

# Acciones de rehabilitación frente a la entrada de gas radón

## Rehabilitation Measures against radon gas entry

Borja Frutos Vázquez\*<sup>1</sup>, Manuel Olaya Adán\*, José Luis Esteban Saiz\*

\* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Madrid. ESPAÑA

Fecha de recepción: 01/ 12/ 2010  
Fecha de aceptación: 01/ 04/ 2011  
PAG. 95 - 121

### Resumen

El gas radón es 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. El objeto de este trabajo 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 de un prototipo de vivienda construido al efecto.

Palabras Clave: Radón, prevención de riesgo de entrada, actuaciones correctoras

### Abstract

Radon gas is a pathological agent for inhabitants of buildings where it is present. Due to its origin in uranium decay chain, it bears radioactive effects that inside human body lead to higher risks of developing lung cancer. It comes from soils containing granite masses or other substrates containing uranium. It enters through common material used in constructions, such as concrete ground slabs, basement walls, etc. In order to avoid such gas immission into inhabited rooms, several measurements can be considered for existing buildings. This study intends to show the results obtained for radon reductions by means of different constructive solutions, already designed and executed so as to stop radon gas immission into a prototype building constructed for this specific purpose.

Keywords: Radon gas, entry risk prevention, corrective measurements

## 1. Introducción

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 de alterar el ADN de los tejidos pulmonares. Barros Dios et al., 2002; Sarah y David, 2003; IRCP, 1987; W.H.O., 2001; Pavia, 2003 y Cohen, 1993.

## 1. Introduction

Uranium (U-238) is an element available in soils composition derived from a decay chain of radioactive elements, where radon gas (Rn-222) is present. Such inert gas from natural source, may reach a life span of 3.8 days and it is able to travel throughout soil pores until reaching surface, where it is capable to dilute among atmospheric gases; or to enter into buildings if they are not properly protected, in both cases completing its decay chain. When entering into closed rooms, radon gas is accumulated and increases its concentration. Inhalation of such gas may lead to lung cancer, since radiation produced by its decay and short-lived descendants, is capable of altering lung tissues DNA. Barros Dios et al., 2002; Sarah y David, 2003; IRCP, 1987; W.H.O., 2001; Pavia, 2003 y Cohen, 1993.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: borjafv@ietcc.csic.es



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>(2)</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>(3)</sup> (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990), 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>(4)</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 (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990):

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.

World Health Organization qualifies radon gas as a carcinogenic agent, degree 1. According to such organization it is the second cause for lungs cancer after tobacco.

In recent decades, health regulations in different countries have been collecting consecutive recommendations proposed by researchers on health effects <sup>(2)</sup> associated to inhalation of radon gas indoors.

Common denominator on these regulations is to assign a limit for radon gas concentration levels indoors <sup>(3)</sup> (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990), as well as the inclusion of constructive solutions to reduce such concentrations to safety limits. Generally, they include application fields closely associated to conditions to be fulfilled by buildings for job or residential purposes. Particularly, as far as residential buildings are concerned, health conditions for buildings in Spain are indicated y the Buildings Technical Code (CTE), based on the Building Regulation Law (LOE) <sup>(4)</sup>. Nowadays, such regulation does not include building inhabitants protection against excessive radon gas concentration indoors.

During the writing phase of such Code, Nuclear Safety Council of Spain (CSN) drafted an introductory proposal to include a chapter on protection measures against radon gas entry in new buildings under construction. The proposal is based on acceptable concentration limits proposed by the European Commission (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990):

Levels of concentration limits

< 200 Bq/m<sup>3</sup> for new residential buildings  
< 400 Bq/m<sup>3</sup> for existing buildings

In the first version of approved Code, the ministry did not believe appropriate to include aspects relative to protection against radon gas. An argument to do so was to avoid a society risk perception on those housings already built, since data were not available at the moment of code approval regarding proven corrective measures. Therefore, it was believed convenient to introduce a research project under development, with the support and subsidy by Nuclear Safety Council.

<sup>2</sup> - International Commission on Radiological Protection (ICRP)  
- The International Atomic Energy Agency (IAEA)

<sup>3</sup> - World Health Organization (WHO). Department of protection of the human environment. "Sources, Exposure and Health Effects" Organización Mundial de la Salud (2001)

<sup>4</sup> Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)

<sup>4</sup> 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). Matarranz, 2004; Quindós, 2004.

Such project is titled “Study on the Feasibility and Effectiveness of corrective measures against the presence of radon gas in existing buildings” and, the purpose of this paper is to show the advances made during the first phase, where an experimental unit has been constructed and the gas entry indoors has been studied. Such data have been correlated with atmospheric variants in order to understand the influence of climate changes on radon gas flow inside the building. Each variant has been studied according to reduction effectiveness on gas concentration indoors. Such measures could be named as rehabilitation measures oriented to improve health conditions on residential buildings, understanding that an excessive concentration of radon gas means a health risk, as stated by diverse medical research organizations.

The research team is composed by staff from:

- Institute of Construction Sciences Eduardo Torroja IETcc (CSIC). Spain
- Medical-Physical Chair, Medicine Faculty. Universidad de Cantabria. Spain

## 2. Methods

### 2.1 Location of Experimental Modulus

When selecting the location to build the experimental modulus, it was necessary to choose a soil area with high radon gas content, so as to be able to test corrective measures with higher accuracy. The company ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. which has focused its activities on uranium exploitation near Ciudad Rodrigo from Saélices el Chico mine site, Province of Salamanca, Spain, has contributed to this project by ceding the territory for modulus construction. The high radon gas contained by this zone and the availability of ENUSA Company has been determinant for the selection of the final location. Figure 1 and Figure 2 show the situation of involved zone within a gas radon presence map elaborated by the CSN (Nuclear Safety Council). Matarranz, 2004; Quindós, 2004.

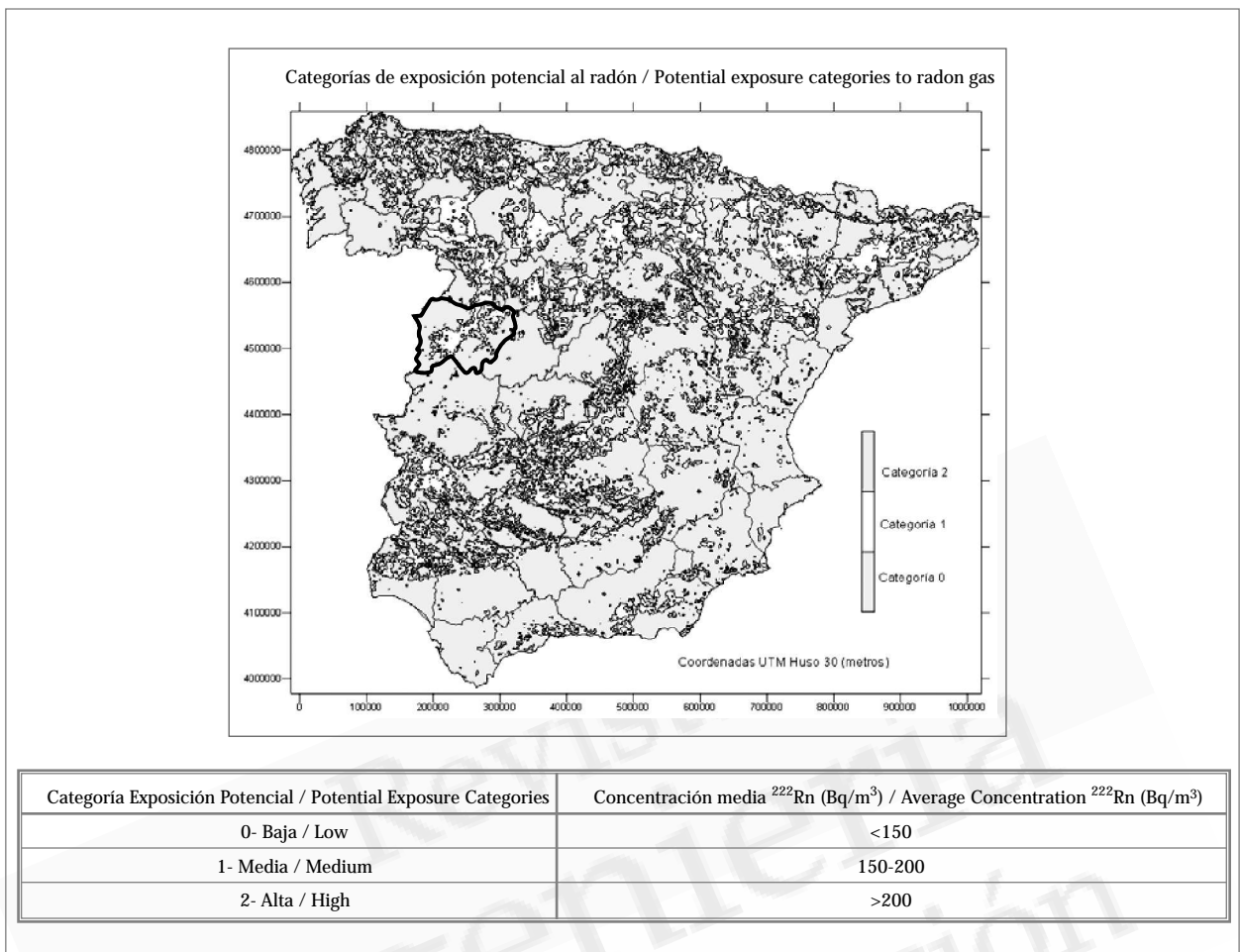


Figura 1. En el mapa de estimación de presencia de radón en viviendas, se observa que la provincia de salamanca se encuentra en una zona de alto riesgo  
 Figure 1. The estimation map for gas radon presence inside buildings in Spain shows that Salamanca Province is located in a high risk zone

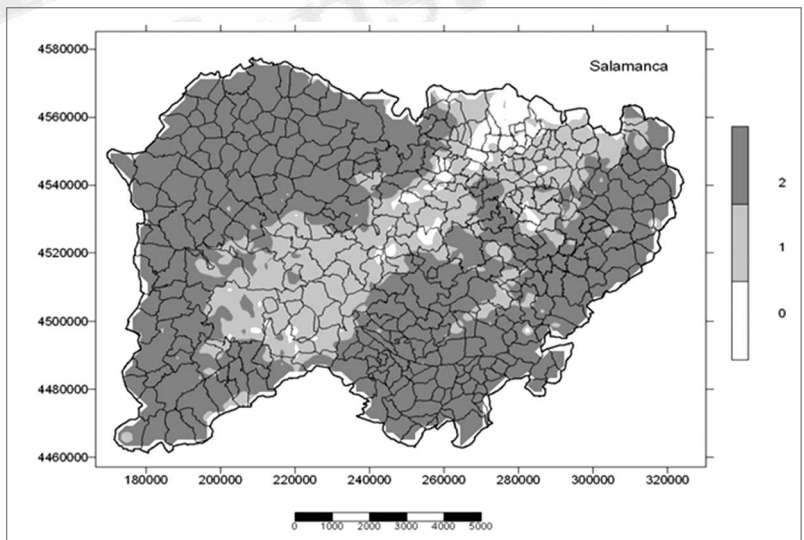


Figura 2. Mapa de la provincia de salamanca. Presenta unos índices altos (grado 2) en la mayoría del territorio. El punto rojo indica la situación exacta de la ubicación del módulo en las instalaciones de ENUSA, Ciudad Rodrigo, Salamanca, España

Figure 2. Map of Salamanca Province shows high indexes in most of the territory (grade 2). Red dot indicates the exact modulus location at ENUSA facilities. Ciudad Rodrigo, Salamanca, Spain

## 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:

- Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo
- Evaluación de la concentración de radón en profundidad
- 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.

- 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.

## 2.2 Records for radon gas in soil location. Concentrations checking

A radiological characterization has been developed on selected soil where experimental modulus has been constructed, basically consisting of:

- Determination of concentration of soil radioactive elements
- Evaluation of radon gas concentration in depth
- Studies of Granulometry and permeability on soil

Main results achieved for each item are presented below, in accordance with laboratory protocol by the Physical-Medical Chair at the Medicine Faculty, University of Cantabria

- Determination of concentration of soil radioactive elements

Nine soil samples have been characterized at the location where experimental modulus is constructed. Table 1 shows the results on a sample obtained from the excavation executed under the modulus.

Tabla 1. Caracterización radiológica de la muestra de terreno obtenida en la excavación realizada para construir el módulo experimental  
Table 1. Radiological characterization of a soil sample obtained from excavation executed to construct the experimental modulus

PROCEDENCIA /ORIGIN	Instalaciones de Enusa – Saélices El Chico (Salamanca)/Enusa Facilities – Saélices El Chico (Salamanca)		
REFERENCIA /REFERENCE	CSIC-ENUSA 03		
REFERENCIA UC /REFERENCE UC	068/05		
FECHA RECOGIDA /COLLECTION DATE	10/02/05		
FECHA ANÁLISIS /ANALYSIS DATE	10/03/05		
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS /ANALYSIS PROCEDURE : CFM-FM-1003.01			
	ACTIVIDAD ACTIVITY (Bq/Kg)	ERROR DE LA ACTIVIDAD ACTIVITY ERROR (Bq/Kg)	L.I.D. (Bq/Kg) 160,1
$^{238}\text{U}$ ( $^{234}\text{Th}$ )	1278,8	94	16,4
$^{226}\text{Ra}$ ( $^{214}\text{Bi}$ )	1012,5	62	32,3
$^{232}\text{Th}$ ( $^{228}\text{Ac}$ )	47,3	11,0	107
$^{40}\text{K}$	826	67	11,1
$^{137}\text{Cs}$	--	--	

Destaca la elevada concentración de radio, 20 veces superior a un suelo normal, lo que garantiza la presencia de gas radón (Quindós, 1995).

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<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/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.

The high concentration of radium, 20 times higher than the normal range, assures the presence of radon gas

b) Evaluation of radon gas concentration in depth

By means of sounding equipment, scintillation cells, counter equipment, radon gas concentration was measured at 1 meter depth, in the zone where the modulus was erected and its surroundings. Results of 20 measures developed on a surface of approximately 150 m<sup>2</sup>, show an average radon gas concentration of 250.000 Bq/m<sup>3</sup> at one meter depth, although there is a remarkable variability in radon gas concentration ranging from 70.000 Bq/m<sup>3</sup> to 500.000 Bq/m<sup>3</sup>, which in principle would qualify the zone as a high risk of radon gas content indoors according to proposal indicated in the preliminary draft of the Building Technical code.

c) Studies of granulometry and permeability on soil

In order to obtain global information on the soil where the modulus is constructed, a Granulometry analysis has been conducted on two samples, which have provided a soil average permeability result of 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s.

2.3 Modulus design and construction. Materials employed

The design of experimental modulus intends to reproduce typological characteristics of a residential building in Spain, by using widely used material for this kind of constructions. It is a two-floor building, one located on the grade line and the other below grade.

In such a manner, it is possible to study radon gas existing in basements and grade line floors. Basement can be used to reproduce the case of a ventilation space under a sanitary framework. The ground floor occupies 5 square meters. Two floors are connected by an inner stair with a door which closes both rooms. The cover is a flat trafficable roof allowing access to the modulus and the manipulation of extraction systems to be installed. Figure 3 and 4 show architectonical design drawings for the experimental modulus.

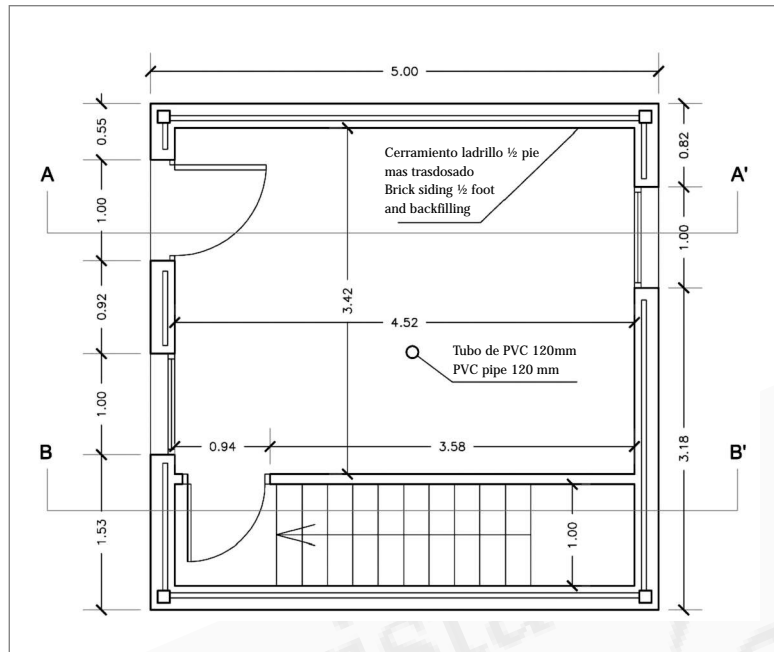


Figura 3. Diseño de planta baja del módulo experimental  
 Figure 3. Ground floor design in experimental modulus

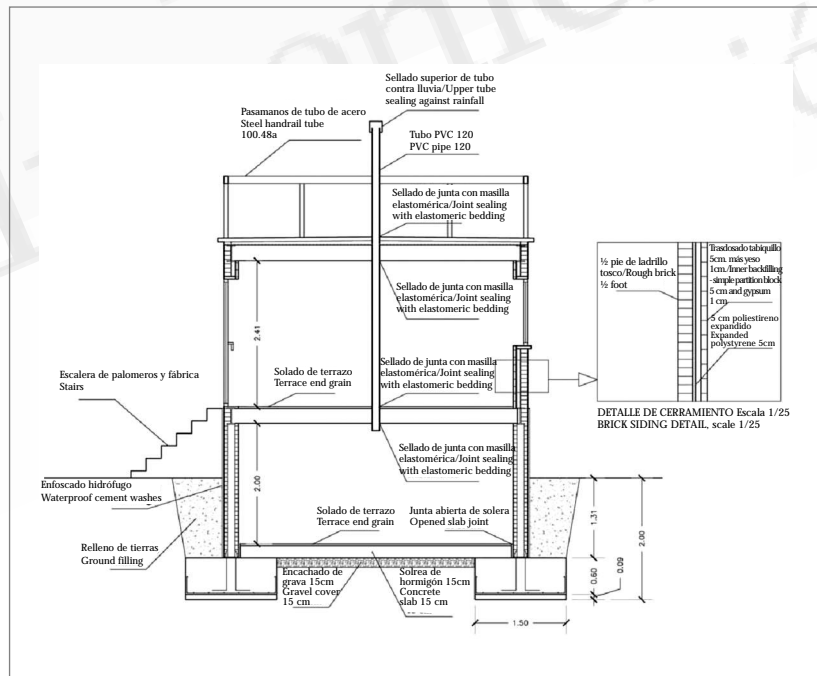


Figura 4. Sección del módulo experimental por el eje central  
 Figure 4. Experimental modulus section by central axis

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 1/2 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 esta 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.

For this construction materials widely employed in this type of buildings were used:

- Basement: basement walls built with 1 foot of perforated brick and external mortar cement wash. No drainage, no impermeable film. In this way, the modulus is unprotected against radon gas entry from the soil.
- Ground slab: concrete slab of 10 cm thickness over gravel cover. No impermeable film has been installed so as to not avoid radon gas entry indoors.
- Floor siding: Wall of 1/2 foot external brick, ventilation space and inner backfilling with simple partition block.
- Roof: It is a flat roof accessible from the outdoors to allow the installation of extraction systems.

The modulus has an access door, and two windows located at opposite fronts, which are used to generate natural ventilation. Besides it is equipped with supply circuit by means of a gasoil generator guaranteeing a constant supply on measurement equipment and extractors to be installed. Figure 5 shows constructed modulus.

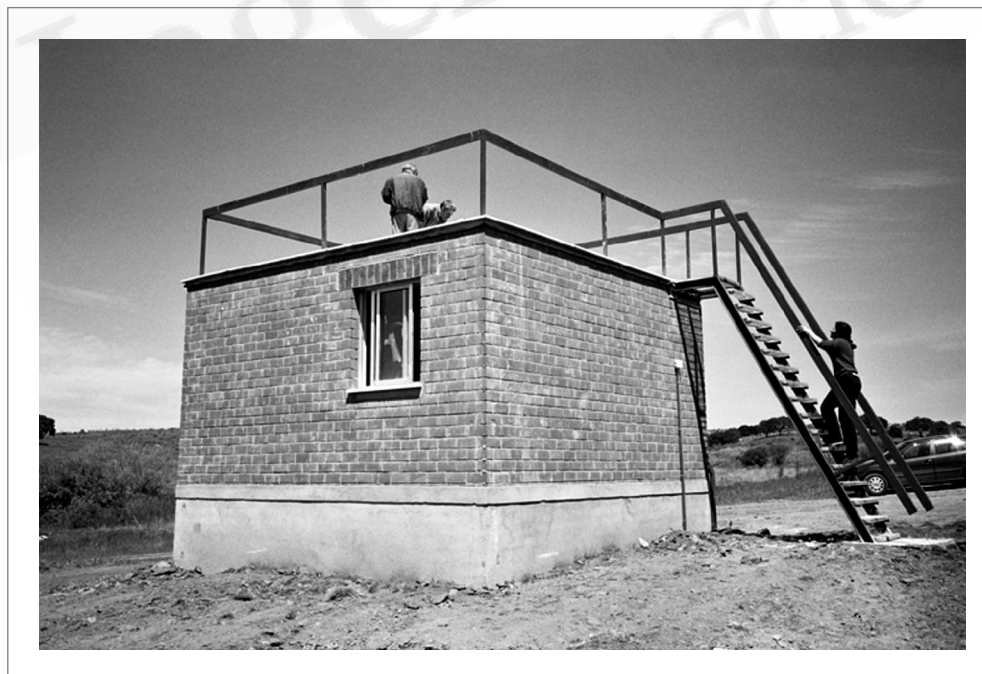


Figura 5. Fotografía del módulo terminado

Figure 5. Picture of finished modulus



#### 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)

#### 2.4 Work schedule

The preliminary objective for the current research project is to study radon gas entry into the experimental modulus, constructed with no protection against gas entry. Radon gas concentration has been studied indoors (basement and ground floor) by correlating records with data regarding winds, atmospheric pressure, rainfalls and temperatures.

The second phase is focused on feasibility and effectiveness study of corrective solutions by measuring radon gas concentration after those solutions have been introduced.

#### 2.5 Equipment to register different parameters

The necessary equipment has been installed inside the modulus to register different parameters:

In order to measure soil permeability "in situ" Czech RADON-JOK equipment has been used to register air flow extracted at one meter depth.

In order to measure radon gas concentration DOSEMAN (Sarad) and SCOUT (Sarad) have been employed, which deliver continuous measurements and averages every hour.

8 temperature soundings are located indoors and other 4 to register pressure variations between modulus indoors and outdoors and, also between ground floor and basement. On the other hand, meteorological information is also available from ENUSA station in Saelices (rainfall, wind, temperature and humidity).



Figura 6. Laboratorio instalado en el interior del módulo para la medida en continuo de los diferentes parámetros de registro  
Figure 6. Laboratory installed inside the modulus for the continuous measurement of different parameters

### 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 <sup>(5)</sup> (Font, 2002; Nazaroff, 1988) 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.

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 (Hintenlang y Al-Ahmady, 1992; Allen, 1997). 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 (Kraner, 1964), 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:

### 3. Results

The results on recordings obtained on radon gas concentration inside the modulus, under unprotected conditions against gas entry are presented below. Such results have been correlated with atmospheric data obtained during measurement period providing an idea about the influence they have on radon gas entry and accumulation.

Afterwards effectiveness results on introduced corrective measures are indicated, which are determined by comparing radon gas concentration before and after introducing such actions.

#### 3.1 Radon gas concentrations correlated with atmospheric data. Modulus unprotected against radon gas entry

The constructed modulus was kept closed during initial period, approximately 4 months, in order to study radon gas behavior inside the prototype building. It is a building constructed without any protection against radon gas entry and, therefore, it is susceptible to its penetration through its cover.

Several studies <sup>(5)</sup> (Font, 2002; Nazaroff, 1988) analyze radon gas generated by soil, its entry through building sides and its accumulation indoors.

Leakage and exhalation rates are related with radon gas generation and its mobilization through soil pores, being amount of radon gas source and soil permeability determinant factors.

Pressure differences between the soil and the inside modulus determine radon gas flow towards indoors. (Hintenlang y Al-Ahmady, 1992; Allen, 1997). Due to different factors, such as ventilation spaces or temperature gradients, a depression is normally found inside a building in comparison to soil pores pressure mainly leading to convection radon gas flow from soil towards the inside building.

The changes of atmospheric variants do not affect in the same way the soil pores ventilation than the inside modulus (Kraner, 1964), thus generating a time phase lag until conditions are made equal. Such phase lag provokes pressure gradients modifications and, therefore, variations of radon gas flow towards the inside. The results obtained from this phase are analyzed below:

<sup>5</sup> - Lluís Font "The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" Grupo de Física de les Radiacions, 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).

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 (Quindós, 1995). (Figura 7).

a) Radon gas concentrations correlated with rainfall data.

A positive correlation is observed between rainfall and the increase of radon gas concentration indoors, for the basement as much as for the ground floor. Such rainfall effect may be correlated with a soil permeability decrease in modulus surroundings, which leads to a preferential radon gas outlet through dry soil underneath the modulus (Quindós, 1995). (Figure 7).

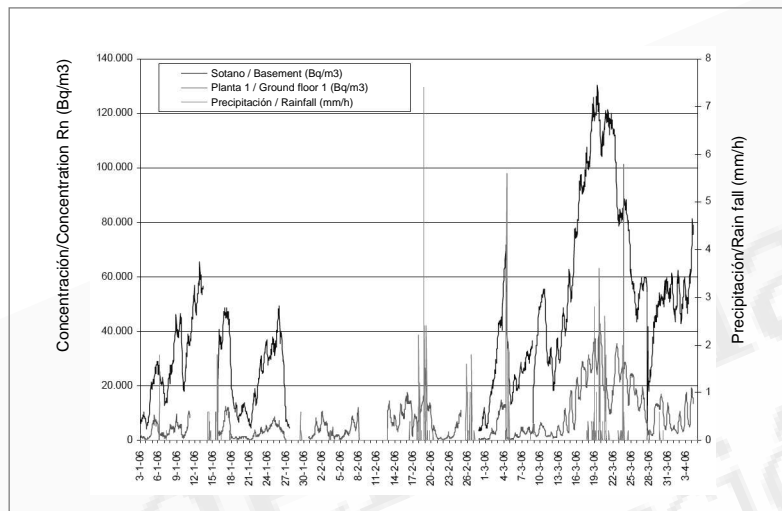


Figura 7. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con las precipitaciones registradas en la zona. Se aprecia un aumento de las concentraciones cuando se producen picos sustanciales en las precipitaciones

Figure 7. Radon gas concentration in basement and ground floor spaces, correlated with rainfall registered in the zone. A concentration increase is observed when significant rainfall peaks take place

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.

b) Radon gas concentrations correlated with wind speed and pressure.

There are two opposite aspects on wind action over radon gas concentration. On one side, according to architectonic features in a residential building, wind can facilitate the exchange of air inside and outside the building. Such air input with low radon gas concentration, would allow a concentration reduction indoors.

On the other hand, wind leads to a local pressure difference between indoors and outdoors which is proportional to its square speed, thus facilitating radon gas entry indoors.

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 de los gases ideales  $P=nRT/V$  <sup>(6)</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.

In our modulus such effect seems to be more effective than air exchange. However, induced pressure differences hardly exceed 20 Pa, which are significantly lower than differences observed for atmospheric pressure as indicated below.

c) Radon gas concentrations correlated with outdoors temperature data.

The variation of temperature outdoors is the cause of a pressure gradient modification between indoors and outdoors. Such effect is known as "Stack" (stack effect) and explains gas mobilization due to temperature changes inside buildings. During winter, hot air generated inside a building is expanded (pressure increase due to ideal gas law  $P=nRT/V$  <sup>(6)</sup>) and tends to leak through stacks, fissures, cracking, windows, etc. Such effect provokes an inner decrease which favors radon gas entry from the soil by means of a suction process.

During the analyzed period, there seems to be no correlation between measured temperatures and radon gas concentration. Only during the last seven days, a positive correlation was observed between outdoors temperatures and radon gas concentration indoors. Differences between outdoors and indoors temperatures may generate a pressure difference modifying radon gas entry into the modulus. For data range available, such difference is low (about 1 Pa) and does not seem to be responsible for observed variations on radon gas concentration.

d) Radon gas concentration correlated with atmospheric pressure data.

A negative correlation between atmospheric pressure and radon gas concentration inside the modulus is observed. Pressure decrease provokes a significant concentration increase. The mechanism generating such increase could be related with soil permeability at different depths. Pressure variations observed are about  $10^3$  Pa, three orders of magnitude higher than the ones provoked by wind or temperature differences, which indicates there is a dominant parameter among the other three previously analyzed.

<sup>6</sup>  $P=nRT/V$  El aumento de presión es directamente proporcional al aumento de temperatura a volumen constante

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)

Complementarily, a relation has been observed between atmospheric pressure changes, rainfalls and wind speed. Low pressures suggest an increase of rainfall probabilities. It is not so evident, although observed, that pressure decreases also increase wind speeds. (Figure 8)

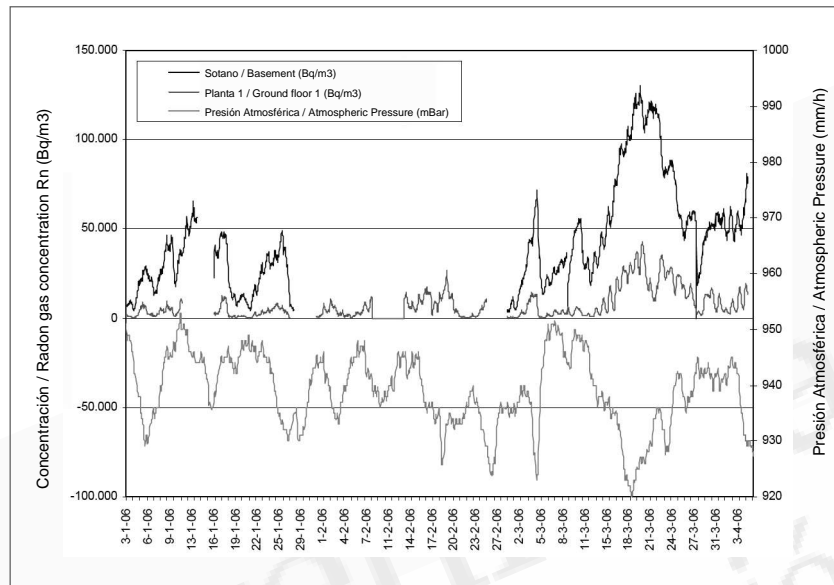


Figura 8. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con la presión atmosférica  
 Figure 8. Radon gas concentration in basement and ground floor correlated with atmospheric pressure

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:

3.2 Effectiveness of rehabilitation measures conducted to reduce radon gas concentration indoors

During the initial period average radon gas concentrations were registered on the modulus with no protection against radon gas entry. These concentrations serve as comparative basis for the evaluation of radon gas decreases achieved by corrective measures tested for almost one month. Initial concentrations for non-protected modulus serve as comparative pattern basis, which are the following:

Tabla 2. Concentraciones de radón en punto de inicio. Situación de módulo sin protección

Table 2. Radon gas concentration at initial point; non-protected modulus situation

	Planta SÓTANO / Basement	Planta 1 / Ground floor 1	Relación / Relation P. sótano / P.1 / Basement /GF 1
Concentración PROMEDIO (3 meses) Average concentration (3 months)	39.385 Bq/m3	6.855 Bq/m3	6 5,75

En esta fase de la investigación, se introducen en el módulo distintas medidas de protección (Loomis, 1995; Loomis, 1994; Murley, 1996; Clavensjö y Akerblom, 1994; Collingnan, 1999; CSTC, 1999; EPA, 2001), 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 frente 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.

At this research stage, different protection (Loomis, 1995; Loomis, 1994; Murley, 1996; Clavensjö and Akerblom, 1994; Collingnan, 1999; CSTC, 1999; EPA, 2001) measures against radon gas entry into the modulus have been introduced and, they are evaluated according to their capacity to reduce radon gas concentration indoors.

These types of measures could be classified into two groups considering the working order they interpose barriers to stop soil radon gas entry into the whole building unit (ground slabs, basement walls, etc.) (Ref. Figure 10) and; measures taking gas out from the soil before entry indoors by means of installation of air removal systems connected to the ground (see Figure 9). Among the second ones, there are variations such as air pressurization instead of extraction, or air circulation in sanitary frameworks.

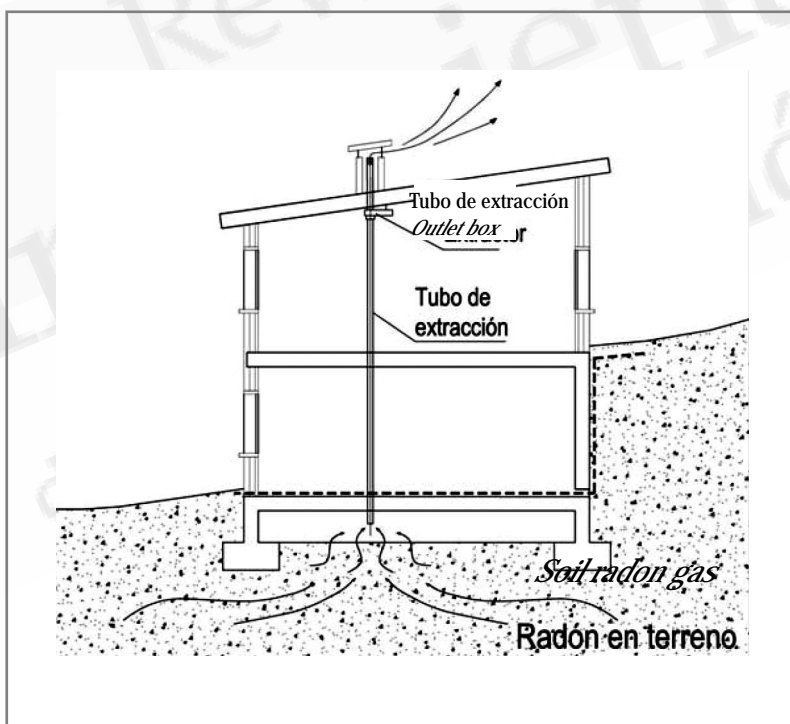


Figura 9. Medidas de extracción  
Figure 9. Extraction Measures

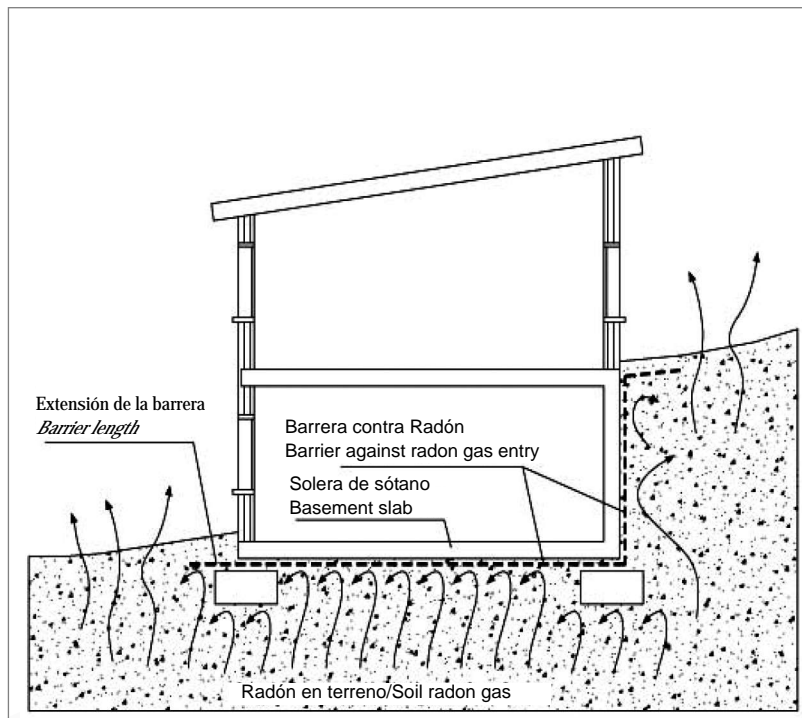


Figura 10. Medidas de barreras  
Figure 10. Barrier Measures

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).

This research only analyzes extraction measures by means of natural draught and forced draught by using central and external catchment areas (outlet boxes).

a) Effectiveness of natural draught system in a central SUMP.

This rehabilitation measure consists of a natural gas extraction system from building settlement soil. For this purpose an SUMP has been constructed to capture gas from the underground and it has been placed under modulus ground floor by perforating concrete slab. An outer SUMP was also constructed to evaluate location influence on them. They both were constructed by means of perforated bricks to allow gas entry indoors. (Figure 11 and Figure 12).

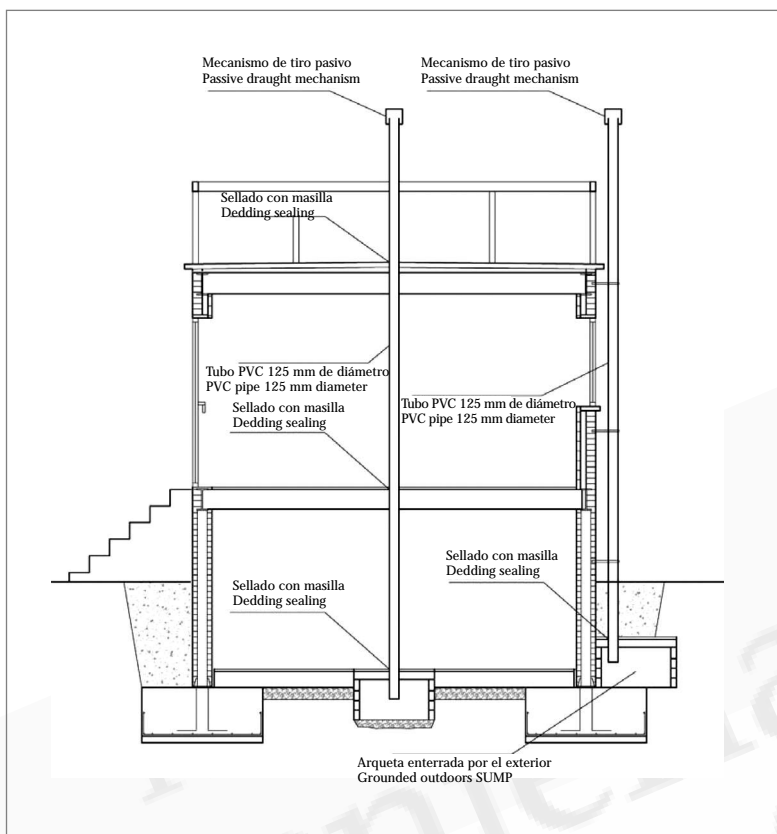


Figura 11. Sección del módulo por el eje central. Se observa el diseño del sistema de extracción  
Figure 11. Modulus section by central shaft. It shows the extraction system design

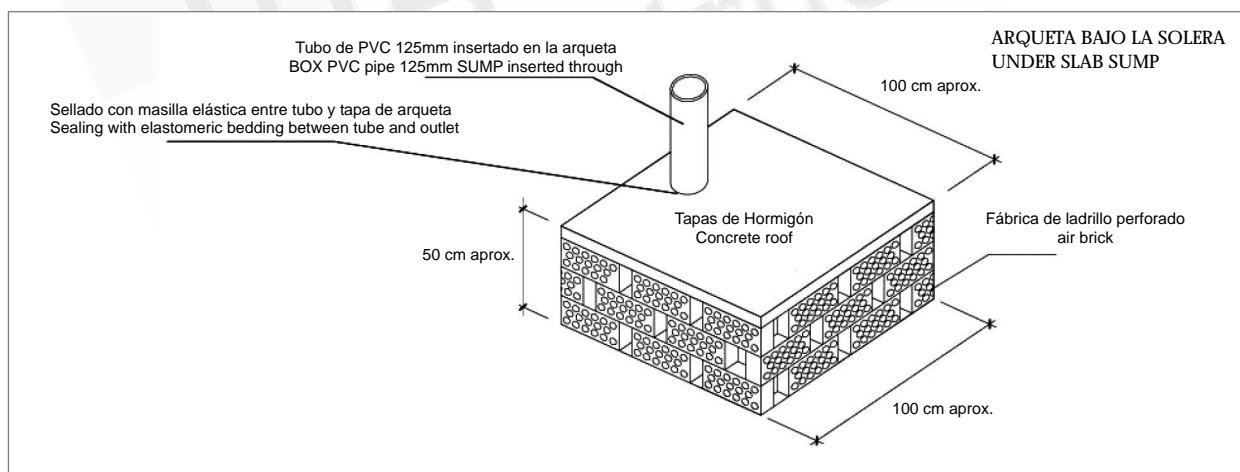


Figura 12. Diseño de la arqueta tipo  
Figure 12. SUMP prototype design



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)

Tubes have been inserted through SUMPS upper sides and they have been conducted up to the roof to force a natural draught (Figures 13 and 14)



Figura 13. Fotografía de la construcción de la arqueta situada bajo la solera de sótano  
Figure 13. Picture of construction of SUMP inserted under basement slab



Figura 14. Salida de los tubos a cubierta. En esta fotografía se encuentran sellados en su extremo  
Figure 14. Tubes output to the roof. This picture shows tubes sealed in the base

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).

The purpose is to study mitigation likely to be produced in indoors concentration by an extraction system. A natural draught device was installed at the tubes ends, which operates by the effect of wind. (Figure 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  
 Figure 15. This picture shows SUMP opened draught located underneath the modulus, while the other tube is sealed

El efecto que ello causó fue una reducción considerable en 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>.

The resulting effect was a significant reduction of radon gas concentration inside the modulus. Figure 16 shows the way radon gas concentration in the basement is reduced from indexes that oscillate from 80,000 Bq/m<sup>3</sup> up to 1,500 Bq/m<sup>3</sup>. In the ground floor concentration has changed from an average value of 20,000 Bq/m<sup>3</sup> to an average value of 500 Bq/m<sup>3</sup>.

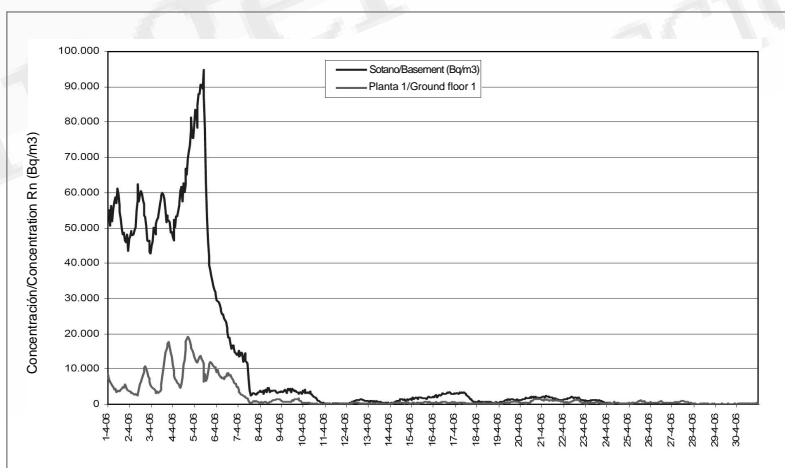


Figura 16. En esta gráfica se observa la reducción en la concentración de radón cuando han entrado en funcionamiento la extracción natural a través de las dos arquetas enterradas  
 Figure 16. This graph shows a radon gas decrease when natural draught is operating by means of two grounded SUMPS

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).

Wind speed may lead to a better operation of passive draught due to “Venturi” effect, which seems to be confirmed from days 10 to 12 in April, when a positive relation is observed between the wind speed increase and the decrease of radon gas concentration (Figure 17).

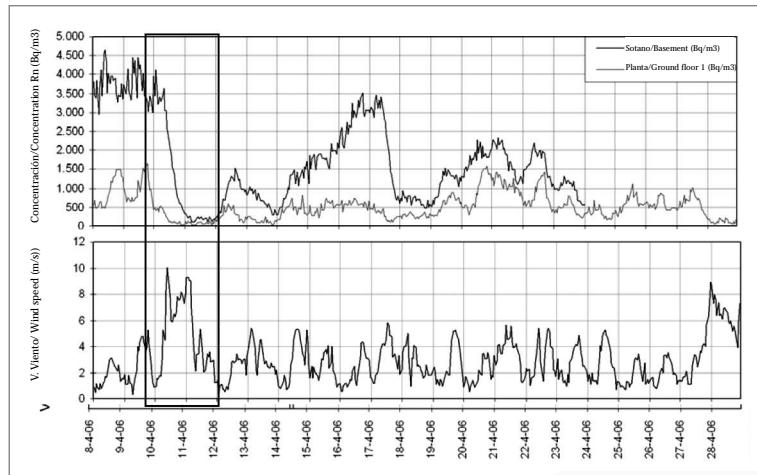


Figura 17. Al aumentar la velocidad de viento se produce una succión mayor por las arquetas y por tanto una mayor extracción de radón  
 Figure 17. When increasing wind speed a higher suction process is produced through SUMPS and therefore a higher output of radon gas takes place

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.

Effectiveness results for this first measurement is summarized in Table 3, showing initial concentration obtained after intervention and reduction of radon gas, achieved by the introduced corrective measurement. Such decrease is also expressed in percentages over initial concentration.

Tabla 3. Efectividad de la medida de rehabilitación (a)  
 Table 3. Rehabilitation measure effectiveness (a)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT								
01-Extracción Natural por arqueta Central 01-Natural draught by central SUMP	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91

b) Efectividad de un sistema de extracción natural por captación en arqueta exterior.

b) Effectiveness of a natural extraction system by means of external SUMP catchment.

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.

The operating basis for this system is the same than in the previous system. In this case, the tube connected to the central SUMP is sealed and the exterior SUMP is opened. Extraction is only carried out through external SUMP by means of natural draught. In this way the SUMP extraction capacity is analyzed in function of their locations. In the previous measure only the central SUMP was operating and in this measure only external SUMP does.

La efectividad de esta medida es la siguiente:

Effectiveness for this measurement is as follows:

Tabla 4. Efectividad de la medida de rehabilitación (b)  
Table 4. Effectiveness of rehabilitation measure (b)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT								
03-Extracción Natural por arqueta Exterior 03-Natural draught by central sump	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53

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, con lleva 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.

It is observed that effectivenesses achieved are quite lower than in the previous corrective measure. Such phenomenon could be explained by the barrier established by modulus footing. The sump is externally dug-in by continuous footing.

Such footing perimeter physically closes the underground soil underneath, thus generating a zone less affected by succions carried out by the sump. Such situation allows a higher amount of radon gas penetration inside the modulus instead of sump reaching. On the other hand it is proven that, as occurred in the previous measure, wind plays an important role in the extraction of radon gas through Sumps.

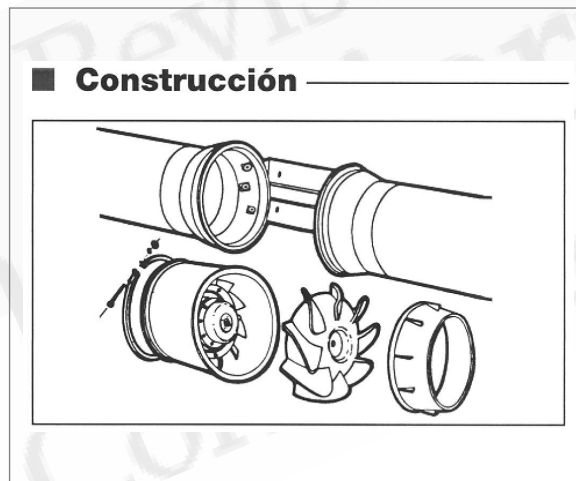
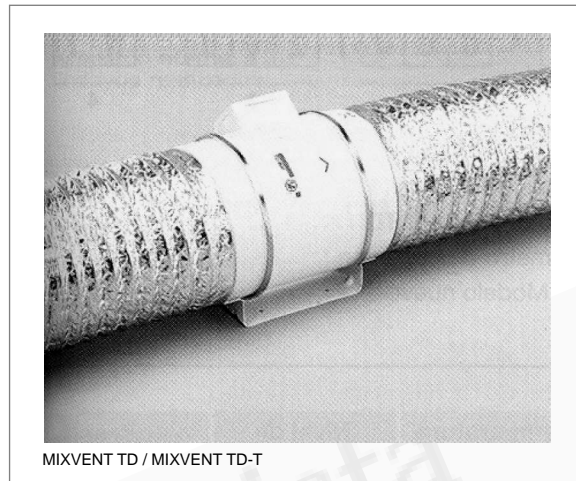
Suction carried out by wind in the tube head, together with passive draught mechanism, leads to higher extraction speed, and therefore, a higher amount of radon gas is expelled. The higher speed is higher extraction capacity, and, therefore, higher decreases of indoors concentration.

c) Forced draught system effectiveness (80W power fan) through central sump.

This is a variant to natural draught measure through central sump (a), where draught is forced by means of a mechanical 80W power fan. Operating basis is the same, i.e. extracting radon gas polluted air underneath the modulus to avoid penetration indoors. Extraction is carried out through the same central sump underneath modulus slab ground and connection to the outer zone is done with the same tube as in measure nr. 2. A helicoblast mechanical extractor was installed in the outlet channel.

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:

Connection diameter is 125mm and generates a maximum decrease in central sump of 155 Pa. Figures 18 and 19 show the extractor installed:



Figuras 18 y 19. Modelo de extractor colocado en el tubo. Marca: Soler & Palau. Modelo: MIXVENT TD 350/125  
 Figures 18 y 19. Flow duct fan installed in the tube. Brand Soler & Palau. Model MIXVENT TD 350/125

Las características de este extractor son las que muestra la Tabla 5.

The characteristics of this fun are shown in Table 5.

Tabla 5. Características técnicas del extractor instalado  
 Table 5. Technical characteristics of the installed flow duct fan

Tipo Type	Velocidad Speed (r.p.m.)	Potencia absorbida Power absorbed max. (W)	Intensidad absorbida Absorbed current max. (A)	Caudal de descarga libre Air flow at free discharge (m3/h)	Nivel de presión sonora Sound pressure level (dBA)	Peso Weigh (kg)
MIXVENT TD 350/125	2.210	80	0.37	360	30	2

La Figura 20 muestra el diseño de la medida correctora:

Figure 20 shows corrective measurement design:

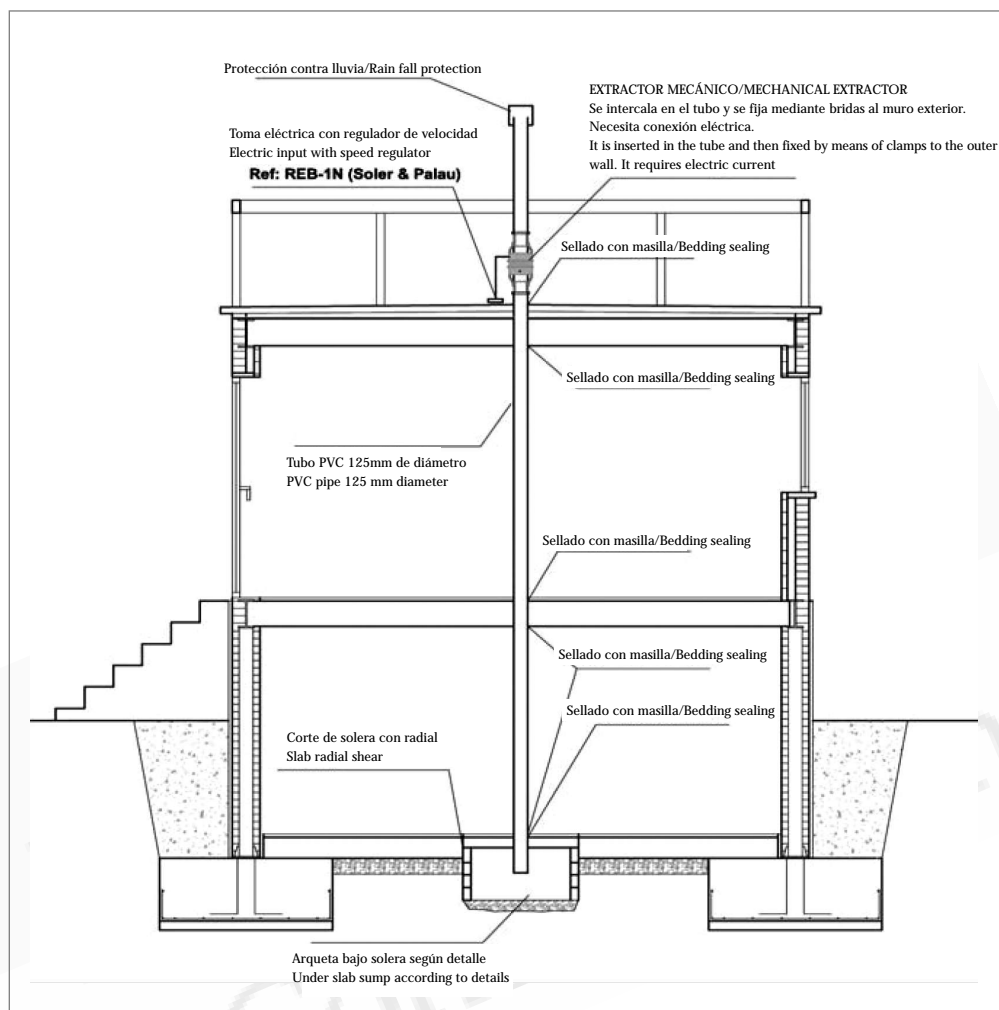


Figura 20. Diseño de la solución de rehabilitación (c)  
Figure 20. Design of rehabilitation solution (c)

La efectividad conseguida se muestra en la Tabla 6.

Achieved effectiveness is shown in Table 6

Tabla 6. Efectividad de la medida de rehabilitación (c)  
Table 6. Effectiveness of rehabilitation measure (c)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN FORZADA NATURAL DRAUGHT								
05-Extracción Forzada (56w) por arqueta Central 05-Forced draught by central sump	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95

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 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.

This table shows the high effectiveness achieved by this measure. Obtained values for both floors are about 400 Bq/m<sup>3</sup>, meeting recommended values for existing buildings according to European Commission.

Fan Maintenance is a crucial issue for these kinds of measures. Effectiveness relies on fan proper operation, so if it fails the system will stop working and once again radon gas will be accumulated indoors, without notice until new concentration analyzes are carried out. In order to avoid such failure, alarms can be used, which are activated once a fan malfunctioning is detected. On the other hand, atmospheric pressure influences are significantly reduced by means of a mechanical extractor.

d) Effectiveness of a forced draught system (80W power fan) through external sump.

In this new measure (last measure of extraction through outlet boxes) the 80W mechanical fan is moved to the tube output connecting with external sump. The tube of central sump is sealed. The operating basis for this solution is the same as measure (b) (natural draught through external sump, excepting that in this case draught is forced by means of a mechanical 80W fan power. Consequently radon gas reduction capacity performed by this measure has been analyzed in comparison to natural draught (b) and also compared to effectiveness of previous measure (c), where the same extractor was placed in the connection tube of central sump.

Achieved effectiveness is shown in Table 7.

Tabla 7. Efectividad de la medida de rehabilitación (d)  
Table 7. Effectiveness of rehabilitation measure (d)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m <sup>3</sup> ) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> ) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> ) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN FORZADA NATURAL DRAUGHT								
07-Extracción Forzada (80w) por arqueta Exterior 07-Forced draught by means of external sump	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

Se observan efectividades bastantes 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.

Quite higher effectivenesses are observed in relation to corrective measure of extraction by means of external sump with natural draft (b), showing effectiveness results of 58% and 53% for basement and ground floor 1, respectively.

In this case modulus foundation representing a barrier for natural draught (b) through external sump does not seem to have the same influence at the same extent. The following assessment is reached: The installation of an extractor in the external sump, achieves good effectiveness for natural draft, and quite similar to the ones obtained by forced draughts through central sump. Therefore, an action plan for an existing building intervened from the outside, would not disturb inhabitants.

### 3.3 Comparative analysis of effectivenesses on tested rehabilitation measures

Table 8 shows radon gas concentrations reductions obtained from different corrective measures, express in Bq/m<sup>3</sup> as well as in percentage reductions compared to initial concentrations.

Tabla 8. Efectividades comparadas  
Table 8. Compared effectivenesses

MEDIDA DE REHABILITACIÓN CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m <sup>3</sup> ) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> ) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m <sup>3</sup> ) REDUCTION		EFECTIVIDAD REDUCCIÓN % REDUCTION EFFECTIVENESS	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1
<b>EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT</b>								
a)-Extracción Natural por arqueta central Natural draught by means of central sump	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
b)-Extracción Natural por arqueta exterior Natural draught by means of external sump	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
<b>EXTRACCIÓN FORZADA FORCED DRAUGHT</b>								
c)-Extracción Forzada (80 W) por arqueta central Forced draught (80 w) by means of central sump	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
d)-Extracción Forzada (80 W) por arqueta exterior Forced draught (80 w) by means of external sump	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

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.

All of them, excepting measure c (natural draught through external sump) have achieved effectivenesses higher than 90%. Although it has not been proven that there is a linear percentage relation applied on other radon gas initial concentration, it is expected that in standard situations not containing such higher radon gas concentration (such as the case of uranium mine site), reductions of radon gas concentrations below 400 or 200 Bq/m<sup>3</sup> would have taken place for most tested measures.





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 ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ) (7) para viviendas existentes.

Figure 21 shows a bar graph where concentration averages can be observed after the intervention of each corrective measure. Red line indicates risk limit, from which a corrective action should be applied for existing buildings in accordance with European Commission ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ) (7).

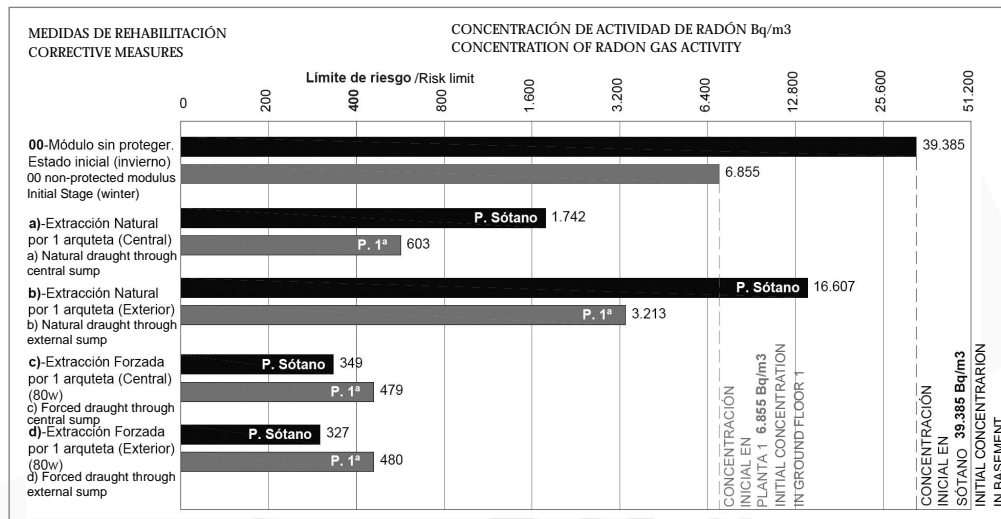


Figura 21. Reducciones de radón en cada una de las medidas correctoras

Figure 21. Radon gas reductions for each corrective measure

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.

Broken lines indicate initial concentrations for basement as well as for ground floor 1.

The most effective measures achieving or close to reach concentration safety limit ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), are those employing mechanical extractors to force draughts through sumps. Therefore, it must be considered that so as to get a given performance, it is necessary to keep the fan working continuously. The installation of an alarm system is recommended to detect electrical or mechanical failures as well as the implementation of a maintenance program that guarantees a continuous operation.

As far as natural draught systems are concerned, passive type measure, it has been proven that sump placed in centered position in relation to ground floor, has the highest catchment capacity 6 European Commission as of February 21, 1990, (90/143/EURATOM) than external sump. On the other hand, it is demonstrated that wind speed positively influences radon gas reduction. Such effect is related to higher suction capacity developed by the sump due to the "Venturi" effect generating wind speed at the expelling tube outlet.

<sup>7</sup> Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)



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 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 (EURATOM, 1990), 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 Bq/m<sup>3</sup> 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 Bq/m<sup>3</sup> 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.

In the system connected to central sump as well as the external sump system, higher effectivenesses are found when the wind exceeds speeds of 8 m/sec.

In general terms and considering that a prototype building has been constructed on a high radon gas soil, all measures have delivered positive results and within expected ranges, being the most effective one the forced draught solutions.

## 4. Conclusions

Following recommendations of entities such as World Health Organization, IRPA (International Radiation Protection Association) or European Community Board as of February 21, 1990 (EURATOM, 1990), radon gas inhalation is a health risk factor which increases the probabilities of developing lung cancer. In that sense, construction sector shall settle protection systems guaranteeing that radon gas immissions for inhabited buildings do not exceed recommended concentrations limits.

The Institute of Construction Sciences Eduardo Torroja upon request of Nuclear Safety Council has carried out research studies to settle regulations oriented to protect buildings inhabitants from excessive radon gas concentrations.

As far as radon gas concentrations registered in the modulus are concerned (when it was not protected against radon gas entry), the atmospheric pressure seems to be a determinant parameter for concentration variations observed inside the modulus. Regarding the influence of rainfalls on radon gas concentration indoors, it seems to become evident when the concentration reaches a significant value. During the analyzed period comprising several months, it does not seem to be a relation at all between registered temperatures and radon gas concentration indoors.

Effectiveness analyses on different tested corrective measures delivered satisfactorily results on the execution of different solutions in the experimental modulus. Taking in to consideration limits established by European Commission (400 Bq/m<sup>3</sup> for existing buildings), for high concentrations at this location, only forced draught solution fulfills such value. However for standard situations, radon gas concentrations lower than 1000 Bq/m<sup>3</sup>, studied measures are likely to be quite effective.

In this study some corrective measures have been introduced, however, some other types of measures still expect to show results such as air pressurization under slabs, forced air ventilation in basements and protective barriers against radon gas entry.

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.

All systems are considered effective and from its further evaluation it will be possible to obtain a comparative analysis on measures collected in the current research.

## 5. Agradecimientos

Mostramos un especial agradecimiento a:  
Enrique Suárez, José Luis Martín Matarranz y a Luis Quindós Poncela de la Universidad de Cantabria.

## 5. Acknowledgements

Our special acknowledgements to:  
Enrique Suárez, José Luis Martín Matarranz and Luis Quindós Poncela from Cantabria University.

## 6. Referencias / References

- Allen L., Robinson Richard G., Sextro y 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 y 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. y 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. y 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 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; Schrolder 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 Affairs. 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 Affairs. Florida standard for radon-resistant new commercial building construction. USA
- Nazaroff W.W., Moed B.A. y Sextro R.G. (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. y 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. y Cascón M.C. (2004), Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International* 29, 1091-1096.
- Sarah C. y David C. (2003), Health Effects of residential radon: European perspective 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 Health Effects. Organización Mundial de la Salud.

