

# Evaluación experimental de la distribución espacial de la concentración de radón-222, utilizando detectores LR 115-tipo 2

V. Y. Guevara Rojas

*Universidad Privada del Norte, Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.*

Received 2 November 2023; accepted 26 February 2024

El radón-222 es un carcinógeno pulmonar reconocido al que la exposición humana debe ser limitada. Los principales emisores de radón-222 en los ambientes se encuentran en el suelo y en los materiales de construcción, por contener cantidades diminutas de Uranio y Radio, que se descomponen radiactivamente en gas radón-222. En este trabajo de investigación se determinó experimentalmente la distribución espacial de la concentración de radón-222 en una oficina donde se pudo colocar un arreglo de 15 puntos de medición. En cada punto de medición se colocaron dos detectores a una altura desde el piso de: 40, 100 y 160 cm. Los detectores se colocaron por un periodo de 168 días. Los valores promedios de concentración de radón-222 encontrados en el presente trabajo van en el rango de 0 a 45.60 Bq/m<sup>3</sup>. Se determinó que la distribución de concentración de radón-222 en un recinto no es homogénea; habiendo mayores niveles de concentración en las zonas del recinto donde hay poca circulación de aire y niveles de concentración casi nulas en las zonas donde hay mayor circulación de aire. De esto concluimos que evaluar la concentración de radón-222 en un recinto, considerando un solo punto de medición, el resultado obtenido no es representativo del lugar, puesto que sus valores pueden cambiar drásticamente si se escogiese uno u otro punto de medición ubicado en el mismo recinto. Además, este rango de 0 a 45.60 Bq/m<sup>3</sup> no supera el nivel de tolerancia más estricto de concentración de radón-222 de 150 Bq/m<sup>3</sup>, que hemos adoptado en este trabajo.

*Descriptores:* Radón-222.

Radon-222 is a recognized lung carcinogen to which human exposure should be limited. The main emitters of radon-222 in the environment are found in soil and building materials, because they contain minute amounts of uranium and radium, which radioactively decay into radon-222 gas. In this research work, the spatial distribution of radon-222 concentration was experimentally determined in an office where an array of 15 measurement points could be placed. At each measurement point, two detectors were placed at a height from the floor of: 40, 100 and 160 cm. The detectors were placed for a period of 168 days. The average values of radon-222 concentration found in this work range from 0 to 45.60 Bq/m<sup>3</sup>. It was determined that the distribution of radon-222 concentration in an enclosure is not homogeneous; There are higher concentration levels in areas of the room where there is little air circulation and almost zero concentration levels in areas where there is greater air circulation. From this we conclude that evaluating the concentration of radon-222 in a room, considering a single measurement point, the result obtained is not representative of the place, since its values can change drastically if one or another measurement point located in the same room were chosen. In addition, this range from 0 to 45.60 Bq/m<sup>3</sup> does not exceed the strictest tolerance level of radon-222 concentration of 150 Bq/m<sup>3</sup>, which we have adopted in this work.

*Keywords:* Radon-222.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.031201>

## 1. Introducción

El isótopo de radio-226 se encuentra en el seno de la corteza terrestre y materiales de construcción como el ladrillo y el concreto [1,2,3], el cual se desintegra dando origen al radón-222, que es un gas natural y de núcleo radiactivo. El radón-222 emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y produce a su vez una serie de partículas de vida corta (Polonio-218, Polonio-214, y Polonio-210). Las partículas de vida corta se adhieren a los aerosoles atmosféricos del aire. Cuando las personas inhalan una fracción de estos núcleos hijos (Polonio-218, Polonio-214, y Polonio-210), estos se fijan en los diversos tramos del tracto respiratorio y decaen emitiendo partículas alfa, que bombardean y ocasionalmente lesionan las células epiteliales, lo que a la larga puede ocasionar un cáncer de pulmón [4]. Afortunadamente, sus concentraciones en la atmósfera exterior suelen ser tolerables a los efectos señalados; sin embargo, en el interior

de recintos como: viviendas, oficinas, sótanos, etc. las concentraciones alcanzadas son varias veces superiores a las de la atmósfera exterior. Ello es debido a que el radón-222 desprendido del piso, paredes y techo de los recintos, a causa del reducido espacio disponible y de la escasa ventilación, experimenta una acumulación superior a la de la atmósfera exterior. Esta circunstancia justifica que el radón-222 haya merecido la atención por parte de muchos países, incluido el nuestro. El objetivo de este estudio es evaluar de manera experimental la distribución espacial de gas radón para la predicción y visualización de la distribución de contaminantes en interiores. Todo esto se llevó a cabo en una sala de prueba modelo. En el presente trabajo de investigación hemos podido demostrar experimentalmente que la distribución espacial de la concentración de radón-222 en un ambiente no es homogénea. A continuación, citamos algunos trabajos de simulación que dan soporte a nuestros resultados. En el trabajo de

sarrollado por Neetika Chauhan y col. [5], se hizo la estimación por simulación de la distribución espacial de los perfiles de concentración de radón-222 dentro de un recinto cerrado (dimensiones  $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ ), con tres puertas. Ellos encontraron que la concentración de radón-222 dentro del recinto no es uniforme, a pesar de estar cerrada y que está vinculada a la distribución del campo vectorial del viento (o corriente de aire) dentro del recinto. En otro trabajo, Keramatollah Akbari y col. [6] evaluaron el impacto de la tasa de ventilación en la distribución espacial de los perfiles de concentración de radón-222 de un recinto, por medio de una simulación. Los resultados obtenidos muestran que los niveles de radón-222 fueron inversamente proporcionales a la tasa de cambio de aire.

## 2. Método experimental

### 2.1. Detectores LR-115-tipo 2

Elaborados en la empresa DOSIRAD, en Francia. Estos detectores fueron empleados en modo desnudo, de  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  de área; y consisten en una película delgadas de nitrato de celulosa de  $12 \text{ }\mu\text{m}$  de espesor (color rojo); con una base de poliéster transparente de  $100 \text{ }\mu\text{m}$  de espesor [1]. Son dispositivos pasivos que se colocan en el lugar que se desea evaluar (bajo condiciones naturales). Las partículas alfas que provienen del radón-222 y/o hijas impactan y generan escisiones en la estructura del detector LR-115. Cuando el detector es subsecuentemente tratado con un apropiado baño químico (NaOH), el área de escisión es disuelta y el agujero resultante (de tamaño original  $20\text{-}50 \text{ \AA}$ ) puede ser agrandado por un factor de  $10^2 - 10^3$ . El rastro del daño dejado por las partículas alfas se vuelve así fijo como trazas, que pueden ser observadas con la ayuda de un microscopio óptico. Las ventajas de emplear los detectores LR -115, son [1]: tienen dimensiones pequeñas (típicamente  $1 \times 1 \text{ cm}$ ,  $\approx 100 - 500 \text{ }\mu\text{m}$  de espesor); facilidad de uso, no necesitan de una fuente de energía ya que su propiedad de detección es una cualidad intrínseca del material del que están hechos; bajo costo (una hoja que produce alrededor de 400 detectores cuesta aproximadamente US \$40); simples de procesar y leer (un baño de grabado termostático, reactivos químicos simples y un microscopio óptico, son los requisitos mínimos); son dispositivos integradores, es decir se dejan in situ por un periodo de tiempo para

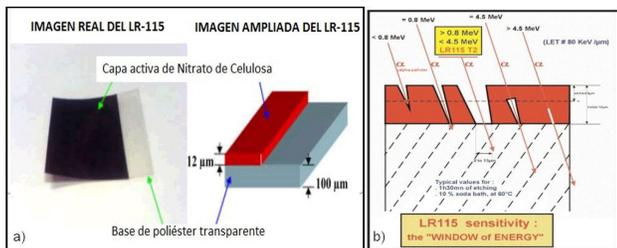


FIGURA 1. a) Detector LR-115. b) Trazas de las partículas alfa, registradas en el detector LR -115.

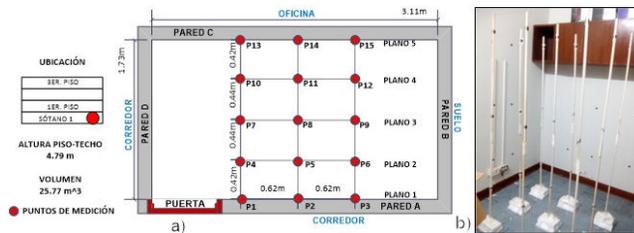


FIGURA 2. a) Diseño y puntos de medición de la oficina, que está ubicada en el sótano del edificio. b) Foto del arreglo real de los detectores en la oficina. En cada punto de medición se colocaron dos detectores a una altura desde el piso de: 40, 100 y 160 cm.

acumular cuentas; el LR-115 no es afectado por electrones; el LR-115 puede ser guardado hasta más de 10 años (pueden ser releídos).

### 2.2. Identificación del lugar de estudio, ubicación y recolección de detectores

Este lugar de trabajo es una oficina que no estuvo ocupada por ningún trabajador y además permanecía completamente cerrada, por tales motivos cuando se realizaron las mediciones, se pudo colocar un arreglo de 15 puntos de medición. En cada punto de medición se colocaron dos detectores a una altura desde el piso de: 40, 100 y 160 cm. Los detectores se colocaron por un periodo de tiempo de 168 días.

### 2.3. Grabado químico y lectura de detectores

Para poder observar y contar las trazas dejadas por las partículas alfa en el detector LR 115, este se deberá someter a un baño químico, que permite que el rastro del daño dejado por las partículas alfas se vuelva fijo como trazas, que luego pueden ser observadas con la ayuda de un microscopio óptico. El procedimiento de grabado se explica a continuación: primero, se prepara la solución de hidróxido de sodio NaOH a una normalidad de 2.5 N. Luego, se vierte 110 ml de NaOH en un vaso de vidrio de Pyrex (de 150 ml de capacidad), aquí se introducen 05 detectores LR-115. Se vertió 200 ml de agua en un vaso de vidrio Pyrex (de 500 ml de capacidad). Luego se incorpora el vaso de Pyrex de 150 ml de capacidad en el Pyrex de 500 ml de capacidad [ver Fig. 3a)].

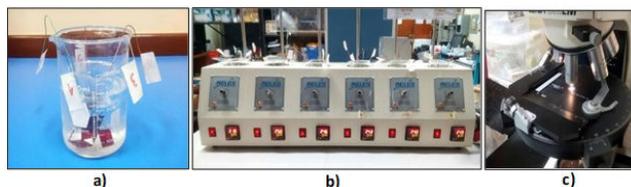


FIGURE 3. a) Vaso de Pyrex (de 150 ml de capacidad) que contiene 05 detectores LR-115 y 110 ml de NaOH; dentro de un vaso de Pyrex (de 500 ml de capacidad) con 200 ml de agua. b) Como se muestra en la Fig. 3a), se preparan 06 arreglos, que son luego colocados en el baño térmico. c) Lectura de los detectores LR-115 con el microscopio óptico marca LEICA, modelo DM LM.

De este tipo de arreglo se preparan 06 [ver Fig. 3b)]. Se preñe del baño térmico a una temperatura de  $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Luego se procede a colocar los 06 arreglos en el baño térmico [ver Fig. 3b)]. El grabado químico dura 90 minutos. Se extraen los detectores para enjuagarlos con agua destilada. Después se les deja secar por periodo de 24 horas y finalmente los detectores están listos para ser leídos con el microscopio óptico marca LEICA, modelo DM LM que proporciona aumentos de 5X, 10X y 20X [ver Fig. 3c)]. Este sistema tiene incorporado una cámara CCD.

#### 2.4. Determinación del factor de calibración del detector LR-115

El grupo de investigación de técnica de huellas nucleares GITHUNU, construyó una cámara de calibración de radón-222, que es un sistema que me permite obtener un factor de calibración para diversos tipos de detectores, empleados sólo para la medición de radón-222, entre ellos los LR 115 en modo desnudo. Este factor de calibración permite asociar la concentración de radón-222 a la densidad de trazas. Los materiales empleados en la cámara de calibración fueron un depósito de plástico cilíndrico (de una altura de 0.85 m y un diámetro de 0.46 m; su volumen es de  $0.14 \text{ m}^3$ ), fuente de Radón: uraninita y tierra, y un monitor de Radón marca Alphaguard. El diseño de la cámara de calibración se muestra en la Fig. 4.

El procedimiento se desarrolló en dos periodos; en el primero se hizo empleando tierra como fuente de radón, la cual fue colocada en el fondo de la cámara. Los detectores LR-115 tipo 2 se pegaron en la pared de la cámara (esto reproduce de manera aproximada las condiciones de exposición de un detector desnudo LR-115 que está pegado en la pared de un recinto); y el monitor Alphaguard se colocó sobre un soporte que estaba a unos 40 cm desde la tierra. La exposición generada por la tierra fue de  $700 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ . En el segundo periodo se generó el mismo sistema, pero emplearon como fuente de radón la uraninita. La exposición generada por la

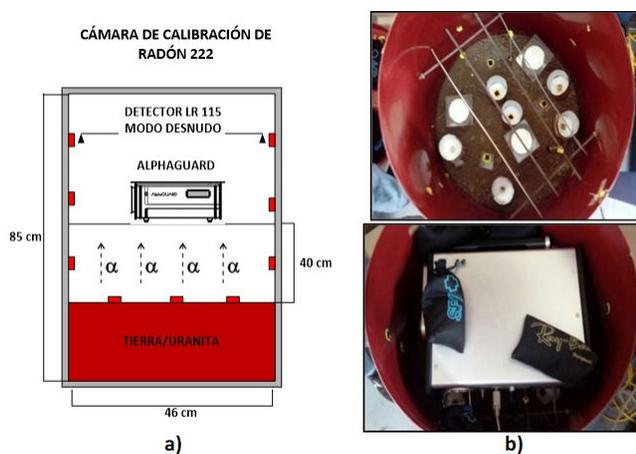


FIGURE 4. a) Esquema de la cámara de calibración de Rn-222. b) Fotos de la cámara de Radón donde se pueden observar detectores LR-115 en diferentes configuraciones.

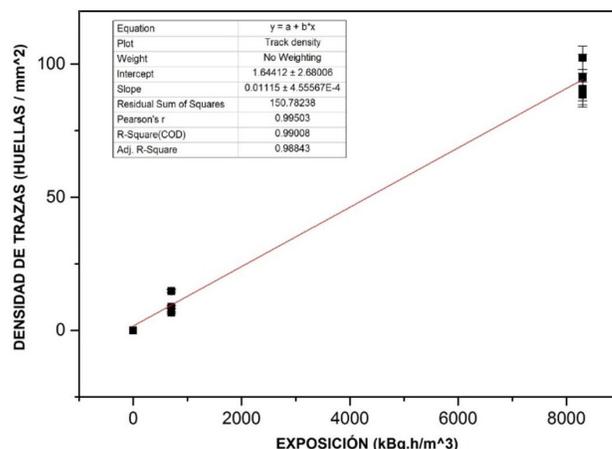


FIGURE 5. Gráfica densidad de trazas versus exposición.

uraninita, fue de  $8000 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ . El Alphaguard fue empleado en modo difusión, lo cual le permite medir sólo concentración de radón-222 dentro de la cámara de calibración. El factor de calibración del detector LR 115, se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{\rho}{Ct}, \quad (1)$$

donde,  $k$ , es el factor de calibración [ $\text{trazas}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ],  $C$  es la concentración de radón [ $\text{kBq}/\text{m}^3$ ],  $\rho$  es la densidad de trazas nucleares [ $\text{trazas}\cdot\text{mm}^{-2}$ ] y  $t$  es el tiempo que el detector estuvo expuesto [h].

Se determinó la gráfica mostrada en la Fig. 5, cuya pendiente es numéricamente igual al factor de calibración  $k = 0.0112 \pm 0.0005 \text{ trazas}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ . Este el valor que se empleó para determinar la concentración de radón-222, en los lugares bajo evaluación.

#### 2.5. Determinación de la concentración de radón-222

Primero, se determinó la densidad de trazas por cada detector, mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{N - N_f}{nA}, \quad (2)$$

donde,  $\rho$  es la densidad de trazas nucleares [ $\text{trazas}\cdot\text{mm}^{-2}$ ],  $N$  número total de trazas analizadas en todos los campos ópticos de visión del microscopio,  $N_f$ , número total de trazas de fondo,  $n$  número total de campos de visión y  $A$  área del campo óptico  $\text{mm}^2$ .

Finalmente se calculó la concentración de radón-222, con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\rho}{kt}, \quad (3)$$

donde,  $C$  es la concentración de radón [ $\text{kBq}/\text{m}^3$ ],  $\rho$  es la densidad de trazas nucleares [ $\text{trazas}\cdot\text{mm}^{-2}$ ],  $t$  es el tiempo que el detector estuvo expuesto [h] and  $k$  es el factor de calibración [ $\text{trazas}\cdot\text{mm}^{-2}/\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ].

TABLA I. Las densidades de trazas y concentraciones de radón-222 de los detectores expuestos.

PLANO 1						
Puntos	P1		P2		P3	
Altura (cm)	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )
160	1.05 ± 0.27	23.33 ± 6.18	-- ± --	-- ± --	1.44 ± 0.39	31.97 ± 8.73
100	1.24 ± 0.33	27.65 ± 7.37	1.79 ± 0.38	39.75 ± 8.59	0.78 ± 0.24	17.28 ± 5.35
40	1.48 ± 0.38	32.84 ± 8.48	0.85 ± 0.23	19.01 ± 5.15	0.82 ± 0.24	18.15 ± 5.40
	Promedio	27.94 ± 4.27	Promedio	29.38 ± 3.34	Promedio	22.47 ± 3.86
PLANO 2						
Puntos	P4		P5		P6	
Altura (cm)	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.30 ± 0.28	28.95 ± 6.33
100	0.10 ± 0.09	2.16 ± 2.04	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	3.07 ± 0.60	68.27 ± 13.58
40	0.02 ± 0.03	0.43 ± 0.74	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.11 ± 0.25	24.63 ± 5.57
	Promedio	1.01 ± 0.74	Promedio	0.43 ± 0.25	Promedio	40.62 ± 5.33
PLANO 3						
Puntos	P7		P8		P9	
Altura (cm)	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	2.60 ± 0.55	57.90 ± 12.56
100	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.41 ± 0.12	9.07 ± 2.70	1.40 ± 0.32	31.11 ± 7.32
40	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	2.16 ± 0.43	47.96 ± 9.76	0.85 ± 0.25	19.01 ± 5.58
	Promedio	0.43 ± 0.25	Promedio	19.16 ± 3.38	Promedio	25.06 ± 5.19
PLANO 4						
Puntos	P10		P11		P12	
Altura (cm)	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.77 ± 0.37	39.32 ± 8.38	1.55 ± 0.34	34.57 ± 7.79
100	0.19 ± 0.08	4.32 ± 1.72	1.73 ± 0.37	38.46 ± 8.35	0.87 ± 0.20	19.44 ± 4.56
40	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.68 ± 0.22	15.12 ± 4.88	1.15 ± 0.26	25.49 ± 5.78
	Promedio	1.73 ± 0.61	Promedio	30.97 ± 4.27	Promedio	22.47 ± 3.57
PLANO 5						
Puntos	P13		P14		P15	
Altura (cm)	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidad (trazas/mm <sup>2</sup> )	Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )
160	0.58 ± 0.17	12.96 ± 3.86	5.09 ± 0.99	113.21 ± 22.46	1.59 ± 0.38	35.43 ± 8.53
100	1.48 ± 0.38	32.84 ± 8.57	1.05 ± 0.26	23.33 ± 8.57	1.36 ± 0.37	30.25 ± 8.42
40	0.04 ± 0.04	0.86 ± 0.88	0.04 ± 0.05	0.86 ± 1.18	0.04 ± 0.05	0.86 ± 1.18
	Promedio	15.55 ± 3.15	Promedio	45.80 ± 8.02	Promedio	22.18 ± 4.01

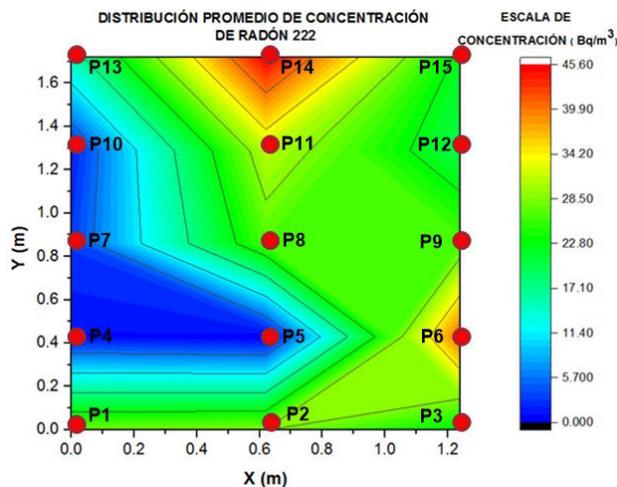


FIGURE 6. Gráfica densidad de trazas versus exposición.

### 3. Resultados

Se desarrolló la Tabla I, donde se puede observar las concentraciones con sus respectivas incertidumbres. Para tener una idea más clara de la distribución espacial de la concentración de radón-222, empleamos el software Origin para desarrollar una gráfica con los promedios de la concentración de radón-222 en cada punto de medición (P1-P15).

#### 3.1. Concentraciones promedios

En la Fig. 6, podemos observar que en los puntos P4, P5, P7 y P10 (región azul) se obtienen concentraciones que varían aproximadamente en un intervalo de  $[0, 11.40]$  Bq/m<sup>3</sup>. Los puntos P1, P2, P3, P8, P9, P11, P12, P13, y P15 (región verde) tienen una concentración que varía aproximadamente en un intervalo de  $[11.40, 34.20]$  Bq/m<sup>3</sup>. En los puntos P6 y P14 se obtuvieron unas concentraciones que varía aproximadamente en un intervalo de  $[34.20, 45.60]$  Bq/m<sup>3</sup>, que representa los valores promedios más altos dentro de este ambiente.

En el trabajo desarrollado por Neetika Chauhan y col. (2014) [5], se hizo la estimación por simulación de la distribución espacial de los perfiles de concentración de radón-222 dentro de un recinto cerrado (dimensiones  $3 \times 3 \times 3$  m<sup>3</sup>) con tres puertas. Ellos encontraron que la concentración de radón-222 dentro del recinto no es uniforme, a pesar de estar cerrada y que está vinculada a la distribución del campo vectorial del viento (o corriente de aire) dentro del recinto. El rango de variación de concentración de radón-222, por simulación, que encontraron fue de 13 a 27 Bq/m<sup>3</sup>, valores parecidos a los encontrados en el presente trabajo, que van en el

rango de 0 a 45.60 Bq/m<sup>3</sup>. Podemos notar que en la Fig. 6 existe un fuerte impacto de la ventilación en la concentración de radón-222, puesto que aquellos puntos que estaban cerca a la puerta y ventana del recinto (P4, P5, P7 y P10 - región azul) tuvieron las concentraciones más bajas en la oficina  $[0, 11.40]$  Bq/m<sup>3</sup>. Esto es conforme con lo encontrado por Keramatollah Akbari y col. [6] que evaluaron el impacto de la tasa de ventilación en la distribución espacial de los perfiles de concentración de radón-222 en un recinto, por medio de mediciones experimentales y simulación. Los resultados obtenidos muestran que los niveles de radón-222 son inversamente proporcionales a la tasa de cambio de aire. En la Fig. 6 el valor de la concentración de radón-222 varía de un punto de medición a otro, esto es conforme con los resultados encontrados por V. Urosevic y col., quienes desarrollaron una simulación para evaluar el comportamiento de radón-222 en un recinto ( $3 \times 4 \times 3$  m<sup>3</sup>) donde los resultados mostraron que la distribución de este isótopo es no homogénea [7]. El Organismo Internacional de Energía Atómica, mostró en su libro IAEA Basic Safety Standards (1994) [1] los niveles de tolerancia de concentración de radón-222 en diversos países. Estados Unidos ha establecido el nivel más estricto de 150 Bq/m<sup>3</sup>, por encima del cual acciones de protección radiológica o remediación deberían llevarse a cabo. En este trabajo se tomó como referencia este nivel, y como podemos observar no lo superamos, puesto que nuestro rango promedio de medición fluctuó desde 0 a 45.60 Bq/m<sup>3</sup>.

### 4. Conclusiones y recomendaciones

Se determinó que la distribución de concentración de radón-222 en un recinto no es homogénea; habiendo mayores niveles de concentración en las zonas del recinto donde hay poca circulación de aire y niveles de concentración casi nulas en las zonas donde hay mayor circulación de aire. De esto concluimos que evaluar la concentración de radón-222 en un recinto, considerando un solo punto de medición, el resultado obtenido no es representativo del lugar, puesto que sus valores pueden cambiar drásticamente si se escogiese un punto de medición u otro punto ubicado en el mismo recinto.

### Agradecimientos

A la Universidad Privada del Norte (UPN), al Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Programa de Becas CIENCIACTIVA del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), que gracias a su apoyo y conocimiento hicieron de esta experiencia una de las más especiales en mi vida.

1. S. A. Durrani and Radomir Ilic, Radon Measurements by Etched Track Detectors. Singapore: World Scientific Publishing Company (1997).
2. L. A. Najam, N. F. Tawfiq, and R. H. Mahmood, Radon concentration in some building materials in Iraq using CR-39 track detector. *International Journal of Physics*, **1** (2013) 73-76.
3. H. A. Yousef, A. H. El-Farrash, A. A. Ela, and Q. Merza, Measurement of Radon Exhalation Rate in Some Building Materials Using Nuclear Track Detectors. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, **5** (2015) 141.
4. L. Garzón Ruipérez. El Radón y sus riesgos. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo (1992).
5. N. Chauhan *et al.*, Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. *Journal of environmental radioactivity*, **136** (2014) 105-111.
6. K. Akbari, and J. Mahmoudi, Numerical simulation of radon transport and indoor air conditions effects. *Int. J. Scientific and Engineering Research*, **3** (2012) 1-9.
7. V. Urosevic, D. Nikezic, and S. Vulovic, A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. *Journal of environmental radioactivity*, **99** (2008) 1829-1833.