

Estudio de calidad del aire interior en edificios de la Universidad de Málaga: concentraciones de radón

Estudo da qualidade do ar interior em edifícios da Universidade de Málaga: concentrações de radão

A Study of Indoor Air Quality in Buildings of the University of Malaga: Radon Concentrations

Ana Belén Muñoz Aguado¹, Sergio Andrés Cañete Hidalgo², Elisa Gordo Puertas², José Manuel Pastor Vega³

¹ Servicio Prevención Riesgos Laborales (SEPRUMA). Universidad de Málaga. España.

² Servicios Centrales Apoyo Investigación (SCAI). Universidad de Málaga. España.

³ Departamento de Radiología y Medicina Física. Universidad de Málaga. España.

Cita: Muñoz Aguado AB, Cañete Hidalgo SA, Gordo Puertas E, Pastor Vega JM. Estudio de calidad del aire interior en edificios de la Universidad de Málaga: concentraciones de radón. Rev. Salud ambient. 2022; 22(2):150-158.

Recibido: 26 de septiembre de 2021. **Aceptado:** 20 de junio de 2022. **Publicado:** 15 de diciembre de 2022.

Autor para correspondencia: Ana Belén Muñoz Aguado.

Correo e: anabelen@uma.es

Servicio Prevención Riesgos Laborales (SEPRUMA). Universidad de Málaga. España.

Financiación: En este estudio se presentan los resultados más destacados del proyecto de investigación CAI_UMA (Calidad del Aire Interior) incluido en el I Plan propio del Vicerrectorado de Smart-campus de la Universidad de Málaga, el cual ha financiado parcialmente este proyecto.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización del estudio.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

Resumen

Se presentan los resultados del proyecto CAI_UMA cuyo objetivo fue cuantificar el promedio anual de concentración de radón en el sector educativo universitario, comparándose con la normativa vigente, estimando el riesgo radiológico derivado. Desde marzo 2019 hasta abril 2020, se realizaron mediciones de Radón ²²²Rn en cinco aulas. ²²²Rn es un gas noble radiactivo de origen natural, perteneciente a la cadena de desintegración del Uranio ²³⁸U. Las mediciones se realizaron mediante 5 detectores activos Saphymo® AlphaE y 70 pasivos CR-39®, revelados en el Laboratorio de Radioactividad, de la Universidad de Cantabria (LARUC). La concentración promedio anual fue de 59 Bq/m³. Estos resultados concuerdan con los pronosticados en estudios a nivel nacional como: el mapa del potencial de Radón, el mapa de radiación Gamma Natural (MARNA), del mapa litoestratigráfico y de permeabilidad, así como de los estudios existentes de medidas de radón. Se determina por primera vez la dosis efectiva en la Universidad de Málaga (UMA) por exposición a radón interior para miembros de público: 0,80 mSv/año. Estas concentraciones no superan el nivel de referencia normativo, si bien en determinados meses se obtienen valores promedios mensuales superiores a 300 Bq/m³. Puede atribuirse a ventilación deficiente y acumulación del gas en el interior de las aulas debida a diversas vías. Cuantificar las concentraciones medias anuales ²²²Rn permiten estimar el riesgo radiológico, comparándolo con los niveles de referencia, resultando ser un riesgo bajo. Se alcanza el objetivo de informar y concienciar a la sociedad sobre los riesgos a la exposición a radón.

Palabras clave: salud pública; salud ambiental; educación; calidad de aire interior; radón; cáncer de pulmón; salud radiológica; radiación.

Resumo

Apresentam-se os resultados do projeto CAI_UMA, cujo objetivo foi quantificar a concentração média anual de radão no setor do ensino universitário, comparando-a com as normas vigentes, estimando o risco radiológico derivado. Desde março de 2019 até abril de 2020, realizaram-se medições de Radão ^{222}Rn em cinco salas de aula. ^{222}Rn é um gás nobre radioativo de origem natural, pertencente à cadeia de desintegração do Urânio ^{238}U . As medições foram realizadas com 5 detetores ativos Saphymo® AlphaE e 70 passivos CR-39®, revelados no Laboratório de Radioatividade da Universidade de Cantábria (LARUC). A concentração média anual foi de 59 Bq/m³. Esses resultados são consistentes com os previstos em estudos nacionais como; o mapa do potencial de radão, o mapa de radiação Gama Natural (MARNA), o mapa litoestratigráfico e de permeabilidade, bem como os estudos existentes de medições de radão. Determina-se pela primeira vez na Universidade de Málaga (UMA) a dose efetiva por exposição a radão interior para o público: 0,80 mSv/ano. Estas concentrações não excedem o nível de referência normativo, embora em determinados meses sejam obtidos valores médios mensais acima de 300 Bq/m³. Estes valores podem dever-se a uma ventilação deficiente e à acumulação de gás dentro das salas de aula devido a vários motivos. Quantificar as concentrações anuais médias de ^{222}Rn permite estimar o risco radiológico, comparando-o com os níveis de referência, resultando em baixo risco. O objetivo de informar e conscientizar a sociedade sobre os riscos da exposição ao radão é assim alcançado.

Palavras-chave: saúde pública; saúde ambiental; educação; qualidade do ar interior; radão; cancro do pulmão; saúde radiológica; radiação.

Abstract

The results of the CAI_UMA Project are herein presented, the purpose of which was to quantify the average annual radon concentration in the university education sector by comparing it with current regulations and to estimate the consequent radiological risk. Radon ^{222}Rn measurements were taken in five classrooms from March 2019 to April 2020. ^{222}Rn is a naturally occurring radioactive noble gas belonging to the decay chain of uranium ^{238}U . Measurements were taken using 5 Saphymo® AlphaE active monitors and 70 CR-39® passive detectors and developed at the Radioactivity Laboratory of the University of Cantabria (LARUC). The average annual concentration was 59 Bq/m³. These results match those predicted in national studies such as the Radon Potential Map, the Natural Gamma Radiation Map (MARNA) and the lithostratigraphic and permeability map and in existing radon measurement studies. The effective dose at the University of Malaga (UMA) due to indoor radon exposure for members of the public was determined for the first time: 0.80 mSv/yr. These concentrations do not exceed the legal reference level, although monthly average values above 300 Bq/m³ were measured in certain months. This can be ascribed to poor ventilation and to the accumulation of gas inside the classrooms via various pathways. Quantifying average annual ^{222}Rn concentrations allows the radiological risk to be assessed and compared to reference levels, the risk being low. The goal of informing the public and raising its awareness of the risks of radon exposure was thus achieved.

Keywords: public health; environmental health; education; indoor air quality; radon; lung cancer; radiological health; radiation.

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire interior (CAI) o *Indoor Air Quality* (IAQ) está relacionada con la salud de los ocupantes de un entorno cerrado¹. Una deficiente calidad del aire interior afecta a la salud de las personas. La salud ambiental es la disciplina de la Salud Pública que identifica, caracteriza, vigila, controla y evalúa los efectos de los riesgos físicos, químicos, psicosociales y biológicos del medio ambiente sobre la salud humana². La sintomatología relacionada con una deficiente calidad del aire interior puede incluir dolor de cabeza, afecciones respiratorias, náuseas e irritación de ojos, nariz y garganta, entre otras. Además, es conocido que una gran parte de los cánceres tienen su origen en factores ambientales. Se incluyen en primer lugar los agentes físicos, entre ellos, destacan por su importancia las radiaciones ionizantes, siendo el radón primera causa de cáncer de pulmón entre quienes no han fumado nunca³. En segundo lugar, los agentes químicos clasificados como cancerígenos, entre ellos, benceno,

asbestos, etc. En tercer lugar, el hábito tabáquico, siendo la nicotina la sustancia química responsable de la adicción y en cuarto lugar los agentes biológicos, virus y bacterias señalados como cancerígenos por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC). Cuando estos efectos nocivos se relacionan con la permanencia de la persona en el edificio, afectan al menos al 20 % de los ocupantes de este y los síntomas se minimizan o desaparecen al poco tiempo de abandonarlo (horas e incluso días), puede tratarse del Síndrome del Edificio Enfermo (SEE). Realizar mediciones de los parámetros ambientales que pueden estar influyendo y analizarlos en su conjunto, permitirá llegar al origen del problema. Existe una relación directa entre contaminación en interiores y salud². La CAI está caracterizada por las concentraciones de determinados contaminantes químicos, biológicos y físicos. Se estima que las personas pasan un 90 % de su tiempo en diferentes microambientes, de ahí la importancia de mantener una buena calidad del aire en interiores⁴. El proyecto CAI_UMA pretende medir,

monitorizar, tratar los datos obtenidos y realizar un seguimiento de la calidad del aire interior (CAI) mediante el desarrollo e integración de instrumentación de medidas y posterior sistema de comunicación y tratamiento de los datos registrados para poder disponer de un diagnóstico de los parámetros de calidad del aire interior (https://eventos.uma.es/29974/detail/cai_uma-i-plan-de-smart-campus.html). Las magnitudes que se miden son temperatura, humedad relativa, monóxido y dióxido de carbono, materia particulada y radón. En este artículo se hace referencia únicamente a las concentraciones de radón.

Las publicaciones científicas referentes a CAI e IAQ, incluyen habitualmente mediciones de temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono (CO₂) y materia particulada⁵, pero no suelen incluir mediciones de radón a pesar de que, durante los últimos años se ha producido un creciente interés tanto a nivel científico como social relacionado con el estudio de los niveles de concentración de radón tanto en lugares de trabajo como en viviendas⁶. De hecho, actualmente, el radón constituye la fuente de radiación natural más estudiada y es la que cuenta con una amplia legislación referente a la protección radiológica del público y trabajadores. Prueba de ello es la importancia que adquiere el control y la medida de radón en la Directiva 2013/59/EURATOM sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes⁷. Esta Directiva obliga a los Estados miembros a establecer niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados y a adoptar medidas adecuadas para limitar la penetración del radón en los edificios. Requiere a los Estados miembros el desarrollo de planes de actuación con el fin de reducir el riesgo de cáncer de pulmón por exposición a gas radón. Se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través de la aprobación de varios Reales Decretos. Concretamente, el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2016, de 17 de marzo, introduce una nueva exigencia básica de salubridad HS 6, de protección frente al gas radón⁸. De forma resumida se establece que, en los edificios situados en los términos municipales en los que se ha apreciado un nivel de riesgo no despreciable, se dispongan los medios adecuados para limitar el riesgo previsible de exposición inadecuada en su interior a radón procedente del terreno. Dicha exigencia básica es desarrollada mediante la inclusión de una nueva sección en el documento básico DB HS de «Salubridad», donde se caracteriza y cuantifica la exigencia y se establecen los criterios para la verificación y justificación de su cumplimiento. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasifica al gas radón como agente cancerígeno de grado 1 y advierte que el principal riesgo derivado de su inhalación es la inducción de cáncer de pulmón³. La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la exposición a radón constituye la segunda causa de

cáncer de pulmón tras el tabaco, por lo que representa el principal agente laboral cancerígeno en relación con este tipo de cáncer⁹. Se estima que es responsable de entre el 3 y el 14 % de las muertes por cáncer de pulmón según la OMS, en función de la concentración media nacional de radón y de la prevalencia del consumo de tabaco. No se conoce una concentración umbral por debajo de la cual la exposición al radón no suponga ningún riesgo. Concentraciones de radón muy bajas pueden dar lugar a un pequeño incremento en el riesgo de cáncer de pulmón. Es mucho más probable que el radón provoque cáncer de pulmón en personas que fuman o han fumado que en quienes nunca lo han hecho³.

Todo ello ha hecho que la exposición a radón sea incluida en el Código Europeo contra el Cáncer. Esta iniciativa incluye un documento con doce recomendaciones en el que se informa a los ciudadanos sobre lo que pueden hacer por ellos o por sus familiares para reducir el riesgo de padecer cáncer y está basado en la evidencia científica¹⁰.

El isótopo más abundante del radón (²²²Rn) es un gas noble formado a partir del radio (²²⁶Ra), que a su vez es un producto de desintegración del uranio (²³⁸U). Existen dos isótopos radiactivos de origen natural del radón, son el ²²⁰Rn denominado torón y el ²¹⁹Rn denominado actinón. Sus vidas medias suelen ser muy cortas, el periodo de semidesintegración del torón es de 55,6 s y el del actinón de 3,96 s. Mientras que el ²²²Rn, isótopo al que se le denomina propiamente radón, tiene un periodo de semidesintegración de 3,82 días. Debido a esto, frecuentemente solo se tiene en cuenta el ²²²Rn, ya que es el único isótopo que permanece significativamente tras un minuto. El uranio y el radio están presentes en las rocas y suelos que forman la corteza terrestre³. Hay que destacar por su peligrosidad los productos de desintegración del ²²²Rn, que se pueden dividir en dos grupos, descendientes de vida corta (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi y ²¹⁴Po) y descendientes de vida media-larga (²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi y ²¹⁰Po). Hay que tener en cuenta la concentración de radón en equilibrio radiactivo con sus descendientes (EEC), ya que se establece que el radón tiene la misma energía alfa potencial que los descendientes en el aire.

La desintegración del radio en radón y los descendientes ²¹⁸Po y ²¹⁴Po, generan partículas alfa, las cuales poseen una alta transferencia de energía lineal (LET)¹¹. Las partículas alfa tienen la capacidad de depositar grandes cantidades de energía al atravesar la materia. Cuando las partículas alfa son inhaladas o ingeridas, penetran en los tejidos, pudiendo dañar a las células y a su material genético. Este daño biológico pulmonar es difícilmente reparable pudiendo llegar a producir cáncer de pulmón⁹. El gas radón formado se moviliza por los poros del terreno, mediante un proceso de emanación, que se completa con el mecanismo de salida a la superficie llamado exhalación. La distribución de radón en el suelo

depende de numerosos factores condicionantes. Los principales son: distribución del uranio, la porosidad, permeabilidad, humedad y condiciones ambientales¹². Una vez en el ambiente exterior, puede movilizarse al aire, al agua subterránea o de superficie⁶. Además del suelo, se consideran fuentes de radón en interiores los materiales de construcción y el agua, aunque, esta última, en menor medida¹³. El radón se concentra en ambientes cerrados cuando logra filtrarse a través de grietas en el suelo o en paredes, huecos en los forjados, sumideros y desagües. El gas radón, junto con los descendientes de vida corta citados, constituye más del 50 % de la dosis recibida por la población debido a la exposición a fuentes naturales de radiación ionizante, siendo en España el valor medio de la dosis en área de fondo normal 1,2 mSv/año y pudiendo alcanzar los 10 mSv/año en algunos lugares¹⁴.

El cáncer de pulmón se considera una de las principales causas de incidencia y mortalidad por cáncer en todo el mundo entre hombres y mujeres, con más de 2 millones de casos diagnosticados por año y 1,8 millones de muertes en 2018, lo que representa cerca de 1 de cada 5 (18,4 %) muertes por cáncer¹¹. El estudio para determinar el riesgo radiológico derivado de la exposición debe basarse en las mediciones de la concentración anual de radón. Desde el punto de vista de la protección radiológica, el valor de dosis efectiva que no debe superarse es de 20 mSv al año, para personal expuesto¹⁵.

El radón contribuye en gran medida a la dosis de radiación ionizante recibida por la población general. Según la Directiva 2013/59/ EURATOM⁷ y el Real Decreto 732/2019⁸, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, para limitar el riesgo de exposición de los usuarios a concentraciones inadecuadas de radón procedente del terreno en el interior de los locales habitables, se establece un nivel de referencia para el promedio anual de concentración de radón en el interior de estos de 300 Bq/m³, que equivalen a 4 mSv anuales según ICRP publicación 137¹⁶. Esta norma establece un factor de conversión de 10 mSv/WLM por lo que, cuando sea transpuesta a nuestra legislación, puede significar un incremento de la dosis recibida por trabajadores y público en general en un factor dos con relación a la actualmente calculada, ya que el presente factor incluido en nuestra legislación es de 4 mSv/WLM¹⁵, teniendo en cuenta un tiempo de exposición de los ocupantes del edificio (trabajadores y alumnos) de 2 000 horas al año¹⁶. La importancia de velar por la salud desde el punto de vista radiológico es cada vez más evidente. Tal es así que la última recomendación de ICRP sobre radón¹⁷, recomienda que las autoridades deben de establecer un nivel de referencia nacional tan bajo como sea razonablemente posible en el intervalo 100-300 Bq/m³.

El estudio se ha realizado en aulas de la Universidad de Málaga, donde la población expuesta es joven (principalmente alumnos). Cuentan con una mayor

expectativa de vida, en la que los efectos estocásticos de la radiación pueden manifestarse en el futuro. Los efectos estocásticos consisten en la posibilidad de que se desarrolle un cáncer y deben su nombre a la naturaleza aleatoria (estocástica) de la interacción de la radiación con la materia. Se supone que los efectos estocásticos no tienen un umbral de dosis para su aparición^{6,18}. Por este motivo, hay que destacar la necesidad de monitorizar la concentración de radón e informar a la sociedad de los riesgos que conlleva la exposición y qué medidas pueden minimizarlo.

A fin de difundir la información del presente estudio a personas sin conocimientos específicos sobre el tema, se introduce en este punto el descriptor *background equivalent radiation time* (BERT), que aporta una estimación temporal y que es fácilmente comprensible para el público¹⁹. El BERT es un descriptor de tiempo de radiación equivalente de fondo. Fue introducido por el Dr. Cameron de la Universidad de Wisconsin-Madison. Compara la radiación de fondo a la que toda la población está expuesta anualmente a partir de sustancias radiactivas naturales en el aire, el suelo y el medio ambiente. La radiación de fondo incluye un componente considerable relacionado con el radón, por lo que podemos expresar la cantidad de radiación recibida en términos de un cierto número de días o años de radiación de fondo¹⁹. La radiación media de fondo anual individual es de 3 mSv/año, de los que se estima que 2,4 mSv/año corresponden a fuentes naturales y 0,60 mSv/año a fuentes artificiales.

El objetivo principal de este estudio fue cuantificar el promedio anual de concentración de radón en el sector educativo universitario, comparándose con los niveles de referencia incluidos en la normativa vigente, para estimar finalmente el riesgo radiológico por exposición a radón e informar a la sociedad de los resultados obtenidos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Durante el estudio, efectuado desde marzo de 2019 hasta abril de 2020, se realizaron determinaciones de concentración de radón en un total de 5 aulas docentes correspondientes a 4 centros universitarios con distintas características constructivas y diferentes años de edificación. La metodología utilizada es la que se incluye en la Guía de Seguridad, 11.4 Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo del Consejo de Seguridad Nuclear²⁰, y en el apéndice C del Código Técnico de la Edificación⁸. El proceso para su determinación se compone de tres pasos: muestreo, medición y estimación del promedio anual de concentración de radón. En la primera fase de muestreo, se seleccionó la zona del edificio que podría contar con una probabilidad más alta de presentar niveles elevados de radón, determinándose que las aulas situadas sobre

rasante serían las elegidas. A fin de delimitar la zona de muestreo, se seleccionó un aula por planta, en la que se instalaron tres detectores pasivos y uno activo. Se ubicaron los detectores cerca del puesto donde se sitúa habitualmente el profesor. La segunda fase del muestreo consistió en realizar las mediciones, que se efectuaron mediante 5 detectores activos de la marca Saphymo®, modelo AlphaE y un total de 70 detectores pasivos CR-39®. Los detectores se situaron a una altura de 130 cm sobre el nivel del suelo, a una distancia de más de 30 cm de paredes o puertas y a más de 10 cm de otros objetos. Las condiciones durante la exposición son las habituales de un aula docente, es decir, ocupación alta en días laborables y horas de docencia y ocupación baja en fines de semana y durante la noche. Los edificios están situados en Málaga, zona climática A3, según el apéndice B del documento DB-HE ahorro de energía⁸.

Con el detector activo Saphymo® AlphaE, se obtuvieron mediciones en continuo de actividad de radón, aproximadamente cada 10 minutos. Este tipo de detector está formado por una cámara de ionización en la que el radón penetra por difusión con un diodo de silicio. La sensibilidad de este equipo es de 3 cph a 100 Bq/m³. Con este detector los niveles considerados bajos de radón (menor a 100 Bq/m³) también se pueden medir según lo especificado por las últimas recomendaciones de la OMS (12 % de incertidumbre a 1 sigma/24 h). Los detectores pasivos CR-39® fueron facilitados por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental, de la Universidad de Cantabria (LARUC). La incertidumbre típica para este tipo de medición²¹ se encuentra en el intervalo de 10-25 %, (incertidumbre expresada para duraciones óptimas de la exposición y para exposiciones de aproximadamente a 200 Bq/m³), siendo mayores para exposiciones inferiores a 200 Bq/m³. Mensualmente, se obtuvieron los resultados de los detectores activos y eran sustituidos los detectores pasivos, que se remitieron al LARUC. El LARUC realizó el tratamiento en laboratorio de los 70 detectores Alpha-track CR-39®, en base a la guía GS 11.1 del CSN²². Cuando

el radón o sus productos de desintegración generan partículas alfa en las proximidades de este detector, estas impactan en el material interior produciendo zonas dañadas microscópicas llamadas trazas latentes. Se observan en laboratorio mediante microscopía óptica. El número de trazas nucleares por unidad de superficie es directamente proporcional a la concentración integrada de radón expresada en Bq h/m³. Tras el trabajo en laboratorio especializado y acreditado según ISO 17025, se emitieron los informes correspondientes sobre la base de la norma que respaldan las mediciones realizadas. De esta forma, se obtuvo información suficiente para comparar los promedios mensuales y el anual con los dos tipos de detectores, activo y pasivo.

Para el análisis estadístico, se han aplicado los programas informáticos Statgraphics, SPSS y Excel.

RESULTADOS

1. NIVELES DE RADÓN Y ESTIMACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIÓN DE RADÓN

La estimación del promedio anual de concentración de radón es la tercera y última fase dentro de la metodología incluida en el apéndice C del Código Técnico de la Edificación. A partir de los valores de concentración de radón en el aire, se estimó el promedio anual de concentración de radón para cada una de las aulas seleccionadas y para el periodo de exposición marzo de 2019 hasta abril de 2020. El promedio se ha calculado como la media aritmética de los valores de concentración de radón proporcionados por los detectores.

Los principales resultados alcanzados por el proyecto CAI_UMA se resumen en la tabla 1 y en las figuras 1 y 2. La tabla 1 incluye las mediciones obtenidas con los monitores Saphymo® AlphaE y los detectores Alpha-track C-39® en los cuatro edificios universitarios citados.

Tabla 1. Valores promedios anuales de concentración de radón mediante detectores activos y pasivos en aulas universitarias de la Universidad de Málaga, marzo 2019

Centro Universitario	Detector Alpha E Valor promedio anual (Bq/m ³)	Detector Alpha track CR-39 Valor promedio anual (Bq/m ³)
Facultad de Medicina	45 ± 10	33 ± 5
ETSI de Telecomunicación	160 ± 30	45 ± 5
Escuela de Ingenierías (Aula 0.0.4)	30 ± 15	16 ± 2
Escuela de Ingenierías (Aula 1.0.4)	30 ± 15	17 ± 2
Facultad de Ciencias de la Salud	30 ± 15	18 ± 2

Figura 1. Valores promedios mensuales de concentración de radón obtenidos mediante detectores activos Saphymo® AlphaE en las Aulas universitarias de la Universidad de Málaga entre marzo 2019 y marzo 2020

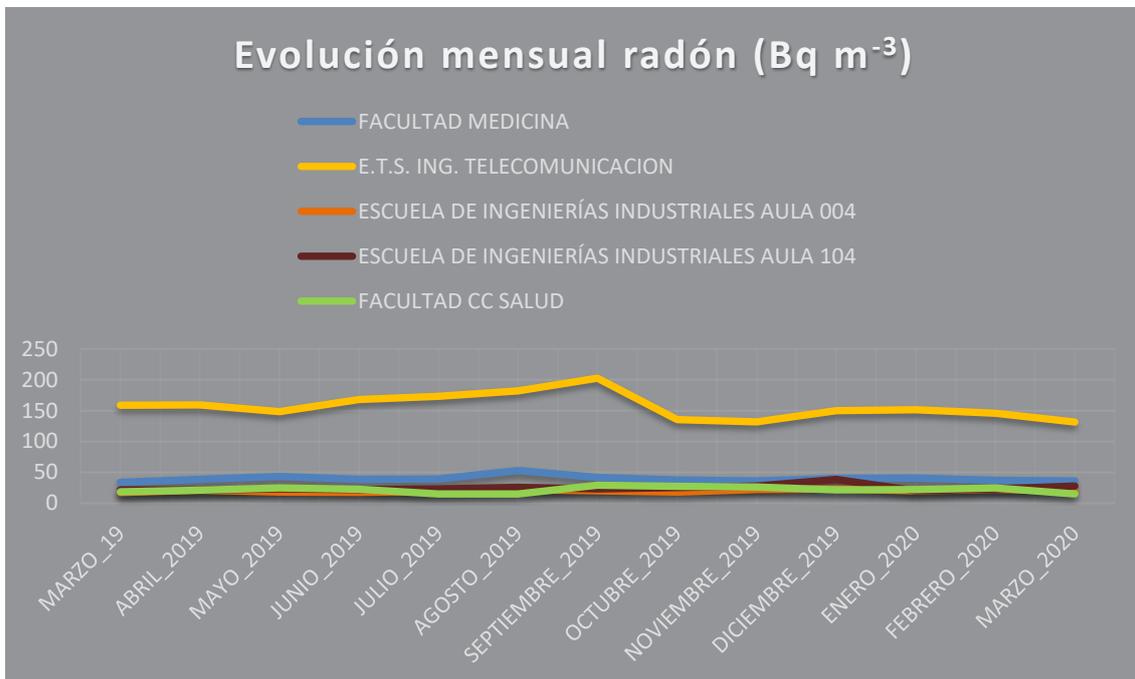
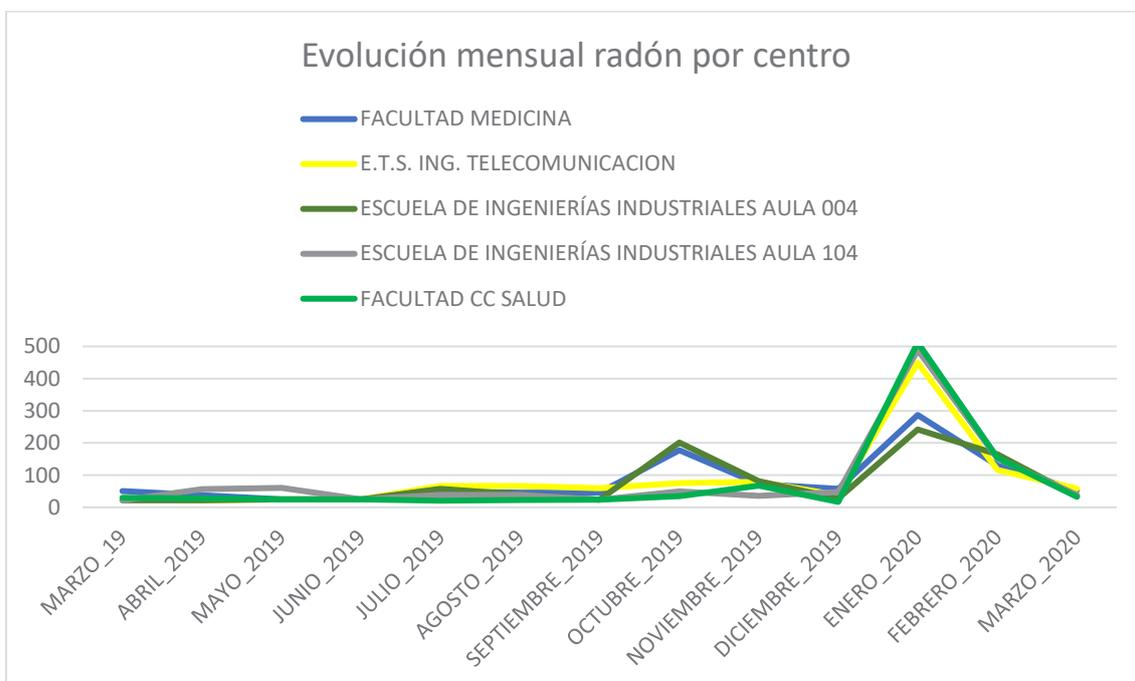


Figura 2. Valores promedios mensuales de concentración de radón obtenidos mediante detectores pasivos CR-39® en las Aulas universitarias en la Universidad de Málaga entre marzo 2019 y marzo 2020



La figura 1 expone los resultados de las mediciones de gas radón realizadas con los detectores monitores Saphymo® AlphaE y la figura 2 expone los resultados de las mediciones de gas radón realizadas con los detectores Alpha-track C-39®. Ambos gráficos facilitan la labor de establecer las conclusiones sobre el comportamiento de la muestra donde se ha realizado el estudio y sobre la metodología utilizada.

Para los niveles de radón, como se puede observar en la tabla 1, existen diferencias en cuanto a la concentración promedio anual en los centros estudiados. El lugar en el que se han obtenido valores más altos fue en la ETS Ingeniería de Telecomunicación y conlleva que se investigue en profundidad. No obstante, la concentración anual de radón en este centro no sobrepasa el nivel de referencia de 300 Bq/m³ según la Directiva 2013/59/EURATOM y el Real Decreto 732/2019. Estos resultados concuerdan con los pronosticados en estudios a nivel nacional en el proyecto MARNA (escala de 1:1 000 000)²³.

2. RIESGO RADIOLÓGICO. PERCEPCIÓN E INFORMACIÓN DEL RIESGO A LA POBLACIÓN

Los niveles dosimétricos se inician calculando la exposición a radón en las aulas docentes de los edificios estudiados. Se tiene en cuenta que no se requiere de actividad física intensa en su interior. Se establece un tiempo de exposición de 2 000 horas al año para los miembros de la comunidad universitaria (trabajadores y alumnos en clase docente). Se aplica la ecuación 1:

$$\text{Exposición a radón} = C_{Rn} \times t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

C_{Rn} es la concentración media anual de radón en aire interior (Bq/m³)

t es el tiempo de exposición

Para calcular la dosis efectiva anual por persona debida a la exposición a radón, se han utilizado el tratamiento matemático y parámetros incluidos en el Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR)²⁴.

Se establece el valor de $F=0,4$ como factor para obtener la concentración de radón equivalente en equilibrio (EEC) a partir de la concentración media anual de radón en aire interior por hora (Bq h m⁻³). Para calcular la dosis efectiva (E) (mSv/año), siguiendo las recomendaciones del informe publicación 137 de ICRP¹⁶, se hace necesario ajustar la EEC mediante la incorporación del coeficiente de dosis redondeado, que adquiere un valor de 17 nSv/Bq h m⁻³ aplicable a la mayoría de los lugares de trabajo interiores.

Con los resultados obtenidos, resumidos en la tabla 2, se determina por primera vez un valor de dosis efectiva en la UMA por exposición a radón interior para miembros de público: 0,80 mSv/año. Este valor es muy inferior al nivel de acción recomendado por la ICRP de 4 mSv/año. Este valor trasladado al descriptor BERT supone 0,25 años.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este proyecto ha convertido a la Universidad de Málaga en una de las primeras universidades españolas en incorporar mediciones de radón en un estudio de calidad de aire interior y en establecer una estimación de dosis efectiva por exposición a radón interior.

Tras el análisis de los datos de la tabla 1, las concentraciones promedio anuales de radón durante el periodo de estudio no superaron el nivel de referencia normativo establecido. El valor de la concentración promedio anual de radón, teniendo en cuenta las cinco aulas monitorizadas de la UMA fue de 59 Bq/m³, el riesgo por exposición a radón es bajo. A continuación, comparamos los resultados obtenidos con un importante estudio piloto realizado en lugares de trabajo por sectores en zonas geográficas de mayor acumulación de radón. En el estudio referenciado, para el sector educativo en España, tras las mediciones realizadas se estableció una concentración mediana de radón de 109 Bq/m³. Este resultado es significativamente más alto que el obtenido en las mediciones realizadas en la UMA (tabla 1). Hay que señalar que Málaga se encuentra entre las zonas de menor acumulación de radón y podría ser la explicación.

Se confirma el nivel estimado de exposición a radón interior para Málaga señalado en el Mapa del potencial del radón en España²⁵ y el presente estudio puede servir para confirmar datos en escalas inferiores.

Por otra parte, tras el análisis de los datos de la tabla 2, se alcanza el objetivo de informar y concienciar a la sociedad sobre los riesgos derivados de la exposición a radón, señalando resultados de mediciones realizadas en el interior de las aulas de los edificios de la UMA y determinando un valor de dosis efectiva, resultando ser de 0,80 mSv/año. Además de promover la concienciación del público sobre el radón, se indica en el presente estudio la necesidad de monitorizar los niveles de gas radón mediante la realización de mediciones de la concentración anual de radón, reducir los niveles de radón mediante la implantación de medidas de remediación y comunicar los resultados obtenidos.

Como resultado discordante conforme al resto, las medidas mensuales de radón han superado puntualmente el nivel de referencia de 300 Bq/m³. Como muestran las figuras 1 y 2, observamos este comportamiento en los meses de invierno, concretamente enero y febrero, comparada con la del resto del año. La meteorología es

Tabla 2. Descriptores de dosis de radiación, BERT, valores obtenidos a partir de las mediciones de Radón (Bq/m³) realizadas con el monitor Alpha E por centro universitario de la Universidad de Málaga, Marzo 2019-2020

Ubicación del detector Alpha E	Dosis efectiva anual (mSv/año)	BERT (años) (días)
Facultad de Medicina	0,610	0,20 74,21
ETS Telecomunicación	2,180	0,72 265,23
Escuela de las Ingenierías (aula 0.0.4)	0,408	0,13 49,64
Escuela de las Ingenierías (aula 1.0.4)	0,408	0,13 49,64
Facultad de CC salud	0,408	0,13 49,64
PROMEDIO	0,800	0,26 97,67

uno de los factores más importantes que afectan a los contaminantes en un ambiente interior como el radón por dos aspectos. El primero de ellos es que, en los meses más fríos, los espacios se ventilan menos debido a que los ocupantes tienden a cerrar puertas y ventanas y la ventilación natural disminuye. Por otra parte, el aire caliente del interior tiende a difundirse hacia el exterior. Este hecho hace que aire frío procedente del suelo acceda al interior, pudiendo contener radón. El radón utiliza las corrientes internas de aire como medio de transporte. Esta podría ser la explicación a esta variación, aunque no se produce de la misma forma en todos los centros.

Se encuentran discrepancias entre los resultados obtenidos por los equipos de medición activos y pasivos, atribuibles al proceso de detección y al análisis de datos realizado en ambos equipos. Los valores obtenidos mediante detectores activos y pasivos son comparables en promedios anuales, pero se encuentran discrepancias cuando se seleccionan periodos de exposición más cortos, aunque la comparativa entre ambos no sea la esperada sí que lo son las tendencias.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación forma parte de la realización de la tesis doctoral de Ana Belén Muñoz Aguado, alumna del Programa de Doctorado en Biomedicina, Investigación Traslacional y Nuevas tecnologías en Salud de la Facultad de Medicina de la UMA e integrante del proyecto del I Plan propio de Smart-campus UMA, CAI_UMA.

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Smart-Campus la financiación parcial de este proyecto, su apoyo técnico y colaboración. Los autores agradecen al personal de la Instalación Radiactiva del SCAI su participación, apoyo técnico y asesoramiento especializado. Los autores agradecen al Laboratorio de Radiactividad ambiental de la Universidad de Cantabria (LARUC) el tratamiento y revelado en laboratorio de los detectores Alpha-track C-39[®] según ISO 17025 y la emisión de los informes correspondientes que respaldan las mediciones realizadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ruiz L, García Sanz MP. Calidad del Ambiente Interior. Madrid: Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo [actualizado en 2010; citado el 23 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/509319/CalidadambinteriorDTECAI.pdf/6f7cfa1c-215d-4f56-9e39-2869a23d8892>.
2. Vargas Marcos F, Gallego Pulgarín I. Calidad ambiental interior: bienestar, confort y salud. Rev. Esp. Salud Pública 2005;79(2):243-51.
3. Zeeb Ha, Shannoun F. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. World Health Organization. [actualizado en 2015; citado el 15 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://www.who.int/iris/handle/10665/161913#sthash.2WvJkXnR.dpuf>.
4. Sharma A, Radha Goyal, Mittal R, editors. Indoor Environmental Quality: Select Proceedings of the 1st ACIEQ. Singapore: Springer Nature Singapore; 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-1334-3.

5. Gaidajis G, Angelakoglou K. Indoor air quality in university classrooms and relative environment in terms of mass concentrations of particulate matter. *J. Environ. Sci. Health. A-Part Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2009;44(12):1227–32. DOI: 10.1080/10934520903139936.
6. OMS Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva: World Health Organization; 2009.
7. DIRECTIVA (UE) 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. DOUE L 13, de 17 de enero.
8. Real Decreto 732/2019, 20 de diciembre, que modifica el Código Técnico de la Edificación. BOE nº 311, de 27 de diciembre.
9. Ruano-Ravina A, Figueiras A, Barros-Dios JM. Lung cancer and related risk factors: an update of the literature. *Salud pública* 2003; 117(3):149–56. DOI:10.1016/S0033-3506(02)00023-9.
10. International Agency for Research on Cancer (IARC). Código Europeo contra el Cáncer. 12 formas de reducir el riesgo de cáncer. Disponible en: https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/enfLesiones/enfNoTransmisibles/docs/Codigo_Cancer.pdf.
11. Provencio M, Carcereny E, Rodríguez-Abreu D, López-Castro R, Guirado M, Camps C, et al. Lung cancer in Spain: information from the Thoracic Tumors Registry (TTR study). *Transl Lung Cancer Res*. 2019;8(4):461–75. DOI:10.21037/tlcr.2019.08.05.
12. Gusain GS, Prasad G, Prasad Y, Ramola RC. Comparison of indoor radon level with radon exhalation rate from soil in Garhwal Himalaya. *Radiat. Meas.* 44:1032–5. DOI: 10.1016/j.radmeas.2009.10.033.
13. Kumar A, Chauhan RP, Joshi M, Sahoo BK. Modeling of indoor radon concentration from radon exhalation rates of building materials and validation through measurements. *J. Environ. Radioact.* 2014;127:50–5. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.10.004.
14. Hu J, Yang G, Hegedús M, Iwaoka K, Hosoda M, Tokonami S. Numerical modeling of the sources and behaviors of ²²²Rn, ²²⁰Rn and their progenies in the indoor environment—A review. *J. Environ. Radioact.* 2018;189:40–7. DOI:10.1016/j.jenvrad.2018.03.006.
15. Real decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE nº 178, de 26 julio.
16. International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. En: Annals of the ICRP Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. [actualizado en 2018; citado el 7 de enero de 2021]. Disponible en: <http://ani.sagepub.com/>.
17. ICRP. Summary of ICRP Recommendations on Radon. International Commission on Radiological Protection ICRP 2018;3–8. Disponible en: www.icrp.org.
18. IAEA Protección radiológica de los pacientes. Información para el público. Disponible en: <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/information-public/index.htm>.
19. Nickoloff EL, Lu ZF, Dutta AK, So JC. Radiation Dose Descriptors: BERT, COD, DAP, and Other Strange Creatures. *Radiographics* 2008;28(5):1439–50. DOI:10.1148/rg.285075748.
20. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Guía de Seguridad 11.4 Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Colección Guías de Seguridad del CSN. Disponible en: <https://www.csn.es>.
21. Abdel-Monem AA, Abdel-Kader FH, El-Naggar AM, Essia HM, Abdel-Hafez AA, Hassan SF. Comparison Between Active and Passive Techniques for Radon Gas and Working Level Measurements, El-Allouga Mine, Sini, Egypt. Pp. 129–38. The Second All African IRPA Regional Radiation Protection Congress; 2007 Apr 22–26; Ismailia Egypt.
22. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Guía de Seguridad 11.01 Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Colección Guías de Seguridad del CSN. Disponible en: <http://www.csn.es>.
23. Quindós Poncela LS, Fernández PL, Gómez Arozamena J, Sainz C, Fernández JA, Suarez Mahou E, et al. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environ. Int.* 2004;29(8):1091–6.
24. Comité científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica. Fuentes, efectos y riesgo de las radiaciones ionizantes: UNSCEAR 2019. Anexo B: Cáncer de pulmón Exposición al radón. Nueva York: Naciones Unidas. [actualizado en 2020; citado el 20 de febrero de 2021]. Disponible en: https://www.unscear.org/docs/publications/2019/UNSCEAR_2019_Annex-B.pdf.
25. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). El mapa predictivo de exposición al radón en España [actualizado en 2021; citado el 20 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>.