ.* **7** 820–32
- Kemski J, Siehl A, Stegemann R and Valdivia-Manchego M 2001 Mapping the geogenic radon potential in Germany *Sci. Total Environ.* **272** 217–30
- Krewski D *et al* 2006 A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer *J. Toxicol. Environ. Health A* **69** 533–97
- Legendre P 1993 Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology* **74** 1659–73
- Lubin J H *et al* 2004 Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies *Int. J. Cancer* **109** 132–7
- Matarranz J L 2004 *Concentraciones de radón en viviendas españolas Colección Informes Técnicos* (Madrid: CSN)
- Miles J 1997 Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses *J. Hazard Mater.* **61** 53–8
- Miles J and Ball K 1996 Mapping radon-prone areas using house radon data and geological boundaries *Environ. Int.* **22** S779–82
- Mikšová J and Barnet I 2002 Geological support to the national radon programme (Czech Republic) *Bull. Geosci.* **77** 13–22
- Nason R and Cohen B L 1980 Correlation between  $^{226}\text{Ra}$  in soil,  $^{222}\text{Rn}$  in soil gas, and  $^{222}\text{Rn}$  inside adjacent houses *Health Phys.* **52** 73–4
- Nazaroff W W, Moed B A and Sextro R G 1988 Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry *Radon and its Decay Products in Indoor Air* ed W W Nazaroff and A V Nero (New York: Wiley-Interscience)
- Odeh R E and Owen D B 1980 *Tables for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans and Screening* (New York: Marcel Dekker)
- Olea R 2006 A six-step practical approach to semivariogram modelling *Stochast. Environ. Reas. Risk Assessm.* **20** 307–18
- Pérez J M, Álvarez M C, Dopico M T and Garzón L 1996 Indoor  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in central Asturias *Health Phys.* **70** 689–94
- Quindós J L, Fernández P L and Soto J 1991 National survey of indoor radon in Spain *Environ. Int.* **17** 449–53
- Quindós L S, Fernández P L, Sainz C, Fuente I, Nicolás J, Quindós L and Arteché J 2008 Indoor radon in a Spanish region with different gamma exposure levels *J. Environ. Radioact.* **99** 1544–7
- Quindós L, Baixeras C and Barros J 2011 *Ampliación del mapa español de radón. Final report to CSN* (Madrid: CSN)
- R Development Core Team 2008 *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Vienna: R Foundation for Statistical Computing)
- Smethurst M A, Strand T, Sundal A V and Rudjord A L 2008 Large-scale radon hazard evaluation in the Oslofjord region of Norway utilizing indoor radon concentrations, airborne gamma ray spectrometry and geological mapping *Sci. Total Environ.* **407** 379–93
- Suárez E, Fernández J A, Baeza A, Moro M A, García D, Pozo J M and Lanaja J M 2000 Proyecto MARNA. Mapa de radiación gamma natural *Colección Informes Técnicos* (Madrid: CSN)
- US EPA 2013 EPA map of radon zones [www.epa.gov/radon/zonemap.html](http://www.epa.gov/radon/zonemap.html) (Retrieved 09 Jan 2013)





# CÁLCULO Y MEDIDA DE INFILTRACIONES DE AIRE EN EDIFICIOS

MOISES ODRIUZOLA MARITORENA

MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA DE MINAS Y OBRAS PÚBLICAS  
UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO / EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

Noviembre 2008

# Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Conceptos básicos y terminología</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Características y clasificación de las grietas en edificios</b>	<b>5</b>
3.1	Flujo de aire a través de las grietas . . . . .	5
3.2	Grandes grietas . . . . .	6
3.3	Pequeñas grietas . . . . .	7
3.4	Analogía entre grietas y conductos . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Fundamentos del movimiento de aire</b>	<b>12</b>
4.1	Efecto del viento . . . . .	12
4.2	Efecto de la diferencia de temperatura interior/externo . . . . .	15
4.3	Efecto combinado viento y diferencia de temperatura . . . . .	17
4.4	Efecto combinado viento, diferencia de temperatura y sistemas mecánicos de ventilación . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Distribución de las fugas de aire</b>	<b>20</b>

<b>6 Mediciones del caudal aire debido a infiltraciones</b>	<b>23</b>
6.1 Medición de las infiltraciones . . . . .	23
6.2 Medición de la estanquidad . . . . .	27
6.2.1 Envolvente del edificio . . . . .	27
6.2.2 Componentes del edificio . . . . .	34
6.2.3 Otros métodos de medida de la estanquidad . . . . .	37
<b>7 Cálculo de las infiltraciones de aire</b>	<b>40</b>
7.1 Modelos empíricos . . . . .	40
7.2 Modelos tipo “network” . . . . .	42
7.2.1 Modelos unizona . . . . .	42
7.2.2 Modelos multizona . . . . .	46
<b>8 Bibliografía</b>	<b>51</b>

# Lista de figuras

2.1	Ventilación de dos espacios mediante distintos mecanismos. . . .	3
3.1	Fugas de aire más comunes en viviendas. . . . .	5
4.1	Corrientes de aire alrededor de edificios. . . . .	14
4.2	Fugas de aire por diferencia de temperatura interior/externo. . .	16
4.3	Presiones y flujos resultantes por efecto del viento, diferencia de temperatura y ventilación mecánica. . . . .	18
6.1	Esquema del método caída de concentración. . . . .	24
6.2	Resultados típicos de un ensayo de gas trazador. Método de caída de la concentración. . . . .	25
6.3	Foto de equipo puerta-ventilador. . . . .	28
6.4	Representación gráfica de resultados del ensayo puerta-ventilador para presurización y despresurización. . . . .	31
6.5	Variación del caudal de ventilación a distintos niveles de diferencia de presión en una medición con puerta-ventilador. . . . .	32
6.6	Esquema del sistema de presurización dinámica. . . . .	34
6.7	Esquema para el ensayo de componentes mediante el sistema puerta-ventilador. . . . .	35

6.8	Clasificación de puertas y ventanas según permeabilidad. . . . .	38
7.1	Representación gráfica de modelo unizona. . . . .	42
7.2	Representación gráfica de modelo multizona. . . . .	47

# Lista de tablas

4.1	Factores que definen el terreno. . . . .	13
6.1	Procedimiento requerido para el método de caída de concentración. . . . .	24
6.2	Escala Beaufort para la definición de la fuerza del viento. . . . .	29
6.3	Permeabilidades al aire de referencia a 100 Pa y presiones máximas de ensayo, relacionadas con la superficie total, para las clases 1 a 4. . . . .	37
6.4	Permeabilidades al aire de referencia a 100 Pa y presiones máximas de ensayo, relacionadas con la longitud de las juntas de apertura, para las clases 1 a 4. . . . .	37
7.1	Coficiente que define el efecto del viento. . . . .	41
7.2	Definición del grado de resguardo. . . . .	42
7.3	Valores de $F_w$ y $F_s$ para el modelo BRE. . . . .	44

# 1

## Introducción

La primera preocupación de un ingeniero de sistemas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire es proporcionar un ambiente interior confortable y saludable.

El confort y la calidad del aire interior dependen de muchos factores: regulación de la temperatura, control de las fuentes de contaminantes, la impulsión de un aire limpio al interior del local, la eliminación del aire sucio del interior del local, la correcta operación y mantenimiento de los sistemas del edificio,...

El aire exterior que se introduce en el interior del edificio se utiliza para diluir y eliminar los contaminantes del aire interior. Esto hace que la energía necesaria para acondicionar el aire exterior a las necesidades térmicas del interior del local sea una parte considerable del total de la energía demandada. Por ello, es necesario conocer la cantidad de aire que se introduce en el interior del local, y de esta forma, dimensionar los sistemas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire (HVAC: Heating, Ventilating and Air Conditioning).

Este trabajo pretende resumir las bases teóricas de los mecanismos del movimiento de aire por infiltraciones en edificios. Además, se define la metodología de medición del caudal de infiltraciones de aire en edificios y se presentan las distintas técnicas de medición de la estanquidad de la envolvente del edificio y de los componentes del mismo. Al final de este trabajo se describen diferentes métodos de cálculo de las infiltraciones de aire en edificios.

## 2

# Conceptos básicos y terminología

- Renovación de aire: Se trata de sustituir el aire del interior del local por aire exterior. Esto supone intercambiar aire sucio interior por aire limpio exterior, pero también implica, generalmente, una pérdida de energía, ya que el aire exterior normalmente no estará a la misma temperatura que el aire interior. La renovación de aire se puede realizar por ventilación o por infiltración.
- Aire de ventilación: Se utiliza para proporcionar una correcta calidad del aire interior. Puede estar compuesto por ventilación natural o forzada, infiltraciones, aire de recirculación correctamente tratado, transferencia de aire o por la combinación de las anteriores.
- Ventilación: Supone la introducción intencionada de aire desde el exterior hacia el interior del edificio. Se puede subdividir en ventilación natural, ventilación mecánica y ventilación híbrida (una mezcla de las dos primeras).
- Ventilación natural: Se trata del flujo de aire a través de ventanas abiertas, puertas abiertas, rejillas de ventilación o cualquier otra abertura situada de forma premeditada e intencionada en la envoltura del local. El movimiento de aire se produce por diferencias de presión producidas de forma natural.
- Ventilación mecánica: Se trata de la ventilación que se produce intencionadamente, colocando para ello sistemas mecánicos, por ejemplo ventiladores y extractores de aire.

- **Infiltración:** Se trata del aire exterior que penetra en el interior de un local a través de grietas (*crack*) y otras aberturas que no han sido colocadas intencionadamente en la envolvente del local. Las infiltraciones también se conocen como fugas de aire (*air leakage*) que se introducen en el edificio. Así como la ventilación natural, se produce por diferencias de presión interior/exterior debido al efecto del viento y la diferencia de temperatura interior/exterior.
- **Exfiltración:** Se trata del aire interior del recinto que, a través de grietas y otras aberturas no colocadas intencionadamente en la envolvente del local, sale al exterior. Los mecanismos que lo producen son los mismos que para la ventilación natural.
- **Transferencia de aire:** Se trata del aire que se mueve desde un local interior hacia otro, de manera intencionada o no.

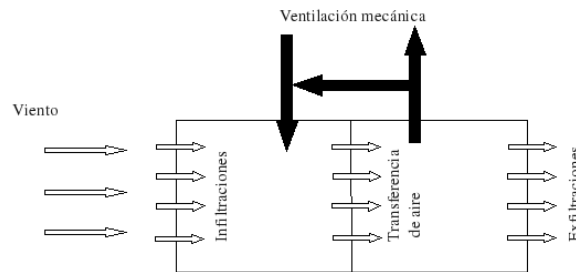


Figura 2.1: Ventilación de dos espacios mediante distintos mecanismos.

El efecto sobre el consumo de energía varía significativamente dependiendo de cómo se realice la renovación de aire, así como la calidad del aire interior y el confort térmico.

Los edificios comerciales, de oficinas, institucionales,... normalmente disponen de sistemas de ventilación mecánica y son habitualmente presurizadas para reducir o eliminar las infiltraciones. La ventilación mecánica tiene un gran potencial para controlar la renovación de aire cuando el sistema se diseña, se instala y opera correctamente. Las viviendas han utilizado la infiltración y la ventilación natural para cumplir con las necesidades de renovación de aire, pero esto no garantiza una correcta ventilación a lo largo del año, ya que dependerá de las condiciones meteorológicas, del tipo de construcción del edificio y su mantenimiento. De todas formas, la ventilación natural, mediante la apertura de las ventanas, por ejemplo, permite a los ocupantes controlar la contaminación y la temperatura del aire interior, pero a costa de un alto coste de energía.

A partir de la definición de las infiltraciones, podemos decir que ayudan a renovar el aire interior del edificio, pero ocurren de manera no intencionada y

por lo tanto, de forma incontrolada. Esto significa que debido a los mecanismos que lo impulsan, más acentuada será cuando mayor sea la incidencia del viento y la diferencia de temperatura interior/exterior. Por lo que en climas en los que los inviernos son muy fríos y los veranos muy calientes las infiltraciones son mayores. Es evidente que cuanto mayor es el aire infiltrado al interior del edificio mayor será el desconfort causado y más intensa deberá ser la actuación a llevar a cabo para compensar su efecto.

La energía consumida en los países desarrollados para mantener unas condiciones adecuadas de confort en el interior de un edificio supone una gran parte del consumo total de energía, superando la energía consumida por la industria o el transporte. Por lo tanto, como es de suponer, se han tomado muchas medidas por parte de los respectivos gobiernos para reducir el consumo de energía para el acondicionamiento de los espacios interiores. La mayor iniciativa tomada por gran parte de los países ha sido reducir la transmisión de calor a través de la envolvente del edificio. También se han tomado medidas para reducir el aire infiltrado/exfiltrado, lo cual a supuesto la aparición de problemas asociados a la mala calidad del aire interior.

Debe tenerse en cuenta que, el aire contenido en el interior de un edificio es el continente de las condiciones y contaminantes que deben soportar los ocupantes del edificio en el desarrollo de sus actividades cotidianas. En este sentido, hay que aclarar que las personas residentes en áreas urbanas pasan entre el 58% y el 78% de su tiempo en un ambiente interior, por lo que la mala calidad del aire interior se ha convertido en un problema de salud. Como conclusión se puede decir que es necesaria una correcta evaluación de las infiltraciones y exfiltraciones, ya que ello supone determinar las necesidades reales de renovación de aire y energía para el acondicionamiento del local o espacio interior. Además es importante tener en cuenta que el correcto funcionamiento de un sistema de ventilación se ve afectado por las filtraciones de aire, ya que las corrientes que generan pueden perturbar el sentido y la cantidad de aire que se transfiere entre las distintas zonas del edificio.

### 3

## Características y clasificación de las grietas en edificios

### 3.1 Flujo de aire a través de las grietas

En la figura 3.1 se presentan los puntos principales de fugas de aire, y por lo tanto donde se localizan las grietas en una vivienda.

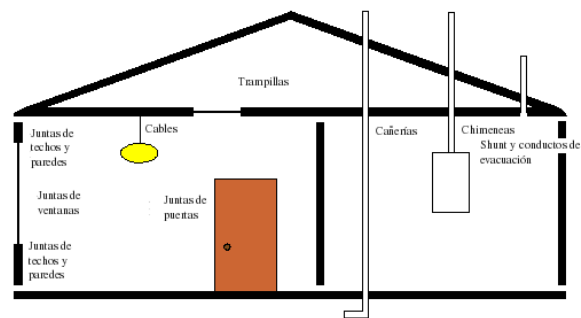


Figura 3.1: Fugas de aire más comunes en viviendas.

En general la cantidad de aire que fluye a través de las grietas depende de los siguientes factores:

- El tamaño y configuración de la grieta.
- Las características del flujo a través de la grieta.
- La diferencia de presión a través de la grieta.
- Temperatura de la grieta.

Para evaluar la tasa del aire filtrado es esencial conocer la influencia de los factores anteriores, definida la influencia de cada factor, la determinación de la tasa del aire filtrado se basa en la aplicación de balances de masa tomando como volumen de control el local analizado. Éste puede ser un local o habitación dentro de un edificio entero o el edificio entero en sí.

El flujo de aire a través de un componente (ventana, puerta, pared, ...) es muy complejo, de todas formas, la estimación de la cantidad de aire que atraviesa la frontera del volumen de control considerado se realiza mediante ecuaciones muy simples, que dependen del tipo de grieta. Estas ecuaciones son distintas para el caso en el que el flujo sea laminar, de transición o turbulento, lo cual depende del tamaño de la grieta principalmente.

## 3.2 Grandes grietas

Se pueden considerar grandes grietas, aberturas con relativamente grandes áreas libres, podemos definir 10 mm como el límite entre lo que sería una grieta grande y una pequeña, tal y como se define en la *British Standard 5925*. Dentro de esta categoría entrarían las grietas que se producen en las ventanas y puertas. El flujo de aire a través de este tipo de grietas tiende a ser turbulento bajo diferencias de presión normales. En este caso la tasa del aire filtrado  $Q$  es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión interior/exterior y puede ser estimado utilizando la ecuación standard para flujos a través de orificios:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3.1)$$

$Q \rightarrow$  Tasa del aire filtrado  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

$C_d \rightarrow$  Coeficiente de descarga de la grieta.

$A \rightarrow$  Área de la grieta  $[m^2]$ .

$\Delta p \rightarrow$  Diferencia de presión a través de la grieta [ $Pa$ ].

$\rho \rightarrow$  Densidad del aire a la temperatura  $T_0$  y presión  $P_0$  de referencia  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

Para orificios en forma de filo (*sharp-edge*, en el plano de la pared alargados y estrechos), el coeficiente de descarga se puede considerar independiente del número de Reynolds (el cual nos indica si es flujo a través de la grieta es laminar, de transición o turbulento), y por lo tanto con un valor de 0,61. No obstante, para la mayoría de las aberturas en orificios esta característica no ha sido observada, debido a la geometría de las grietas y la variación de la diferencia de presión a través de la grieta, por las condiciones a un lado y otro de la misma. El término  $C_d \cdot A$  se define como el área efectiva de fugas de aire (*ELA*).

### 3.3 Pequeñas grietas

Se definen como pequeñas grietas aquellas que son muy pequeñas en comparación con su profundidad, el flujo a través de ellas es esencialmente laminar o viscoso. El flujo de aire a través de las mismas nos da la siguiente expresión:

$$Q = \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot \Delta p \quad (3.2)$$

$b \rightarrow$  Longitud de la grieta [ $m$ ].

$h \rightarrow$  Altura de la grieta [ $m$ ].

$L \rightarrow$  Profundidad de la grieta en la dirección del flujo [ $m$ ].

$\mu \rightarrow$  Viscosidad dinámica del aire [ $Pa \cdot s$ ].

Las grietas en las que el flujo no es ni laminar ni turbulento, sino de transición, por ejemplo las grietas de tamaño medio, es necesario utilizar una ecuación que es la mezcla de las dos anteriores.

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (3.3)$$

$C \rightarrow$  Coeficiente de flujo  $\left[\frac{m^3}{Pa \cdot s}\right]$ .

$n \rightarrow$  Exponente de flujo [-].

Esta ecuación es normalmente llamada como ecuación de flujo de aire a través de una grieta (en inglés “*crack flow equation*”), y es la que se utiliza comúnmente en los programas de simulación. A partir del desarrollo de conceptos básicos de la Mecánica de Fluidos aplicados a flujos a través de conductos se puede realizar una aproximación al comportamiento del aire a través de las grietas.

### 3.4 Analogía entre grietas y conductos

La caída de presión debido al paso del aire a través de un conducto, independientemente de que el flujo sea laminar, turbulento o de transición, se puede definir mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (3.4)$$

$\lambda \rightarrow$  Factor de fricción [-].

$L \rightarrow$  Longitud del conducto o grieta, como en este caso [ $m$ ].

$d \rightarrow$  Diámetro [ $m$ ].

$v \rightarrow$  Velocidad del fluido [ $\frac{m}{s}$ ].

$$Q = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.5)$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (3.6)$$

$Re \rightarrow$  Número de Reynolds [-].

$\nu \rightarrow$  Viscosidad cinemática [ $\frac{m^2}{s}$ ].

$$\lambda = \frac{A}{Re^M} \quad (3.7)$$

$A \rightarrow$  Constante [-].

$M \rightarrow$  Valor que depende del régimen de flujo. Si el flujo es laminar será igual a 1 y si el flujo es turbulento es igual a 0 [-].

Si se introducen las tres últimas ecuaciones en la primera, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = \left[ \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left( 2 \cdot \frac{d^{M+1}}{A \cdot L} \right)^{\frac{1}{2-M}} \right] \cdot \left[ \nu^{\frac{-M}{2-M}} \cdot \rho^{\frac{-1}{2-M}} \right] \cdot \Delta p^{\frac{1}{2-M}} \quad (3.8)$$

Hay que tener en cuenta que la variable  $M$  toma valores en función del régimen de flujo, esto significa que si esta ecuación fuese aplicable para las grietas, lo sería tanto para las grietas grandes como para las pequeñas.

Tal y como se han agrupado las variables en la anterior expresión, se pueden identificar distintos términos de manera clara. En el primer término entre corchetes se incluyen todas las variables que definen las dimensiones, y por lo tanto la forma del conducto. El segundo término incluye los parámetros que definen las propiedades del fluido, en este caso el aire. Y por último, se define la diferencia de presión que provoca el movimiento del aire a través del conducto.

En cuanto al exponente  $n$  definido para indicar el régimen de flujo, éste será:

$$n = \frac{1}{2 - M} \quad (3.9)$$

Ya han sido definidos los valores de  $M$  para distintos regímenes de flujo, por lo que se deduce que los valores de  $n$  estarán definidos entre 0,5 y 1. De todas formas, mediante la experimentación se comprueba que el exponente de flujo toma valores comprendidos entre 0,6 y 0,7, aunque se acepta como válido un valor de 0,67 en la mayoría de los casos.

A partir del desarrollo realizado para los conductos, se pueden identificar los distintos parámetros que influyen sobre el flujo de aire a través del mismo. Está claro que el flujo de aire a través de una grieta es mucho más complicado que el definido para un conducto de sección circular, pero nos da una idea clara de lo que ocurre en el caso de las grietas. Además la amplia experimentación realizada en este campo ha comprobado que se trata de una expresión válida para definir el comportamiento del flujo de aire a través de las grietas. Por lo que quedaría una expresión tal que,

$$Q = C_s \cdot f(\rho, \nu, n) \cdot \Delta p^n \quad (3.10)$$

$$Q = C_s \cdot \rho^{-n} \nu^{1-2 \cdot n} \cdot \Delta p^n \quad (3.11)$$

Los valores de las variables  $C_s$  y  $n$  se obtienen mediante ensayos bajo unas ciertas condiciones ambientales. De todas formas, podemos suponer que los valores de  $C_s$  y  $n$  son constantes dentro del rango de diferencias de presión analizado. Dependiendo de estas condiciones, los valores de las propiedades termofísicas del aire variarán modificando el valor del flujo o tasa del aire filtrado a través de la grieta, aún cuando no varíe la geometría y la diferencia de presión a través de la grieta. Es por ello que se requiere introducir un factor de corrección que tenga en cuenta esta variación de la temperatura de ensayo con respecto de las condiciones ambientales, y su efecto sobre las propiedades termofísicas del aire.

$$K_Q = \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right)^{-n} \cdot \left( \frac{\nu}{\nu_o} \right)^{1-2 \cdot n} \quad (3.12)$$

donde los parámetros indicados mediante el subíndice “o” definen los valores para las condiciones standard.

Si consideramos que el aire se comporta como un gas ideal y que la influencia de la presión es despreciable para el cálculo de las propiedades termofísicas, la anterior ecuación se puede reescribir de la siguiente forma:

$$Q = C_s \cdot f(T, n) \cdot \Delta p^n \quad (3.13)$$

De tal manera que se puede definir el factor de corrección solamente en función de la temperatura real y la temperatura en las condiciones de referencia.

$$K_Q = \left( \frac{T}{T_o} \right) \cdot \left( \frac{T_o - 136}{T - 136} \right)^{2 \cdot n - 1} \quad (3.14)$$

La temperatura real de la grieta depende tanto de las condiciones ambientales como de las condiciones en el interior del local. Para poder determinar la temperatura real y utilizarlo en el cálculo de la tasa del aire filtrado, es necesario utilizar distintas expresiones que se obtienen según el componente en el cual se sitúa la grieta.

Cabe señalar, llegado a este punto, que la ecuación de flujo de aire a través de una grieta no es dimensionalmente homogénea, por lo que pierde generalidad en su aplicación. Para resolver este problema, se propone otro tipo de ecuación. Se trata de una ecuación de forma cuadrática, la cual es dimensionalmente homogénea:

$$\Delta p = \alpha \cdot Q + \beta \cdot Q^2 \quad (3.15)$$

donde los valores  $\alpha$  y  $\beta$  se definen como coeficientes de flujo. El primer término de la derecha representa el componente debido al flujo laminar, mientras que el segundo término corresponde al flujo turbulento. El primer coeficiente adquiere mayor importancia en el caso de valores de flujos de aire bajos, mientras que el valor del segundo será mayor para valores de flujos de aire altos. Los valores de estas dos variables se pueden obtener a partir de la experimentación.

A partir del comportamiento de estos dos tipos de ecuaciones, ley de potencias y la cuadrática, en la predicción del aire filtrado en viviendas unifamiliares se puede concluir que, para diferencias grandes de presión ( $\Delta p > 20 Pa$ ) las dos ecuaciones producen idénticos resultados. En cambio, en el caso de diferencias de presiones más bajas, y por lo tanto más acordes con lo que ocurre bajo condiciones normales, la ecuación en forma de potencias predice la cantidad de aire infiltrado con mayor precisión.

La clasificación de las grietas es algo que crea una gran incertidumbre. Siendo esto así, se definen dos métodos distintos. El primero de ellos, define el tipo de grieta según el componente en el cual se sitúa. En este sentido, la mayoría de las curvas que definen las fugas de aire se definen según los componentes en los que se producen las filtraciones de aire.

El segundo método, clasifica las grietas según su geometría: rectas, en forma de  $L$  y en forma de zig-zag (*straight, L-shaped, multi-cornered*). Este método es útil cuando las grietas están definidas por su forma, tamaño y localización en el interior del edificio. Esto rara vez ocurre en la realidad, por lo que resulta difícil creer que este método pueda utilizarse para definir el flujo de aire infiltrado en el interior del edificio.

## 4

# Fundamentos del movimiento de aire

Se ha podido comprobar mediante las ecuaciones definidas en el apartado anterior, que la diferencia de presión es lo que induce el flujo de aire a través de las grietas. Esta diferencia de presión puede ser producida por el viento, por la diferencia de temperatura interior/exterior o por la operación de cualquier aparato de ventilación mecánica.

### 4.1 Efecto del viento

El efecto del viento se tiene en cuenta mediante el coeficiente  $C_p$ , este coeficiente indica la fuerza de la incidencia del viento sobre una superficie de la fachada del edificio, y describe la distribución de la presión sobre dicha superficie. Este valor puede tomar tanto valores positivos como negativos. En el caso de que el valor sea positivo habrá una sobrepresión con respecto a la presión de referencia, que será la del flujo sin perturbar. En el caso de que este coeficiente tenga un valor negativo, habrá depresión en la fachada analizada.

El valor del coeficiente de presión estática se obtiene mediante la relación entre la presión dinámica sobre la superficie exterior de la envolvente del edificio y la presión dinámica en un punto a una altura de referencia en el flujo no perturbado por la situación del edificio.

$$C_{pk}(z_{ref}, \phi) = \frac{p_k - p_z(z)}{p_{din}(z_{ref})} \quad (4.1)$$

sabiendo que la presión dinámica es

$$p_{din}(z_{ref}) = \frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot v^2(z_{ref}) \quad (4.2)$$

El valor de  $C_p$  se consigue a partir de mediciones en edificios reales, en túneles de viento sobre modelos a escala de los edificios y mediante simulaciones utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional. Su valor depende de los siguientes factores:

- La geometría del edificio.
- La velocidad y dirección del viento con respecto al edificio.
- El grado de exposición del edificio al viento (localización con respecto a los edificios cercanos y la topografía y rugosidad del terreno en la dirección del viento).

Tabla 4.1: Factores que definen el terreno.

<i>Terreno</i>	c	a
Campo abierto	0,68	0,17
Campo abierto con obstáculos dispersos	0,52	0,20
Urbano	0,35	0,25
Ciudad	0,21	0,33

Es importante conocer la velocidad del viento a la altura para la que se desea calcular el coeficiente de presión estática. Sabiendo que el viento es altamente turbulento y que además puede actuar de forma variable, en forma de rachas, es necesario determinar el valor del coeficiente de presión promedio con respecto al tiempo. Por otra parte, debido a la interacción con el terreno, se produce una capa límite que define la variación de la magnitud de la velocidad del viento con la altura. Para calcular la velocidad del viento promedio para una determinada altura, se puede utilizar la siguiente expresión,

$$\frac{v}{v'} = c \cdot H^a \quad (4.3)$$

$v \rightarrow$  Velocidad media del aire a la altura  $H$  sobre el terreno [ $\frac{m}{s}$ ].

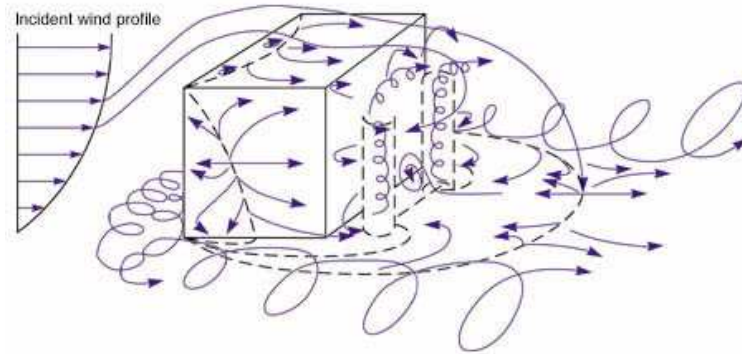


Figura 4.1: Corrientes de aire alrededor de edificios.

$v'$  → Velocidad media del aire medida en una estación meteorológica, normalmente a la altura de 10 m sobre el terreno [ $\frac{m}{s}$ ].

$a, c$  → Factores que dependen del terreno.

Existe otra expresión para obtener el valor de la velocidad del viento en diferentes alturas, y de esta manera definir la capa límite del viento:

$$\frac{v}{v'} = \frac{\alpha \cdot \frac{H}{10}^\gamma}{\alpha' \cdot \frac{H'}{10}^\gamma} \quad (4.4)$$

$H'$  → Altura de la estación meteorológica [m].

$\alpha, \gamma$  → Factores que dependen del terreno.

A partir del valor de  $C_p$  se determina la diferencia de presión debida al efecto del viento,

$$p_w = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_o \cdot v^2(z) \quad (4.5)$$

## 4.2 Efecto de la diferencia de temperatura interior/exterior

En cuanto a la diferencia de temperatura interior/exterior, la temperatura del fluido afecta a la densidad del mismo, a mayor temperatura menor es la densidad del aire, por lo que menor será el peso que ejerce la columna de fluido que queda sobre la altura considerada de la grieta, y el peso por unidad de área se traduce en presión.

$$\rho = \frac{p}{R_m \cdot T} \quad (4.6)$$

$$p_o = p_0 - \rho_o \cdot g \cdot h \quad (4.7)$$

$$p_i = p_0 - \rho_i \cdot g \cdot h \quad (4.8)$$

$$\Delta p = p_i - p_o = (\rho_o - \rho_i) \cdot g \cdot h \quad (4.9)$$

$p \rightarrow$  Presión [Pa].

$\rho \rightarrow$  Densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

$g \rightarrow$  Aceleración gravitacional  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ .

$h \rightarrow$  Altura [m].

$$\frac{dp}{h} = -\rho \cdot g \quad (4.10)$$

$$\rho_o = \frac{p_o}{R_m \cdot T_o} \quad (4.11)$$

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_m \cdot T_i} \quad (4.12)$$

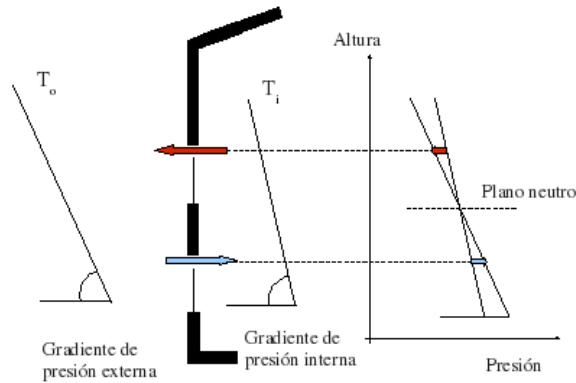


Figura 4.2: Fugas de aire por diferencia de temperatura interior/exterior.

Si suponemos que la diferencia de presión es muy pequeña podría decirse que:

$$p_o \approx p_i \quad (4.13)$$

y por lo tanto,

$$\rho_i = \rho_o \cdot \frac{T_o}{T_i} \quad (4.14)$$

$$\Delta p = (p_i - p_o) = (\rho_o - \rho_i) \cdot g \cdot h = \rho_o \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) \cdot g \cdot h \quad (4.15)$$

donde,

$T_o \rightarrow$  Temperatura exterior  $[T]$ .

$T_i \rightarrow$  Temperatura interior  $[T]$ .

$\rho_o \rightarrow$  Densidad del aire a la temperatura  $T_o$   $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

Como referencia comentar que, para una diferencia de alturas de 5 m entre la grieta superior y la grieta inferior, y una diferencia de temperaturas interior/exterior de 20 K, se produce una diferencia de presión por diferencia de

peso de columna de aire 4,3 Pa. Este valor equivale a la que se obtendría para una velocidad del viento de  $5 \frac{m}{s}$ , si el único factor causante de la diferencia de presiones fuese el viento.

### 4.3 Efecto combinado viento y diferencia de temperatura

La diferencia total de presión depende de ambos factores, por lo que la suma de cada agente nos dará el valor global de su efecto combinado.

$$Q_t = \left[ Q_w^{\frac{1}{n}} + Q_s^{\frac{1}{n}} \right]^n \quad (4.16)$$

$Q_w \rightarrow$  Caudal de aire infiltrado debido al efecto del viento  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

$Q_s \rightarrow$  Caudal de aire infiltrado debido al efecto de la diferencia de temperatura interior/exterior  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

De todas formas, esta expresión no representa de manera correcta la combinación no lineal del efecto de la diferencia de temperatura y el viento, el resultado real solamente se puede calcular de forma iterativa. Para tratar de no utilizar complejos modelos iterativos, han sido propuestos una serie métodos simples para tratar de superponer los efectos de la diferencia de temperatura y el viento.

$$Q_t = Q_w + Q_s \quad (4.17)$$

$$Q_t = \left[ Q_w^{\frac{1}{2}} + Q_s^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (4.18)$$

$$Q_t = \left[ Q_w^{\frac{1}{n}} + Q_s^{\frac{1}{n}} \right]^n \quad (4.19)$$

$$Q_t = \left[ Q_w^{\frac{1}{n}} + Q_s^{\frac{1}{n}} + B \cdot (Q_w \cdot Q_s)^{\frac{1}{2 \cdot n}} \right]^n \quad (4.20)$$

Estos modelos han sido comparados entre ellos y con mediciones realizadas por el método de la concentración constante para una vivienda mediante gases trazadores. A partir de los resultados del estudio se concluye que, por la diferencia entre los resultados de las mediciones y los cálculos realizados mediante las anteriores expresiones, en términos de simplicidad y precisión en los resultados la más apropiada es la segunda.

#### 4.4 Efecto combinado viento, diferencia de temperatura y sistemas mecánicos de ventilación

Las infiltraciones o exfiltraciones producidas por el sistema de mecánico de ventilación se producen por la sobrepresión producida en el caso de un sistema de impulsión o por la depresión producida por un sistema de extracción.

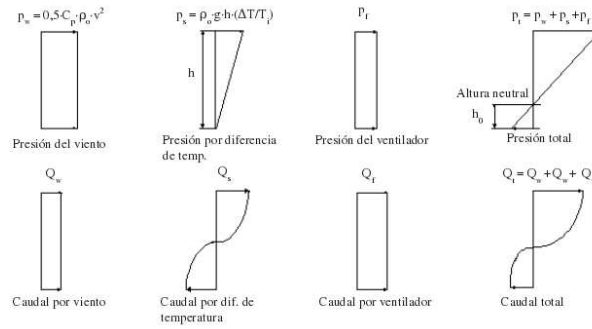


Figura 4.3: Presiones y flujos resultantes por efecto del viento, diferencia de temperatura y ventilación mecánica.

El caudal de ventilación depende de  $\Delta p^n$ , por lo que el cálculo del caudal de aire total debe tener en cuenta la influencia de todos los factores. Se puede aproximar mediante la siguiente expresión 4.21:

$$Q_t = \left[ Q_w^{\frac{1}{n}} + Q_s^{\frac{1}{n}} + Q_{fu}^{\frac{1}{n}} \right]^n \quad (4.21)$$

$Q_{fu}$  representa el caudal de aire debido al sistema de ventilación mecánico no equilibrado, mientras que el resto de los términos representan la aportación del viento y de la diferencia de temperaturas. Cuando el sistema de ventilación mecánico utilizado está equilibrado, el flujo adicional de aire no afecta a la diferencia de presiones, ya que se impulsa tanto como lo que se extrae mediante

el sistema de ventilación, lo que supone la conversión de la expresión anterior en

$$Q_t = Q_{fb} + \left[ Q_w^{\frac{1}{n}} + Q_s^{\frac{1}{n}} \right]^n \quad (4.22)$$

## 5

# Distribución de las fugas de aire

Diferentes estudios han tratado de definir la distribución de las fugas de aire, y por lo tanto de las grietas, en los distintos componentes que forman la envolvente del edificio. En los siguientes puntos se resumen los porcentajes de fugas de aire con respecto al total de estos componentes.

- Paredes: Representan entre el 18% y el 50% del total de las fugas de aire que se producen a través de la envolvente. Se localizan básicamente en las uniones de los cerramientos, enchufes eléctricos y paso de tuberías.
- Techos: Representan entre el 3% y el 30% del total de fugas de aire, reducen la efectividad de aislamiento y contribuyen a la pérdida de energía en el caso de las últimas plantas. Los dispositivos de iluminación, cableado y el paso de tuberías son áreas que deben tratarse con especial cuidado.
- Sistemas de ventilación: Representan entre el 3% y el 28% de las fugas de aire. Se trata de unidades de tratamiento de aire, sistemas de conductos de aire, rejillas de ventilación (para la ventilación de cocinas por ejemplo), tomas de aire para combustión de calderas,... Especial mención merecen los sistemas de conductos, ya que para conseguir el movimiento de aire necesario hay que generar una diferencia de presión, la cual puede llegar a superar 10 veces la diferencia de presión entre el interior y el exterior de una vivienda. Estudios de campo demuestran que se pueden eliminar desde el 25% hasta el 66% de las fugas en los conductos.
- Puertas y ventanas: Representan entre el 6% y el 25% del total de fugas

de aire. Las fugas de aire dependen del tipo de ventana. Las ventanas con burletes muestran una capacidad superior para impedir el paso del aire.

- Chimeneas: Dependiendo si existen o no, pueden llegar a suponer el 30% de las fugas de aire. Cuando existe y no se utiliza, se emplean una serie de trampillas que cierran para impedir el paso del aire, aunque estos rara vez funcionan correctamente. También existen una serie de protecciones de cristal que se colocan en las chimeneas, se trata de dispositivos que sirven para prevenir posibles accidentes, aunque también actúan reduciendo el aire en exceso que pudiera salir de la chimenea cuando se produce la combustión. De todas formas no son más herméticas que las trampillas ya mencionadas. Los tapones para chimeneas son dispositivos que se muestran más efectivos a la hora de tratar de evitar fugas de aire cuando la chimenea no está siendo utilizada.
- Rejillas de extracción en espacios acondicionados: Las fugas de aire que representan pueden ser entre el 2% y el 12% del total. Por ejemplo, rejillas de extracción en los espacios acondicionados que no disponen de trampillas o éstas no cierran correctamente.
- Difusión de aire a través de paredes: Su influencia es muy pequeña, menor que el 1% del total. No se trata de un mecanismo importante en comparación con el resto de las fugas de aire analizadas. Para una diferencia de presión de 5 Pa a un lado y otro de la pared, la permeabilidad de los materiales utilizados producen renovaciones de aire por hora inferiores a 0,01 ACH en construcciones típicas de viviendas.

### Tendencia según las características de los edificios

A partir de la experimentación, mediante la aplicación del ensayo denominado “Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire de los edificios. Método de presurización por medio de ventilador” (UNE-EN 13829), coloquialmente conocido como ensayo de puerta-ventilador (*blower-door*) y su variante aplicada a puertas y ventanas, “Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Método de ensayo” (UNE-EN 1026) se determina la estanquidad (*airtightness*) de los edificios y sus componentes. Este ensayo se definirá más adelante, indicando diferentes métodos que se pueden utilizar para completar y detallar el estudio relativo a la estanquidad de edificios.

Existe una gran tradición, y por lo tanto se encuentra muy extendida la realización de este tipo de ensayos en países tales como Estados Unidos, Canadá, los países nórdicos,... Los datos obtenidos a lo largo de los años a proporcionado la posibilidad de determinar la influencia de diferentes parámetros en la estanquidad del edificio. Los parámetros que más influyen en el comportamiento

del edificio son el año de construcción, su tamaño, su localización, la presencia de conductos o el tipo de construcción. Entre los factores citados, los más importantes son el año de construcción y el tamaño del edificio. Los análisis de regresión realizados utilizando estas mediciones, han dado como resultado que se pueda predecir el valor medio de las fugas de aire partiendo del año de construcción del edificio y su tamaño. El análisis del resto de variables y la determinación de su influencia en la predicción de las fugas también ha sido analizado, ninguno de ellos a supuesto un cambio significativo en el resultado.

El año de construcción del edificio define el desgaste que haya podido sufrir, lo cual provoca el aumento de las fugas de aire. Se debe tener en cuenta, en este sentido, la posible variación o evolución en la construcción de edificios a lo largo de los años, que puede ser consecuencia de cambios en la normativa referida a la edificación. De todas formas, las construcciones más recientes presentan una mayor capacidad para resistir la influencia del paso del tiempo.

En cuanto a la influencia de la geometría, aumentan las fugas de aire a medida que aumenta la complejidad del edificio. La complejidad del edificio se define como la suma de la longitud de las juntas entre paredes, suelo y techo dividido por el área de la envolvente.

La localización del edificio también afecta a la estanquidad del mismo, las construcciones en climas severos son más estancas que en climas más cálidos. Esto se debe a la necesidad de la conservación de la energía y al mantenimiento del confort térmico.

## 6

# Mediciones del caudal aire debido a infiltraciones

Las técnicas de medición de las infiltraciones de aire son necesarias para comprender su comportamiento en edificios ya construídos. La información que se obtiene a partir de este tipo de ensayos sirve para valorar cuantitativamente las características del movimiento de aire en el interior de los edificios.

La progresiva mejora de los equipos utilizados en la medición de infiltraciones de aire ha supuesto el desarrollo de nuevas técnicas y métodos para su determinación, así como una mayor precisión en las mediciones realizadas, y por tanto una mayor fiabilidad en los resultados obtenidos.

Los nuevos métodos desarrollados permiten incluso cuantificar el aire intercambiado entre zonas internas del edificio, la transferencia de aire. También se puede determinar la localización de las fugas de aire y su distribución. La información que se obtiene a partir de estas técnicas y métodos de medida sirven como datos de entrada de modelos de infiltración y ventilación existentes, así como para validar los resultados que se obtienen a partir de estos modelos.

### 6.1 Medición de las infiltraciones

La medición directa de las infiltraciones de aire que se producen en un local se realiza mediante la utilización de métodos de gases trazadores. El procedimiento

para cada uno de los métodos se presenta en la Norma UNE-EN ISO 12569. Las técnicas de gases trazadores se basan en la inyección controlada de una cantidad de gas inerte, se registra la evolución de la concentración de dicho gas durante un periodo de tiempo, y se realizan los balances de masa pertinentes para determinar el caudal de aire intercambiado por una zona con otras y el exterior. Los tres métodos de ensayo utilizados son la caída de concentración o dilución del gas trazador, el método de la inyección constante y el método de la concentración constante. Aunque existen otras técnicas asociadas al uso de equipos de gases trazadores, éstas quedan fuera de este ámbito de aplicación.

De todas formas esta norma internacional, sólo describe el uso de la caída de la concentración del gas trazador y el método de la concentración constante para determinar la renovación de aire en una zona única. En la figura 6.1 se presenta un esquema simplificado de un sistema de gas trazador basado en la espectroscopía fotoacústica.

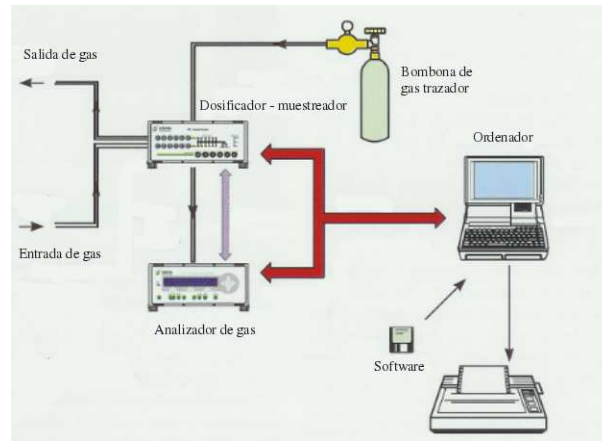


Figura 6.1: Esquema del método caída de concentración.

En la tabla 6.1 se presenta la metodología a seguir para un ensayo de caída de concentración.

Tabla 6.1: Procedimiento requerido para el método de caída de concentración.

<i>Paso</i>	<i>Acción</i>
1	Medición de la concentración de fondo del gas trazador
2	Inyección del gas trazador en el local
3	Mezcla uniforme del gas trazador
4	Medición de la evolución de la concentración del gas
5	Repetición de los pasos 1, 2, 3 y 4

Para llevar a cabo este método, es necesario registrar la temperatura in-

terior en todas las partes de la zona analizada, y comprobar el estado de los sistemas de ventilación y las aperturas de la envolvente. Se debe registrar igualmente la temperatura exterior, velocidad y dirección del viento con datos de la estación meteorológica más próxima o mediante una estación meteorológica transportable, y determinar el volumen de la zona.

Los resultados se representan en un gráfico, siendo éste como el que se muestra en la figura 6.2:

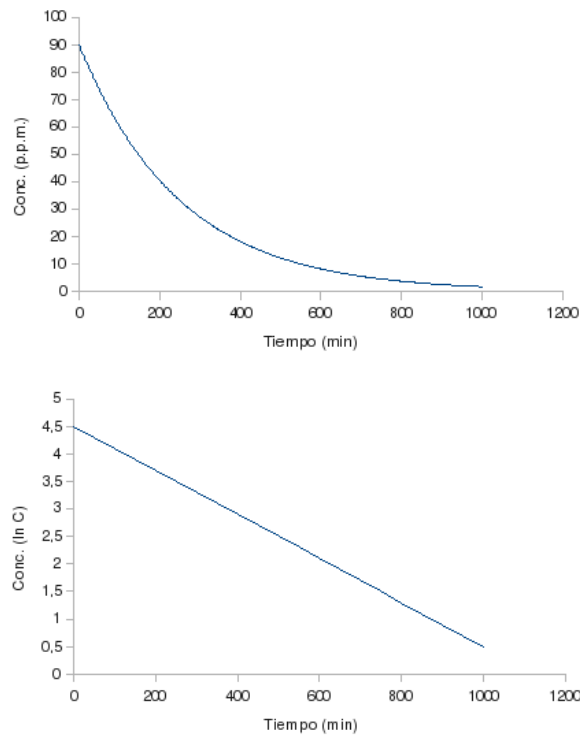


Figura 6.2: Resultados típicos de un ensayo de gas trazador. Método de caída de la concentración.

$$Q = V \cdot \frac{\ln C(t_0) - \ln C(t_i)}{t} \quad (6.1)$$

$C(t_0)$  → Concentración del gas trazador en el instante  $t_0$ .

$C(t_i)$  → Concentración del gas trazador en el instante  $t_i$ .

$t$  → Intervalo de tiempo entre  $t_0$  y  $t_i$ .

Si los procedimientos son seguidos correctamente y los requisitos de este método de ensayo se cumplen, la renovación de aire del local se puede determinar con una precisión del 10% de su valor real. La precisión se ve afectada por,

- Procedimientos de inyección y distribución del gas en el local.
- Muestreo del aire en el interior de la zona.
- Cambios en el viento y la temperatura ambiental.
- Determinación de la concentración del gas trazador.

Mediante la aplicación de técnicas de gases trazadores también se puede llevar a cabo la medición del flujo de aire entre zonas. Definidas las  $n$  zonas del edificio (en el caso de una vivienda, cada local puede definirse como zona) es necesario evaluar la concentración del gas en cada zona. Para cada zona se define el balance de masa, teniendo en cuenta que el aire pasa hacia el exterior y hacia otras zonas. Considerando nula la concentración de fondo del gas trazador, la expresión que representa el balance de masa queda de la siguiente manera:

$$V_i \cdot \frac{dc_i}{dt} = G_i + \sum_{j=1}^n Q_{ij} \cdot c_j \cdot (1 - \delta_{ij}) - Q_{ei} \cdot c_i - \sum_{j=1}^n Q_{ji} \cdot c_i \cdot (1 - \delta_{ij}) \quad (6.2)$$

$V_i$  → Volumen interno de la zona  $i$  [ $m^3$ ].

$c_i$  → Concentración del gas trazador en la zona  $i$  [p.p.m.].

$c_j$  → Concentración del gas trazador en la zona  $j$  [p.p.m.].

$G_i$  → Inyección del gas trazador en la zona  $i$  [ $\frac{cm^3}{s}$ ].

$Q_{ij}, Q_{ji}$  → Tasa del aire filtrado o flujo de aire desde  $j$  a la zona  $i$ , y desde la zona  $i$  a la zona  $j$  [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$Q_{ei}$  → Flujo de aire desde la zona  $i$  al exterior [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$\delta_{ij}$  → Delta de Kronecker, si  $i \neq j$  vale 0 y si  $i = j$  vale 1.

Esta ecuación no se puede resolver debido a que hay más variables desconocidas que ecuaciones. Para tratar de determinar los caudales de aire entre las

distintas zonas es necesario definir una metodología concreta, además de definir balances de masa. Los balances de masa para cada zona tienen la siguiente expresión:

$$Q_{ei} + \sum_{j=1}^n Q_{ji} = Q_{ie} + \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (6.3)$$

Se pueden definir distintas metodologías, entre las que se citan las siguientes:

- Utilizar el método de inyección constante mediante el uso de gases trazadores en una de las zonas y registrar la concentración del gas trazador en todas las zonas, repetir las mediciones para  $n$  diferentes caudales de inyección constante en la zona.
- Utilizar el método de la caída de la concentración en una de las zonas, midiendo las concentraciones de todas las zonas. Hay aplicar el mismo procedimiento en cada zona.
- Utilizar  $n$  gases trazadores, uno para cada zona. Se registra la evolución de la concentración de cada gas en cada zona.

## 6.2 Medición de la estanquidad

Se trata de evaluar la estanquidad, y por lo tanto la resistencia al paso del aire, de la envolvente de un edificio o de un componente del edificio (p.e. puertas y ventanas) sin la influencia de las condiciones ambientales.

### 6.2.1 Envolvente del edificio

Existen dos métodos que permiten determinar las características de la envolvente de un edificio frente a las infiltraciones. El primero ya ha sido citado en un apartado anterior, se trata del método “puerta – ventilador” que se aplica presurizando o despresurizando de forma constante en local de ensayo, el segundo aplica una presurización dinámica en el edificio, se trata de una técnica mucho más compleja que la anterior. El primero ha sido utilizado durante muchos años y su ensayo es exigido por la normativa de numerosos países, el segundo en cambio, ha sido desarrollado recientemente y todavía no está muy extendido, probablemente debido a que se trata de una técnica más compleja e inadecuada para grandes espacios.

### Método de presurización por medio de ventilador

Su ensayo se define mediante la Norma UNE-EN 13829:2000. Este método consiste en la presurización del edificio y en la medición del caudal de aire necesario para obtener la diferencia de presión interior/exterior resultante. El equipamiento necesario es un ventilador de velocidad variable que se utiliza para establecer la diferencia de presión interior/exterior y un sistema para medir la diferencia de presiones interior/exterior. Esta unidad está comercialmente disponible. En la figura 6.3 se muestra una fotografía del equipo.



Figura 6.3: Foto de equipo puerta-ventilador.

Poniendo como ejemplo el caso de una vivienda, el local ensayado necesita ser preparado para llevar a cabo el ensayo. Para ello, es necesario que todas las puertas interiores permanezcan abiertas durante el mismo, y que todas las ventanas y puertas exteriores permanezcan cerradas, así como los conductos de ventilación. El dispositivo puerta-ventilador se ubica en la puerta exterior, la cual cierra de forma estanca. Una vez que la envolvente está preparada, se acciona el ventilador y se registran el caudal de aire impulsado o extraído por el mismo, para las diferencias de presión definidas.

Para aplicar este método, al igual que en el caso de la presurización dinámica, es necesario que el total del edificio o la parte del mismo que se pretenda analizar se configure para que responda a la presurización como una única zona. Esto significa que la presión dentro de la zona analizada debe ser uniforme. Para

ello, hay que abrir todas las puertas interiores.

Hay que tener en cuenta que las condiciones ambientales pueden influir en el desarrollo del ensayo. Es por ello que se debe tener en cuenta que, si el producto de la diferencia de temperatura del aire interior/externo en  $K$ , multiplicado por la altura de la envolvente del edificio en  $m$ , da un resultado mayor que  $500 m \cdot K$  no es probable que se presenten unas condiciones adecuadas para la realización del ensayo. En cuanto al efecto del viento, si la velocidad del viento meteorológico es superior a  $6 m \cdot s^{-1}$  o un valor de 3 en la escala de Beaufort, no es probable que se presenten unas condiciones adecuadas para la realización del ensayo. Se deduce de esto que, es necesario registrar las temperaturas interior y exterior del edificio antes, durante y después del ensayo, y determinar la fuerza del viento por medio de una valoración visual de árboles, agua, etc. y definir el rango en la escala de Beaufort, tabla 6.2. De todas formas es necesario determinar las condiciones de flujo-cero para valorar si el ensayo es válido o no, antes y después de realizar el ensayo de puerta-ventilador.

Tabla 6.2: Escala Beaufort para la definición de la fuerza del viento.

<i>Número de Beaufort</i>	<i>Nombre</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>	<i>Descripción</i>
0	Calma	menos de 0,45	calma; el humo se desplaza verticalmente
1	Aire ligero	de 0,45 a 1,34	la dirección del viento se muestra por el humo, pero no por las veletas
2	Brisa ligera	de 1,8 a 3,1	el viento da en la cara, susurro de hojas, la veleta corriente se mueve por el viento
3	Brisa suave	de 3,6 a 5,4	hojas y pequeñas ramas en constante movimiento; el viento despliega una bandera ligera
4	Brisa moderada	de 5,8 a 8	alcanza el polvo y el papel perdido; pequeñas ramas son movidas
5	Brisa fresca	de 8,5 a 10,7	pequeños árboles con hojas empiezan a balancearse; pequeñas olas con cresta en charcas o balsas de agua
6	Brisa fuerte	de 11,2 a 13,9	grandes ramas en movimiento; cables de teléfono silbando; los paraguas se usan con dificultad
7	Vendaval moderado	de 14,3 a 17	el conjunto de los árboles en movimiento; dificultad para caminar contra el viento
8	Vendaval fuerte	de 17,4 a 20,6	rotura de las pequeñas ramas de los árboles generalmente impide la continuación de actividades

Para reducir la influencia de las condiciones ambientales, tales como la fluctuación del viento, es necesario que la diferencia de presiones tenga un valor mínimo de 10  $Pa$ , la diferencia de presión más alta depende de las dimensiones del edificio ensayado. Estas diferencias de presión son bastante más elevadas que las que se producen por motivo de la diferencia de temperatura y por el efecto del viento.

- Viviendas individuales y otros edificios pequeños

La diferencia de presión más alta debe ser por lo menos de 50  $Pa$ , pero se recomienda que se tomen lecturas de hasta 100  $Pa$ , para obtener una mayor precisión de los resultados.

- Edificios grandes (volúmenes superiores a 4000  $m^3$ )

Si es posible la diferencia de presiones más alta debe ser como mínimo igual que en el caso anterior. Cabe señalar que en el caso de este tipo de edificios es posible que los equipos utilizados no sean capaces de generar esa diferencia de presión. Se puede resolver este problema utilizando un equipo adicional para aumentar la capacidad total de ensayo, o que el ensayo se lleve a cabo definiendo una presión máxima menor. Como límite inferior para este último caso se define una diferencia de 25  $Pa$ .

Para todos los casos deben registrarse cinco puntos de dato, tratando que la separación sea aproximadamente igual. Es importante indicar que se consiguen datos más precisos con diferencias de presión más elevadas.

Por la naturaleza de las grietas, la resistencia al paso del aire varía en función de que si se presuriza el interior de la envolvente o se despresuriza. Es por ello que se realizan ambos ensayos y se calcula el valor medio del caudal necesario para obtener la misma diferencia de presión en valores absolutos.

Debido a que se trata de una técnica muy simple, resulta muy útil para evaluar la influencia de reformas y correcciones llevadas a cabo en la envolvente del edificio (renovación de puertas y ventanas, p.e.), así como mediante la utilización de termografías o test mediante humos en combinación con este ensayo se puede valorar cualitativamente la distribución de las fugas de aire.

Los resultados de la tasa del aire filtrado de los ensayos deben ser comparables para distintas envolventes, esto indicará lo estanco que es la envolvente analizada con respecto a otras. Para ello se definen distintos valores de diferencias de presión de referencia, siendo los más utilizados los valores que tasa

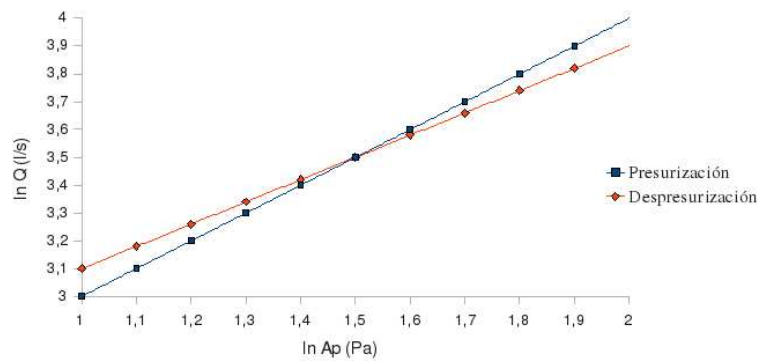


Figura 6.4: Representación gráfica de resultados del ensayo puerta-ventilador para presurización y despresurización.

del aire filtrado referidos a 50 Pa y 4 Pa. La diferencia de presión de 50 Pa es con diferencia el más utilizado. Esto se debe a que es lo suficiente baja como para que pueda ser alcanzada por un equipo estándar de puerta-ventilador, y es lo suficientemente alta como para que los resultados sean independientes con respecto a las condiciones ambientales. En cuanto a la diferencia de presión de 4 Pa, se utiliza para la definición del área efectiva de fugas (*ELA*, *effective leakage area*). Esta área representa el área equivalente a través de la cual pasa la misma cantidad de aire para la misma diferencia de presión de referencia, en este caso 4 Pa. Se define esta diferencia de presión debido a que se trata de una presión representativa en comparación con la provocada por efecto de las condiciones ambientales.

$$Q = ELA \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_r}{\rho}} \quad (6.4)$$

Para terminar, comentar que las diferencias de presión de 25 Pa y 1 Pa también son utilizadas. La primera de ellas como referencia en aquellos casos en los que no pueda alcanzarse el valor de 50 Pa. El segundo de ellos para definir el coeficiente de flujo (tasa de la ley de potencias).

Las tasas del aire filtrado medidas para las diferentes diferencias de presión se normalizan dependiendo del volumen interno del edificio ( $V$ ), el área de la envolvente ( $AE$ ) y el área neta del suelo ( $AF$ ).

- Volumen interno ( $V$ ): es el volumen de aire en el interior de los edificios medidos o parte de los mismos. Se calcula multiplicando el área neta del

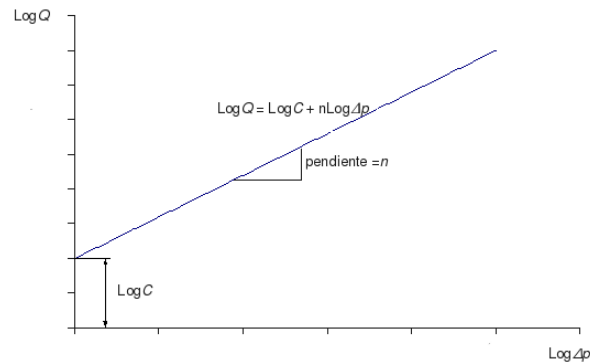


Figura 6.5: Variación del caudal de ventilación a distintos niveles de diferencia de presión en una medición con puerta-ventilador.

suelo con la media de la altura neta del techo. El volumen del mobiliario no se tiene en cuenta ( $m^3$ ).

- Área de la envolvente ( $A_E$ ): se trata de la parte de la envolvente en la que se ha medido la permeabilidad. Es el área total de todos los suelos, paredes y techos que bordean el volumen interno del edificio, o parte del mismo. No se deben restar a esta área la unión de paredes internas ( $m^2$ ).
- El área neta del suelo ( $A_F$ ): se trata del área total del suelo que pertenece al volumen interno ensayado ( $m^2$ ).

Estos valores normalizados que permiten comparar edificios de diferentes dimensiones entre sí, son los que siguen:

- La permeabilidad al aire:

$$q_{50} = \frac{Q_{50}}{A_E} \quad (6.5)$$

- Tasa específica del filtrado:

$$W_{50} = \frac{Q_{50}}{A_F} \quad (6.6)$$

Los resultados que se obtienen de los ensayos realizados sirven para comprobar que las renovaciones medias de aire por hora (*ACH*, *air change per hour*) se relacionan con la tasa del aire filtrado para una diferencia de presión de 50 *Pa* de la siguiente manera para viviendas:

$$ACH = \frac{Q_{50}}{20 \cdot V} \quad (6.7)$$

$Q_{50} \rightarrow$  Aire filtrado para una diferencia de presión de 50 *Pa*  $\left[\frac{m^3}{h}\right]$ .

Para el caso de grandes edificios no domésticos, experimentalmente se observa que

$$ACH = \frac{Q_{50}}{60 \cdot A_E} \quad (6.8)$$

### Presurización dinámica

Para que el método anterior sea preciso es necesario que el ensayo se realice bajo condiciones climáticas estables. Condiciones ambientales cambiantes, como viento racheado, producen resultados que no son repetibles debido a la superposición del efecto fluctuante del viento y la acción del ventilador. Por ello, es necesario que la diferencia de presión interior/exterior sea como mínimo de 10 *Pa* para la utilización del dispositivo puerta-ventilador. Es por ello que existe incertidumbre a la hora de definir el área de las fugas de aire para bajas diferencias de presión, ya que en estos casos normalmente es necesario extrapolar los resultados obtenidos para diferencias de presión superiores.

El método que se presenta permite determinar la permeabilidad del edificio para diferencias de presión más bajas ( $\approx 4$  *Pa*). Se presenta el esquema del sistema en la figura 6.6.

Se crea una diferencia de presión periódica en el interior de la envolvente del edificio mediante el movimiento sinusoidal del émbolo. La diferencia de presión creada mediante el émbolo puede ser diferenciada con respecto a la fluctuación aleatoria causada por el efecto de las condiciones ambientales cambiantes. La permeabilidad de la envolvente afecta tanto a la amplitud como a la fase del cambio de presión en el edificio debido a la acción del viento, ya que si el edificio fuese completamente impermeable, la diferencia de presión producida sería debida simplemente al movimiento del émbolo. Esto significa que, cualquier

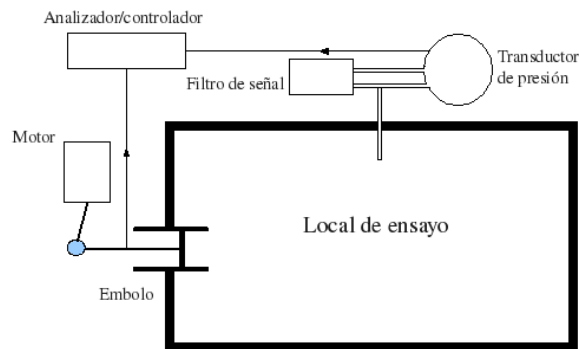


Figura 6.6: Esquema del sistema de presurización dinámica.

desviación con respecto a la fluctuación generada por el émbolo, se debe al efecto de las fugas de aire a través de la envolvente.

Esta técnica ha sido utilizada en una serie de viviendas para comparar sus resultados con los conseguidos mediante la utilización del dispositivo puertaventilador. Los valores de permeabilidad obtenidos mediante el método dinámico siempre han sido menores que los obtenidos por el método estático.

## 6.2.2 Componentes del edificio

Así como de la envolvente en su conjunto, también se pueden obtener valores de la permeabilidad de los elementos que lo componen. Para ello es necesario un equipo compuesto por elementos similares a los utilizados para el análisis de la envolvente.

Tal y como se puede apreciar en la figura 6.7, es necesario crear una cámara de aire alrededor del componente que se desea ensayar, la cámara de aire se coloca en la parte interior del componente. Para aplicar la diferencia de presión se utiliza un ventilador.

Estos componentes pueden ser ensayados en laboratorio o *in situ*. Los ensayos en laboratorios presentan como ventaja, que se pueden analizar una gran cantidad de elementos bajo situaciones en las que los ensayos no se ven afectados por la variación de las condiciones ambientales.

Como desventaja se puede decir que, los resultados conseguidos para los mismos componentes varían para las mediciones en laboratorio e *in situ*.

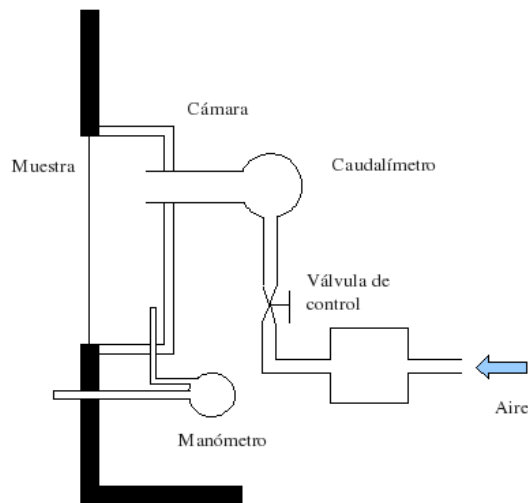


Figura 6.7: Esquema para el ensayo de componentes mediante el sistema puertaventilador.

El procedimiento de ensayo de muestras en laboratorios se define en la Norma UNE-EN 1026, en la que se indica que la temperatura ambiente y la humedad relativa en el entorno de la muestra de ensayo debe estar en un rango entre  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y entre 25% y el 75%. Hasta los  $300\text{ Pa}$ , la presión de ensayo se aplica en escalones de  $50\text{ Pa}$  y a partir de este valor en escalones de  $150\text{ Pa}$ . El resultado de la permeabilidad al aire debe darse con una precisión del 10%.

Para llevar a cabo el ensayo, es necesario determinar cual es la permeabilidad al aire de la cámara. Si se conoce la permeabilidad al aire de la misma, se admite que es nula si ésta es inferior al 5% de la permeabilidad máxima que se permite para el tipo de clasificación de la muestra de ensayo. Si no se conoce la permeabilidad de la cámara, hay que medirla. Para medirla, se asegura la estanquidad de las juntas de la muestra de ensayo, y se mide la permeabilidad al aire de la cámara de ensayo con presiones positivas. Si se va a realizar también el ensayo de la muestra para diferencias de presión negativas, habrá que medir la permeabilidad al aire de la cámara para diferencias de presión negativas.

Normalmente sólo se realizan ensayos para diferencias de presión positivas. En el caso de que se requiera ensayar la muestra también para diferencias de presión negativas, el procedimiento es el mismo.

Se abren y se cierran al menos una vez todas de las partes practicables de la muestra de ensayo. Una vez cerradas, se aplican 3 pulsaciones de presión,

que serán un 10% superiores a la presión máxima definida para el ensayo o de 500 Pa, se elegirá el valor más alto. El tiempo para llegar a la presión de cada pulso ha de ser por lo menos de 1 s, y la presión debe mantenerse por lo menos durante 3 s. Una vez realizada la preparación de la muestra se procede a aplicar los escalones de presión definidos, y a medir y registrar la permeabilidad al aire en cada escalón. La duración de cada escalón debe ser tal que permita que la presión del ensayo se estabilice antes de medir la permeabilidad.

Realizadas las mediciones de los caudales de aire para cada escalón de diferencia de presión, estos caudales o tasas de aire  $Q_x$  deben adaptarse a las condiciones normales ( $T_0 = 293\text{ K}$ ;  $P_0 = 101,3\text{ kPa}$ ) para determinar el valor  $Q_0$  de cada escalón. Esto se hace considerando el aire un gas ideal.

Para la muestra ensayada, la permeabilidad al aire en cada escalón de diferencia de presión es igual a la permeabilidad total del aire menos la permeabilidad al aire de la cámara, si ésta no es nula. Utilizando la longitud de junta de la muestra y la superficie total se calcula la permeabilidad al aire en  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}\cdot\text{m}}\right)$  y  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}\cdot\text{m}^2}\right)$ , respectivamente. La permeabilidad al aire se expresa en un gráfico en función de la longitud de junta y la superficie total para escalón de diferencia de presión.

Utilizando los resultados conseguidos mediante este ensayo se clasifican las puertas y ventanas según una clase. Las permeabilidades al aire de referencia están definidas para la diferencia de presión de 100 Pa. Para otros escalones de diferencia de presión, hay que buscar la equivalencia por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_x = Q_{100} \cdot \left(\frac{p_x}{100}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6.9)$$

$Q_x \rightarrow$  Permeabilidad al aire de la muestra a una diferencia de presión  $p_x \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ .

$Q_{100} \rightarrow$  Permeabilidad al aire de la muestra a una diferencia de presión 100 Pa  $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ .

La clase se determina según las tablas 6.3 y 6.4, y el diagrama 6.8.

Se pueden dar distintas situaciones a la hora de clasificar la muestra, ya que esto se hace dependiendo del valor de la permeabilidad por unidad de longitud y por unidad de superficie.

Tabla 6.3: Permeabilidades al aire de referencia a 100 Pa y presiones máximas de ensayo, relacionadas con la superficie total, para las clases 1 a 4.

<i>Clase</i>	<i>Permeabilidad al aire de referencia a 100 Pa</i> $m^3/(h \cdot m^2)$	<i>Presión máxima de ensayo</i> (Pa)
0	No ensayada	No ensayada
1	50	150
2	27	300
3	9	600
4	3	600

Tabla 6.4: Permeabilidades al aire de referencia a 100 Pa y presiones máximas de ensayo, relacionadas con la longitud de las juntas de apertura, para las clases 1 a 4.

<i>Clase</i>	<i>Permeabilidad al aire de referencia a 100 Pa</i> $m^3/(h \cdot m^2)$	<i>Presión máxima de ensayo</i> (Pa)
0	No ensayada	No ensayada
1	12,50	150
2	6,75	300
3	2,25	600
4	0,75	600

- Que dé la misma clase para los dos.
- Dos clases adyacentes. La clase se clasifica según la clase más favorable al paso del aire, por lo tanto según la clase con mayor permeabilidad al paso del aire.
- Una diferencia de dos clases. La muestra se clasifica en la clase media.
- Una diferencia de más de dos clases. La muestra ensayada no se clasifica.

### 6.2.3 Otros métodos de medida de la estanquidad

Se han presentado distintos métodos, los cuales mediante un dispositivo puerta-ventilador miden valores de la permeabilidad de la envolvente del edificio o parte del mismo, así como los componentes que incluyen estos, de forma independiente. De todas formas existe una serie de métodos que permiten definir la permeabilidad al paso del aire de las interconexiones entre las zonas que componen en edificio completo. En general, estos métodos se aplican utilizando varios dispositivos puerta-ventilador simultáneamente.

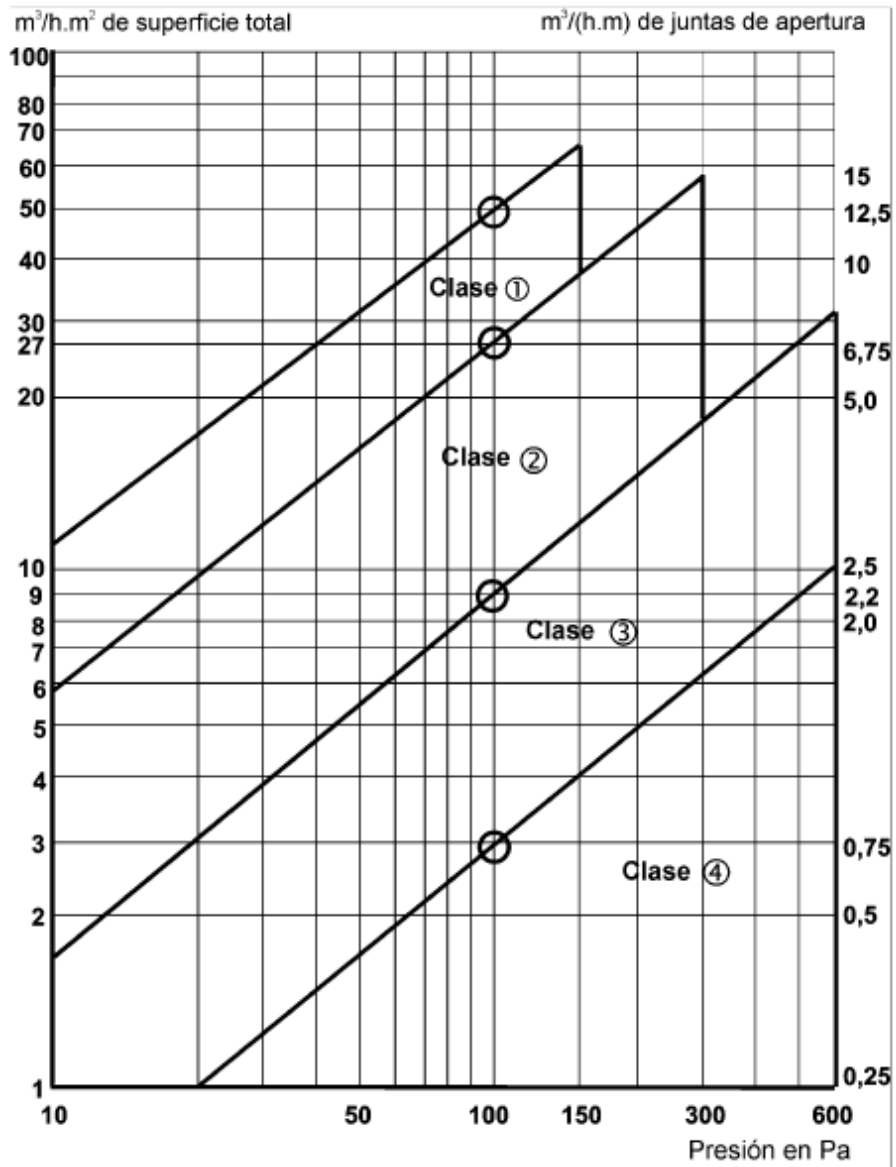


Figura 6.8: Clasificación de puertas y ventanas según permeabilidad.

### Medición de la permeabilidad entre zonas

Mediante la utilización de dos equipos puerta-ventilador es posible medir valores de la permeabilidad entre zonas adyacentes (por ejemplo la permeabilidad

al paso del aire de una pared). La técnica consiste en mantener una diferencia de presión constante (p.e.  $50 Pa$ ) entre una de las zonas y el exterior, mientras que simultáneamente se va variando la presión de la segunda zona. De esta forma, se determina el caudal de aire introducido en la segunda zona para mantener una diferencia de presión requerida entre estas dos zonas. Teniendo en cuenta que la presión entre la primera zona y el exterior se mantiene constante, el caudal de aire desde esta zona hacia el exterior no variará. Por lo tanto, es necesario determinar primero cuanto es el valor de este caudal de aire, para ello será necesario definir la situación en la que la diferencia de presión entre las dos zonas sea nula. De esta forma se asegura que todo el aire que se impulsa mediante los ventiladores sale hacia el exterior. Si la diferencia de presión interior/exterior en cada zona es la misma que se vaya a utilizar para el resto del ensayo para la primera zona, se habrá medido el caudal constante entre la primera zona y el exterior.

Siendo esto así, variando la diferencia de presión entre las dos zonas, se producirá un flujo de aire desde la zona de mayor presión hacia la de menor presión. Esto supone que para mantener la misma diferencia de presión entre la primera zona y el exterior será necesario variar el caudal del ventilador de esta primera zona. La diferencia entre el caudal hacia el exterior medido para la diferencia de presión nula entre las dos zonas, y el nuevo caudal de aire necesario según la diferencia de presión entre zonas para la primera zona, definirá el caudal de aire que atraviesa la pared para la diferencia de presión entre zonas dada.

### **Many–Pressure–State technique**

Esta técnica utiliza tantos dispositivos puerta-ventilador como zonas se hayan definido dentro del edificio. De esta forma pueden impulsarse o extraerse los caudales de aire precisados en cada una de ellas. Esto hace que se establezca una distribución de diferencias de presión en el interior del edificio entre las distintas zonas. Aplicando distintas combinaciones de caudales en el interior de las zonas, se conseguirá una distribución determinada de diferencias de presión entre zonas, para cada caso. La gran cantidad de datos podrá utilizarse para determinar mediante balances de masa, los valores de permeabilidad al paso de aire de las distintas interconexiones entre zonas.

# 7

## Cálculo de las infiltraciones de aire

Para poder calcular el aire filtrado en un edificio o entre distintos locales que componen el edificio hay que conocer las siguientes variables:

- La velocidad del viento y su dirección.
- La temperatura interna y externa del edificio.
- La posición y las características del flujo de todas las aberturas.
- La distribución de la presión sobre la envolvente de todo el edificio para la dirección del viento considerada.

En la práctica es muy difícil, o imposible, determinar con precisión todos estos parámetros, por lo que es necesario realizar simplificaciones para alcanzar un resultado. Hay dos tipos de modelos que pueden ser utilizados para calcular la tasa del aire filtrado: los modelos empíricos y los modelos tipo “*network*”.

### 7.1 Modelos empíricos

Son modelos simples basados en datos empíricos que sirven para estimar la tasa del aire infiltrado en edificios de una única zona, tales como viviendas, pequeña

industria y edificios comerciales. Estos métodos se consideran adecuados para dimensionar sistemas HVAC.

### Método ASHRAE

Se trata de una ecuación empírica que combina el flujo de aire debido a la diferencia de temperatura y el efecto del viento, y se utiliza para calcular las infiltraciones de aire a través de toda la envolvente. Su aplicación se basa en el conocimiento del área efectiva de fugas de aire o coeficiente de la tasa de filtrado para una diferencia de presión de 4 Pa y de los valores de una serie de constantes empíricas que se obtienen a partir de tablas.

$$Q = A \cdot \sqrt{a \cdot \Delta T + b \cdot v_r^2} \quad (7.1)$$

$A$  → Área efectiva de fugas (ELA) para la envolvente de todo el edificio para una presión de referencia de 4 Pa [ $cm^2$ ].

$a$  → Coeficiente que define el efecto de la diferencia de temperatura  $\left[ \frac{m^6}{h^2 \cdot cm^4 \cdot K} \right]$ .

$b$  → Coeficiente que define el efecto del viento  $\left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{h^2 \cdot cm^4} \right]$ .

$\Delta T$  → Diferencia de temperatura media interior/exterior [K].

$v_r$  → Velocidad media del aire medida en la estación meteorológica más cercana  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

El valor del coeficiente  $a$  depende de la altura del edificio: para un edificio de una única planta 0,00188, para un edificio de dos plantas 0,00376 y para un edificio de tres plantas 0,00564. El coeficiente que valora el efecto del viento depende de lo resguardado que esté el edificio del viento y de su altura.

Tabla 7.1: Coeficiente que define el efecto del viento.

Grado de resguardo	Plantas del edificio		
	una planta	dos plantas	tres plantas
I	0,00413	0,00544	0,0064
II	0,00319	0,00421	0,00495
III	0,00226	0,00299	0,00351
IV	0,00135	0,00178	0,00209
V	0,00041	0,00054	0,00063

Tabla 7.2: Definición del grado de resguardo.

<i>Grado de resguardo</i>	<i>Descripción</i>
I	Sin resguardar, no existen obstrucciones
II	Bajo nivel de resguardo o protección
III	Resguardo medio, debido a la cercanía de edificios de misma altura
IV	Elevado nivel de resguardo, por la cercanía de edificios más altos
V	Muy elevado nivel de resguardo, por la cercanía de edificios mucho más altos

## 7.2 Modelos tipo “network”

Son modelos desarrollados teóricamente, por lo que resultan más rigurosos que los modelos empíricos. Son capaces de estimar la tasa de aire filtrado, tanto para una única zona como para analizar el comportamiento de varias zonas conjuntamente. Una única zona se define como aquella que no tiene particiones internas, y por lo tanto las condiciones permanecen uniformes en ella. Este tipo de edificios raramente existen en la realidad, aunque se puede simplificar de esta forma un edificio, si las particiones internas no afectan de manera significativa al movimiento del aire en el interior del mismo. Será necesario realizar un análisis multizona en aquellos edificios en los que se deban definir zonas bien diferenciadas.

### 7.2.1 Modelos unizona

En un modelo unizona, la descripción de la zona se realiza definiendo la presión y la temperatura como uniforme en el interior de la misma. Este nodo de presión interno se conecta a uno o varios nodos de presión externos.

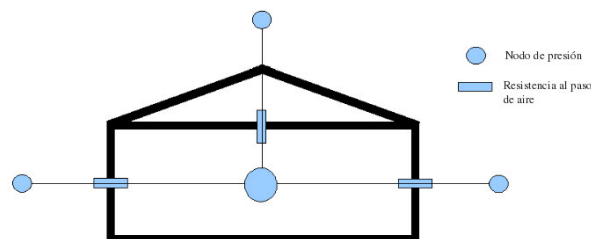


Figura 7.1: Representación gráfica de modelo unizona.

El esfuerzo necesario para resolver este tipo de modelos, es menor que el

necesario para resolver un modelo multizona, pero no son tan precisos. Se presentan dos modelos validados por la asociación AIVC para un amplio rango de viviendas y condiciones climáticas.

### Modelo de Building Research Establishment (modelo BRE)

Permite calcular el aire infiltrado para las condiciones del interior y exterior en función de la permeabilidad de la envolvente, la cual se determina mediante el uso del dispositivo puerta-ventilador. La expresión utilizada para ello es la siguiente:

$$Q_t = Q_p \cdot \left[ \frac{\rho_e \cdot v^2}{\Delta p_p} \right]^n \cdot F_t(Ar, \theta) \quad (7.2)$$

$Q_t$  → Tasa del aire filtrado debido al efecto del viento y la diferencia de temperatura  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

$Q_p$  → Tasa del aire filtrado obtenida mediante el ensayo puerta-ventilador para la diferencia de presión interior/exterior definida, normalmente  $\Delta p = 50 \text{ Pa}$   $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

$\rho_e$  → Densidad del aire exterior  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ .

$v$  → Velocidad del viento a la altura de la cumbrera de la cubierta  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

$n$  → Exponente de flujo obtenido a partir del ensayo puerta-ventilador [-].

$F_t$  → Valor que define la infiltración, depende del número de Arquímedes y la dirección del viento.

$\theta$  → Dirección del viento [°].

$Ar$  → Número de Arquímedes [-].

$$Ar = \frac{\Delta T \cdot g \cdot h}{T_i \cdot v^2} \quad (7.3)$$

$\Delta T$  → Diferencia de temperatura interior/exterior [K].

$T_i$  → Temperatura interior [K].

$h \rightarrow$  Altura del espacio ventilado [m].

Se pueden calcular los flujos de aire filtrados por cada uno de los efectos por separado. El caudal debido al efecto del viento:

$$Q_t = Q_p \cdot \left[ \frac{\rho_e \cdot v^2}{\Delta p_p} \right]^n \cdot F_w(\theta) \tag{7.4}$$

$F_w \rightarrow$  Función de la dirección del viento [-].

Y el debido al efecto de la diferencia de temperatura interior/exterior:

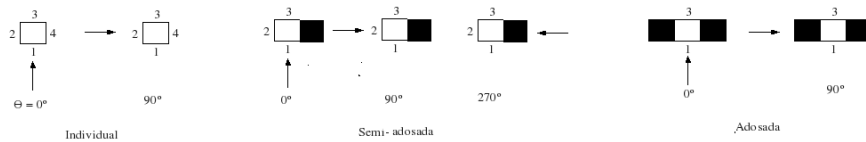
$$Q_t = Q_p \cdot \left[ \frac{\Delta T \rho_e \cdot g \cdot h}{T_i \cdot \Delta p_p} \right]^n \cdot F_s \tag{7.5}$$

$F_s \rightarrow$  Función de la diferencia de temperatura [-].

La tabla 7.3 presenta los valores de estos parámetros para el cálculo del caudal de infiltraciones mediante este método.

Tabla 7.3: Valores de  $F_w$  y  $F_s$  para el modelo BRE.

Tipo de vivienda	n	$F_s$		$F_w$		$F_w$		$F_w$	
		(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)
Individuales	0,5	0,26	-	0,17	-	0,20	-	-	-
	0,6	0,23	0,26	0,15	0,13	0,18	0,16	-	-
	0,7	0,20	-	0,13	-	0,16	-	-	-
Semi-adosados	0,5	0,26	-	0,16	-	0,18	-	0,12	-
	0,6	0,23	0,27	0,15	0,15	0,16	0,18	0,10	-
	0,7	0,20	-	0,14	-	0,15	-	0,08	-
Adosados	0,5	0,26	-	0,20	-	0,13	-	-	-
	0,6	0,23	0,27	0,18	0,18	0,10	0,08	-	-
	0,7	0,20	-	0,16	-	0,08	-	-	-



### Modelo de Lawrence Berkeley Laboratory (modelo LBL)

La característica más importante de este modelo unizona es su simplicidad, el edificio se representa mediante un volumen rectangular. El aire que atraviesa la estructura del edificio se describe mediante la ecuación que se utiliza para definir grandes aberturas.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Tal y como se ha hecho para el modelo anterior, se calculan por separado los caudales coorespondientes a los dos efectos, viento y diferencia de temperatura. Para ello, hay que determinar el valor del área efectiva de fugas de aire ( $C_d \cdot A$ ), lo cual se hace utilizando los ensayos realizados mediante el dispositivo puertaventilador,

$$C_d \cdot A = \frac{C \cdot \Delta p^n}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_r}{\rho}}} \quad (7.6)$$

Calculado el área efectiva de las fugas de aire, se procede a calcular los caudales debidos al efecto del viento y la diferencia de temperatura. El caudal producido por motivo de la incidencia del viento será,

$$Q_w = f_w^* \cdot C_d \cdot v' \quad (7.7)$$

$f_w^*$  → Parámetro que define la incidencia del viento.

$v'$  → Velocidad del viento medida en la estación meteorológica más cercana  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

$$f_w = C' \cdot \sqrt[3]{1 - R} \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^\gamma}{\alpha' \cdot \left(\frac{H'}{10}\right)^{\gamma'}} \right] \quad (7.8)$$

El término entre corchetes define la relación entre la velocidad del aire medida a la altura de referencia y la velocidad del aire a la altura de la cumbre del edificio estudiado.

$$R = \frac{C_{d,c} \cdot A_c + C_{d,f} \cdot A_f}{C_d \cdot A} \quad (7.9)$$

$C_{d,c} \cdot A_c$  → Área efectiva de fugas de aire en el techo  $\left[m^2\right]$ .

$C_{d,f} \cdot A_f \rightarrow$  Área efectiva de fugas de aire en el suelo  $[m^2]$ .

Y el caudal producido por la diferencia de temperatura,

$$Q_s = f_s^* \cdot C_d \cdot A \cdot \sqrt{\Delta T} \quad (7.10)$$

$\Delta T \rightarrow$  Diferencia de temperatura interior/exterior  $[K]$ .

$f_s^* \rightarrow$  Parámetro que define la incidencia de la diferencia de temperatura.

$$f_s = \left[ \frac{1 + 0,5 \cdot R}{3} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{X^2}{2 - X^2} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{g \cdot H}{T_i}} \quad (7.11)$$

$$X = \frac{C_{d,c} \cdot A_c - C_{d,f} \cdot A_f}{C_d \cdot A} \quad (7.12)$$

Como ya se ha dicho, se trata de un método relativamente simple de aplicar. No obstante, es necesario conocer la distribución de los áreas de fugas en las superficies verticales y horizontales, lo cual no puede ser evaluado con ensayos estándar de tipo puerta-ventilador. De todas formas se puede definir la distribución de las fugas de aire según el porcentaje de cada una de las superficies con respecto al total de la envolvente.

## 7.2.2 Modelos multizona

Los anteriores modelos se basan en hipótesis simplificadoras de lo que es de por sí un fenómeno de gran complejidad, como consecuencia de ello su aplicación se limita a una única zona, lo cual no sirve para predecir la cantidad de aire infiltrado para una gran cantidad de edificios. Los modelos multizona, en cambio, son capaces de considerar el flujo de aire entre las distintas zonas que puedan definirse dentro del problema analizado. Para ello se define un sistema basado en una serie de nodos que representa cada zona del edificio, en cada una de las zonas se define una presión y temperatura uniformes.

Para definir el movimiento de aire entre las zonas a través de las grietas que pueda haber, en las paredes por ejemplo, se realizan conexiones entre los nodos adyacentes. Estas conexiones representan un camino para el paso del aire de una zona o otra, la cual queda definida según una resistencia al paso del aire.

La ventaja de este tipo de modelos es que son capaces de determinar el flujo de aire entre las distintas zonas que componen el edificio, lo cual los hace aplicables en el caso de grandes edificios. Las principales aplicaciones en las que se pueden utilizar estos modelos multizona son la determinación del movimiento de aire entre zonas en el interior de edificios y el transporte de contaminantes entre zonas, y su eliminación.

Esta red de nodos sólo puede ser resuelta mediante métodos iterativos mediante una sucesión de cálculos hasta alcanzar la convergencia, la cual se define mediante el balance de masa.

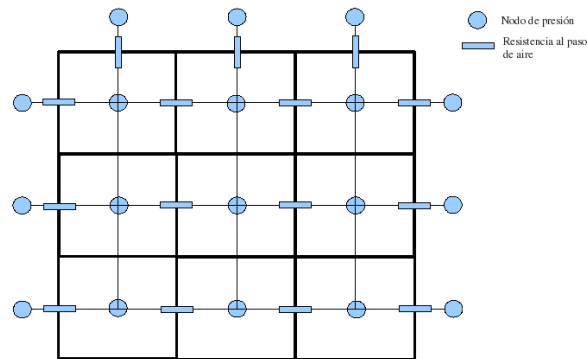


Figura 7.2: Representación gráfica de modelo multizona.

Los balances de masa se definen para cada zona de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^j \rho_i \cdot Q_i = 0 \quad (7.13)$$

Teniendo en cuenta que el caudal de aire entre nodos se definen utilizando la siguiente expresión,

$$Q_i = C_i \cdot \Delta p_i^{n_i} \quad (7.14)$$

Sustituyendo la ecuación que define el balance de masa en esta última se obtiene la siguiente:

$$\sum_{i=1}^j C_i \cdot (p_i - p)^{n_i} = 0 \quad (7.15)$$

donde  $p$  es la presión interna de la zona analizada, y el subíndice  $i$  se refiere al paso del aire desde la zona  $i$ . Para evitar potencias de valores negativos en el caso de que  $p_i < p$ , la ecuación anterior se representa de la siguiente manera,

$$\sum_{i=1}^j C_i \cdot \underbrace{|p_i - p|^{n_i}}_I \cdot \underbrace{\frac{p_i - p}{|p_i - p|}}_{II} = 0 \quad (7.16)$$

De esta forma, el término I expresa el valor absoluto de la diferencia de presión entre las dos zonas que une el paso del aire, mientras que el término II define el signo de la dirección del flujo de aire. Según el convenio de signos adoptado, el flujo de aire es positivo cuando el movimiento de aire se produce desde la zona  $i$  hasta la zona analizada, produciéndose la infiltración de aire.

Definiendo los valores  $C_i$  y  $n_i$  de cada paso de aire de la zona analizada, la ecuación 7.16 se puede resolver de forma iterativa, consiguiendo los valores de las presiones en cada nodo de presión definido.

Para calcular el caudal de aire infiltrado en cada zona será necesario hacer el siguiente cálculo para cada una de las zonas.

$$Q_t = \sum_{i=1}^j Q_i \quad (7.17)$$

El caudal de aire introducido por un sistema mecánico no equilibrado de ventilación  $Q_{fu}$  puede ser incorporado con facilidad en la ecuación 7.13:

$$\sum_{i=1}^j \rho_i \cdot (Q_i + Q_{fu}) = 0 \quad (7.18)$$

Se definirán valores negativos de  $Q_{fu}$  en el caso de que el caudal de aire definido sea de extracción, y positivo en el caso de que sea de admisión. Si el caudal de ventilación  $Q_{fu}$  se viera influido por la diferencia de presión entre zonas, éste puede ser definido en función de esta presión. En el caso de un sistema de ventilación equilibrado, el sistema de ventilación no influye sobre la distribución de presión interna de las zonas, transformándose la ecuación 7.17 en

$$Q_t = Q_{fb} + \sum_{i=1}^j Q_i \quad (7.19)$$

Hasta el momento, el análisis realizado se refiere a una única zona dentro de un edificio multizona. El procedimiento presentado se puede utilizar para calcular el aire infiltrado en una zona a través de una serie de pasos de aire definidos por su resistencia. El mismo procedimiento se puede aplicar para calcular la cantidad de aire filtrado en una serie de zonas dentro del edificio. Por lo tanto, definiendo  $m$  zonas dentro del edificio, cada una con  $j_m$  pasos de aire, el balance de masa para el conjunto del edificio quedaría de la siguiente forma:

$$\sum_{i_m=1}^{j_m} \rho_{im} \cdot Q_{im} = 0 \quad (7.20)$$

La ecuación 7.16 debe ser reescrita, obteniendo la siguiente expresión:

$$\sum_{i_m=1}^{j_m} C_{im} \cdot |p_{im} - p_m|^{n_{im}} \cdot \left[ \frac{p_{im} - p_m}{|p_{im} - p_m|} \right] = 0 \quad (7.21)$$

$C_{im} \rightarrow$  Coeficiente de flujo del paso de aire  $i$  de la zona  $m$   $\left[ \frac{m^3}{Pa \cdot s} \right]$ .

$n_{im} \rightarrow$  Exponente de flujo del paso de aire  $i$  de la zona  $m$  [-].

$p_{im} \rightarrow$  Presión de la zona adjacente a la zona  $m$ , que el paso de aire  $i$  conecta [Pa].

$p_m \rightarrow$  Presión de la zona  $m$  [Pa].

La ecuación 7.21 debe aplicarse para cada zona  $m$  para un total de  $q$  zonas, por lo que el balance de masas se transforma en

$$\sum_{m=1}^q \sum_{i_m=1}^{j_m} C_{im} \cdot |p_{im} - p_m|^{n_{im}} \cdot \left[ \frac{p_{im} - p_m}{|p_{im} - p_m|} \right] = 0 \quad (7.22)$$

En este caso, hay tantas presiones internas como zonas en el problema multizona analizado. Esto genera una serie de ecuaciones que deben resolverse antes

de calcular el caudal de aire en una zona en particular. La ventilación mecánica en cada zona se puede analizar de la misma forma presentada anteriormente, teniendo en cuenta que la admisión y la extracción pueden localizarse en distintas zonas.

Existen numerosos programas informáticos diseñados para resolver este tipo de problemas. Algunos de los software que implementan estas ecuaciones son los siguientes:

- AIDA: Modelo unizona.
- LBL: Modelo unizona.
- AIOLOS: Modelo multizona.
- COMIS: Modelo multizona.
- CONTAM: Modelo multizona.

## 8

# Bibliografía

AENOR, *UNE-EN ISO 12569 Aislamiento Térmico de los Edificios. Determinación del Cambio de Aire en Edificios. Método de Dilución de Gas Trazador*, AENOR, Madrid, 2002.

J. McWilliams, *Review of Airflow Measurements Techniques*, CA: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, 2002.

F. Allard, *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*, London, James and James, 1997, ch 3.

AENOR, *UNE-EN 13829 Aislamiento Térmico. Determinación de la Estanquidad al Aire en Edificios. Método de Presurización por medio de Ventilador*, AENOR, Madrid, 2002.

AENOR, *UNE-EN 1026 Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Método de ensayo*, AENOR, Madrid, 2000.

ASTM Standard E779-99, *Test Method for Field Measurement of Air Leakage Through Installed Exterior Windows and Doors*, American Society for Testing and Materials, PA: Philadelphia, 1999.

M.K. Herrlin and M.P. Modera, *Analysis of Errors for a Fan-Pressurization Technique for Measuring Inter-Zonal Air Leakage*, 9th AIVC Conference, Gent, Belgium, 1988.

M.H. Sherman and Rengie Chan, *Building airtightness: Research and practise*, CA: Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

P.R. Armstrong, D.L. Hadley, R.D. Stenner and M.C. Janus, *Whole Building Airflow Network Characterization by a Many-Pressure-States (MPS) Technique*, ASHRAE Transactions, 107(2):645-657; Journal Volume: 107; Journal Issue: 2, 2001.

IEA Air Infiltration and Ventilation Centre, *An Analysis and Data Summary of the AIVC's Numerical Database*, Technical Note 44, 1994.

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Infiltration and Leakage Paths in Single Family Houses*, Technical Note 27, 1990.

H.E. Feustel and A. Raynor-Hoosen, *COMIS-Fundamentals*, CA: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, 1997.



# Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón.

**Beatriz Piedecausa García.** *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

**Servando Chinchón Payá.** *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

**Miguel Angel Morales Recio.** *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

**Miguel Angel Sanjuán Barbudo.** *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

*El presente artículo analiza aspectos relacionados con los tipos de radiactividad natural presentes en el interior de las edificaciones, sus fuentes y sus influencias.*

*Más concretamente, desarrolla el estudio de la radiactividad ambiental en el interior de los espacios construidos debida a la presencia del gas radón, así como sus fuentes de origen y los niveles recomendados. Este es un artículo que se presenta como la segunda parte de un trabajo sobre radiactividad natural en los materiales de construcción, cuya primera parte hace referencia a la radiación externa de dichos materiales y se publica por los mismos autores, en esta misma revista.*

*Al mismo tiempo, se realiza un recorrido por el marco normativo, tanto internacional como nacional, relativo al radón y a sus descendientes de vida media corta.*

*El presente trabajo es parte de la tesis doctoral de la primera autora del mismo, Beatriz Piedecausa García, a quien el resto de autores agradece su esfuerzo para preparar el texto que ahora se publica y la autorización y las facilidades ofrecidas para acceder a su trabajo.*

## 1. La exposición a radiación interna. El gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El siguiente artículo se presenta como la segunda parte de un trabajo sobre la radiactividad natural de los materiales de construcción.

En la primera parte del trabajo se hace referencia a la radiación externa emitida de manera natural por distintos materiales de construcción y, en sus apartados 1.1 y 1.2, se establecen definiciones, magnitudes y unidades de medida de los términos que presentan un especial interés en relación con las radiaciones ionizantes.

En esta segunda parte del trabajo se desarrollan aspectos relacionados con la exposición a la radiación interna debida al gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) emanado por distintos materiales utilizados en construcción.

## 1.1 Definición y orígenes

El Radón es un gas noble radiactivo e inerte (resistente a reaccionar químicamente), incoloro, inodoro, insípido e invisible, más pesado que el aire y soluble en agua u otros líquidos. Existen tres isótopos principales de radón procedentes de tres grandes cadenas radiactivas de origen natural:

- La del uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) en la que se forma radio-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) que se transforma en radón 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) o Radón.  
 $(^{238}\text{U}) \rightarrow (^{226}\text{Ra}) \rightarrow (^{222}\text{Rn}) \rightarrow (^{206}\text{Pb})$
- La del uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ) da origen al radio-223 ( $^{223}\text{Ra}$ ) que se desintegra en radón 219 ( $^{219}\text{Rn}$ ) o Actinón.  
 $(^{235}\text{U}) \rightarrow (^{223}\text{Ra}) \rightarrow (^{219}\text{Rn}) \rightarrow (^{207}\text{Pb})$
- La del torio 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) que produce radio-224 ( $^{224}\text{Ra}$ ) que pasa a ser radón 220 ( $^{220}\text{Rn}$ ) o Torón.  
 $(^{232}\text{Th}) \rightarrow (^{224}\text{Ra}) \rightarrow (^{220}\text{Rn}) \rightarrow (^{208}\text{Pb})$

En cada una de las series radiactivas existe un isótopo del gas radón que escapa del material natural y se incorpora a la atmósfera en forma de radón-222, radón-219 y radón-220 respectivamente. De estas tres formas químicas, la que se encuentra en mayor proporción en la naturaleza es la primera de ellas denominada radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), teniendo importante trascendencia para la salud puesto que aporta en torno al 50% de toda la dosis de radiación natural que recibe el ser humano.

El Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es un gas descendiente directo del Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ). Este Radio es descendiente del Torio ( $^{230}\text{Th}$ ) procedente a la vez de la desintegración del Uranio ( $^{234}\text{U}$ ) y si seguimos la cadena en orden inverso se llegará hasta el Uranio ( $^{238}\text{U}$ ),

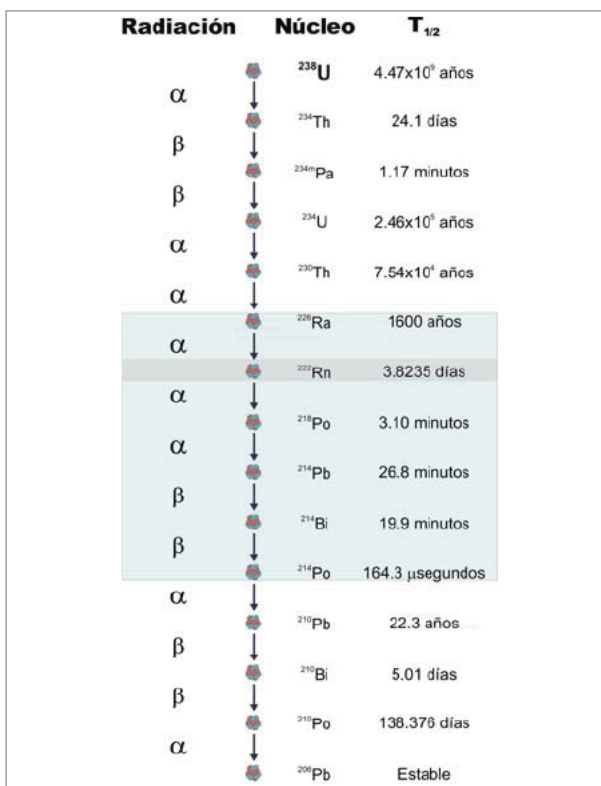
■ **Figura 1. Series radiactivas naturales.** (Fuente: NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. Notas Técnicas de Prevención).

$^{232}_{90}\text{Th}$	$\rightarrow$	$^{224}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{220}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
$^{238}_{92}\text{U}$	$\rightarrow$	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{222}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$^{235}_{92}\text{U}$	$\rightarrow$	$^{223}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{219}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{207}_{82}\text{Pb}$

que se encuentra diseminado por la corteza terrestre siendo un elemento abundante en la naturaleza en una proporción 40 veces mayor a la de la plata y 800 veces mayor a la del oro.

Por tanto, se puede afirmar que donde exista Uranio inicial ( $^{238}\text{U}$ ) encontraremos también Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y en consecuencia Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), estando presente sobre todo en subsuelos graníticos o en algunos suelos volcánicos y en las aguas que se acumulan o transcurren por ellos, generando una distribución muy irregular en todo el planeta que varía aleatoriamente según las épocas del año o incluso de un día a otro.

■ **Figura 2. Serie de desintegración radiactiva del Uranio-238.** (Fuente: propia a partir de la NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención).



De este modo, el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se encuentra en casi todos los tipos de suelo o aguas. Tiene un período de semidesintegración de 3,8 días y en su proceso de desintegración desde los elementos inestables hasta el isótopo estable Pb-206, el gas radón produce unos descendientes sólidos con vidas medias inferiores a 30 minutos como son el Po-218, Pb-214, el Bi-214 y el Po-214 (marcados en azul en la imagen de la Figura 2).

En el aire ambiental, tras la desintegración del radón, sus descendientes sólidos de vida media corta se pueden fijar a partículas de aerosoles presentes en el aire, pudiendo deducirse en ciertos casos la concentración del radón a partir de la concentración existente de sus descendientes. De este modo, se considera que 1 Bq(EER)/ $\text{m}^3$  de descendientes de vida media corta del radón equivale a 2 Bq (radón gas)/ $\text{m}^3$ , considerando las siglas EER como "equilibrium equivalent of radon".

Por otra parte, también cabe destacar que tras la inhalación de gas radón por el ser humano, su desintegración dentro de nuestro sistema respiratorio da lugar a los citados descendientes sólidos dentro del mismo que, tras fijarse a los distintos tejidos y continuar desintegrándose, emiten radiaciones que pueden dañar a las células más próximas y desembocar en enfermedades cancerígenas.

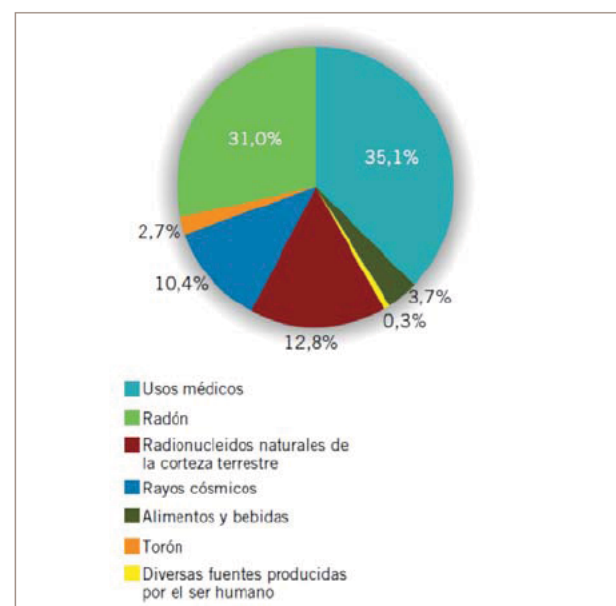
## 1.2 Riesgos del $^{222}\text{Rn}$

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), el radón representa aproximadamente la mitad del promedio mundial de exposición del ser humano a fuentes naturales de radiación, siempre considerando que existe una gran variabilidad debido a su irregular distribución geográfica.

Los daños producidos por este tipo de radiaciones en el ser humano dependen de muchos factores como son la naturaleza y la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición, la energía cedida, la superficie irradiada o la dosis de radiación; siendo más perjudicial el efecto si se recibe la misma radiación en un periodo de tiempo corto que en un tiempo mayor. Según datos Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la dosis que una persona recibe como promedio en España proveniente de fuentes naturales es de 2,41 mSv/año; cantidad que en condiciones normales y como promedio se estima que se distribuye en:

- Un 50% de la dosis procedente del radón.
- Un 20% de la dosis procedente de la radiación terrestre (materiales).
- Un 15% de la dosis procedente de la radiación cósmica.
- Un 15% de la dosis procedente del propio organismo.

■ **Figura 3. Contribución de las distintas fuentes de exposición de origen natural y artificial a la dosis de radiación promedio recibida en un año por una persona cualquiera de la población de España.** (Fuente: CSN. Dosis de Radiación).



Dosis que, al provenir de fuentes naturales (Figura 3), son muy variables y dependen de factores como el lugar de residencia, el tipo de vivienda, la altitud sobre el nivel del mar, el régimen alimentario o los hábitos de vida en general.

### 1.3 Niveles ambientales y dosis corporales de <sup>222</sup>Rn

Debido a que el radón está presente de forma natural en el medio ambiente, el establecimiento de niveles mínimos a partir de los cuales se deben tomar medidas correctoras es complejo y dificultoso. Es por esto que, según el país de origen, existen valores distintos como consecuencia de su problemática particular, su capacidad de acción y la sensibilidad pública existente, generando recomendaciones constructivas adaptadas a las características propias del lugar y normativas limitadoras del nivel de radón en edificios de nueva construcción.

Estos valores han sido objeto de mayor regulación en los países nórdicos o con temperaturas medias bajas, puesto que en ellos se tiende al ahorro calorífico con viviendas muy herméticas y a la estanqueidad de puertas y ventanas, impidiendo la renovación de aire exterior y consiguiendo concentraciones de radón decenas e incluso cientos de veces superiores a los niveles de peligrosidad recomendados por los organismos internacionales. Problema que se reduce en zonas más cálidas y bien ventiladas.

Niveles que, a pesar de ser recomendados, no deben entenderse como frontera entre 'niveles seguros' y 'niveles no seguros' siendo siempre deseable minimizar al máximo la concentración de radón en las viviendas mediante las medidas necesarias ya que cuanto más alta sea, mayor será el riesgo de afección a los usuarios.

### Niveles de <sup>222</sup>Rn en el ambiente

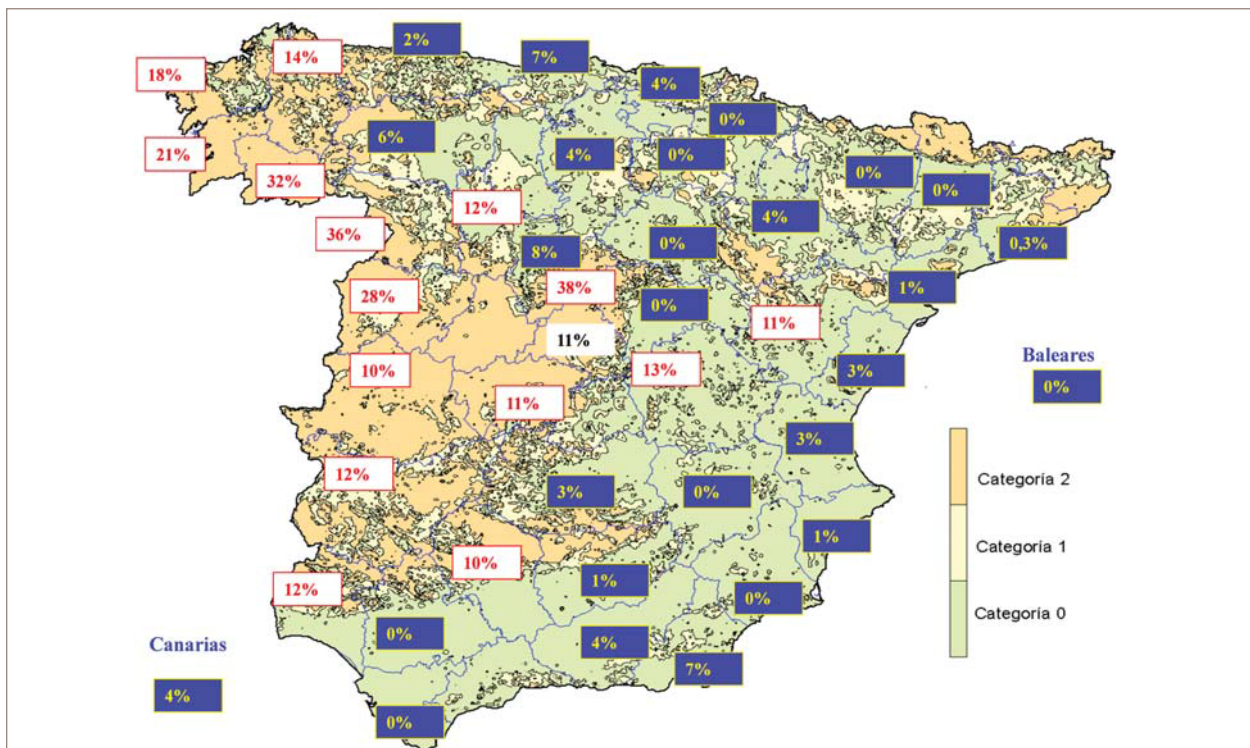
Respecto a los niveles máximos de radón aconsejables en espacios interiores, la Unión Europea recomienda a sus estados miembros según la 90/143/Euratom un nivel de acción de 400 Bq/m<sup>3</sup> para iniciar acciones de remedio en viviendas ya existentes y un nivel de radón objetivo en la fase de diseño inferior a 200 Bq/m<sup>3</sup> en viviendas de nueva construcción.

Por otra parte, en países como EE.UU. o Reino Unido se recomiendan niveles de acción de radón más bajos para todo tipo de viviendas, no superando los 148 Bq/m<sup>3</sup> (4 pCi/L) y 200 Bq/m<sup>3</sup> respectivamente; si bien es cierto que en EE.UU. existe una mayor definición en cuanto a las actuaciones a tomar, estableciendo intervenciones graduales para mitigar el problema en función de las concentraciones existentes, determinando períodos máximos para su reducción (años, meses o semanas).

Hoy en día es posible reducir el nivel de radón fácilmente a 75 Bq/m<sup>3</sup> en la mayoría de las viviendas, dato importante, ya que según la OMS el riesgo de padecer cáncer de pulmón aumenta en un 16% por cada incremento de 100 Bq/m<sup>3</sup> en la concentración de radón, siguiendo una relación lineal de dosis-respuesta, es decir, que el riesgo aumenta proporcionalmente con el aumento de exposición.

Por último, cabe destacar que, aunque una cierta cantidad de radón en el aire se considera normal, ningún nivel de radón es absolutamente seguro. En España según el CSN el nivel promedio ronda los 24 Bq/m<sup>3</sup>, siendo interesante comentar la existencia de zonas con altas concentraciones de radón que llegan incluso a sobrepasar la recomendación de los 400 Bq/m<sup>3</sup>. Según

■ Figura 4. Categorías de exposición potencial al radón en España. Proyecto Marna. (Fuente: Figueiras, A. (2010)).



se indica en la publicación Real, G. (2002), el porcentaje de viviendas que superan esa recomendación son aproximadamente: Castilla y León (30%), Madrid-Sierra de Guadarrama (17%), Galicia (11%), Andalucía (4%), Extremadura (4%), Canarias (4%) o Aragón (3%).

## Dosis de $^{222}\text{Rn}$ en los habitantes

Según el Consejo de Seguridad Nuclear la dosis media de radiación total (natural y artificial) a la que está expuesta la población española se estima en 3,7 mSv/año. De ellos, 2,41 mSv/año (el 65%) se deben al denominado fondo radiactivo natural (generado por la radiación terrestre, la radiación cósmica, los isótopos ingeridos junto con el agua y los alimentos y los inhalados principalmente con el  $^{222}\text{Rn}$  y sus descendientes), aunque lo cierto es que este valor varía de unas zonas a otras.

Las diferencias observables en la Figura 4 son debidas a distintas causas, como por ejemplo a que las radiaciones cósmicas procedentes del espacio exterior aumentan con la altitud (existe un 20% más de dosis en las montañas que a nivel del mar) y con la latitud (mayores dosis en los polos que en el ecuador). Geológicamente, cabe destacar que la presencia en el terreno de determinados minerales también afecta al campo de radiación originado, concretamente la existencia de rocas ígneas y metamórficas conteniendo trazas de materiales radiactivos como uranio o radio.

Por tanto, a nivel internacional se establecen unos límites de dosis anuales recomendadas en el ser humano, planteando así una protección frente a la exposición excesiva a las radiaciones ionizantes; valores que nunca deben ser sobrepasados y que se aplican a la suma de las dosis recibidas por exposición externa e interna en un periodo considerado, teniendo en cuenta factores de ponderación que dependen del órgano irradiado y del tipo de radiación de la que se trate.

En España, según el CSN la dosis media procedente del radón es de 1,15 mSv/año, pudiendo alcanzar valores de hasta 40 mSv/año en áreas concretas. Estas dosis pueden ascender de cinco a diez veces más en ciertos espacios interiores puesto que, al contrario que ocurre en el exterior, la concentración aumenta debido a la carencia de ventilación de aire, dando lugar a un valor medio que depende de las características geológicas de la zona, en ciertos casos de los materiales de construcción empleados y de la ventilación de los locales.

■ **Tabla 1. Límites de dosis de exposición ocupacional. (RD 783/2001). (Fuente: NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas Técnicas de Prevención).**

DOSIS EFECTIVA <sup>1</sup>	Personas profesionalmente no expuestas	Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años) <sup>2</sup>	1 mSv/año oficial
DOSIS EQUIVALENTE	Personas profesionalmente no expuestas	Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años)	
		Cristalino	1 mSv/año oficial
		Piel <sup>3</sup>	1 mSv/año oficial

(1) Dosis efectiva: suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo procedentes de irradiaciones internas y externas.

(2) Excepcionalmente se podrá superar este valor, siempre que el promedio durante 5 años consecutivos no sobrepase 1 mSv por año.

(3) Calculando el promedio en cualquier superficie cutánea de 1 cm<sup>2</sup>, independientemente de la superficie expuesta.

En la actualidad, la exposición ocupacional es la única que está regulada actualmente en España. Dentro del Real Decreto 783/2001 se regula la exposición al público que accede a distintas instalaciones con unas dosis máximas según el cuadro de la Tabla 1.

## 1.4 Fuentes de exposición

El interés por la acumulación de radón en las viviendas plantea un mayor desarrollo a finales de los años 70, cuando se convierte en una de las causas asociadas al síndrome del edificio enfermo (SEE) ("Sick Building Syndrome") que respondía a un deterioro biológico de los materiales debido a hongos, ácaros, etc.; a un deterioro físico debido a ruidos, mala ventilación, etc., o a un deterioro químico debido al CO<sub>2</sub>, radón, asbestos, etc. Un problema ampliamente extendido en nuestras construcciones, habiéndose estimado por la Organización Mundial de la Salud que el 30% de los edificios de los países industrializados resultan afectados por este tipo de deficiencias.

Además de estas patologías relacionadas con las propias construcciones existen otros condicionantes sociológicos que agravan la situación ya que la creciente permanencia del hombre urbano en ambientes cerrados, donde pasa el 75% de su tiempo llegando incluso hasta el 90% en el caso de niños, ancianos o enfermos crónicos, ha provocado un creciente interés en el estudio de las condiciones ambientales interiores, especialmente las que puedan tener efectos significativos sobre la salud, con el fin de poder evitarlas.

Por ello, en los últimos años tanto la comunidad científica como el público en general se han interesado por el peligro que el gas radón puede tener para la salud de los usuarios de viviendas con concentraciones altas. Niveles que al aire libre son generalmente muy bajos en torno a 10 Bq/m<sup>3</sup> pero que en interiores aumentan de valor, fundamentalmente en lugares poco ventilados, minas, cuevas o instalaciones de tratamiento de agua.

Así, parece preciso establecer las distintas fuentes de exposición de radón puesto que, debido a ser un gas presente en el aire, es capaz de entrar en los edificios y permanecer atrapado en su interior favoreciendo la generación de problemas de salud en sus habitantes. Dichas fuentes de exposición son fundamentalmente:

### 1.4.1 El terreno

Es la principal fuente emisora de radón en la naturaleza, siendo más habitual su influencia en construcciones aisladas o en las plantas bajas de edificios. Así, con la existencia de concentraciones medias de radio Ra-226 en suelos entre los 10 y 50 Bq/kg, el radón gaseoso procedente de los materiales en el terreno pasa al interior de las viviendas por difusión molecular; proceso que puede ser acelerado por las diferencias de presión existentes entre el gas del terreno y el aire del interior de la estancia.

A nivel general, son los terrenos graníticos, los yesos fosfatados y los terrenos uraníferos los que presentan los niveles más altos de este gas, que al pesar siete veces más que el aire, tiende a concentrarse en los sótanos y los bajos de las viviendas a través de grietas y resquicios en paredes o canalizaciones.

Además, la presencia de extractores de ventilación o mecanismos de calefacción en el edificio provoca que se generen corrientes de aire y movimientos inducidos que incrementan el paso de radón desde el suelo hasta las habitaciones a través de poros y fisuras existentes en la propia estructura, lo que explica las elevadas concentraciones que se han llegado a encontrar en algunos casos concretos en interiores.

Debido a que el principal foco de radón es el propio terreno en la mayoría de los casos y considerando que el radón es un descendiente del Uranio y del Torio, el potencial del terreno como emisor de radón dependerá de la cantidad de ambos, siendo además habitual que exista una importante presencia de radio.

Así, tras su exhalación el radón se acumulará en mayor proporción si el terreno es rico en uranio, puesto que su larga vida media de 4.500 millones de años provocará que siempre haya uranio por transformarse en radón. Es por ello que, la concentración de radón en un domicilio tendrá leves altibajos y persistirá durante la existencia de la casa en cuestión siempre que no se modifiquen las características estructurales de dicha vivienda.

Por otra parte, también es importante considerar que las medidas realizadas en terrenos de diferente naturaleza indican que, para que la concentración de radón sea elevada, los suelos no sólo han de poseer un buen potencial emisor sino que además han de permitir la salida del radón a través de ellos.

■ **Tabla 2. Fuente: laboratorio de radón de Galicia. Partes por millón (ppm) = miligramos de una sustancia/L de disolución (medida de concentración de una solución).**

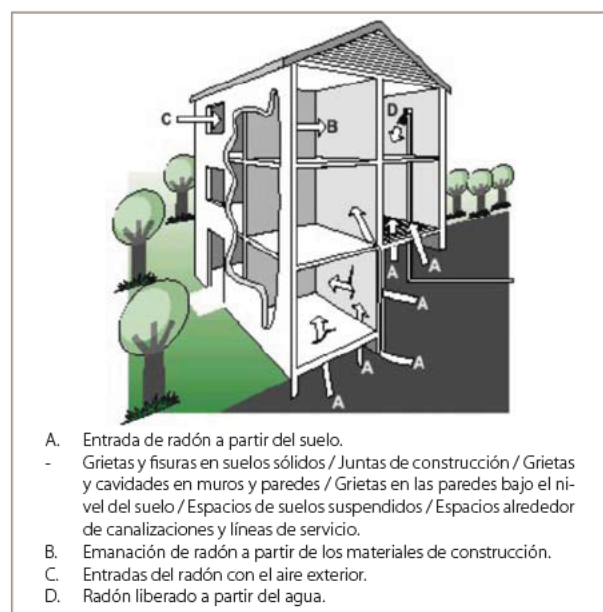
MATERIA	URANIO 238 (en ppm)	TORIO 232 (en ppm)
Rocas areniscas	0,5	1,7
Rocas carbonatadas	0,5	1,7
Rocas basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3,5	11
Rocas graníticas	5	12

Esto es posible en el caso de terrenos suficientemente fracturados y suficientemente porosos o permeables, donde la existencia de un mineral muy envejecido o con presencia de grietas o fallas, aumenta la difusión y por tanto la exhalación de radón.

También cabe destacar que las condiciones meteorológicas son otro de los factores que influyen en la emanación del radón en el terreno mediante:

- Un aumento de exhalación con la existencia de bajas presiones atmosféricas y a la inversa.
- Una reducción de exhalación con lluvia y nieve, lo que conlleva una maximización de la concentración de radón en el terreno en invierno.
- Un aumento de la exhalación con la existencia de altas velocidades de viento.
- Un aumento de la exhalación con el aumento de temperaturas.

■ **Figura 5. Típicas fuentes de radón y rutas de entrada. (Fuente: NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención).**



- A. Entrada de radón a partir del suelo.
  - Grietas y fisuras en suelos sólidos / Juntas de construcción / Grietas y cavidades en muros y paredes / Grietas en las paredes bajo el nivel del suelo / Espacios de suelos suspendidos / Espacios alrededor de canalizaciones y líneas de servicio.
- B. Emanación de radón a partir de los materiales de construcción.
- C. Entradas del radón con el aire exterior.
- D. Radón liberado a partir del agua.

### 1.4.2 Los materiales de construcción

A nivel general se estima que los materiales de construcción puedan aportar un 20% de la concentración total de radón en domicilios, aproximadamente, lo que representa una cantidad aportada comprendida entre 10 Bq/m<sup>3</sup> y 20 Bq/m<sup>3</sup> que, si no existieran aportaciones de radón provenientes del terreno, están muy alejadas de los valores límite aceptables de 400 Bq/m<sup>3</sup> para edificios existentes y 200 Bq/m<sup>3</sup> para edificios nuevos, como se indica más adelante al hacer referencia a las Recomendaciones de la Comunidad Europea (Recomendación 90/143). Los principales elementos radiactivos presentes en los materiales de construcción son el radio (<sup>226</sup>Ra), el Torio (<sup>232</sup>Th) y el Potasio (<sup>40</sup>K), con unas concentraciones que varían en función de distintos factores como la propia concentración de radio en el material, su porosidad, la preparación de la superficie o el acabado exterior.

En general, los valores de las concentraciones de actividad típicas del hormigón (véase la Tabla 6 de la primera parte) 40 Bq/kg en  $^{226}\text{Ra}$  y 30 Bq/kg en  $^{232}\text{Th}$  hacen que este material no sea considerado como fuente de radiación a considerar. Cuando se superan los valores anteriormente indicados se comprobará que el hormigón no aporta una concentración de radón tal que la total que pueda existir en el interior del edificio supere 200 Bq/m<sup>3</sup>. Esta comprobación se realizará con cualquier material que pueda aportar una cantidad de radón adicional a aquella que pueda existir en el edificio por otras fuentes.

Algunos de los materiales de construcción que liberan radón emplean, en su composición, residuos industriales como las escorias de alto horno, las cenizas volantes, u otros materiales tales como las piedras naturales, como el granito o la pizarra, los ladrillos, el cemento portland, la arena, la grava, el yeso natural y, en niveles mínimos en España, la madera. Además, es importante tener en cuenta que pueden existir productos como los ladrillos y los hormigones con concentraciones elevadas de radón si los materiales base de los que están compuestos se han extraído de zonas con alta radiación natural, como es el caso de algunas tobas volcánicas o puzolanas. Es posible encontrar entre los materiales de construcción contenidos de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  de hasta 50 Bq/kg, cantidades que pueden aumentar con composiciones de las citadas anteriormente.

### 1.4.3 El aire exterior

Debido a su bajo contenido en radón, normalmente el aire exterior actúa como un factor de dilución. Sin embargo, en zonas con elevada concentración de radón en aire y edificios construidos con materiales con bajo contenido en radio, el aire exterior puede actuar propiamente como una fuente que aporta radón.

En estos casos, la concentración de radón en el aire exterior está relacionada fundamentalmente con la presión atmosférica, oscilando habitualmente entre unos valores en condiciones estables. A nivel general, los valores más altos se producen durante la noche y con unos valores medios para el radón de 10 Bq/m<sup>3</sup> en áreas continentales y aproximadamente 0,1 Bq/m<sup>3</sup> en las zonas costeras y oceánicas.

### 1.4.4 El agua de consumo

Finalmente, cabe comentar que la utilización de aguas subterráneas (manantiales o pozos) para uso doméstico en zonas con una elevada concentración de radón puede suponer un aumento de su concentración en el aire interior especialmente en cuartos de baño donde, con la existencia de agua caliente y en movimiento, el proceso de liberación del gas se ve favorecido.

La presencia del radón en el agua es debida a que ciertas rocas, que contienen uranio natural, liberan radón al agua subterránea con la que entran en contacto, generando concentraciones más elevadas que en las aguas superficiales debido a que en estas últimas el radón se libera al aire atmosférico con facilidad.

A nivel general, en los sistemas públicos de abastecimiento de agua procedente de aguas superficiales la concentración media de radón suele ser menor que 0,4 Bq/l y si el agua procede de fuentes subterráneas el valor ronda los 20 Bq/l de media.

De este modo, el valor máximo recomendado por la OMS y la Comisión Europea por debajo del cual no es necesario realizar controles en abastecimientos públicos es de 100 Bq/l, requiriendo la toma de acciones de reductoras si las concentraciones de radón son mayores a 1.000 Bq/l. En este último caso, según distintas fuentes la concentración de 1.000 Bq/l en el grifo podría llegar a contribuir, en las condiciones más desfavorables, en aumentar la concentración de radón en el aire interior de ciertos espacios en unos 100-200 Bq/m<sup>3</sup>.

### 1.4.5 Otras consideraciones

Por último, es importante destacar que la concentración de radón en las construcciones no sólo depende del tipo de fuente de exposición sino que además depende de otros factores como son la localización geográfica, la altura del piso, la antigüedad, su grado de aislamiento o los hábitos de ventilación de sus habitantes.

A este respecto, la problemática de la acumulación de radón en interiores se ha incrementado debido a las numerosas y recientes políticas de ahorro energético que promueven un completo aislamiento térmico mediante eficientes materiales de construcción.

La consecuencia directa de este aumento de aislamiento, unida a la disminución de la ventilación en las viviendas fundamentalmente en el norte de Europa, es el incremento de la concentración de radón en el interior de las mismas. Una existencia de edificaciones mejor aisladas y poco ventiladas que pueden alcanzar niveles peligrosos de concentración preferentemente en aquellos lugares con una baja ventilación como son sótanos, semisótanos, garajes u otras áreas en contacto directo con el suelo.

Por tanto, también el tipo de construcción y las condiciones de ventilación de los recintos van a determinar la concentración del radón en el interior de los edificios, ocasionando que en construcciones estancas ubicadas en zonas más frías se alberguen niveles de radón considerables en épocas de frío, cuando la ventilación es menor. Situación que se ve agravada con los sistemas de calefacción interior ya que generan depresiones y presiones que favorecen la emanación del radón desde el suelo debido a que la presión de aire en el interior es generalmente menor que la presión en el suelo en torno a su cimentación, actuando la construcción como un elemento de succión del gas.

## **2. Marco normativo relativo a radiaciones naturales y $^{222}\text{Rn}$**

A pesar de que la presencia del radón es bastante relevante en muchos territorios, suponiendo cierto riesgo para la salud de un buen número de ciudadanos, lo cierto es que la regulación sobre este gas es muy reciente o incluso inexistente en determinados países.

La intensa preocupación sobre el radón presente en Estados Unidos ha tardado en generalizarse por Europa, pero poco a poco se está empezando a considerar este fenómeno con la existencia de distintas organizaciones internacionales y europeas encargadas del estudio y control de la radiactividad. Organizaciones que, desde hace algunos años, se han preocupado por esta cuestión mediante la generación de documentos que instan a los diferentes países a adoptar medidas concretas en lo referente a las radiaciones y aconsejan un desarrollo legislativo propio a cada uno de ellos, generándose una normalización progresiva.

Al respecto de las organizaciones intergubernamentales, la "International Commission on Radiological Protection" (ICRP) recomienda, a nivel general, tanto unas bases científicas como unos principios generales de protección radiológica que junto con los estudios sobre los efectos de esas radiaciones llevados a cabo por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) da lugar a una serie de normas globales convenidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado por las Naciones Unidas.

Por otra parte, existen también varios organismos internacionales que formulan recomendaciones sobre protección radiológica como son la Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom/UE), la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA) o la Organización Mundial de la Salud (OMS); entidades que generan documentos con principios prácticos globales, facilitando el desarrollo de regulaciones nacionales siendo los propios países los que definan en última instancia sus regulaciones y normas para una mejor aplicación práctica acorde con las condiciones y características propias de sus territorios.

#### ICRP + UNSCEAR → EURATOM / UE / OIEA / EPA / OMS → PAISES

De este modo, un gran número de países han establecido normativas específicas para medir el radón así como programas de reducción de concentraciones en el interior de viviendas, locales o establecimientos públicos. Para ello se han elaborado mapas de contaminación por radón con los que determinar las áreas problemáticas.

Tras los resultados obtenidos no parece que las propuestas normativas se vayan a detener en un futuro ya que en los últimos años se han multiplicado los estudios tanto sobre el radón como los conocidos como NORM ("Naturally Occurring Radioactive Materials") materiales que contengan radionucleidos naturales, en distintos medios y sectores.

A continuación se destacan diferentes regulaciones llevadas a cabo por cada uno de los anteriores organismos en referencia a las radiaciones naturales y relacionadas con el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

#### 2.1 International Commission on Radiological Protection (ICRP)

- ICRP 39. "Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation". 1984.

- Señala como fuente predominante de exposición en interiores al  $^{222}\text{Rn}$  y genera una serie de recomendaciones a tener en cuenta respecto a esa fuente tanto en situaciones de exposición existente como futura.

- Exposición espacios existentes. Nivel de acción: 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- Exposición espacios futuros. Nivel de referencia: 200 Bq/m<sup>3</sup>.

- ICRP 60. "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". 1990.

- Considera la protección del público frente a la radiación natural, y sigue apuntando al  $^{222}\text{Rn}$  como la principal fuente de exposición en interiores.

- Mantiene los conceptos anteriores de nivel de acción con el que es preciso iniciar acciones de remedio en viviendas ya edificadas y el nivel de referencia para edificaciones futuras.

- En el caso de la exposición de trabajadores a fuentes naturales, indica también otras fuentes potenciales adicionales al  $^{222}\text{Rn}$  como son:

- El almacenamiento/las operaciones con materiales con cantidades significativas de isótopos naturales.
- La operación de aviones a reacción y los vuelos espaciales.

- ICRP 65 "Protection against  $^{222}\text{Rn}$  at home and at work". 1993.

- Considera otros lugares además de las minas donde pueden existir concentraciones elevadas de radón, como es el caso de cuevas, túneles y balnearios.

- Recomienda controlar la exposición tanto en viviendas (mediante la intervención) como en lugares de trabajo (mediante la intervención y un control más regular).

- Recomienda unos niveles de acción a partir de los que iniciar intervención:

- Viviendas -----→ entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup>.
- Lugares de trabajo -----→ entre 500 y 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

- En viviendas nuevas recomienda que sean diseñadas y construidas de forma que las concentraciones de radón sean tan bajas como sea posible, considerando la fácil incorporación de técnicas de reducción de concentraciones si se diese el caso de que la construcción inicial fallase.

- Establece valores de dosis según los denominados "conversion conventions factors" basados en un factor de ocupación anual de 7.000 h y un factor de equilibrio entre el radón y sus descendientes de 0,4:

- Antes de la ICRP 65: 600 Bq/m<sup>3</sup> -----→ 10 mSv/año.
- Con la ICRP 65: 200 Bq/m<sup>3</sup> -----→ 3 mSv/año.

- Introduce el concepto de "Radon prone areas", es decir, zonas propensas a la acumulación de radón en las que más de un 1% de las viviendas tienen concentraciones de radón diez veces superiores al valor medio nacional. Considera que las acciones emprendidas para disminuir dichas concentraciones en un país sean dirigidas prioritariamente hacia dichas áreas.

- ICRP 82. "Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure". 2001.

- Sigue considerando válidas las recomendaciones de la publicación nº 65 respecto al control de la exposición al radón en viviendas.

- Sugiere a las autoridades nacionales el establecimiento de niveles de intervención/exención para las concentraciones de actividad de isótopos específicos en materiales de construcción.

## 2.2 Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom)

- Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988. Relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción. 1989.
  - En su apartado 3, 'Higiene, Salud y Medioambiente' indica la necesidad de proyectar y construir sin amenaza para la salud de los ocupantes, como consecuencia de partículas o gases peligrosos y la emisión de radiaciones peligrosas.
  - El medioambiente interior debe ser saludable y se tendrán en cuenta como contaminantes el radón y las sustancias radiactivas que emitan radiaciones gamma. Por el momento este requerimiento legislativo no se ha puesto en práctica en nuestro país a la hora de construir nuevos edificios.
- Recomendación 90/143 "Relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios". 1990.
  - Recomienda tanto en viviendas edificadas como en la construcción de nuevas viviendas:
    - Edificio existente ----> Nivel de acción ----> 20 mSv/año dosis efectiva = 400 Bq/m<sup>3</sup> concentración anual radón.
    - Construcción futura --> Nivel de diseño --> 10 mSv/año dosis efectiva = 200 Bq/m<sup>3</sup> concentración anual radón.
  - Establece una especial atención a la adecuada información al público de los niveles a los que está expuesto y de los medios existentes para reducirlos cuando se consideren acciones correctoras; además de suministrar información a los que participen en la construcción de edificios.
  - Cada estado debe garantizar la identificación mediante estudios u otras medidas adecuadas de las actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o cualquier otra exposición en lugares de trabajo.
  - Las decisiones deben estar basadas en valores medios anuales de calidad con el uso de técnicas de integración y con la existencia de autoridades competentes que velen por su calidad y fiabilidad.
  - Criterios de identificación de zonas de riesgo basados en investigaciones realizadas en base a parámetros como la radiactividad en suelos, la permeabilidad, etc.
- Directiva 96/29. Normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. 1996.
  - Aplicación a actividades profesionales que impliquen exposición tanto a fuentes artificiales de radiación como a fuentes naturales con la aparición del Título VII Incremento significativo de la exposición debida a fuentes naturales de radiación.
  - Cada estado miembro garantizará que se lleve a cabo la identificación, mediante estudios u otras medidas adecuadas, de las actividades que puedan constituir motivo de preocupación.
  - Posteriormente la UE ha publicado una serie de documentos para clarificar ciertos aspectos de la Directiva 96/29, principalmente en relación con las industrias no nucleares.
    - Radiation Protection 88. "Recommendations for the implementation of Title VII of BSS concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources". 1997.
    - Radiation Protection 95. "Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally-occurring radionuclides". 1999.
    - Radiation Protection 107. "Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides". 1999.
    - Radiation Protection 112. "Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials". 1999.
    - Radiation Protection 122. "Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part II Natural radiation sources". 2002.
- Directiva 98/83 "Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano". 1998.
  - Se aplica por una parte a la calidad de las aguas utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos u otros usos domésticos, sea cual fuere su origen independientemente de que se suministren a través de una red de distribución, o de una cisterna o envasadas en botellas u otros recipientes y por otra se aplica a las aguas utilizadas en empresas alimentarias para fines de fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinados al consumo humano.
  - No se aplica a aguas minerales naturales reconocidas por las autoridades nacionales competentes, de conformidad con la Directiva 80/777 o a las aguas que son productos medicinales a efectos de la Directiva 65/65.
  - Considera un valor del tritio de 100 Bq/l y una dosis indicativa total excluyendo el tritio, el 40K y los productos de desintegración del radón de 0,10 mSv/año.
- Recomendación 2001/928. Relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable. 2001.
  - Considera la existencia en algunos estados miembros de aguas subterráneas con elevadas concentraciones de radón y con una exposición de la población a dosis elevadas.
  - Conciencia sobre la importancia de la exposición de la población al radón en aguas potables y sobre la adopción de medidas de control. Se considera que el radón en el agua potable es controlable en el sentido físico y técnico, por lo que debe establecerse un sistema apropiado para reducir las exposiciones significativas.
  - Respecto al agua suministrada en el marco de una actividad comercial o pública:
    - Concentración mayor a 100 Bq/l-----> establecer nivel de referencia para iniciar medidas correctoras.

- Concentración mayor a 1000 Bq/l -----> tomar medidas correctoras por razones de protección radiológica.
- Concentración mayor a 0,1 Bq/l (<sup>210</sup>Po) y 0,2 Bq/l (<sup>210</sup>Pb) -----> considerar adoptar medidas correctoras.
- Suministros de agua individual:
  - Concentración mayor a 1000 Bq/l -----> estudio de medidas correctoras. La urgencia de las medidas será proporcional al grado de superación de la concentración de referencia.

### 2.3 Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (International Atomic Energy Agency / IAEA)

- "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources". 1996
  - En situaciones de exposición crónica al radón recomienda niveles de acción a partir de los que intervenir:
    - Viviendas -----> entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup> concentración media anual de radón.
    - Lugares de trabajo -----> 1.000 Bq/m<sup>3</sup> concentración media anual de radón.
- Documentos relativos a protección radiológica en industrias y lugares de trabajo con exposición al radón.
  - "Occupational radiation protection in the mining and processing of raw materials". Safety Guide N° RS-G-1.6. Esta guía fue inicialmente publicada en el año 2004 y ha sido editada en español en el año 2009.
  - "Radiation and waste safety in the oil and gas industry". Safety Reports Series n° 34, 2003.
  - "Radiation protection against radon in workplaces other than mines". Safety Reports Series n° 33, 2003.
  - Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials. Safety Reports Series n° 49, 2006.
  - Radiation protection and NORM residue management in the zircon and zirconia industries. Safety Reports Series n° 51, 2007.
- Drafts.
  - "Assessment of occupational radiation protection conditions in workplaces with high levels of exposure to natural radiation".
  - "Protection from occupational radiation exposure due to thorium in industrial operations".

### 2.4 Organización Mundial de la Salud (OMS)

- "Air Quality Guidelines for Europe". 1987.
  - Recomendaciones relativas a la exposición al radón en el interior de viviendas.
  - Adoptar medidas correctoras sencillas -----> concentraciones medias de radón superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>.
  - Adoptar acciones correctivas inmediatas -----> concentraciones medias de radón superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Drinking Water Regulations". 1993.
  - Recomendación de un nivel de referencia de dosis (RDL) de

0,1 mSv/año, representando menos de un 5% de la dosis media efectiva atribuible a la radiación natural. Por debajo de este nivel de dosis, el agua de bebida es aceptable para el consumo y no es necesario realizar ninguna actuación.

- Para propósitos prácticos se recomiendan unos valores de referencia de actividad  $\alpha$  total y  $\beta$  total de 0,1 Bq/l y 1 Bq/l respectivamente.

- Revisión "Air Quality Guidelines for Europe". 2000.
  - Adoptar medidas correctoras sencillas -----> concentraciones medias de radón superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Guidelines for Drinking-water Quality" 3ª ed. 2004.
  - Recomendación de un nivel de referencia de dosis (RDL) de 0,1 mSv / año.
  - En este caso, para propósitos prácticos se recomiendan unos valores de referencia de actividad  $\alpha$  total y  $\beta$  total de 0,5 Bq/l y 1 Bq/l respectivamente.
  - En el caso de la actividad  $\beta$  total se debería tener en cuenta la contribución del 40K a dicho índice.
  - Deben establecerse controles si la concentración de <sup>222</sup>Rn en abastecimientos públicos de agua excede los 100 Bq/l.
- "Handbook on indoor radon. A public health perspective". 2009.
  - Establece un nivel de referencia de concentración de radon de 100 Bq/m<sup>3</sup>.
  - Trata de corregir el problema a gran escala sugiriendo programas nacionales de radón.
  - Recomienda que se establezcan códigos de edificios según la rentabilidad de los sistemas de prevención de radón en las viviendas nuevas.

### 2.5 Agencia de Protección Ambiental EE.UU. (EPA)

- La EPA y el DHHS (Department of health and human services) emiten una recomendación sobre el radón en viviendas. 1986.
  - Recomienda iniciar acciones de remedio en concentraciones superiores a 4 pCi/l  $\rightarrow$  150 Bq/m<sup>3</sup>.
  - En el año 1994, se reevaluó esta propuesta y se mantuvo el valor indicado. No obstante se recomendó la mitigación si existían concentraciones entre 70 y 150 Bq/m<sup>3</sup> y especialmente si era factible reducir estos valores por debajo de 70 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Code of Federal Regulations-Part 141". National Interim Primary Drinking Water Regulations. 1976.
  - Normativa aplicable principalmente a exposiciones a los radionucleidos naturales e isótopos del Radio.
  - Los niveles máximos de contaminación (MCL) aplicables al agua en el punto de consumo son:
    - 5pCi/l (0,2 Bq/l) suma de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra y <sup>228</sup>Ra.
    - 15 pCi/l (0,6 Bq/l) concentración de actividad  $\alpha$  total, excluyendo Uranio y <sup>222</sup>Rn.
- Propuesta sobre <sup>222</sup>Rn en agua de bebida. 1999.

- Aplicable a sistemas comunitarios que suministren regularmente agua a más de 25 personas, si el agua es subterránea o mezclada con superficial.
- Reducción de niveles de radón en agua a 300 pCi/l (11 Bq/l), si el Estado no desarrolla los denominados Multimedia Mitigation Programs (MMP) para reducir los niveles de radón en aire.
- En caso de desarrollar los MMP, no se deberá suministrar agua con concentraciones superiores a 4pCi/l. Se ha estimado que esta concentración, daría lugar a una concentración de <sup>222</sup>Rn en el aire del interior de la vivienda de 0,4 pCi/l (15 Bq/m<sup>3</sup>).

## 2.6 Legislación Española

- Real Decreto 1630/92 Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. 1992.
  - Según el apartado 3, 'Higiene, Salud y Medio Ambiente' Anexo I Requisitos Esenciales: Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:
    - a) Fugas de gas tóxico.
    - b) Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.
    - c) Emisión de radiaciones peligrosas.
    - d) Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.
    - e) Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.
    - f) Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.
- Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifica, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. 1995.
  - No modifica el apartado anterior.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. 2001.
  - Aplicable a todas las prácticas que presenten un riesgo derivado de las mismas, tanto si su procedencia es de origen artificial como natural.
  - No se aplica a la exposición al radón en las viviendas o a los niveles naturales de radiación, es decir, los radionucleidos contenidos en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo y los radionucleidos presentes en la corteza terrestre no alterada.
  - Se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos de las radiaciones ionizantes, adoptando criterios de estimación de dosis considerados razonables para proteger a las personas.
  - En su título VII se refiere a las exposiciones a fuentes naturales de radiación en actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o cualquier otra exposición en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. 2003.
  - Generado tras la Directiva de la UE 98/83 Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
  - Según la disposición adicional segunda. Muestreo de la radiactividad: "la Dirección General de Salud Pública del Ministerio de Sanidad y Consumo publicará, antes de cinco años desde la entrada en vigor de esta disposición, los muestreos, frecuencias, tipos de análisis y métodos de ensayo para la determinación de los parámetros correspondientes a la radiactividad".
  - Disposición adicional tercera. Muestreo de los parámetros relacionados con los materiales: "Para los casos del cromo, cobre, níquel, plomo y cualquier otro parámetro que la autoridad sanitaria considere que pudiera estar relacionado con los materiales en contacto con el agua de consumo humano, la Dirección General de Salud Pública del Ministerio de Sanidad y Consumo establecerá un método de muestreo armonizado y lo publicará antes de cinco años desde la entrada en vigor de esta disposición. Estos métodos de recogida de muestras deberán lograr que los valores obtenidos como valor medio semanal ingerido por los consumidores obtenidos de muestreos adecuados en grifo del consumidor y de forma representativa."
- Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
  - No se aplica a las situaciones de exposición al radón en las viviendas, ni a los niveles naturales de radiación, es decir, a los radionucleidos contenidos naturalmente en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo, y la exposición en la superficie de la tierra debida a los radionucleidos presentes en la corteza terrestre no alterada.
  - Los titulares de las actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación, deberán declarar estas actividades ante los órganos competentes en materia de industria de las Comunidades Autónomas 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.
    - a) Actividades laborales en las que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o a cualquier otra exposición en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.
    - b) Actividades laborales que impliquen el almacenamiento o la manipulación de materiales o de resi-

duos, incluyendo las de generación de éstos últimos, que habitualmente no se consideran radiactivos pero que contengan radionucleidos naturales que provoquen un incremento significativo de la exposición de los trabajadores y, en su caso, de miembros del público.

- c) Actividades laborales que impliquen exposición a la radiación cósmica durante la operación de aeronaves.
- Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
  - NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Se refiere al radón y las radiaciones naturales en términos generales, así como a las fuentes principales de exposición.
  - NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Se refiere al radón como fuente de radiación y sus efectos.
  - NTP 607: Calidad de aire interior: contaminantes químicos. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Indica guías y valores máximos de contaminantes químicos en el aire exterior.
  - NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. 2003.
    - Se refiere a la naturaleza de las radiaciones ionizantes, procedencia (fuentes naturales o artificiales), características y acción sobre los seres vivos, así como a las medidas y normas de protección frente a las mismas, de acuerdo con el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (RD 783/2001). Tiene por objeto establecer las normas relativas a la protección de los trabajadores y de los miembros del público contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes según la Ley 251/1964 reguladora de la energía nuclear.
    - Se excluye la exposición a radón en el interior de las viviendas.
  - NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. 2003.
    - En la NTP 614 (apartado anterior) se relacionan las actividades en las que trabajadores y público en general pueden estar expuestos a la inhalación de elementos radiactivos como consecuencia de las fuentes naturales de radiación. En la presente NTP se revisan algunos aspectos concretos de esta exposición laboral.

### 3. Concentración de radón en ambientes interiores

#### 3.1 Procedimientos de medida de radón y sus descendientes

Existen diversas técnicas para medir la concentración del radón y sus descendientes, tanto en los ambientes exteriores como en los espacios interiores, basadas en la detección de la radiación

ionizante emitida durante la desintegración radiactiva del radón o de su progenie.

Algunas de estas técnicas requieren el desplazamiento de pesados equipos al lugar de medida mientras que otras únicamente consisten en colocar pequeños detectores que posteriormente se analizan en el laboratorio. La elección del método de medida depende de los objetivos del estudio a realizar y está condicionada por el instrumental disponible, por el coste y por la duración de la medida.

A menudo se realiza la distinción entre métodos 'instantáneos', que se usan para hacer medidas en corto tiempo (valores instantáneos o puntuales de la concentración de radón existente), y métodos 'de lectura continua', que se utilizan para realizar una media de los valores obtenidos durante largos períodos (semanas o meses). En función del tiempo de muestreo, es posible distinguir tres tipos de medidas:

##### 3.1.1 Métodos instantáneos

Son métodos utilizados para medidas en cortos intervalos de tiempo, inferiores a 20 minutos. Consisten en un pequeño contenedor con un sistema de detección en su interior (célula de centelleo) y, tras haber efectuado la medida, son analizados en el laboratorio para determinar la concentración de radón ambiental.

Este método proporciona datos correspondientes a un momento determinado. Sin embargo, debido a los cambios que experimenta la concentración en función del tiempo y de las condiciones concretas de ventilación, este método no aporta valores representativos que evalúen las tasas promedio de exposición al radón.

##### 3.1.2 Métodos de lectura continua

En ellos se analiza el paso constante de un flujo de aire durante un período de tiempo concreto, registrando la presencia de radón de una manera continua mediante gráficos en tiempo real.

Muy útiles para el estudio de las fluctuaciones de concentración a lo largo del día o de las estaciones del año, permiten incluso obtener relaciones entre la concentración de radón ambiental y las actividades desarrolladas en el edificio; aún así, son métodos muy voluminosos y debido a su elevado precio están limitados a tareas de investigación.

##### 3.1.3 Métodos integrados

Son aquellos que permiten obtener información sobre las concentraciones promedio durante un cierto tiempo (días, semanas o meses). Son métodos asequibles y se convierten en los más utilizados para estudios de inspección y reconocimiento, permitiendo decidir sobre la necesidad de tomar acciones correctoras (siempre habiendo efectuado medidas de tres meses de duración como mínimo).

Estos equipos de medida pueden clasificarse en dos grupos: de período corto (medida de unos días) y de período largo (medida de unos meses). Entre los primeros, se encuentran los detectores

de carbón activo y entre los segundos, cabe citar los detectores de trazas. La cámara electret puede considerarse tanto de período corto como largo, en función de la elección que se haga.

- Cámara de carbón activo: el detector es una caja de reducidas dimensiones que contiene carbón activo, donde se queda adsorbido el radón del ambiente. El tiempo de exposición de estos detectores varía entre 2 y 7 días, no debiendo prolongarse más debido al período de desintegración del radón. La medida en el laboratorio se debe realizar en las 24 horas posteriores a la recogida del detector.
- Cámara electret: está formado por una cámara con un disco detector electrostáticamente cargado (electret). Durante el proceso de medida, la desintegración del radón y su progenie reduce el voltaje de la superficie del detector y, posteriormente, un factor de calibración relaciona esta caída de tensión con la concentración de radón existente en el espacio estudiado. El tiempo de exposición de estos detectores suele ser de 3 a 12 meses en medidas integradas para obtener concentraciones medias; aún así, también es posible realizar medidas de 3 a 7 días en determinados casos.
- Detectores de trazas: es uno de los métodos más frecuentes para realizar medidas de período largo. Está basado en el efecto (huella o traza), sobre el material plástico (nitrato de

celulosa, carbonato o policarbonato) alojado en el interior del contenedor, que producen las partículas emitidas por el radón y sus descendientes al desintegrarse. El tiempo de exposición de estos detectores suele ser de 3 a 12 meses en medidas integradas cuando se necesita obtener un valor promedio de las concentraciones de radón.

### 3.2 Datos de concentración de radón en ambientes interiores en distintos países

A continuación, se recogen datos de concentración de radón en espacios interiores según algunos estudios realizados en distintos países, donde se tienen en cuenta parámetros tales como el tipo de detector elegido, su ubicación en el edificio y la duración temporal del estudio.

En unos casos, el dato se presenta como media aritmética, calculada según la expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

mientras que en otros casos se presenta como media geométrica, calculada según la expresión:

$$\bar{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$$

■ **Tabla 3. Valores de la concentración de radón en viviendas (Bq/m<sup>3</sup>) aportados por distintas publicaciones.**

Edificio	Concentración <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Detector	Duración estudio	País	Ubicación	Bibliografía
Viviendas	103 (geom.) 116,5±56,6 (aritm.)	Electret	1 año	México	-	Morales, O. Y. Et Al. 2009.
Viviendas	136 (geom.) 229 (aritm.)	Detector de trazas	6 meses	Rumania	-	Sainz, C. Et Al. 2009.
Viviendas	85 (geom.) 98 (aritm.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2009.
Viviendas	36±2 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Grecia	-	Psichoudaki, M. Et Al. 2008.
Viviendas	32-40 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Sótano	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	27-30 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Planta baja	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	27-29 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Primer piso	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	69,5 (geom.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Barros-Dios, J.M. Et Al. 2007.
Viviendas	1.453 (geom.) 1.851 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2007.
Viviendas	529 (geom.) 1.163 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Serbia	-	Zunic, Z.S. Et Al. 2007.
Viviendas	15,5 (aritm.)	-	-	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Viviendas	64 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Planta baja	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	40 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Primer piso	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	29 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Segundo piso o más	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	23 (geom.) 33 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Argentina	-	Canoba, A.C. Et Al. 1998.
Viviendas	34,0 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Amorós, R. Et Al. 1995.
Viviendas	116 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Quindós, L.S. Et Al. 1995.

### 3.2.1 Viviendas

En la Tabla 3 se muestran los datos de concentración de radón en espacios interiores ( $Bq/m^3$ ) de viviendas en diversos países según las distintas publicaciones.

### 3.2.2 Lugares de trabajo

En la Tabla 4 se recogen los datos de concentración de radón en espacios interiores ( $Bq/m^3$ ) de lugares de trabajo en diversos países según las distintas publicaciones.

■ **Tabla 4. Valores de la concentración de radón en lugares de trabajo ( $Bq/m^3$ ) aportados por distintas publicaciones.**

Edificio	Concentración $^{222}Rn$ ( $Bq/m^3$ )	Detector	Duración estudio	País	Ubicación	Bibliografía
Mina turística	4.800	Detector de trazas	3 meses	Argentina	-	Anjos, R.M. Et Al. 2010.
Escuelas	52±9	Detector de trazas	1 año	Pakistán	-	Matiullah, R. Et Al. 2010.
Varios lugares de trabajo	82 (geom.) 95±51 (aritm.)	Electret	3 meses	Grecia	-	Papachristodoulou, C.A. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo subterráneos	92±36 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Sótano	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo subterráneos	58±30 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Planta baja	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Varios lugares de trabajo	64±32 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Primer piso	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Escuelas	209 (geom.) 214 (aritm.)	Detector de trazas + electret	6 meses	Italia	Sótano	Trevisi, R. Et Al. 2010.
Escuelas	216 (geom.) 329 (aritm.)	Detector de trazas + electret	6 meses	Italia	Planta baja	Trevisi, R. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo universidad	253±3 (geom.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Cortina, D. Et Al. 2008.
Cueva turística	95±4	Detector de trazas	4 meses	España	-	Font, Ll. Et Al. 2008.
Mina	139±6	Detector de trazas	9 meses	España	-	Font, Ll. Et Al. 2008.
Edificios públicos	1.356 (geom.) 3.073 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2007.
Lugares de trabajo subterráneos	213	Detector de trazas	1 año	China	Lugares subterráneos/ túneles/ párkings	Li, X. Et Al. 2006.
Oficinas	22,6±17,0 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Fábricas	10,1±8,3 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Escuelas	28,4±24,5 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Hospitales	19,8±24,4 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Pirámide	178±14 (aritm.) 179±13 (aritm.)	Detector de trazas+ Electret	3 meses	México	-	Espinosa, G. Et Al. 2005.
Cueva de Altamira	3.456	Detector de trazas	1 año	España	-	Lario, J. Et Al. 2005.
Cueva de Altamira	3.562	Medida en continuo	1 año	España	-	Lario, J. Et Al. 2005.

## 4. Reflexiones sobre hormigón y radón

Por una parte, como se ha comprobado en el primer artículo publicado del presente trabajo, existe una amplia bibliografía sobre la radiación externa emitida por algunos de los materiales más utilizados en la construcción. Así, obteniendo los valores de las concentraciones de actividad de los isótopos naturales  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  existentes en los distintos materiales del mercado se puede calcular, de manera común, un índice de concentración de actividad (I) con el que poder compararlos de una forma objetiva.

Por otra parte, también existen múltiples datos relacionados con los valores de concentración de radón ambiental ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) en espacios interiores, por ejemplo: mapas nacionales e internacionales de las zonas más expuestas al radón, estudios sobre regiones geográficas concretas o trabajos localizados en puntos especialmente conflictivos por sus altas concentraciones ambientales. Bibliografía que también ha querido ser representada en la Tabla 3 y la Tabla 4 del presente artículo mediante una pequeña muestra de valores nacionales y extranjeros, tanto en el interior de viviendas como en lugares de trabajo.

También es importante destacar que el documento "Radiation Protection 112" considera que, a nivel general, los materiales de construcción pueden aportar un 20% del valor total de la concentración ambiental de radón en el interior de las edificaciones. Esto representa, aproximadamente, una aportación comprendida entre  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$  y  $20 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , lo que constata que la mayor aportación es la proveniente del propio terreno natural donde se ubica la construcción.

Por tanto, a nivel global se puede afirmar que la aportación a la concentración de radón ambiental interior debida a los materiales de construcción tiene una repercusión baja respecto al valor total. Un razonamiento que también puede ser extrapolable al caso concreto del hormigón.

Con el fin de profundizar en esta cuestión, en la actualidad el grupo de investigación Materiales y Sistemas Constructivos de la Edificación de la Universidad de Alicante está llevando a cabo estudios a este respecto que se espera que concluyan en breve.

Así, si se considera el terreno como fuente principal de aporte de radón ambiental, su permeabilidad intrínseca se puede clasificar en baja, media o alta según los siguientes valores:

- Permeabilidad baja  $<4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ .
- Permeabilidad media entre  $4 \cdot 10^{-13}$  y  $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

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

Según sea la permeabilidad del terreno baja, media o alta, la concentración de radón  $^{222}\text{Rn}$  en dicho terreno podría considerarse con un determinado valor en  $\text{Bq}/\text{m}^3$  según se indica en la Tabla 5 y, por tanto, la exposición potencial al radón de una vivienda ubicada en ese lugar a su vez podría ser catalogada como baja, media o alta.

Si se realiza el mismo razonamiento al respecto del hormigón, el valor medio de su permeabilidad intrínseca es de  $0,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ , es decir 10.000 veces inferior a la de un terreno calificado con permeabilidad baja. De este modo, incluso cuando el hormigón presenta microfisuras, su permeabilidad intrínseca puede llegar a valores del orden de  $0,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ , que aún siguen siendo valores 40 veces menores a los de un terreno de permeabilidad baja.

Además, debido a su elevada compacidad, se puede destacar que el hormigón es un material adecuado para ser utilizado en la envolvente de edificios sometidos a importantes emisiones de gas radón provenientes del terreno.

Otro aspecto a considerar es que el radón puede recorrer antes de desintegrarse, en el suelo normal, una longitud de un metro, razón por la que se investiga una profundidad similar en el terreno en el que se va a asentar la construcción, para determinar la exposición potencial que afectará al edificio.

La longitud de difusión del radón en el hormigón suele situarse entre 10 y 20 cm, lo que también confiere a éste una capacidad de protección.

Por tanto, el empleo de hormigón en las edificaciones junto con una ventilación frecuente, tanto natural como artificial (como medida de extracción y por razones de higiene), mejoran la protección frente a la acción de este gas en construcciones ubicadas en zonas sometidas a importantes concentraciones de radón ambiental. Protección que se incrementará notablemente cuando se utilicen, en la parte de la envolvente en contacto con el terreno, membranas que actúen contra el paso del gas radón como elementos de barrera.

## 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a D. José Luis Martín Matarranz, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), las correcciones realizadas y el aporte de material bibliográfico al presente trabajo.

■ **Tabla 5. Exposición potencial al radón en un solar a partir de los datos de concentraciones de radón en profundidad y permeabilidad intrínseca del terreno. (Fuente: Frutos, B. et al. (2010)).**

Exposición potencial al radón	Concentración en el terreno del $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )		
	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	$>100.000$	$>70.000$	$>30.000$

Parte de la presente investigación se ha realizado gracias a una ayuda económica del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

## 6. Bibliografía específica

Amorós, R.; Bolta, J. M.; Navarro, E.; Roldán, C. "Radon levels in the valencian community (Spain). Results in the province of Valencia (1990-991)". *Journal Of Environmental Radioactivity*. Vol. 27, Nº 2, Pp. 125-131, 1995.

Anjos, R.M.; Umisedo, N.; Da Silva, A.A.R.; Estellita, L.; Rizzotto, M.; Yoshimura, E.M.; Velasco, H.; Santos, A.M.A., "Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis province, Argentina". *Journal of Environmental Radioactivity*. Nº 101, Pp. 153-158, 2010.

Ardila, J. *Radiactividad Natural: El Radón*. Publicación Online. Junio, 2007. Web: [www.laem.es/documentos/radiacnaturalradon.Pdf](http://www.laem.es/documentos/radiacnaturalradon.Pdf)

Barreiro, M<sup>a</sup> A. "A exposición ao radón e seus descendentes en domicilios e edificios públicos". Curso: actualización del gas radón como factor de riesgo ambiental para la salud humana: Implicaciones de las administraciones, de los profesionales y de los ciudadanos. Noia, 2008.

Barros-Dios, J.M.; Ruano-Ravina, A.; Gastelu-Iturri, J.; Figueiras, A. "Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain". *Environmental Research*. Nº 103, Pp. 185-190, 2007.

Canoba, A. C.; Arnaud, M. I.; López, F. O.; Oliveira, A. A. Mediciones de gas radón en el interior de viviendas de la República Argentina. Publicado como Pi-16/98 de la Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina, 1998.

Cembureau. "Radon And Radioactivity In Buildings". The European Cement Association, 1999.

Cortina, D.; Durán, I.; Llerena, J. J. "Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 99, Pp. 1583-1588, 2008.

CSN. Dosis de radiación. Consejo De Seguridad Nuclear. Madrid, 2010.

Ebensperger, L.; Torrent, R. "Medición in situ de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo". *Revista Ingeniería de Construcción*. Vol. 25, Nº 3. Diciembre, 2010.

Espinosa, G.; Golzarri, J. I.; Martínez, T.; Navarrete, M.; Bogard, J.; Martínez, G.; Juárez, F. "Indoor <sup>220</sup>Rn and <sup>222</sup>Rn concentration measurements inside the Teotihuacan pyramids using ntd and e-perm methodologies". *Radiation Measurements*. Nº 40, Pp. 646-649, 2005.

Fernández, L.; Torrent, R.; Castillo, A. La mediación in situ de la permeabilidad al aire: una herramienta para el diagnóstico y el control de la calidad de ejecución.

Figueiras, A. Los mapas de radón. experiencias internacionales. El caso del mapa de radón de Galicia: Planificación y ejecución de un estudio de revalencia sobre exposición domiciliaria al radón. Universidad de Santiago de Compostela, 2010. Web: [www.usc.es/radongal/actualizacions/11\\_prevalencia\\_radon.pdf](http://www.usc.es/radongal/actualizacions/11_prevalencia_radon.pdf).

Font, Ll.; Baixeras, C.; Moreno, V. "Indoor radon levels in underground workplaces of catalonia, Spain". *Radiation Measurements*. Nº 43, Pp. S467-S470, 2008.

Frutos, B. Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones. E.T.S. Arquitectura Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2009.

Frutos, B.; Olaya, M. Protección frente a la emisión de gas radón en edificios. Publicado Como Nº 24. 2010. Colección de Informes Técnicos. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Madrid, 2010.

IAEA. "International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for safety of radiation sources". International Atomic Energy Agency. Viena, 1994.

ICRP. "Recommendations".

Lario, J.; Sánchez-Moral, S.; Cañaveras, J.C.; Cuezva, S.; Soler, V. "Radon continuous monitoring in altamira cave (northern Spain) to Assess user's annual effective dose". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 80, Pp. 161-174, 2005.

Li, X.; Zheng, B.; Wang, Y.; Wang, X. "A Survey of radon level in underground buildings in China". Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, China. 2006.

Martín, J. L. El marco legislativo y la radiación natural. Consejo De Seguridad Nuclear. Iv Workshop Radón Y Medioambiente. Suances, 2005.

Matiullah, R.; Anwar, J.; Jabbar, A.; Rafique, M. "Indoor Radon survey in 120 schools situated in four districts of the Punjab province Pakistan". *Indoor and built environment*. Nº 19, Pp. 214, 2010.

Morales, O. Y.; Martínez, T.; González, P.; Navarrete, M.; Cabrera, L.; Ramírez, A. "Indoor Radon levels and gamma-radiation in dwellings of the metropolitan zone of Guadalajara". *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 280, Nº 2, Pp.431-437, 2009.

NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.

NTP 533: El Radón y sus efectos sobre la salud. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.

- NTP 607: Calidad de aire interior: contaminantes químicos. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- Oikawa, S.; Kanno, N.; Sanada, T.; Abukawa, J.; Higuchi, H. "A survey of indoor workplace radon concentration in Japan". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 87, Pp. 239-245, 2006.
- Papachristodoulou, C. A.; Patiris, D. L.; Ioannides, K. G. "Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece". *Radiation Measurements*. Nº 45, Pp. 865-871, 2010.
- Popović, D.; Todorović, D. "Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia". *Facta Universitatis. Series: physics, chemistry and technology*. Vol. 4, Nº 1, Pp. 11-20, 2006.
- Psichoudaki, M.; Papaefthymiou, H. "Natural radioactivity measurements in the city of Ptolemais" (Northern Greece). *Journal of environmental radioactivity*. Nº 99, Pp. 1011-1017, 2008.
- Quindós, L. S. Radón: un gas radiactivo de origen natural en su casa. Consejo de Seguridad Nuclear y Universidad de Cantabria. Santander, 1995.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J. "A method for the measurement of the emanation factor for  $^{222}\text{Rn}$  in small samples of porous materials". *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 56, Nº 1-4, Pp. 171-174, 1994.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J. "Study of areas of Spain with high indoor radon". *Radiation measurements*. Vol. 24, Nº 2, Pp. 207-210, 1995.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J.; Ródenas, C.; Gómez, J.; Arteche, J. "Natural radioactivity of cements and granites in Spain". *Annales de l'Association Belge de Radioprotection*. Vol. 19, Nº 1-2, Pp. 289-298, 1994.
- Quindós, L. S.; Newton, G. J. "Estimation of indoor  $^{222}\text{Rn}$  from concrete". *Health Physics*. Vol. 56, Nº 1, Pp. 107-109, 1989.
- Rahman, S. U.; Anwar, J.; Matiullah, J. A. "Measurement of indoor radon concentration levels in Islamabad, Pakistan". *Radiation Measurements*. Nº 43, Pp. 401-404, 2008.
- Rahman, S. U.; Rafique, M.; Matiullah, J. A. "Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad capital area, Pakistan". *Building and Environment*. Nº 45, Pp. 421-426, 2010.
- Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifica, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. Madrid, 1995.
- Real Decreto 140/2003, De 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE Nº 45. Madrid, 2003.
- Real Decreto 1630/92 de 29 de diciembre por el que se dictan las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. BOE Nº 34. Madrid, 1992.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE Nº 178. Madrid, 2001.
- Real, G. El Radón. Tratamiento jurídico de un enemigo invisible. Editorial Club Universitario. Alicante, 2002.
- Risica, S. "Legislation on radon concentration at home and at work. Radiation protection dosimetry, Vol. 78, No 1, Pp. 15-21. Nuclear Technology Publishing, 1998.
- Risica, S.; Bolzan, C.; Nuccetelli, C. "Radioactivity in building materials: experimental methods, calculations and an overview of the Italian situation". *Radon in the living environment*, Nº 19. Abril. Atenas, 1999.
- Sainz, C.; Dinu, A.; Tiberius Dicu, T.; Szacsvai, K.; Cosma, C.; Quindós, L. S. "Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radon-prone areas, Ştei (Romania) and Torrelodones (Spain)". *Science of the total environment*. Nº 407, Pp. 4452-4460, 2009.
- Sainz, C.; Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Gómez, J.; Fuente, I.; Quindós, L.; Matarranz, J. L. "High background radiation areas: the case of Villar de la Yegua village (Spain)". *Radiation Protection Dosimetry*. Nº 125(1-4), Pp. 565-567, 2007.
- Steger, F.; Kunsch, B.; Buchner, I. Önorm S 5200. "Radioactivity in building materials (A Standard In Austria To Limit Natural Radioactivity In Building Materials)". *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 45. Nº 1/4, Pp. 721-722. Nuclear Technology Publishing, 1992.
- Tevisi, R.; Caricato, A.; D'alexandro, M.; Fernández, M.; Federica Leonardi, F.; Armando Luches, A.; Tonnarini, S.; Veschetti, M. "A pilot study on natural radioactivity in schools of south-east Italy. Environment International. Nº 36, Pp. 276-280, 2010.
- UE. Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción, 1988.

---

UE. 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. Diario Oficial N° L 159 De 29/06/1996.

UE. Directiva 98/83/Ce del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial N° L 330 De 5/12/98.

UE. Draft European Basic Safety Standards Directive. Versión 24 Febrero, 2010.

UE. Radiation Protection 88. "Recommendations for the implementation of Title VII of bss concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources", 1997.

UE. Radiation Protection 112. "Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials", 1999.

UE. Radiation Protection 122. "Practical use of the concepts of clearance and exemption. part II natural radiation sources", 2002.

UE. Recomendación 2001/928 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. Diario Oficial N° L 344 De 28/12/2001.

UE. Recomendación 90/143/Euratom de la Comisión de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. Diario Oficial N° L 080 De 27/03/1990.

Unsclear 2006. Report Vol. I. "Effects of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2008.

Unsclear 2008 Report Vol. I. "Sources of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2010.

WHO. "Air quality guidelines for Europe". WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Copenhagen, 2000.

WHO. Recomendaciones organización mundial de la salud. Web: [www.who.int/ionizing\\_radiation/env/radon/en](http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en).

WHO. "Handbook on indoor radon. A public health perspective". WHO. France, 2009.

Zunic, Z. S.; Yarmoshenko, I. V.; Birovljev, A.; Bochicchio F. et Al. "Radon survey in the high natural radiation region of Niska Banja, Serbia". Journal of Environmental Radioactivity. N° 92, Pp. 165-174, 2007.





Revista de la Asociación Latinoamericana  
de Control de Calidad, Patología y  
Recuperación de la Construcción

E-ISSN: 2007-6835

revistaalconpat@gmail.com

Asociación Latinoamericana de Control  
de Calidad, Patología y Recuperación de

Frutos Vázquez, B.; Olaya Adán, M.; Saiz, J. L. Esteban  
Acciones de rehabilitación frente a la entrada de gas radón  
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y  
Recuperación de la Construcción, vol. 1, núm. 2, mayo-agosto, 2011, pp. 170-195  
Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la  
Construcción, A. C.  
Mérida, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639585006>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



# Revista ALCONPAT

<http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista>



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

## Acciones de rehabilitación frente a la entrada de gas radón

B. Frutos Vázquez<sup>1</sup>, M. Olaya Adán<sup>1</sup>, J. L. Esteban Saiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Calle Serrano Galvache nº 4, 28033 Madrid, España. Tel: +34 91 3020440, Fax: +34 91 3020700. [borjafv@ietcc.csic.es](mailto:borjafv@ietcc.csic.es), [olaya@ietcc.csic.es](mailto:olaya@ietcc.csic.es), [jlesteban@ietcc.csic.es](mailto:jlesteban@ietcc.csic.es)

### Información del artículo

Artículo recibido el 03 de Noviembre de 2010, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 30 de Enero de 2011. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el primer número del año 2012 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2011

© 2011 Alconpat Internacional

### RESUMEN

La Organización Mundial de la Salud (WHO), así como distintos organismos internacionales de protección radiológica, clasifican al gas radón como un agente patológico para los usuarios de los edificios en donde se manifiesta su presencia. Por su origen, en la cadena de desintegración del uranio, conlleva efectos radiactivos que, en el organismo humano, determinan un aumento de riesgo en la generación de cáncer pulmonar. Procedente de suelos donde hay masas de granito u otros sustratos con contenidos de uranio, penetra a través de los materiales habitualmente usados en la construcción; como es el caso de las soleras de hormigón, muros de sótano, etc. Para impedir la inmisión de este gas en los espacios habitados, se pueden considerar varias actuaciones en edificios ya construidos. Para la realización de esta investigación se ha construido un módulo experimental de vivienda y se han analizado las concentraciones de radón en su interior. Se ha podido observar una correlación con la presión atmosférica como parámetro determinante en la variación del flujo de radón al interior en un edificio sin protección. Posteriormente se han ejecutado diversas medidas de protección, como acciones de rehabilitación, basadas en sistemas de despresurización en terreno. Estos sistemas han hecho uso de arquetas de captación enterradas en dos ubicaciones distintas y con dos tipos de extracción, forzada o natural. Los resultados analizados muestran una mayor efectividad en la arqueta bajo solera, usando extracción natural o forzada, y una alta efectividad de la arqueta exterior, únicamente cuando se usa la extracción forzada. Se han alcanzado efectividades en el rango de 91-99 % en todos los casos, salvo en la arqueta exterior con extracción natural que únicamente consigue un promedio de 55%.

**Palabras clave:** Radón, prevención de riesgo de entrada, actuaciones correctoras.

Autor de contacto: B. Frutos Vázquez

## 1. INTRODUCCION

El uranio (U-238), elemento presente en la composición de suelos, aparece como origen de una cadena de desintegración de elementos radiactivos dentro de la cual se haya el gas radón (Rn-222). Este gas inerte de origen natural, con un periodo de vida de 3,8 días, es capaz de viajar entre los poros del suelo 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, completando en ambos casos su proceso de desintegración. 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 sus descendientes de vida corta en el interior de nuestro organismo, es capaz alterar el ADN de los tejidos pulmonares. La Organización Mundial de la Salud, califica al radón como agente carcinógeno de grado 1. Según este Organismo, el radón es la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco.

En las últimas décadas se han ido recogiendo, en la normativa de salubridad de distintos países, las sucesivas recomendaciones emanadas de investigaciones sobre los efectos en la salud (<sup>1</sup>) que supone respirar en espacios cerrados con presencia de gas radón.

El denominador común de estas normativas es la asignación de niveles límite de concentración de radón (<sup>2</sup>) en tales espacios así como la intervención con soluciones constructivas que reduzcan dichas concentraciones por debajo de los límites seguros. En general contemplan ámbitos de aplicación bien relacionados con las condiciones que deben cumplir los espacios destinados a puestos de trabajo o bien 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) (<sup>3</sup>). En la actualidad, esta normativa no contempla la protección de los usuarios de los edificios frente al riesgo de habitar con excesiva concentración de gas radón en espacios cerrados. Durante la fase de redacción del Código, el Consejo de Seguridad Nuclear de España (CSN), presentó una propuesta de inclusión de un capítulo que incluyese medidas de protección frente a la entrada de radón en edificios de nueva construcción. La propuesta se basa en los límites de concentración de radón aceptables propuestos por la Comisión Europea:

### NIVELES LÍMITES DE CONCENTRACIÓN:

- < 200 Bq/m<sup>3</sup> para viviendas de nueva construcción
- < 400 Bq/m<sup>3</sup> para viviendas construidas

En esta primera versión del Código ya aprobada, el ministerio no creyó oportuno incluir aspectos relativos a la protección frente al gas radón. Uno de los argumentos para no hacerlo fue el de evitar una percepción de riesgo en la sociedad en aquellas viviendas que ya estaban construidas y para las que no se tenían datos en el momento de aprobación de código de medidas correctoras probadas. Por este motivo se creyó oportuna la presentación de un proyecto de investigación que se está realizando bajo el amparo y subvención del Consejo de Seguridad Nuclear.

---

<sup>1</sup> - Organización Mundial de la Salud (WHO)  
- International Comisión on Radiological Protecction (ICRP)  
- The International Atomic Energy Agency (IAEA)  
- World Health Organization (WHO). Department of protection of the human environment. "Sources, Exposure and Heath Effects" Organizacion Mundial de la Salud. (2001)

<sup>2</sup> Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)

<sup>3</sup> [www.codigotecnico.org](http://www.codigotecnico.org)

El proyecto tiene como título “Estudio de la viabilidad y la efectividad de las acciones de remedio frente a la presencia de gas radón en los edificios existentes” y el objeto de este artículo es presentar los avances en esta primera fase en la que se ha construido un módulo experimental y se ha estudiado la entrada del gas en el mismo. Estos datos se han correlacionado con variables atmosféricas para entender la influencia de los cambios climáticos en el flujo de radón hacia el interior. Por último, se han ejecutado distintas soluciones constructivas enfocadas a frenar la entrada del gas radón al interior, y se ha estudiado, en cada una de ellas, la eficiencia de reducción en la concentración interior del gas. Dichas medidas podrían denominarse actuaciones de rehabilitación enfocadas a la mejora de las condiciones de salubridad de una vivienda entendiendo que, una excesiva concentración de gas radón, constituye un riesgo para la salud como manifiestan distintos organismos a través de estudios médicos.

El equipo investigador está formado por personal de:

- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc (CSIC). España
- Cátedra de Física Médica. Facultad de Medicina. Universidad de Cantabria. España

## **2. MÉTODOS**

### **2.1. Ubicación del módulo experimental**

Para la elección del lugar donde construir el módulo experimental se ha pretendido escoger una zona con alta presencia de radón en el terreno para así poder llegar a testar las actuaciones de remedio con mayor efectividad. La empresa ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. que ha dedicado su actividad a la extracción de uranio en las inmediaciones de Ciudad Rodrigo en la mina de Saélices el Chico, provincia de Salamanca, España, ha colaborado en el proyecto cediendo el terreno donde se ha construido el módulo. La alta presencia de radón en la zona y la disponibilidad de la empresa ENUSA han sido determinantes para la elección de la ubicación final. En las figuras 1 y 2 se puede observar la situación de la zona de actuación dentro del mapa de presencia de radón que ha elaborado el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear).

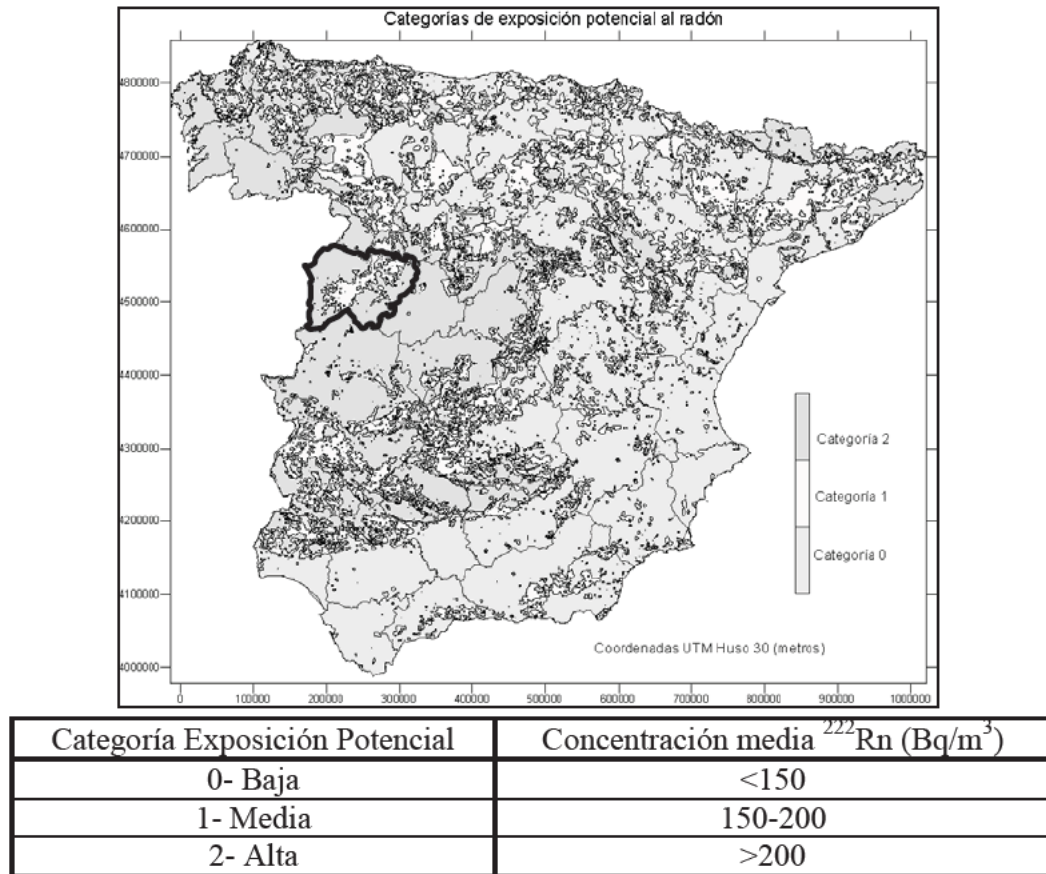


Figura 1. En el mapa de estimación de presencia de radón en España en viviendas, se observa que la provincia de Salamanca se encuentra en una zona de alto riesgo.

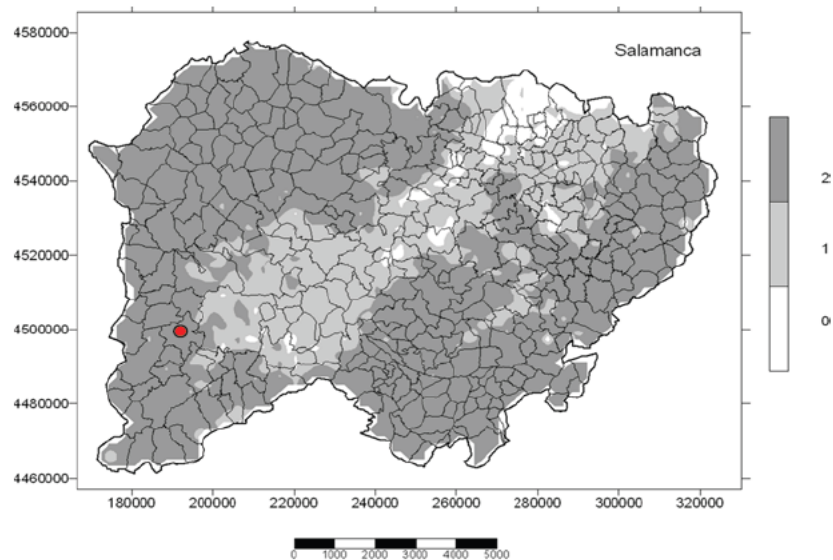


Figura 2. Mapa de la provincia de Salamanca. Presenta unos índices altos (grado 2) en la mayoría del territorio. El punto rojo indica la situación exacta de la ubicación del módulo en las instalaciones de ENUSA, Ciudad Rodrigo, Salamanca, España.

## 2.2. Registros de radón en el terreno de actuación. Verificación de concentraciones.

Se ha llevado a cabo una caracterización radiológica del suelo elegido sobre el que se ha construido el módulo experimental, que ha consistido 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 alcanzados en cada uno de los apartados indicados según el protocolo del laboratorio de la Cátedra de Física Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria

- a) Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo

Se han caracterizado 9 muestras de terreno en el lugar de construcción del módulo experimental. En la (Tabla 1) se muestran los resultados de una muestra obtenida en la excavación realizada bajo el módulo.

Tabla 1. Caracterización radiológica de la muestra de terreno obtenida en la excavación realizada para construir el módulo experimental.

PROCEDENCIA	Instalaciones de Enusa – Saélices El Chico (Salamanca)		
REFERENCIA	CSIC-ENUSA 03		
REFERENCIA UC	068/05		
FECHA RECOGIDA	10/02/05		
FECHA ANÁLISIS	10/03/05		
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS : CFM-FM-1003.01			
	ACTIVIDAD (Bq/Kg)	ERROR DE LA ACTIVIDAD (Bq/Kg)	L.I.D. (Bq/Kg)
$^{238}\text{U}$ ( $^{234}\text{Th}$ )	1278,8	94	160,1
$^{226}\text{Ra}$ ( $^{214}\text{Bi}$ )	1012,5	62	16,4
$^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ac}$ )	47,3	11,0	32,3
$^{40}\text{K}$	826	67	107
$^{137}\text{Cs}$	--	--	11,1

Destaca la elevada concentración de radio, 20 veces superior a un suelo normal, lo que garantiza la presencia de gas radón.

- b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad

Mediante el empleo de una sonda, células de centelleo, equipo contador, se ha evaluado la concentración de radón a 1 metro de profundidad, en la zona donde ha sido colocado el módulo así como en los alrededores del mismo. Los resultados de las 20 medidas realizadas en una superficie de unos 150 m<sup>2</sup>, muestran una concentración media de radón a un metro de profundidad de 250.000 Bq/m<sup>3</sup>, si bien es de destacar la gran variabilidad encontrada en la concentración de radón que oscila desde los 70.000 Bq/m<sup>3</sup> hasta 500.000 Bq/m<sup>3</sup>, lo que en principio, clasificaría la zona como de alto riesgo a la presencia de radón en viviendas según la propuesta que aparece en el anteproyecto de nuevo Código Técnico de la Edificación.

c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad:

Al objeto de disponer de una información global del suelo sobre el que se construye el módulo, se ha llevado a cabo un análisis granulométrico en dos de las muestras recogidas que han dado un resultado de permeabilidad media para el suelo de  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**2.3. Diseño y construcción del módulo. Materiales empleados.**

El diseño del módulo experimental parte de la idea de reproducir las características tipológicas de una vivienda en España usando los materiales comunes para este tipo de construcciones.

El módulo presenta dos alturas, una de ellas sobre la rasante del terreno y la otra semienterrada. De esta manera se puede estudiar la presencia de radón en sótanos y en plantas elevadas. También se puede usar el semisótano para reproducir el caso de una cámara ventilada bajo un forjado sanitario. En planta ocupa un cuadrado de 5 metros de lado. Las dos plantas están unidas mediante una escalera interior con puerta que cierra ambos espacios. La cubierta es plana transitable para poder acceder a ella y manipular los sistemas de extracción que se vayan a colocar. En las figuras 3 y 4 se puede observar los planos de diseño arquitectónico del módulo experimental.

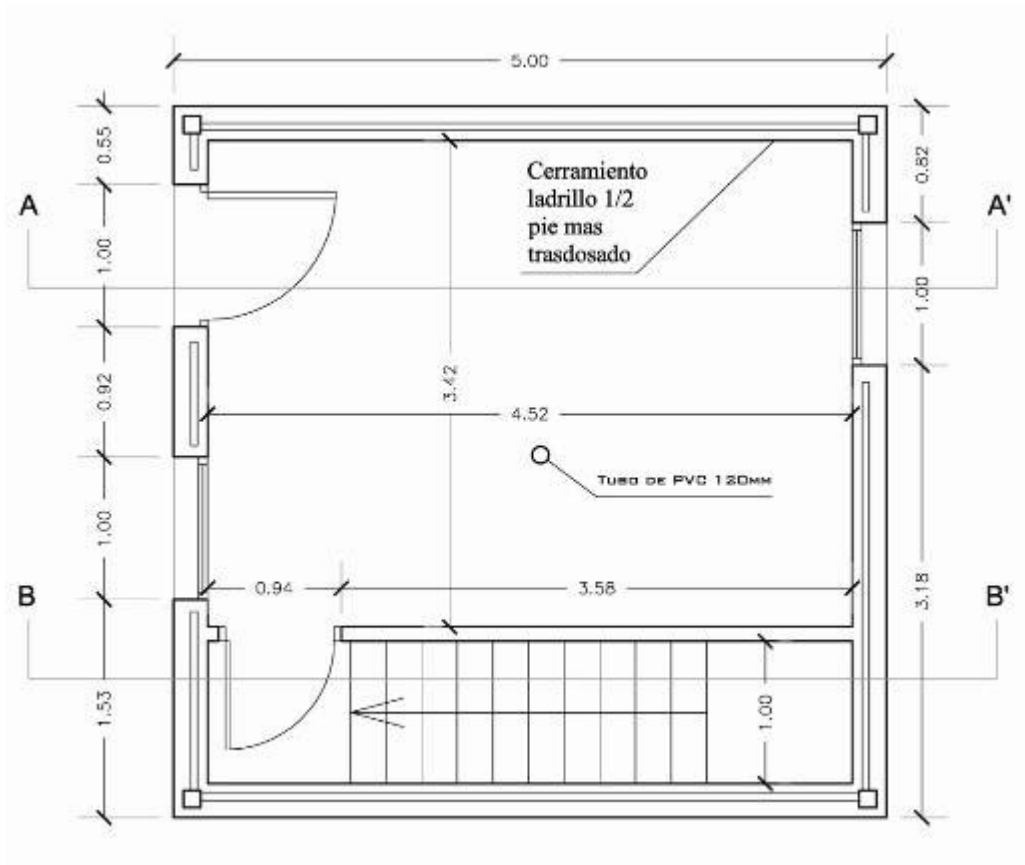


Figura 3. Diseño de planta baja del módulo experimental

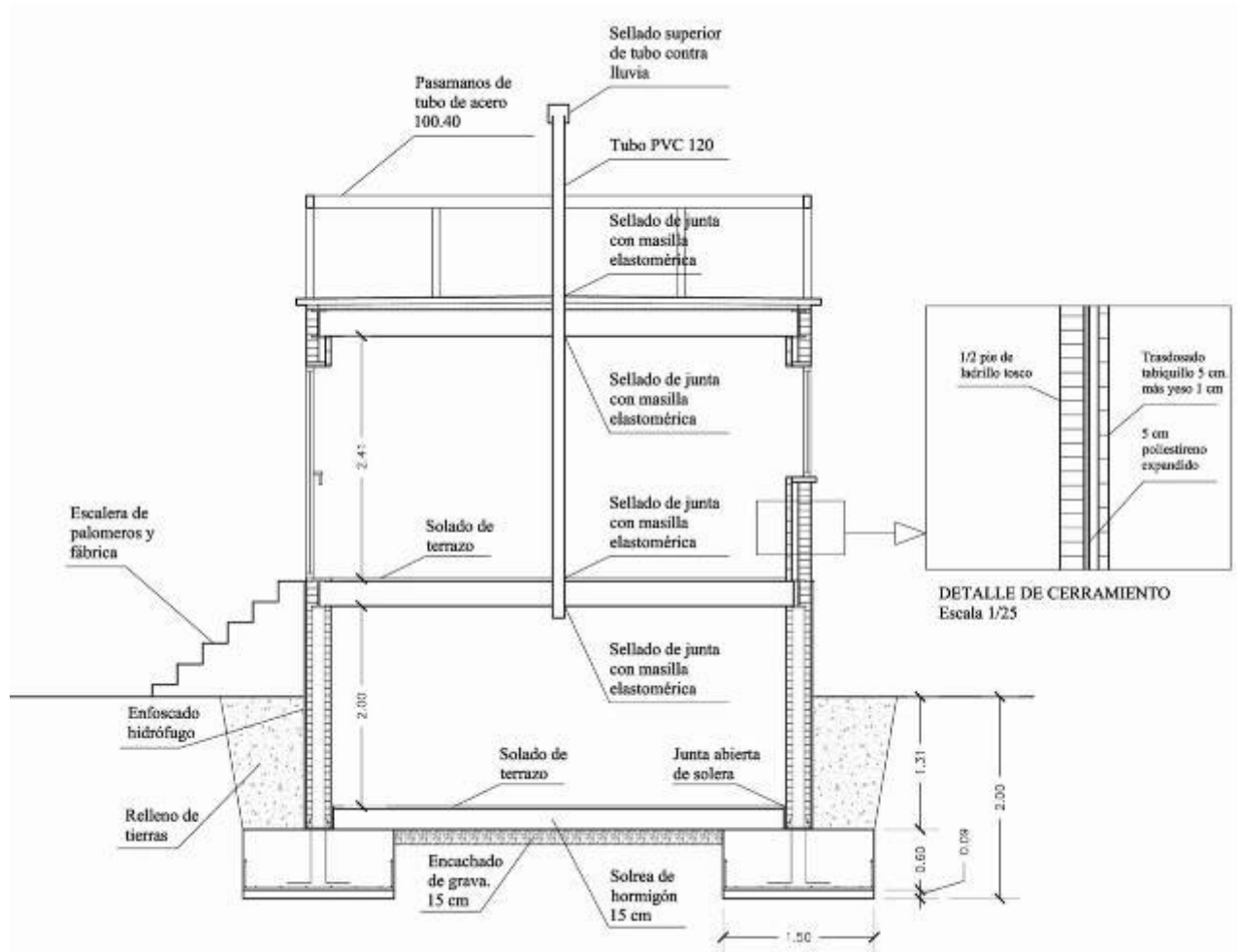


Figura. 4. Sección del módulo experimental por el eje central

Para la construcción se han usado materiales propios de este tipo de edificaciones:

- Sótano: Muros de sótano de 1 pie de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento exterior. Sin drenaje ni lámina impermeabilizante. De esta manera, el módulo se encuentra sin protección alguna frente al paso de radón desde el terreno.
- Solera: Losa de hormigón de 10 cm de espesor sobre encachado de grava. No se ha instalado lámina impermeabilizante para no obstaculizar el paso de radón hacia el interior
- Cerramiento de planta: Muro de ½ pie de ladrillo exterior, cámara de aire y trasdosado interior con tabique de hueco sencillo.
- Cubierta: La cubierta es plana con acceso desde el exterior para la instalación de sistemas de extracción.

El módulo cuenta con una puerta de acceso y dos ventanas en fachadas opuestas que se utilizan para provocar una ventilación natural. Además está dotado de red eléctrica a través de un generador de gasoil que garantiza un suministro constante para abastecer a los equipos de medida y a los extractores que se instalen. En la figura 5 se observa el módulo terminado



Figura 5. Fotografía del módulo terminado

#### **2.4. Programa de trabajo.**

El proyecto de investigación tiene como objetivo previo estudiar la entrada de radón en el módulo experimental construido sin protección alguna frente al paso del gas. Se ha estudiado la concentración de radón en los espacios interiores (planta de sótano y planta baja) correlacionando los registros con los datos de viento, presión atmosférica, precipitaciones y temperaturas.

La segunda fase del proyecto se ha dedicado a estudiar la viabilidad y la efectividad de algunas soluciones correctoras realizando mediciones de concentración de radón tras haber introducido dichas actuaciones.

#### **2.5. Equipo para el registro de los diferentes parámetros.**

En el interior del módulo se han instalado los equipos necesarios para registrar los distintos parámetros:

Para medir la permeabilidad del terreno “in situ” se ha utilizado el equipo Checo RADON-JOK que usa el flujo de aire que se extrae a un 1 metro de profundidad.

Para el registro de las concentraciones de radón se han usado equipos DOSEMAN (Sarad) y SCOUT (Sarad) que proporcionan medidas en continuo con promedios de hora en hora.

También se dispone de 8 sondas de temperaturas en el interior y exterior y otras 4 para el registro de diferencias de presión entre el interior y el exterior del módulo y entre la planta superior e inferior. Por otro lado contamos con el uso de información meteorológica a través de la estación de ENUSA en Saelices (lluvia, viento, temperatura, humedad)



Figura 6. Laboratorio instalado en el interior del módulo para la medida en continuo de los diferentes parámetros de registro.

### 3. RESULTADOS

Se presentan a continuación los registros obtenidos de concentración de radón en el interior del módulo cuando este se encontraba sin ningún tipo de protección frente al paso del gas. Estos se han correlacionado con los datos atmosféricos del periodo de medida y nos da una idea de la influencia que estos tienen en la penetración y acumulación de radón.

Posteriormente se muestran los resultados de efectividad de algunas soluciones correctoras introducidas, determinados por las comparaciones de concentraciones de radón antes y después de introducir dichas medidas.

#### 3.1. Concentraciones de radón correlacionadas con datos atmosféricos. Módulo sin protección frente a la entrada de gas radón.

El módulo construido se mantuvo cerrado durante el periodo inicial, aproximadamente 4 meses, con el fin de estudiar el comportamiento del radón en el prototipo de edificio. Se trata de una edificación construida sin ningún tipo de medida de protección frente al radón y que, por tanto, es susceptible a la penetración del mismo a través de su envolvente.

Diversos estudios (4) analizan la generación de radón procedente del terreno, la penetración del mismo a través de los cerramientos de un edificio, y su acumulación en el interior de los mismos.

---

4

- Lluís Font "The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" Grupo de Física de les Radiations, Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona, España.
- Modelos de movimiento de radón en terreno (Washington and Rose, 1992; Schery and Siegel, 1986; Rogers and Nelson, 1991; Chen and Thomas, 1995), modelos de penetración de radón en espacios (Andersen, 1992; Nielson et al., 1994; Revzan et al., 1993; Riley et al., 1996).

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.

La diferencia entre las presiones que existen en el terreno y las que existen en el interior del módulo determina el flujo de radón hacia el interior. Debido a distintos factores como pueden ser las ventilaciones o los gradientes de temperaturas, es normal encontrar una depresión en el interior de un edificio comparada con la presión en los poros del terreno, y ello es lo que induce, principalmente, un flujo de radón por convección desde el terreno hasta el interior del edificio.

Los cambios en las variables atmosféricas no afectan de la misma manera al aire de los poros del terreno que al del interior del módulo, produciéndose un desfase en tiempo hasta igualarse las condiciones. Este desfase provoca modificaciones en el gradiente de presiones y, por tanto, variaciones en el flujo de radón hacia el interior. A continuación se analizan los resultados obtenidos en esta fase:

a) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de precipitaciones.

Se observa una correlación positiva entre la lluvia y el aumento de la concentración interior de radón, tanto en el sótano como en la primera planta. 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. (Figura 7)

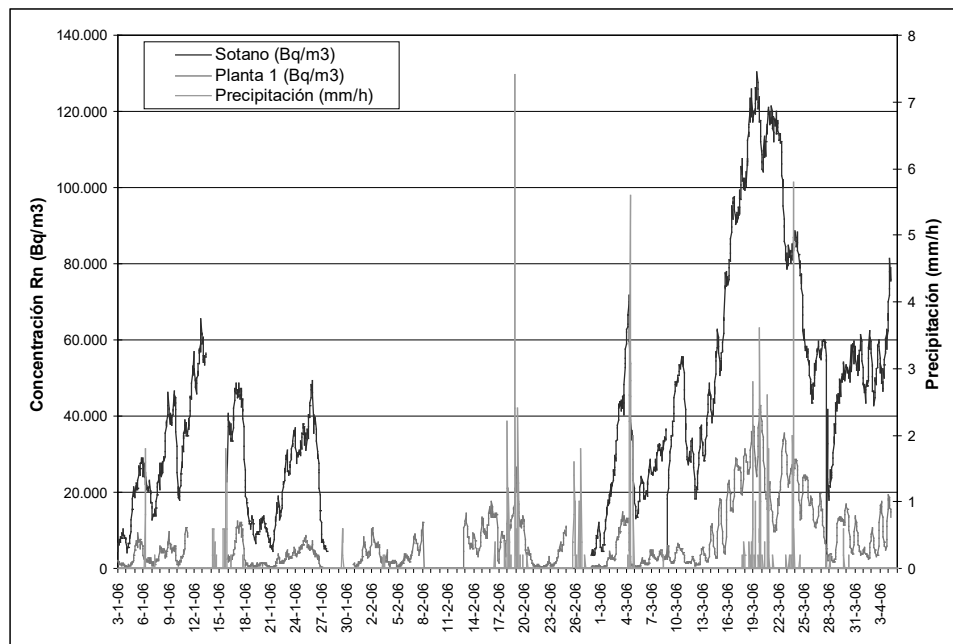


Figura 7. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con las precipitaciones registradas en la zona. Se aprecia un aumento de las concentraciones cuando se producen picos sustanciales en las precipitaciones.

b) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de velocidad de viento y presión producida por este.

La acción del viento sobre la concentración de radón interior tiene dos vertientes opuestas. Por un lado, en función de las características arquitectónicas de la vivienda, el viento puede favorecer el

intercambio de aire entre el interior y el exterior de la misma. Este aporte de aire con baja concentración de radón, daría lugar a una reducción de la misma en el interior.

Por otra parte, el viento 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 módulo, este efecto parece más eficaz 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 como veremos más adelante.

c) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de temperaturas exteriores.

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 (aumento de presión por la ley los gases ideales  $P=nRT/V$  <sup>(5)</sup>) y tiende a fugarse por chimeneas, fisuras o grietas, ventanas, etc. Ese proceso crea una depresión interior que favorece la entrada de radón desde el suelo por succión.

Durante el periodo analizado, no parece haber correlación entre ninguna de las temperaturas medidas y la concentración de radón. Únicamente en los últimos siete días se observó correlación positiva entre las temperaturas exteriores y la concentración de radón interior. La diferencia de temperaturas entre el aire exterior e interior del módulo puede inducir una diferencia de presiones que modifique la entrada de radón. Para el rango de datos disponibles, estas diferencias son pequeñas (del orden de 1 Pa) y no parecen responsables de las variaciones observadas en la concentración de radón.

d) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de presión atmosférica.

Se observa una correlación negativa entre la presión atmosférica y las concentraciones de radón en el interior del módulo. Los descensos de presión provocan un incremento significativo de la concentración. El mecanismo por el que se produce tal incremento podría relacionarse con la permeabilidad del suelo a diferentes profundidades. Las variaciones observadas de presión son del orden de  $10^3$  Pa, tres órdenes de magnitud mayores que las inducidas por el viento o la diferencia de temperaturas, lo cual indica que se trata del parámetro dominante de entre los otros tres analizados anteriormente.

Complementariamente se ha observado una relación entre los cambios de presión atmosférica, las precipitaciones y la velocidad del viento. Las bajas presiones suponen un incremento de la probabilidad de precipitaciones. De una forma menos evidente, también se observa que los descensos de presión incrementan la velocidad del viento. (Figura 8)

---

<sup>5</sup>  $P=nRT/V$  El aumento de presión es directamente proporcional al aumento de temperatura a volumen constante.

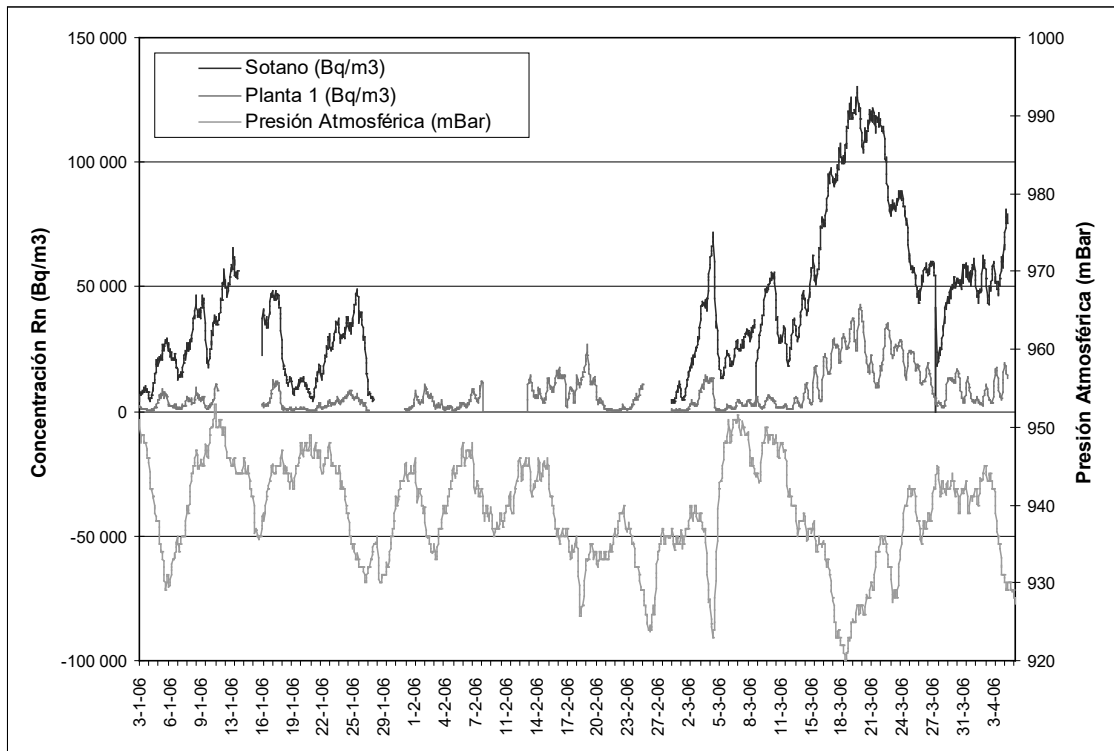


Figura 8. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con la presión atmosférica.

### 3.2. Efectividad de las medidas de rehabilitación enfocadas a reducir la concentración de radón interior.

Durante el periodo inicial del módulo, sin protección frente a la inmisión de gas radón, se han registrado unas concentraciones de radón promediadas en el tiempo de dicho periodo. Estas concentraciones sirven de base comparativa para poder evaluar que reducción de radón consiguen las soluciones correctoras que han sido testadas por periodos de tiempo de aproximadamente un mes. Las concentraciones iniciales en el módulo sin proteger constituyen el patrón base de comparación, y son las siguientes:

Tabla 2. Concentraciones de radón en punto de inicio. Situación de módulo sin protección

	Planta SÓTANO	Planta 1	Relación P. sótano / P.1
Concentración PROMEDIO (3 meses)	<b>39.385 Bq/m<sup>3</sup></b>	<b>6.855 Bq/m<sup>3</sup></b>	<b>5,75</b>

En esta fase de la investigación, se introducen en el módulo distintas medidas de protección frente a la inmisión de radón y se evalúan conforme a su capacidad para reducir la concentración de radón en el interior del módulo.

Este tipo de medidas podrían clasificarse en dos grandes grupos atendiendo a la base de funcionamiento en aquellas que interponen barreras frene al paso de radón en todo elemento del edificio que esté en contacto con el terreno (soleras, muros de sótano, etc.) (Ver figura 10) y

aquellas que extraen el gas del terreno antes de que este pueda penetrar en los edificios mediante la instalación de sistemas de expulsión de aire conectados al terreno (Ver figura 9). Dentro de éstas últimas existen variaciones como la presurización en lugar de la extracción, o las ventilaciones de forjados sanitarios.

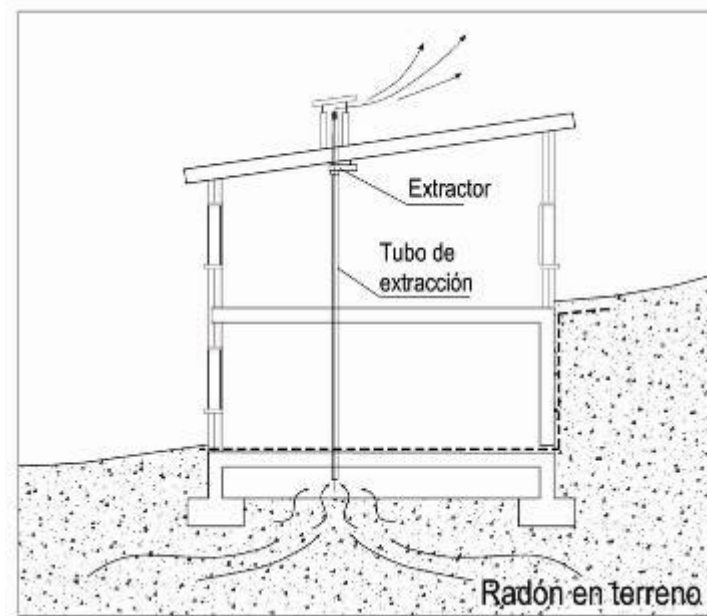


Figura 9. Medidas de extracción

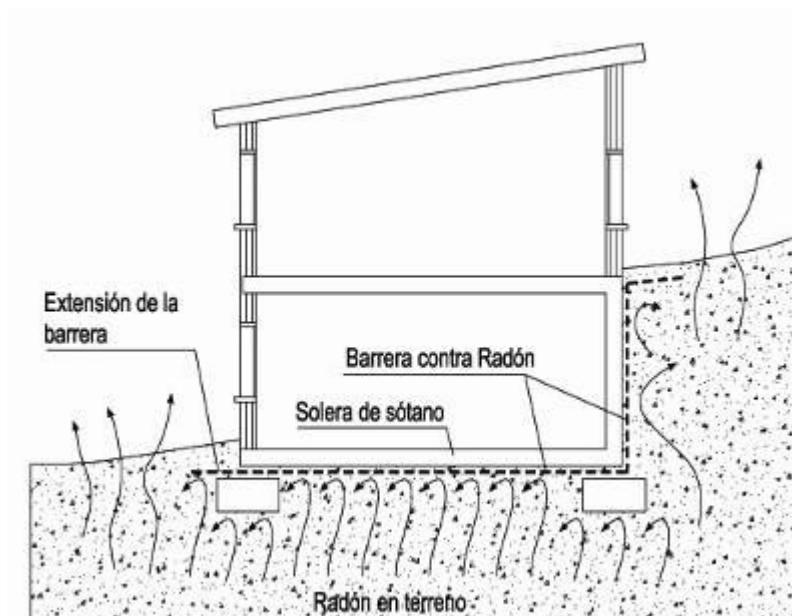


Figura 10. Medidas de barreras

En este trabajo se analizan únicamente las medidas de extracción, mediante tiro natural y mediante tiro forzado usando espacios de captación (arquetas) centrados y exteriores

a) Efectividad de un sistema de extracción natural por captación en arqueta central.

Esta medida de rehabilitación consiste en un sistema de extracción natural del gas en el terreno de asiento de la edificación. Se ha construido al efecto una arqueta enterrada para captar el gas en el subsuelo y se ha situado bajo la solera del módulo perforando la losa de hormigón. También se aprovechó para construir una arqueta exterior para evaluar la influencia de la ubicación de las mimas. Ambas se han construido con ladrillo perforado para permitir la entrada del gas hacia el interior. (Figuras 11 y 12)

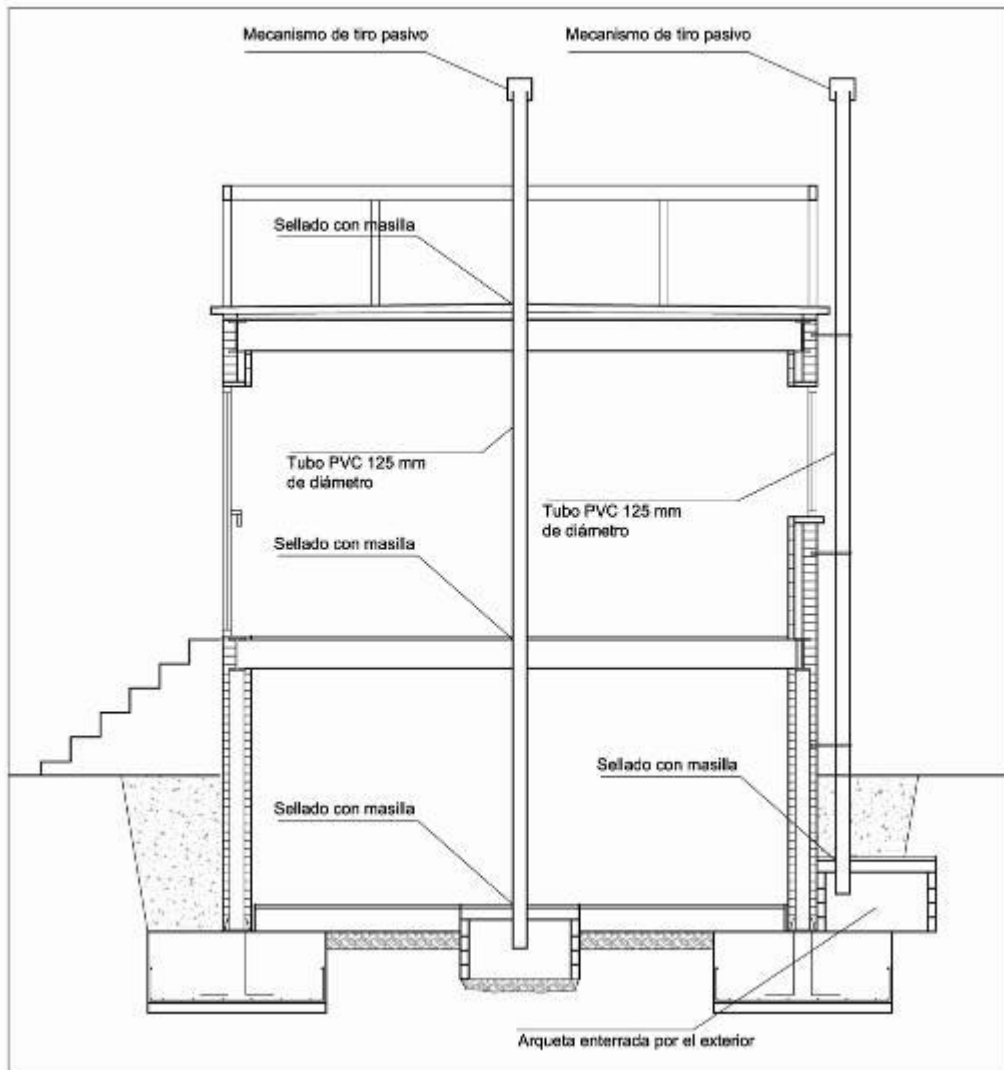


Figura 11. Sección del módulo por el eje central. Se observa el diseño del sistema de extracción.

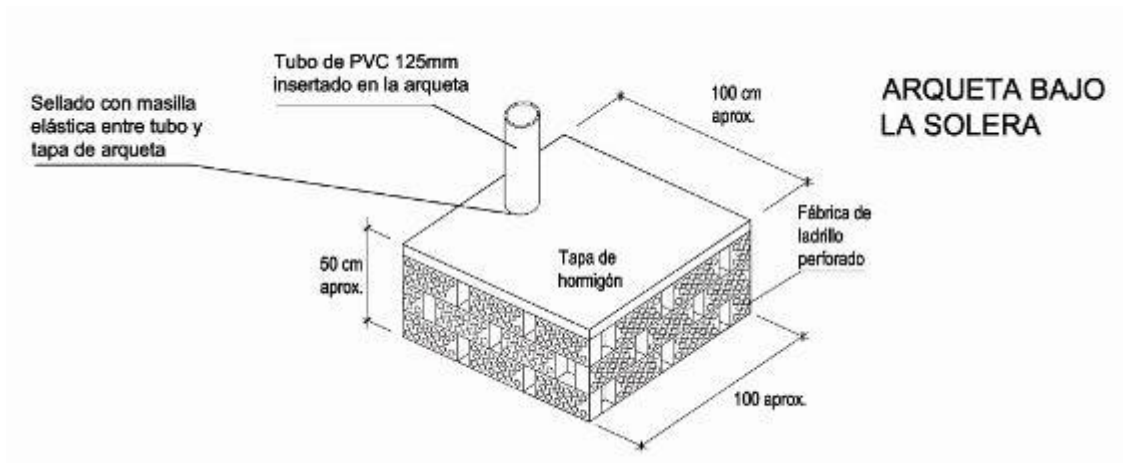


Figura 12. Diseño de la arqueta tipo.

Se han insertado tubos por la parte superior de las arquetas y se les ha conducido hasta cubierta para forzar un tiro natural. (Figuras 13 y 14)



Figura 13. Fotografía de la construcción de la arqueta situada bajo la solera de sótano.



Figura 14. Salida de los tubos a cubierta. En esta fotografía se encuentran sellados en su extremo.

Se trata de estudiar la mitigación que puede producir el sistema de extracción en la concentración interior. En los extremos de estos tubos, se colocó un dispositivo de extracción natural que funciona por el efecto del viento. (Figura 15)



Figura 15. En esta fotografía se encuentra abierto el tiro de la arqueta situada bajo el módulo mientras que el otro tubo está sellado.

El efecto que ello causó fue una reducción considerable de la concentración de radón en el interior del módulo. En la Figura 16 se observa como la concentración de radón en el sótano se reduce de unos índices que oscilan en torno a los 80.000 Bq/m<sup>3</sup> hasta los 1.500 Bq/m<sup>3</sup>. En planta baja la concentración ha pasado de un valor medio de 20.000 Bq/m<sup>3</sup> a un valor medio de 500 Bq/m<sup>3</sup>.

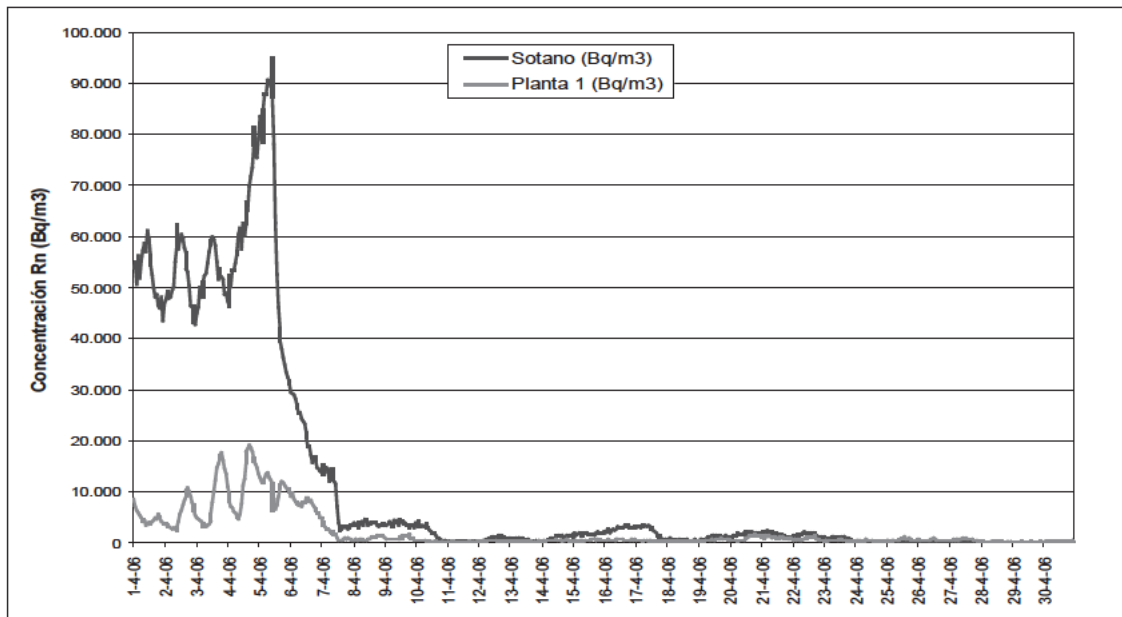


Figura 16. En esta gráfica se observa la reducción en la concentración de radón cuando han entrado en funcionamiento la extracción natural a través de las dos arquetas enterradas.

La velocidad de viento puede provocar un mejor funcionamiento del tiro pasivo debido al efecto “Venturi” y parece que así se confirma en los días del 10 al 12 del mes de abril en los que se observa una relación positiva entre el aumento de la velocidad del viento y la disminución de concentración radón (Figura 17).

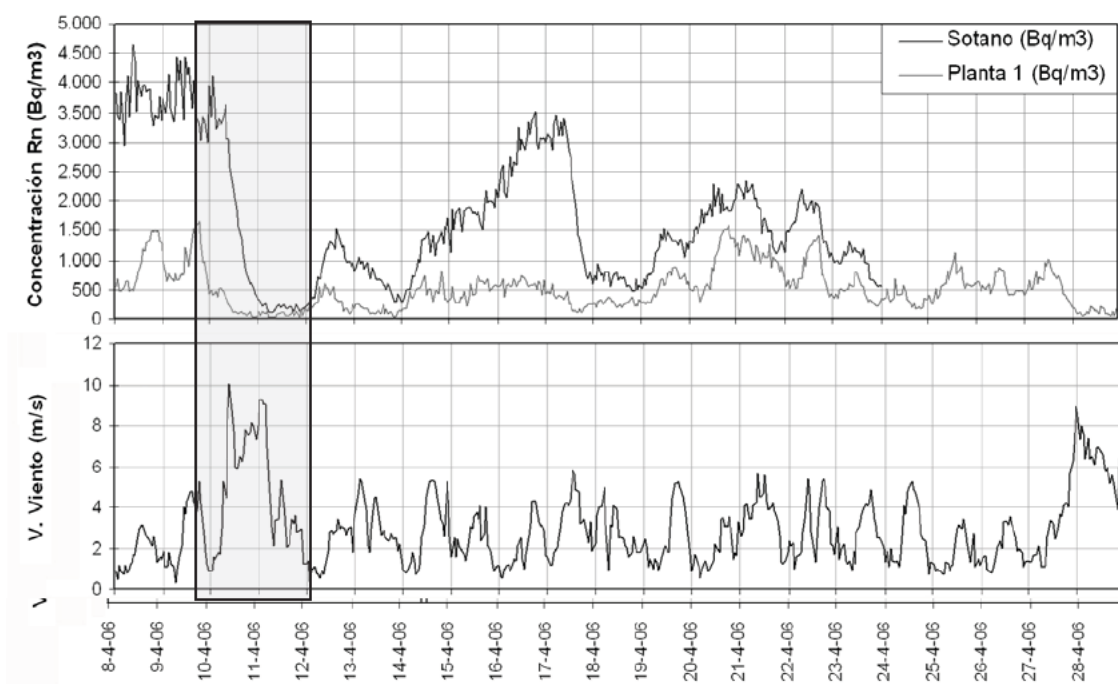


Figura 17. Al Aumentar la velocidad de viento se produce una succión mayor por las arquetas y por tanto una mayor extracción de radón

Los resultados de efectividades de esta primera medida se resumen en la tabla 3 que muestra las concentraciones iniciales, las obtenidas tras la intervención y la reducción de radón conseguida por la medida correctora introducida. Esta reducción se expresa también en porcentaje sobre la inicial.

Tabla 3. Efectividad de la medida de rehabilitación (a)

MEDIDA CORRECTORA	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3)		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3)		REDUCCIÓN (Bq/m3)		REDUCCIÓN %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
<b>EXTRACCIÓN NATURAL</b>								
<b>01-Extracción Natural por arqueta Central</b>	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	<b>96</b>	<b>91</b>

b) Efectividad de un sistema de extracción natural por captación en arqueta exterior. La base de funcionamiento de este sistema es la misma que la del sistema anterior. En este caso, se sella el tubo que conecta la arqueta central y se abre el de la exterior. La extracción se realiza únicamente por la arqueta exterior mediante tiro natural. De esta manera se analiza que capacidad de extracción presentan las arquetas en función de su ubicación. En la medida anterior funcionaba la arqueta central, y en ésta solo la exterior.

La efectividad de esta medida es la siguiente:

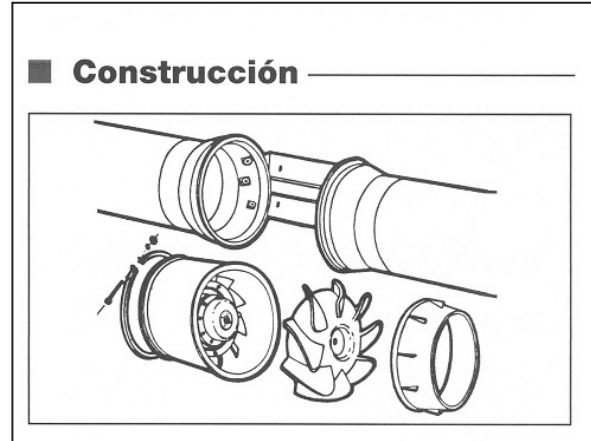
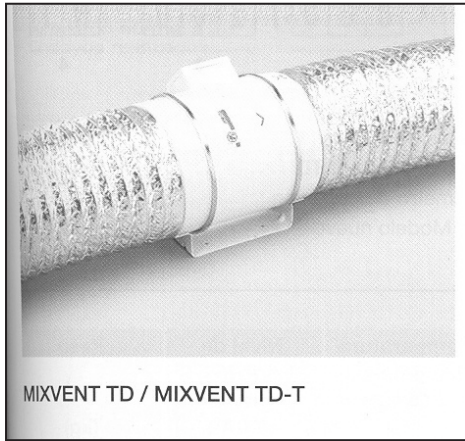
Tabla 4. Efectividad de la medida de rehabilitación (b)

MEDIDA CORRECTORA	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m <sup>3</sup> )		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		REDUCCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		REDUCCIÓN %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
<b>EXTRACCIÓN NATURAL</b>								
<b>03-Extracción Natural por arqueta Exterior</b>	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	<b>58</b>	<b>53</b>

Se observa que las efectividades conseguidas son bastante menores que en la anterior medida correctora. Este fenómeno se podría explicar por la barrera que constituye la cimentación del módulo. La arqueta se encuentra enterrada por el exterior de la zapata corrida de cimentación. Dicha cimentación perimetral cerca, físicamente, el espacio de terreno bajo él, generando una zona que se ve menos afectada por las succiones creadas por la arqueta. Esta situación provoca que una mayor cantidad de radón penetre en el interior del módulo en lugar de alcanzar la arqueta de captación. Por otro lado se ha comprobado que, al igual que ocurría en la medida correctora anterior, el viento juega un papel importante en la extracción de radón por arquetas de captación. La succión que produce el viento en la cabeza del tubo, ayudado por el mecanismo de tiro pasivo, conlleva a una mayor potencia extracción y con ello, mayor radón expulsado. A mayor velocidad mayor es la extracción y por tanto mayor es la reducción en la concentración interior.

c) Efectividad de un sistema de extracción forzada (ventilador de 80 W de potencia) por arqueta central.

Ésta es una variante de la medida de extracción natural por arqueta central (a) en la que se ha forzado el tiro mediante un extractor mecánico de 80 W de potencia. La base de funcionamiento es la misma, extraer aire contaminado de radón del terreno bajo el módulo para evitar que este penetre en el interior del edificio. La extracción se realiza a través de la misma arqueta de captación en la situación central bajo la solera del módulo, y la conexión al exterior es mediante el mismo tubo de la medida nº 2. En la boca de salida a cubierta se instaló un extractor mecánico de tipo helico-centrífugo. El diámetro de conexión es de 125 mm y genera una depresión máxima en la arqueta central de 155 Pa. Las figuras 18 y 19 muestran el tipo de extractor instalado:



Figuras 18 y 19. Modelo de extractor colocado en el tubo. Marca: Soler & Palau. Modelo: MIXVENT TD 350/125

Las características de este extractor son las que muestra la tabla 5.

Tabla 5. Características técnicas del extractor instalado

Tipo	Velocidad (r.p.m.)	Potencia absorbida max. (W)	Intensidad absorbida max. (A)	Caudal de descarga libre (m <sup>3</sup> /h)	Nivel de presión sonora (dBA)	Peso (kg)
<b>MIXVENT TD 350/125</b>	2.210	80	0.37	360	30	2

La figura 20 muestra el diseño de la medida correctora:

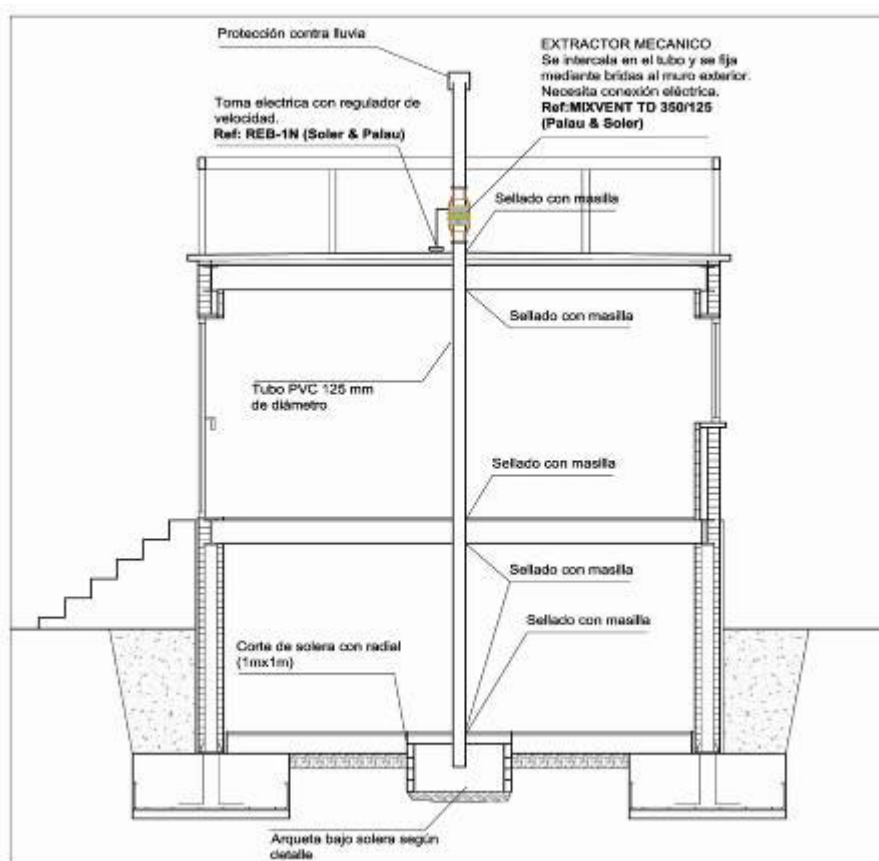


Figura 20. Diseño de la solución de rehabilitación (c)

La efectividad conseguida se muestra en la tabla 6

Tabla. 6. Efectividad de la medida de rehabilitación (c)

MEDIDA CORRECTORA	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m <sup>3</sup> )		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		REDUCCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		REDUCCIÓN %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
<b>EXTRACCIÓN FORZADA</b>								
<b>05-Extracción Forzada (56w) por arqueta Central</b>	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	<b>99</b>	<b>95</b>

Este cuadro muestra la alta efectividad conseguida con la medida. Los valores obtenidos en ambas plantas rondan los 400 Bq/m<sup>3</sup>, resultados que cumplen con los recomendados para edificios construidos según la Comisión Europea.

El mantenimiento del ventilador es un tema crucial en este tipo de medidas. La efectividad se confía al funcionamiento del extractor por lo que si éste falla el sistema deja de funcionar y el radón vuelve a acumularse en el interior del edificio sin que pueda ser detectado hasta que no se realicen nuevas medidas de concentración. Para evitar este fallo se pueden usar alarmas que

B. Frutos Vázquez, M. Olaya Adán, J. L. Esteban Saiz

saltan en cuando detectan un mal funcionamiento del ventilador. Por otro lado, la influencia de los cambios de presión atmosférica queda significativamente reducida por la acción del extractor mecánico.

d) Efectividad de un sistema de extracción forzada (ventilador de 80 W de potencia) por arqueta exterior.

En esta nueva medida, última de las de extracción por arquetas, se traslada el extractor mecánico de 80 w a la salida del tubo que conecta con la arqueta exterior. El tubo de la arqueta central se sella. La base de funcionamiento para esta solución es la misma que para la medida (b), extracción natural desde arqueta exterior, con la salvedad de que en este caso se fuerza el tiro mediante el uso de un extractor mecánico de 80 w de potencia. Con esta medida se ha analizado la capacidad de reducción de radón que tiene esta medida comparada con la (b) en la que el tiro era natural y también comparado con la efectividad de la medida anterior (c) en la que el mismo extractor estaba colocado en el tubo de conexión de la arqueta central.

La efectividad conseguida la muestra la tabla 7.

Tabla 7. Efectividad de la medida de rehabilitación (d)

MEDIDA CORRECTORA	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3)		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3)		REDUCCIÓN (Bq/m3)		REDUCCIÓN %	
	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1	Sótano	Planta 1
<b>EXTRACCIÓN FORZADA</b>								
<b>07-Extracción Forzada (80w) por arqueta Exterior</b>	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	<b>99</b>	<b>93</b>

Se observan efectividades bastante superiores a la que daba la medida correctora de extracción por arqueta exterior por tiro natural (b), que mostraba unos resultados de efectividades del 58 % y 53 % para planta de sótano y planta 1 respectivamente.

En este caso, la cimentación del módulo que constituía una barrera para la extracción por arqueta exterior en tiro natural (b), no parece influir en el mismo grado. Se obtiene la siguiente apreciación: la instalación de un extractor en una arqueta exterior, consigue buenas efectividades en relación al tiro natural, y muy similares a las obtenidas por extracción forzada por arqueta central. Serviría, pues, para una actuación en edificio existente con una intervención por el exterior, que no ocasionaría molestias para los habitantes.

### 3.3. Análisis comparativo de efectividades de las medidas de rehabilitación ensayadas

La tabla 8 muestra las reducciones de concentración de radón conseguidas por las distintas medidas de rehabilitación, expresadas tanto en Bq/m<sup>3</sup> como en un porcentaje de reducción frente a las concentraciones iniciales.

Tabla 8. Efectividades comparadas

MEDIDA DE REHABILITACIÓN	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m <sup>3</sup> )		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		REDUCCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> )		EFECTIVIDAD REDUCCIÓN %	
	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>
<b>EXTRACCIÓN NATURAL</b>								
a) Extracción natural por arqueta central	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	<b>96</b>	<b>91</b>
b) Extracción natural por arqueta exterior	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	<b>58</b>	<b>53</b>
<b>EXTRACCIÓN FORZADA</b>								
c) Extracción forzada (80 W) por arqueta central	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	<b>99</b>	<b>93</b>
d) Extracción forzada (80 W) por arqueta exterior	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	<b>99</b>	<b>93</b>

En todas ellas, salvo en la medida c (extracción natural por arqueta exterior), se han conseguido efectividades superiores al 90 %. Aunque no se ha podido comprobar que exista una relación lineal en el porcentaje aplicado a otra concentración inicial de radón, si 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 se hubieran conseguido reducciones de radón por debajo de los 400 o 200 Bq/m<sup>3</sup> en la mayoría de las medidas probadas.

La figura 21 presenta un diagrama de barras donde se pueden ver los promedios de concentración tras la intervención en cada una de las medidas de rehabilitación. La línea roja indica el límite de riesgo a partir del cual se debería introducir una actuación de corrección según la comisión europea (400 Bq/m<sup>3</sup>) (6) para viviendas existentes.

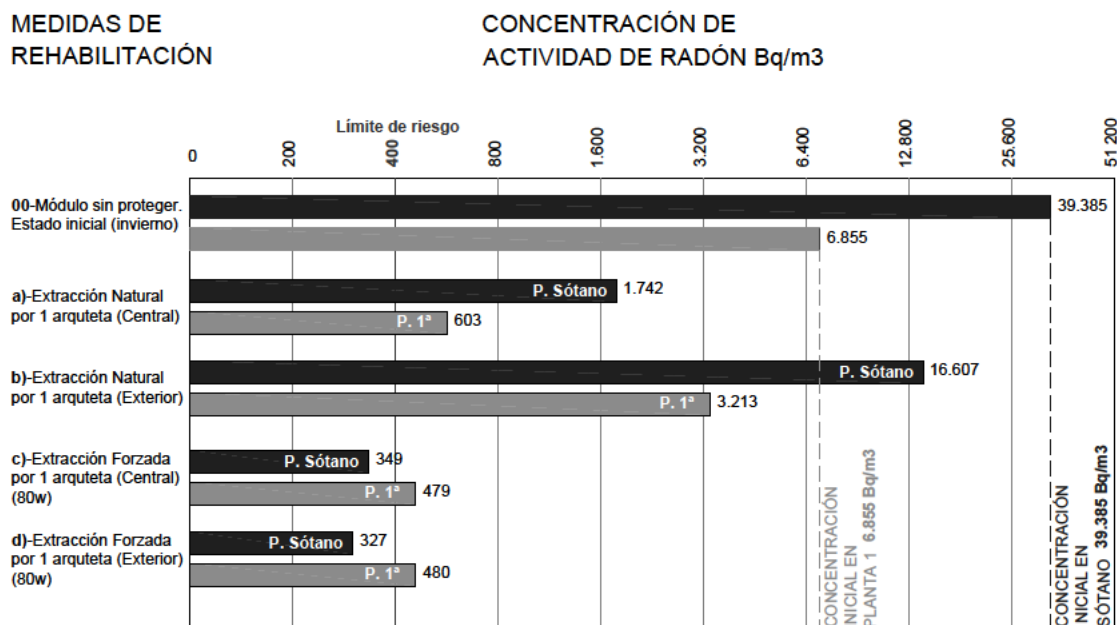


Figura 21. Reducciones de radón en cada una de las medidas correctoras.

<sup>6</sup> Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)  
 B. Frutos Vázquez, M. Olaya Adán, J. L. Esteban Saiz

Las líneas discontinuas marcan las concentraciones iniciales tanto en planta de sótano como en planta 1ª.

Las medidas que mayor efectividad han conseguido, y que se aproximan o alcanzan el límite de seguridad de concentración ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), son aquellas que hacen uso de extractores mecánicos para forzar los tiros de las arquetas captadoras, por lo que hay que tener en cuenta que, para que den el rendimiento previsto, es necesario que el extractor no deje de funcionar. Se recomienda la instalación de un sistema de alarmas que detecten fallos eléctricos o mecánicos, y un programa de mantenimiento que garantice un funcionamiento continuo.

En cuanto a los sistemas de extracción natural, medida de tipo pasivo, se ha comprobado que la arqueta situada de forma centrada conforme a la planta, tiene una capacidad de captación mayor que la colocada por el exterior. Por otro lado, se ha visto que la velocidad del viento influye positivamente en la reducción de radón. Este efecto está relacionado con la mayor succión que se produce en la arqueta debido al efecto "Venturi" que provoca la velocidad de viento en la boca del tubo de expulsión. Tanto en el sistema que está conectado a la arqueta centrada o al de la arqueta de exterior, se han comprobado efectividades mayores cuando el viento supera velocidades de  $8 \text{ m/s}$ .

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 resultados favorables y dentro de los rangos esperados, siendo las de máxima efectividad, las de tiro forzado.

#### 4. CONCLUSIONES

Atendiendo a las advertencias de entidades como la Organización Mundial de la Salud, IRPA (International Radiation Protection Association) o la propia Comunidad Europea en su directiva de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM), la inhalación de gas radón constituye un riesgo para la salud al aumentar el riesgo de contraer 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 límites de concentración recomendados.

El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, a instancias de del Consejo de Seguridad Nuclear, ha desarrollado investigaciones para sentar las bases normativas destinadas a proteger a los usuarios de edificios de concentraciones excesivas de gas radón.

En cuanto a los registros de concentraciones de radón en el módulo cuando se encuentra sin ningún tipo de protección frente a la entrada del gas, parece que es la presión atmosférica el parámetro determinante de las variaciones en la concentración observadas en el interior del módulo. En cuanto a relación que pueda tener las precipitaciones en la concentración de radón en el interior del módulo, parece que se evidencian positivamente cuando la misma adquiere un valor significativo. Durante el periodo analizado de varios meses, no parece haber correlación entre ninguna de las temperaturas medidas y la concentración de radón interior.

El análisis de efectividades de las distintas medidas de rehabilitación testadas, muestra resultados satisfactorios en la ejecución de las distintas soluciones en un módulo experimental. Teniendo en cuenta los límites de la comisión europea ( $400 \text{ Bq/m}^3$  para viviendas construidas), en las concentraciones altas debidas a la localización, solo cumpliría la solución de extracción forzada. Sin embargo es probable que en situaciones habituales de concentraciones de radón inferiores a  $1000 \text{ Bq/m}^3$  las soluciones estudiadas pueden ser suficientemente efectivas.

En este trabajo se han presentado algunas de las medidas de rehabilitación, quedando a la espera de poder mostrar los resultados de otro tipo de medidas como pueden ser presurizaciones bajo la solera, ventilaciones forzadas de semisótano y barreras de protección frente al paso de radón.

Todos estos sistemas se estiman efectivos y de su evaluación futura se podrá obtener el análisis en comparación con las medidas que se recogen en este trabajo.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Mostramos un especial agradecimiento a:

Enrique Suárez, José Luis Martín Matarranz, del Consejo de Seguridad Nuclear.  
A Luis Santiago Quindós Poncela de la Universidad de Cantabria

## 6. REFERENCIAS

- Allen L; Robinson Richard G; Sextro and William J. Riley (1997). Soil-gas entry into houses driven by atmospheric pressure fluctuations-the influence of soil properties. *Atmospheric Environment* vol. 31, no. 10, pp. 1487-1495.
- Barros-Dios J.M; Barreiro M.A; Ruano-Ravira A; Figueiras, A. (2002). Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: A population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156 (6), 548-555.
- Clavensjö, B.; Gustav Akertblom, G. (1994). "The Radon Book. Measures against radon" The Swedish Council for Building Research. Suecia
- Cohen B. (1993). Relationship between exposure to radon and various types of cancer. *Revista: Health Phys.* 65(5) 529-531.
- Collignan B. (1999). CSTB (Centre Scientifique et Technique de la Construction). "Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants". Francia
- Comisión de las Comunidades Europeas (1990). Recomendación de la Comisión de 21-2-1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. (90/143/Euratom). D.O.C.E. L80, 2628.
- CSTC Centre Scientifique et Technique de la Construction. (1999). Le radon dans les habitations. Bélgica
- EPA Environmental Protection Agency (2001). Building Radon Out. USA
- Font, L. (2002). The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" Grup de Física de les Radiacions, Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona
- Hintenlang D.E; Al-Ahmady K.K (1992). Pressure differentials for radon entry coupled to periodic atmospheric pressure variations. *Indoor Air*, Volume 2, Number 4, pp. 208-215(8). December
- I.C.R.P-60 International Commission on Radiological Protection. (1977)
- I.C.R.P International Commission on Radiological Protection (1987). Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. ICRP Publication 50, *Annals of the ICRP* 17 (1), Pergamon Press, Oxford.
- Kraner H.W; Schroll G.L; Evans R.D. 1964. Measurement of the effects of atmospheric variables on radon-222 flux and soil gas concentration. In: Adams, J.A.S. and Lowder, W.M. Editors, 1964. A review in the natural radiation environment University of Chicago Press, Chicago, pp. 191-195.
- Loomis L. (1995). Florida Department of Community Affairs. Radon Program "Florida standard for passive radon-resistant new residential building construction". USA

- Loomis L. (1994). Florida Department of Community Affaire. Radon Program “Florida standard for mitigation of radon in existing building”. USA
- Matarranz J.L. (2004). Concentraciones de Radón en Viviendas Españolas. CSN, Madrid, España.
- Murley J.F. (1996). Florida Department of Community Affaire. Florida standard for radon-resistant new commercial building construction. USA
- Nazaroff WW; Moed BA; Sextro RG (1988). Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry. In: Nazaroff WW, Nero AV, editors. Radon and its decay products in indoor air. New York: Wiley-Interscience, p. 57 –112.
- Pavia, M; Bianco, A; Pileggi, C; Angelillo I.F (2003). Meta-analysis of residential exposures to radon gas and lung cancer. Bulletin of the World Health Organization 2003, 81 (10), 732-738.
- Quindós, L.S. (1995). Radón, un gas radiactivo de origen natural. CSN y Universidad de Cantabria, España
- Quindós L.S; Fernández P.L; Gómez J; Sainz C; Fernández J.A; Suarez E; Matarranz J.L; Cascón, M.C. (2004). Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. Environment International 29, 1091-1096.
- Sarah C., David C., (2003). Health Effects of residential radon: European perpestive at the end 2002. II Workshop. Radón y Medio Ambiente. Santiago de Compostela
- World Health Organization (2001). Department of protection of the human environment. Sources, Exposure and Heath Effects. Organización Mundial de la Salud.



# GESTIÓN DE RIESGO. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

## *RADON RISK MANAGEMENT. CONSTRUCTION SOLUTIONS*

**Borja Frutos Vázquez y Manuel Olaya Adán**

Departamento de Habitabilidad, Energía y Medio Ambiente. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) - CSIC

### RESUMEN

El gas radón es un elemento radiactivo que se presenta en la naturaleza por la desintegración del radio contenido en los suelos terrestres. Este gas es capaz de viajar entre los poros del terreno y penetrar en los edificios, donde podrá aumentar su concentración y constituir un riesgo para la salud sus ocupantes por la inhalación del mismo.

La Organización Mundial de la Salud califica el radón como agente cancerígeno de grado 1. Según este organismo, el radón es la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco.

En base a la percepción del riesgo derivada de estudios epidemiológicos, algunos países han establecido unos valores de concentración de radón como límites de seguridad, por encima de los cuales se recomienda o se obliga, según el caso, a una intervención arquitectónica para reducir los niveles.

Desde una perspectiva arquitectónica, se han venido estudiando diversas técnicas constructivas destinadas a frenar la inmisión de radón hacia el interior de los edificios o a evacuar el mismo, con el fin de disminuir la concentración por debajo de los límites de seguridad.

Este artículo desarrolla las distintas estrategias constructivas que se vienen usando para estos fines, algunas de las cuales han sido ensayadas en España gracias a un proyecto de investigación subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear, y desarrollado por el Instituto Eduardo Torroja y la Universidad de Cantabria.

**PALABRAS CLAVE:** radón; inmisión; técnicas de actuación; medidas correctoras.

### INTRODUCCIÓN

El uranio (U-238), elemento presente en la composición de los terrenos, aparece como origen de una cadena de desintegración de elementos radiactivos dentro de la cual se haya el gas radón (Rn-222).

Este gas inerte de origen natural es capaz de viajar entre los poros del terreno gracias a su alta movilidad, y alcanzar la superficie, donde podrá diluirse entre los

### ABSTRACT

Radon gas is a radioactive element that appears in nature by the decay of radium found in terrestrial soils. This gas is able to travel between the pores of the ground and enter into the buildings where the concentration can increase and becoming a health risk to occupants from inhaling.

The World Health Organization rate the radon gas as a level 1 carcinogen agent. According to this organization, radon is the second leading cause of lung cancer contraction after tobacco.

Based on the perception of risk derived from epidemiological medical studies, some countries have established radon concentration values as safety limits, above which is recommended or required an architectural intervention to reduce levels.

From an architectural perspective, there have been studies of several radon protection techniques to reduce radon immission in buildings or to evacuate it, in order to reduce the radon levels below the safety limits.

This article develops some protection strategies that have been being used for these purposes, some of which have been tested in Spain thanks to a research project funded by the Nuclear Safety Council, and developed by the Eduardo Torroja Institute and the University of Cantabria.

**KEY WORDS:** radon; immission; protection techniques; mitigation action.

gases de la atmósfera o penetrar en el interior de los edificios si estos no se encuentran debidamente protegidos, completando en ambos casos su proceso de desintegración. 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 sus descendientes de vida corta en el interior de nuestro organismo, es capaz alterar el ADN de los tejidos pulmonares.

Diversos países han establecido unos límites de seguridad para los espacios cerrados y habitados. En esta línea, la recomendación de la Comisión Europea de 21 de febrero de 1990 (90/143/EURATOM) establece unos límites de concentración de actividad de radón como límites de actuación correctora, teniendo en cuenta el valor de referencia de dosis efectiva recibida de 20 mSv por año. Estos límites se expresan en bequerelios (número de desintegraciones por segundo) por metro cúbico de aire, y se dividen en dos categorías:

- Para viviendas existentes: 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- Para viviendas de nueva construcción (valor de diseño): 200 Bq/m<sup>3</sup>.

Sobrepasados estos valores se recomienda realizar una actuación correctora que consiga reducir las concentraciones por debajo de estos límites. Estas actuaciones son de tipo arquitectónico y suponen ejecuciones constructivas de diversa índole, cuyo desarrollo, dependerá del nivel de concentración inicial, de la efectividad que se deba conseguir para reducir los niveles por debajo de los límites de seguridad, y de la configuración tipológica de la edificación.

## PENETRACIÓN DEL GAS EN UNA EDIFICACIÓN

El radón presente en la superficie terrestre se difunde en la atmósfera sin que alcance una concentración importante, siendo de un orden de 20 Bq/m<sup>3</sup>. Ahora bien, si existiese una edificación sobre un terreno con presencia de radón, y esta no estuviese protegida, el gas radón podrá penetrar en el interior de la vivienda y llegar a concentraciones superiores a los límites de seguridad que supondrán un riesgo para la salud de sus habitantes.

La movilidad del gas desde el terreno a la edificación depende principalmente de procesos convectivos en los que un gradiente de presiones induce un flujo positivo de gas. Debido a diferencias de presión entre los poros del terreno, por donde viaja el gas, y el espacio cerrado de la edificación, normalmente alto debido a ventilaciones o ausencia de las mismas, se establece un flujo positivo 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 penetrará fácilmente en el interior de la vivienda, atravesando los forjados, soleas o muros.

El flujo del gas hacia la edificación depende principalmente de:

- La potencialidad del suelo de generar gas radón. Rocas con contenidos altos de radio.
- La capacidad que tenga el gas de escapar de la estructura de la roca (emanación), que dependerá de la compacidad de dicha roca.

- La porosidad y humedad que presente el terreno para que el radón pueda alcanzar la superficie (exhalación).
- La diferencia de presiones entre la existente en los poros del terreno y el interior de la edificación.
- Las condiciones meteorológicas que modificarán el flujo de radón por variación del gradiente de presiones entre los poros del terreno y el interior del edificio.

Los caminos del gas para introducirse en el interior son numerosos. Aprovechando cualquier fisura, cámara de aire, chimenea, conductos de saneamiento, materiales de alta permeabilidad, el gas penetra al interior de la vivienda aumentando su concentración y pudiendo sobrepasar los valores límites que nos aconsejan los diferentes organismos.

En la figura 1 se reflejan algunas de las vías de penetración más frecuentes.

## TÉCNICAS DE ACTUACIÓN. MEDIDAS CORRECTORAS

Se trata de actuaciones constructivas destinadas a frenar la entrada de radón al interior del edificio. Estas técnicas pueden aplicarse a edificios existentes, en los que habrá que intervenir para la introducción de las mismas, o a edificios de nueva planta, en los que podrán ser planteadas en fase de proyecto.

Lógicamente, las técnicas planteadas para edificios de nueva planta supondrán un menor coste, una mayor fa-

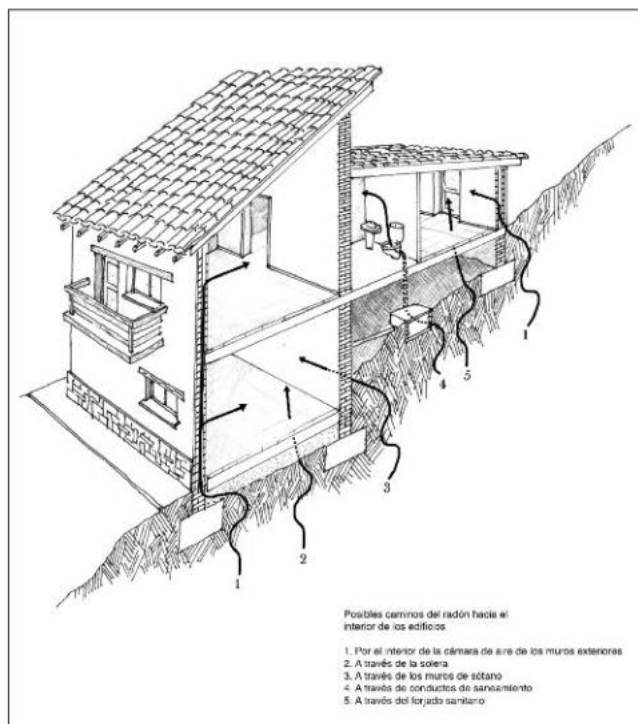


FIGURA 1. Vías principales de penetración de radón al interior de una vivienda.

cilidad de ejecución y una integración en el diseño del edificio, además de conseguir efectividades de reducción de radón de mayor rango.

En general, e independientemente de si se trata de un edificio de nueva planta o un edificio ya construido, las técnicas de actuación se basan en dos estrategias claramente diferenciadas, que pasamos a describir a continuación.

#### SISTEMAS DE BARRERAS FRENTE AL PASO DE GAS RADÓN

Son las que se suelen usar para condiciones de riesgo medio de presencia de radón, cuando los valores de concentración interior no sobrepasan los  $500 \text{ Bq/m}^3$ . Consiste en interponer una membrana de material impermeable frente al paso de los gases entre el terreno y los elementos constructivos que cierran el edificio (soleras, forjados sanitarios, muros de sótano). El sistema es similar a los de protección frente a la humedad, salvo que no se trata de protegerse frente al agua sino frente a un gas, por lo que los materiales usados como barreras frente a radón deben cumplir con unas exigencias mayores en cuanto a impermeabilidad y a resistencias mecánicas.

La figura 2 muestra un esquema de colocación de la membrana bajo la solera de sótano y por la cara exterior de los muros.

Las membranas que se utilizan como barreras frente al paso de radón no solo deben ser estancas a este, sino que además deben cumplir una serie de exigencias relacionadas con la durabilidad del material, para que esta se ajuste a la vida útil del edificio, y con las resistencias mecánicas, para que pueda soportar los distintos estados de tensión y carga que se van a producir en el edificio. La lámina, cuando se coloca sobre el terreno, deberá soportar el peso de la losa de solera y no

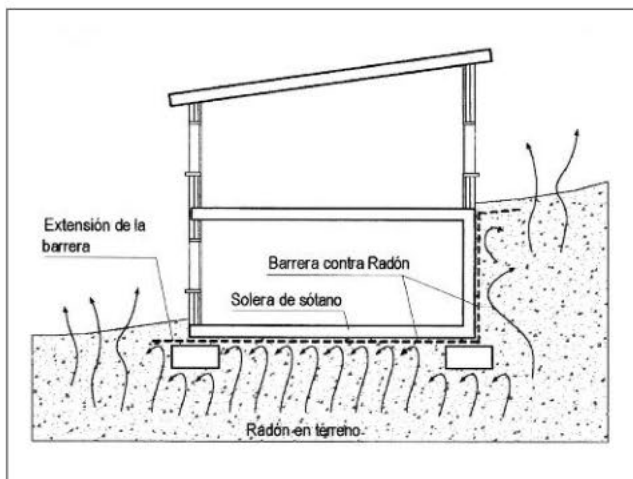


FIGURA 2. Esquema de situación de una barrera de protección frente a radón.

punzarse 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 punzarse 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 de solado, vertido de morteros, etc. Por tanto, se les exigirá altas resistencias al punzamiento, al desgarrar 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 figurarse.

Entre los materiales más usados se encuentran los siguientes, que en su mayoría constituyen sistemas multicapa: polietilenos de baja densidad con refuerzos de mallas; polietilenos de alta densidad; multicapas asfálticas; PVC plastificado; caucho EPDM; sistemas de aplicación líquida (poliuretanos).

La figura 3 muestra un ejemplo de membranas multicapa aplicadas en sistema de rollo por solape.

#### Ubicación de la barrera

La barrera debe colocarse en todo elemento de cerramiento del edificio que esté en contacto con el terreno. Las soleras, los forjados sanitarios y los muros de sótano son objeto de protección. La ubicación de la misma por la cara interior del cerramiento, o por la cara exterior directamente contra el terreno, dependerá del tipo de construcción que se quiera proteger. En casos de viviendas existentes, la colocación por la cara exterior complicará mucho la actuación, mientras que en edificios de nueva planta se puede proyectar la instalación de la barrera en fase de diseño de la misma manera que se hace con las membranas protectoras frente a la humedad. En este último caso, la barrera frente a la penetración del gas funcionará a su vez como sistema de impermeabilización frente a la humedad.



FIGURA 3. Barrera multicapa aplicada por bandas con solape. Marca comercial: DuPont Radon Plus Gas Barrier, DuPont Engineering Products.

## Puntos singulares

La técnica de barreras contra radón requiere una puesta en obra que cuide al máximo detalles como juntas, solapes, encuentros y demás puntos que puedan presentar riesgos de rotura a largo o corto plazo. El tratamiento debe ir enfocado a permitir cierta movilidad en la barrera para absorber dilataciones estructurales, a reforzar puntos de sobrecarga para evitar punzonamientos o desgarros, al sellado adecuado de los solapes para que no existan fugas y, en general, a todo encuentro entre diferentes materiales y demás puntos singulares que puedan presentar riesgo de rotura de la lámina. Hay que entender que el radón es un gas y que su movilidad es alta, por lo que cualquier deterioro en la lámina va a provocar una disminución en la estanquidad de la misma y la efectividad de la actuación se verá reducida.

## SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE RADÓN

En esta segunda gama de actuaciones arquitectónicas, los sistemas basan su estrategia 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 para que no penetre en los espacios interiores. Su función es evacuar los gases provenientes del terreno antes de que pasen al interior de los edificios. Estas soluciones se suelen usar para casos en los que se detectan niveles de radón superiores a los 500 Bq/m<sup>3</sup>.

Para la extracción es necesario un punto de captación en el terreno, un conducto de evacuación hacia el exterior y un extractor mecánico. Este último se deberá colocar en el caso de que se precise mayor efectividad ya

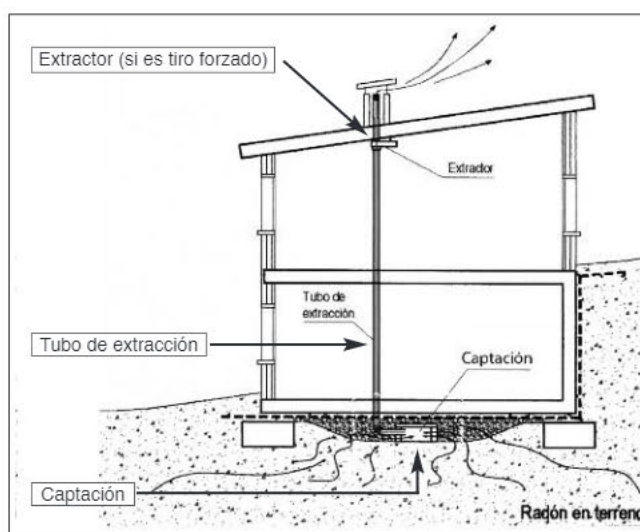


FIGURA 4. Ejemplo de sistema de extracción con una arqueta de captación situada bajo la solera y un tubo de extracción que expulsa el gas hacia el exterior. En este esquema figura también un extractor para forzar el tiro.

que, el tiro forzado, lógicamente evacuará mayor cantidad de radón al exterior que un tiro natural.

La figura 4 esquematiza un diseño de este tipo de actuaciones.

Lógicamente, el resultado de un sistema que incluya un extractor mecánico será más efectivo que el de tiro natural. La elección de un sistema u otro vendrá condicionada por una serie de factores:

- La ubicación del punto de captación en el terreno en relación a la planta del edificio. Si el punto de captación se encuentra alejado de la zona de apoyo del edificio, fuera del perímetro de este, por ejemplo, puede ser recomendable el uso de extractores para generar mayor succión y así ampliar el área de influencia del sistema. También será necesario colocar un extractor mecánico en situaciones de terrenos compactos, en los que la movilidad del radón es escasa y la potencia del extractor facilita su movilidad hacia el punto de captación.
- En zonas con concentraciones elevadas de radón también será recomendable el uso de sistemas mecánicos por su mayor efectividad frente a los de tiro natural
- Cuando menor sea el número de puntos de extracción bajo la vivienda, más recomendable será el uso de extractores mecánicos por su mayor radio de acción en el terreno.
- En aquellos casos en los que no se use extractor, se ha demostrado mediante un proyecto de investigación\*, que en los días en los que se han detectado vientos superiores a 8 m/s, la efectividad se ha igualado a la de un sistema con extractor gracias a la mayor depresión inducida en la arqueta debido al efecto venturi que se produce en la boca del tubo de expulsión.

### Sobre el punto de captación. Arqueta porosa

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.

Normalmente, se usan unas arquetas parecidas a las comúnmente empleadas para los sistemas de saneamiento, con la salvedad de que la interfaz con el terreno debe ser porosa para permitir el paso del gas al interior. Existen sistemas de arquetas prefabricadas con materiales plásticos y perforaciones en sus paredes para permitir el paso del gas a su interior, pero también se pueden realizar con materiales convencionales en el mundo de la construcción como ladrillos perforados, bloques, etc.

\* Proyecto realizado por el Instituto Eduardo Torroja y la Universidad de Cantabria. Financiado por el consejo de Seguridad Nuclear. Título: Estudio de la viabilidad y efectividad de las acciones de remedio ante la presencia de gas radón en edificios existentes. Junio 2007.

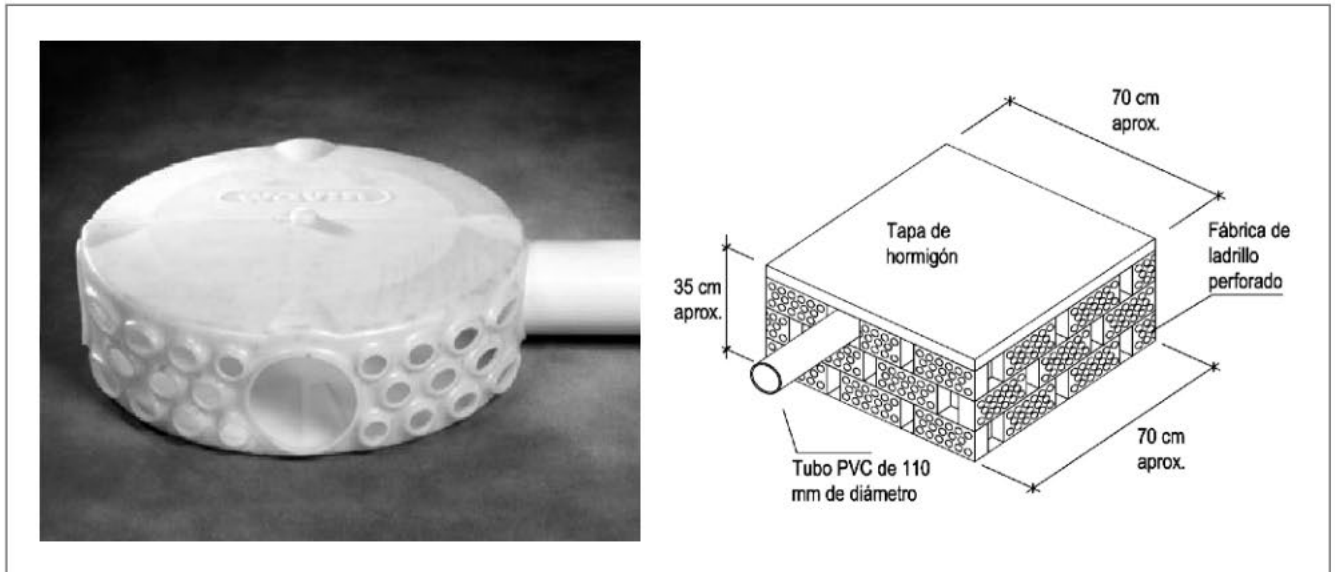


FIGURA 5. Ejemplo de arqueta de captación prefabricada en PVC (comercializada por Wavin Ireland, Limited Balbriggan Co. Dublín) y arqueta realizada *in situ* con ladrillos perforados colocados en sentido transversal.

La figura 5 muestra un sistema prefabricado en PVC y otro realizado *in situ* con ladrillos perforados.

Si se realiza un relleno bajo la vivienda con material más poroso, es decir, con algún tipo de arena o grava por donde el gas se mueva con mayor facilidad, el punto de captación podrá abarcar mayor superficie de extracción. La superficie "segura", la superficie de terreno cubierta por un sistema de extracción depende de la compacidad del terreno y de la fuerza del extractor si el sistema es de tiro forzado.

#### Sobre la tubería de extracción

La tubería de extracción se encarga de conducir los gases desde la captación hasta el exterior del edificio. Lo comúnmente usado para estos propósitos es un tubo de PVC con un diámetro nominal entre 110 mm y 130 mm, aunque este puede cambiar en función del cálculo de necesidades para el extractor dado, la cantidad de radón detectada, y la compacidad del terreno.

Lo más efectivo será llevar el tubo de extracción en vertical hasta la cubierta porque, de esta manera, provocaremos un tiro natural desde el punto más bajo. En ocasiones se conduce el tubo en horizontal hasta el exterior de la vivienda, atravesando los muros de cimentación o de plantas de sótano. De esta manera, se evitan los tubos pasantes entre plantas pero se deberá tener presente que el tiro natural, en este caso, será menor y que por tanto, la instalación de un extractor mecánico para forzar el tiro, puede ser inevitable.

En ambos casos se debe tener presente que el punto de paso del conducto a través de la barrera de protección

frente a gas radón debe tratarse con elementos especiales de sellado.

#### Sobre la instalación de un extractor para forzar el tiro

Se usa el extractor para forzar el tiro del conducto de evacuación de gases y conseguir mayor efectividad en la reducción de radón. Las instalaciones con tuberías de extracción pueden funcionar mediante tiro natural si se han previsto para ello, y solamente será necesaria la colocación del extractor, si tras haber medido la concentración de radón, esta fuera aún excesiva.

Este puede instalarse en diferentes puntos de paso del conducto, si bien lo más normal es colocarlo en lugares donde esté protegido de la intemperie y no cause molestias a los habitantes del edificio.

En cuanto a la potencia necesaria del extractor, variará dependiendo del área de terreno que deba cubrir y de la permeabilidad del terreno. A mayor área de terreno y a menor permeabilidad, la potencia debe ser mayor. En condiciones normales de permeabilidad media del terreno y en un área de 250 m<sup>2</sup> (radio de 15 metros) un extractor con una potencia de 50-100 W bastará, pero estos datos han de ser calculados para cada caso. Existen programas basados en cálculos de elementos finitos que reproducen las características del terreno e introducen focos de captación para comprobar la movilidad del radón en función de la depresión generada. En base a estos estudios, se puede determinar que superficie de terreno se puede abarcar con una extracción situada en un punto estratégico y que pueda dar cobertura a varias viviendas. El extractor que se coloque será de mayor potencia que el que beneficia a una única vivienda.



**FIGURA 6 . Fotografía del módulo de vivienda donde se han probado los diferentes sistemas de protección frente a radón.**

### Variaciones del sistema

Estos sistemas de extracción pueden tener varias configuraciones:

- Dependiendo de la ubicación del punto de extracción, se encuentran soluciones que utilizan arquetas de captación enterradas bajo la vivienda y otras que utilizan arquetas enterradas fuera de la planta del edificio. Estas últimas se suelen colocar en viviendas construidas ya que no se interviene en el interior, pero su efectividad es menor y, en la mayoría de los casos, será necesaria la colocación de extractores mecánicos para garantizar la protección.
- En los casos en los que la vivienda esté levantada sobre una cámara de forjado sanitario (espacio de aire libre entre el suelo de planta baja y el terreno), la extracción se puede conectar directamente a este espacio usándolo como arqueta captadora. La efectividad es elevada al tener mucha superficie de captación. En estos casos en los que se construye la vivienda elevada sobre el terreno, un método bastante efectivo es practicar huecos de ventilación en los muros laterales de dicha cámara permitiendo que el radón acumulado bajo la vivienda sea expulsado hacia el exterior.
- Otra variante del sistema es introducir aire en lugar de expulsarlo. De esta manera, se crea una sobrepresión en la arqueta enterrada y se genera un volumen de terreno circundante (bulbo de presiones), que por tener mayor presión que el resto, obliga al radón a salir a la atmósfera por el exterior de la influencia de estas presiones.
- Otra actuación posible, y que puede englobarse en esta gama de soluciones de extracción, consiste en ventilar directamente la vivienda. Es decir, evacuar aire de la misma e introducir aire nuevo desde el exterior. Lógicamente, si se introduce aire "limpio" de la atmósfera y se evacua el contaminado del interior de la vivienda, se obtendrá un aire interior con

menos contenido de radón, pero hay que tener presente un aspecto importante a estudiar: si el aire expulsado (mediante un ventilador de aseo, por ejemplo) es de mayor cuantía que el que se introduce por los puntos de inmisión desde el exterior, entonces se creará una depresión en el interior de la vivienda, que aunque mínima, puede ser suficiente para inducir un mayor flujo de radón desde el terreno hacia la vivienda, y obtener unas concentraciones finales mayores que las que existían sin el sistema de ventilación. Para lograr que este problema no aparezca, hay que estudiar bien los caudales de expulsión y los de inmisión para que, en el interior de la vivienda, se cree una sobrepresión y no una depresión. Por otro lado, al introducir aire del exterior se tendrán pérdidas energéticas que deberán ser evaluadas conforme al Código Técnico de la Edificación (CTE).

### EFFECTIVIDADES DE LAS DISTINTAS TÉCNICAS DE ACTUACIÓN

Las efectividades de estos sistemas se han estudiado mediante experiencias de campo, midiendo las concentraciones de radón antes y después de haber introducido los sistemas de protección. En este sentido, se muestran a continuación los resultados obtenidos de la ejecución de distintas técnicas de actuación, aplicadas a un módulo representativo de vivienda construido en una zona con altos contenidos de radón. Los datos derivan de un proyecto de investigación realizado por el Instituto Eduardo Torroja y la Universidad de Cantabria (Cátedra de Física Médica), con financiación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), que se ha terminado en el año 2007.

### CONCLUSIONES

El riesgo que se presenta, para el ser humano, al habitar en espacios con altos contenidos de radón ha sido estudiado desde hace décadas y en estos momentos se tiene la certeza de que existe un riesgo real de contraer cáncer pulmonar derivado de la inhalación de dicho gas. Así lo afirman organismos tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), o la Environmental Protection Agency (US EPA), que califican al radón como agente cancerígeno de grado 1 (probado), y advierten de que se trata de la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco.

Asumiendo estos datos de riesgo, desde el punto de vista arquitectónico, se plantea la necesidad de proteger los espacios habitados de una excesiva concentración de gas radón. Como se ha mostrado en este artículo, los resultados de reducción de radón interior de diversas soluciones arquitectónicas han sido, en alto grado, satisfactorios, ya que se ha conseguido, en muchas de ellas, reducir por debajo de concentraciones de  $400 \text{ Bq/m}^3$  (recomendación europea).

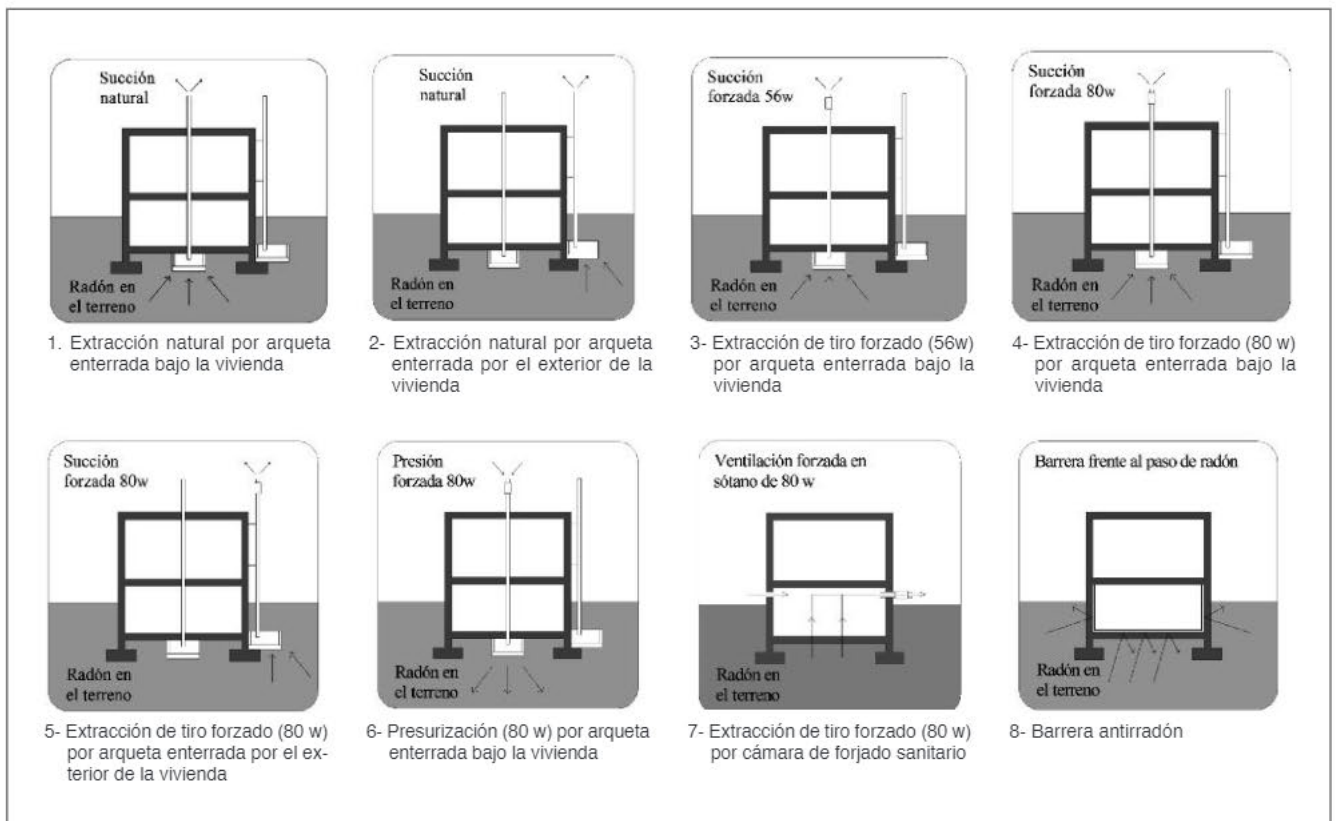


FIGURA 7. Esquemas de las soluciones ensayadas para obtener los resultados de efectividades.

### Efectividades

De las efectividades conseguidas por cada una de las soluciones probadas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- De todas ellas, las soluciones que hacen uso de extractores mecánicos han dado resultados con reducciones de radón más elevadas que los de tiro natural.
- Se ha visto como una ubicación de arqueta por el exterior de la vivienda ha resultado ser una opción de menor efectividad que las que usan la arqueta bajo el edificio, aunque también se ha demostrado como al instalar un extractor en dicha arqueta, la efectividad aumenta y se iguala a la de la arqueta central bajo el edificio. Ello nos indica que si se pretende actuar por el exterior del terreno de asiento de la vivienda, se deberá pensar en sistemas de extracción con tiro forzado para que la efectividad aumente.
- Por otro lado, la solución de presurización ha dado tan buenos resultados como los de extracción, oscilando los porcentajes de efectividad entre un 93% y un 99%.
- El sistema de ventilación del forjado sanitario ha conseguido unos resultados muy buenos igualando los de extracción por arquetas, lo que indica que, la tipología constructiva de elevación del suelo de asiento que permita dejar una cámara bajo el mismo, es una buena practica para frenar el radón al mismo tiempo que contribuye a un dotar a la vivienda de un mayor aislamiento térmico y una protección frente a la humedad.

- Por ultimo, en el sistema de barreras anti radón estudiado, se han visto efectividades altas que contrastan con las que documentan otras experiencias fuera de España. La barrera utilizada ha resultado de la aplicación líquida de poliuretano de densidad  $1.000 \text{ Kg/m}^3$  que ha curado en las superficies de proyección y que ha constituido una membrana continua sin solapes en todo muro de sótano y solera. Dicho modo de aplicación por proyección, en lugar de los comúnmente usados por extensión de rollos de material y solapes, ha sido uno de los factores que ha permitido elevar la efectividad de la barrera por encima de lo esperado al evitar las posibles fugas que se pueden encontrar en los solapes.
- De todas formas, el cuadro de efectividades mostrado hay que tomarlo como un indicador orientativo de las efectividades de las distintas soluciones posibles ya que se ha realizado tomando como modelo una construcción concreta ubicada en un terreno determinado. Para cada caso de terreno y para cada tipología constructiva de vivienda, la solución de protección frente a radón debe ser ajustada para que no disminuya la efectividad. Muchas de estas soluciones serán de difícil aplicación en viviendas construidas y por tanto se necesitarán estudios arquitectónicos que aporten las soluciones idóneas para cada caso. Para viviendas en fase de ejecución, la adaptación de las técnicas será de menor complejidad y podrán ser integradas en el proyecto global de la edificación.

TABLA 1. Cuadro de efectividades

Medida correctora	Inicial concentración media (Bq/m <sup>3</sup> )		Concentración tras la intervención (Bq/m <sup>3</sup> )		Reducción (Bq/m <sup>3</sup> )		Efectividad reducción %	
	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>	Sótano	P. 1 <sup>a</sup>
<b>Extracción natural</b>								
1. Extracción natural por 1 arqueta (central)	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
2. Extracción natural por 1 arqueta (exterior)	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
<b>Extracción forzada</b>								
3. Extracción forzada por 1 arqueta (central) (56 W)	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95
4. Extracción forzada por 1 arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
5. Extracción forzada por 1 arqueta (exterior) (80 W)	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93
<b>Presurización</b>								
6. Presurización por 1 arqueta (central) (80 W)	39.385	6.855	271	380	39.114	6.475	99	94
<b>Ventilación forjado sanitario</b>								
7. Ventilación forzada en sótano 80 W	39.385	6.855	10.072	307	29.313	6.548	74	96
<b>Barrera frente a radón</b>								
8. Barrera antirradón. Poliuretano (densidad 1.000 kg/m <sup>3</sup> )	39.385	6.855	1.446	434	37.939	6.421	96	94

■ Muy alta    ■ Alta    ■ Media/baja

### Protocolo de actuación

Cuando se quiere dar solución correctora a una vivienda con altos contenidos de gas radón, el protocolo que se debiera seguir constaría de los siguientes pasos:

- Solicitar una medida de concentración a un laboratorio especializado (contactar con la Red de Radiación Natural, REDRADNA), bien en la vivienda, si esta se encuentra construida, o en el terreno, si se trata de una vivienda en fase de construcción.
- Con los datos de concentración de radón y permeabilidad de terreno se debe contactar con especialistas en soluciones arquitectónicas enfocadas a reducir dicha concentración, para realizar un proyecto de actuación. En estos momentos, el Instituto Eduardo Torroja tiene abierta una línea de actuación para peticiones de este tipo.
- Tras la actuación arquitectónica, un laboratorio especializado debe volver a medir para poder garantizar que se han reducido los niveles por debajo de los límites de seguridad.

### AGRADECIMIENTOS

- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)
- ENUSA
- Fandiño Alfayate Construcciones
- ATEPA
- PERAI S.L.
- Synthesia Española S. A.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Barros Dios JM. Radón y cáncer pulmonar: Un desafío de futuro. III Workshop Radón y Medio Ambiente. Madrid; 2004.
2. 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 núm. L80, de 27 de marzo.
3. Decreto 262/2007, de 20 de diciembre, por el que aprueban las normas del hábitat gallego. Diario Oficial de Galicia num. 12, de 17 de enero de 2008.
4. Berenguer Subils MJ. Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 1997;440.
5. Font L, Baixeras C. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. *Science of the Total Environment* 2003;307(1-2):55-69.
6. Quindós L. Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa. Madrid: CSN – Universidad de Cantabria; 1995.
7. Collignan B, Millet JR. Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants. Guide de proposition de solutions techniques Cahiers du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTB) Francia 1999; 3143.
8. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). Le radon dans les habitations. Bélgica; 1999.
9. Clavensjön Bertil, Akertblom Gustav. The Radon Book. Measures against radon.. The Swedish Council for Building Research; 1994.
10. Office of Air and Radiation. Building Radon. US EPA; 2001.

