



HAL
open science

Estudio de las técnicas de medida de gas radón en volcanes: caracterización de la biodisponibilidad del radón en áreas volcánicas

C Trull, B Juste, Pierre-J. Gauthier, M Sancho

► **To cite this version:**

C Trull, B Juste, Pierre-J. Gauthier, M Sancho. Estudio de las técnicas de medida de gas radón en volcanes: caracterización de la biodisponibilidad del radón en áreas volcánicas. *RADIOPROTECCIÓN*, 2023, 108, pp.21-29. hal-04766658

HAL Id: hal-04766658

<https://hal.science/hal-04766658v1>

Submitted on 8 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Estudio de las técnicas de medida de gas radón en volcanes: caracterización de la biodisponibilidad del radón en áreas volcánicas

C. TRULL¹, B. JUSTE¹, P.-J. GAUTHIER², M. SANCHO¹

¹Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental. Universitat Politècnica de València

²Laboratoire Magmas et Volcans. Université Clermont Auvergne (France)

Este artículo de investigación corresponde al Trabajo de Fin de Máster premiado como finalista por la SEPR en el 8^º Congreso Conjunto SEFM-SEPR 2023, celebrado en Oviedo

RESUMEN: El radón es un radionucleido de naturaleza gaseosa que supone una fuente de exposición para la población. Este gas está reconocido por la Organización Mundial de la Salud como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo. Las áreas volcánicas son entornos en donde se ha evidenciado una mayor incidencia de patologías como el cáncer de pulmón, siendo estas zonas además áreas que presentan elevados niveles de radiación ambiental, a los que el radón contribuye potencialmente [1]. En cada entorno, factores como la situación geográfica, los procesos de transporte involucrados y el clima, condicionan los niveles de radón a los que se expone el público. Esta variabilidad pone de manifiesto la necesidad de estimar las concentraciones de radón y los factores que ejercen de condicionantes en cada tipo de entorno. Este artículo, por medio de técnicas nucleares, analiza los procesos de desgasificación de radón en aguas y lavas y la emanación espontánea de radón en productos volcánicos. Todo ello, con el fin de establecer una relación preliminar entre la presencia de radiactividad natural en áreas volcánicas, particularmente radón, con el riesgo inherente e influencia que tendría sobre la salud de la población ocupante de dichas zonas.

Palabras clave: radón; exposición; productos volcánicos; desgasificación; emisión espontánea; técnicas nucleares.

ABSTRACT: Radon is a gaseous radionuclide that entails an exposition source for the population. The World Health Organization identifies this gas as the second reason of lung cancer deaths worldwide. Volcanic areas are environments where has been reported an increase in the incidence of lung cancer pathologies. These areas have also high background levels of radiation, being radon a potential contributor to them [1]. There are factors in each environment, as the geographic location, the transport processes involved and the weather, that determine the levels of radon to which the public is exposed. As a consequence of radon levels variability, radon concentrations and factors having an influence on them must be estimated for each type of environment. This article, using nuclear techniques, analyses processes as radon degasification in water and lavas and radon spontaneous emanation in volcanic products. All this to establish a preliminary relationship between the inherent risk and the influence on population health that arises from the natural radioactivity presence, specifically radon, in volcanic regions.

Keywords: radon, exposure, volcanic products, degassing, spontaneous emissions, nuclear techniques.

INTRODUCCIÓN.

EL RADÓN Y SU PRESENCIA EN ENTORNOS VOLCÁNICOS

El radón supone el 42% de la exposición total que la población recibe anualmente. Se trata de un gas radiactivo que se origina principalmente en rocas y suelos de forma natural tras desintegrarse el radio o el uranio contenido en los mismos [2]. Al ser un gas tiene la capacidad de escapar de la roca en donde se origina y transportarse a través del terreno, hasta alcanzar la superficie, desde donde se libera a la atmósfera. Cuando se asientan edificaciones sobre esta superficie del terreno, el radón es capaz de acceder al interior del recinto, donde tiende a acumularse. Con ello, las estancias más cercanas al suelo, como son los niveles inferiores, en combinación con bajas tasas de renovación de

aire, propician la acumulación del radón en su interior que, en caso de ser ocupadas por miembros del público, deriva en una exposición al radón y su progenie. Esta exposición supone un riesgo para la salud de la población ya que, tras inhalarse el radón y sus descendientes, también radiactivos, permanecen en el interior del organismo el tiempo suficiente para llegar a desintegrarse. Al decaer emiten partículas muy energéticas que interactúan con el organismo causando daños celulares y alteraciones en el ADN. Por ello, la Organización Mundial de la Salud identifica el radón como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo [3].

La biodisponibilidad de radón, es decir, las cantidades de radón accesibles por incorporación a los organismos en cada entorno en particular dependen de diversos factores.

Un componente influyente sobre la biodisponibilidad del radón es la presencia de sus elementos precursores, como el radio y el uranio, cuya abundancia y distribución varía geográficamente. A su vez, tras originarse el radón en los suelos y rocas, que alcance la superficie y suponga una fuente de exposición para los miembros del público depende de procesos de transporte como son la emanación, el transporte en aguas y suelos, la exhalación, el transporte en magmas y la desgasificación de lavas. Asimismo, aquellos factores con influencia sobre los procesos de transporte, como son las condiciones meteorológicas, condicionan la presencia de radón en cada entorno en particular. La variabilidad de concentraciones de radón que pueden suponer una fuente de exposición para la población subraya la necesidad de caracterizar tanto la presencia del radón en cada área en particular como los factores que influyen sobre esta. Las provincias volcánicas son zonas a las que se atribuyen potencialmente altos niveles de radón [1], lo que expone la necesidad de estimar las concentraciones de radón en entornos volcánicos y caracterizar sobre éstos los procesos de liberación del radón a la atmósfera.

CASOS DE ANÁLISIS DE LA BIODISPONIBILIDAD DE RADÓN PLANTEADOS

Este artículo expone la caracterización de las cantidades de radón accesibles por incorporación al organismo, es decir, la biodisponibilidad de radón en provincias volcánicas. Se integran cuatro casos de estudio que aplican sobre zonas volcánicas activas y durmientes, cuyo análisis contribuye al conocimiento y estudio del radón en estos entornos. Las investigaciones realizadas comprenden el estudio de las emisiones de radón a la atmósfera procedentes del penacho de gases de un volcán activo, el análisis del proceso de desgasificación de los magmas durante el proceso eruptivo, la caracterización de la emanación espontánea de muestras de origen volcánico de zonas activas y durmientes, y la medida de los niveles de radón transportados en burbujas de gas en aguas de manantial de una zona no activa.

Con ello se busca proporcionar una imagen general de la existencia y distribución del radón en diferentes escenarios habituales de las zonas volcánicas, definiendo y caracterizando así la presencia y repercusión del radón en aquellos entornos volcánicos que sean equivalentes. Todo ello con el fin de conocer de manera más precisa la presencia del radón en las zonas volcánicas para así estar en posición de delimitar y controlar los niveles de radón a los que se expone la población y minimizar el riesgo que dicha exposición supone para su salud.

RADÓN EN AIRE PROCEDENTE DE UN VOLCÁN ACTIVO

La actividad volcánica constituye una fuente de liberación de diversos contaminantes al medio ambiente. Entre estos se identifican metales pesados, metaloides y elementos radiactivos volátiles como el radón y el polonio [4]. Estos componentes volátiles están catalogados como cancerígenos y, en consecuencia, la exposición a los gases de origen volcánico tiene un impacto sobre la salud de la población. Las principales vías de exposición a los gases volcánicos son la infiltración en los suelos de zonas habitadas y las columnas de gases ascendentes, también conocidas como penachos, que se esparcen sobre las poblaciones habitadas [5]. Dada la variedad de contaminantes presentes en las zonas volcánicas activas, es complejo identificar la influencia de cada factor en particular. Esto destaca la importancia de monitorizar tanto los niveles de exposición a radón como la incidencia poblacional, para así estar en posición de establecer una posible relación futura entre ambos factores. Este caso de estudio se centra en estimar los niveles de actividad de radón en aire provenientes del penacho de un volcán activo.

Materiales y método

Las medidas de radón en aire se realizan en las inmediaciones del Parque del Volcán Masaya, en Nicaragua, estimándose la cantidad de radón procedente de la columna de gases que asciende desde el lago de lava del cráter Santiago.



Figura 1. Dosímetros pasivos. De izquierda a derecha: Interior del contenedor cerrado y película LR-115, base del contenedor abierto con película, contenedor y pestaña exterior. (Fuente propia)

La técnica de medida utilizada corresponde con detectores de estado sólido de trazas nucleares. La Figura 1 recoge los dispositivos pasivos utilizados, que se componen de una película film de tipo LR-115 y un contenedor en dos partes acoplables. Cuando las partículas alfa inciden sobre la superficie de la película que actúa de material detector, producen pequeñas marcas visibles que se contabilizan, determinando la concentración de actividad de radón. El contenedor cuenta con una pestaña de cierre que impide que las partículas alfa incidan sobre la película mientras el detector no se encuentra en uso.

Se distribuye de manera radial en torno al cráter Santiago un total de 16 estaciones de muestreo, denominando cada una de ellas como punto de muestreo "PR" y la numeración correspondiente, más una estación adicional situada al suroeste del cráter denominada "Extra". Se ubica otra estación fuera de la influencia de los gases volcánicos del penacho con el fin de registrar el nivel de fondo de la zona. Las estaciones de muestreo corresponden con estacas de madera insertadas en el terreno, sobre las que se disponen los dispositivos pasivos de medida en ganchos atornillables. Estos enganches se recubren con cinta aislante para prevenir la corrosión ácida derivada de las fuertes condiciones ambientales de la zona. Cada estación de muestreo se provee de dos dosímetros de película, dispuestos a distinta altura, situando uno a 10 cm y otro a un metro del nivel del suelo. La Figura 2 recoge la distribución de estaciones en torno al cráter, junto con imágenes descriptivas de las estaciones. La colocación de las estaciones de muestreo en torno al cráter busca precisar qué zonas presentarían niveles más elevados de radón, así como examinar la posible dependencia de éstos con los flujos de vientos habituales de la zona. El posicionar dos dosímetros por estación tiene como objetivo distinguir la contribución de radón procedente del penacho de gases que asciende del lago de lava, de una posible contribución de la desgasificación de suelos procedente de fumarolas y sistemas hidrotermales, en caso de que las hubiera. Tras un periodo de medida de 4 meses, los dosímetros son recogidos y se procede a su lectura en laboratorio.

Análisis de los resultados de los dosímetros de trazas

Dadas las adversas condiciones ambientales de la zona, durante el periodo de exposición, se produjo la pérdida de parte de los dosímetros, habiéndose extraviado la estación PR3 en su totalidad. Los vientos dominantes en la zona del cráter Santiago proceden del noreste. Se confirma que las estaciones de la parte oeste, que por la dirección de los vientos se espera estén más expuestas a los gases volcánicos, presentan valores por encima del resto. Por tanto, las estaciones se agrupan en dos categorías, identificando las estaciones de PR2 a PR11 como las menos expuestas y el resto de las estaciones como la cara más expuesta. La Figura 3 indica la diferenciación de los



Figura 2. Izquierda: Distribución radial de estaciones de muestreo (Fuente Google Earth). Derecha de arriba a abajo: Colocación de dosímetro en estaca y estación de muestreo completa. (Fuente propia).



Figura 3. Agrupación de las estaciones de muestreo (Fuente Google Earth).

grupos de estaciones señalando las localizaciones de las estaciones más expuestas en rojo y las menos expuestas en azul.

De cada agrupación realizada, una vez deducido el fondo, se calcula el valor medio de concentración de radón en aire a cada altura. La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos, siendo "[A_{Rn}]" la concentración de radón en aire y "+/-" la incertidumbre asociada.

	Dosímetro a 10 cm		Dosímetro a 1 m	
	[A _{Rn}]	+/-	[A _{Rn}]	+/-
Media cara más expuesta (Bq/m ³)	19,2	11,3	22,5	6,7
Media cara menos expuesta (Bq/m ³)	2,3	3,1	17,0	2,5

Tabla 1. Resultados concentración media de radón en aire.

A continuación, se analizan las diferencias observables entre cada agrupación de dosímetros. En caso de darse procesos de desgasificación de suelos, estos quedarían registrados en los dosímetros más bajos, tal y como se ha observado en estudios previos en el Monte Etna [6]. En contraposición, en el caso del cráter Santiago el dosímetro más bajo registra niveles por debajo de los situados a un metro de altura. Estas observaciones sugieren que los niveles de radón medidos proceden únicamente de la desgasificación del lago de lava. La cara más expuesta al flujo de los vientos registra para los dosímetros colocados a ambas alturas valores por encima de los de la cara menos expuesta. Los dosímetros más bajos de la cara menos expuesta, al no encontrarse en la trayectoria de los vientos, se encuentran menos expuestos a los gases volcánicos y, por tanto, presentan valores cercanos a los del fondo. A 1 metro de distancia del nivel del suelo sí se registran valores por encima del fondo en la cara menos expuesta. Dada la marcada topografía del cráter, los vientos podrían estar chocando con las paredes e irregularidades del cráter, arremolinándose en su interior, lo que causaría su retroceso. Los bajos niveles registrados para todos los dosímetros, en comparación con los estudios realizados previamente en el Monte Etna [6], sugieren que los elevados flujos de radón que se dan en volcanes activos provendrían de la desgasificación de los suelos derivada de la presencia de sistemas hidrotermales poco profundos y fumarolas.

Los valores de actividad promedio en aire registrados no superan el nivel de referencia de 100 Bq/m^3 que recomienda la OMS para minimizar los riesgos para la salud de la exposición al radón [3]. Por tanto, se considera que las concentraciones medidas no entrañarían un riesgo para la salud de los visitantes de la zona, tampoco para los individuos que frecuentan diariamente el parque como sería el caso de los guardas.

Las estimaciones realizadas en las inmediaciones del parque volcánico del Masaya se han realizado desde la cima en torno al cráter, es decir, en los puntos más cercanos al lago de lava que pueden ser una fuente de exposición para los ocupantes de la zona. Los niveles registrados, por lo tanto, corresponden con las cantidades de radón liberadas en el proceso de desgasificación del lago de lava tras diluirse en la atmósfera durante el ascenso de los gases volcánicos hasta el punto de medida. Por tanto, a partir de estas medidas no se estima la liberación total del proceso de desgasificación de las lavas y por ello se plantea el siguiente caso de estudio.

DESGASIFICACIÓN DE RADÓN DURANTE EL PROCESO ERUPTIVO

La liberación de notables cantidades de radón se vincula a volcanes en activo y se encuentra influenciada por los procesos de desgasificación del suelo, habiéndose constatado esta circunstancia en el caso de estudio anterior. Este análisis, por tanto, se centra en definir el proceso de liberación

de radón en otro tipo de zona volcánica en activo, particularmente durante una erupción.

El análisis de la presencia de radón en productos volcánicos sólidos de reciente erupción puede relacionarse con el proceso de desgasificación que tiene lugar durante un episodio eruptivo [7]. Por medio de este análisis se estima qué porcentaje del radón contenido inicialmente en los magmas habría sido emitido a la atmósfera, así como los niveles de actividad de radón liberados en dicha erupción.

Materiales y método

El análisis de la desgasificación de radón se realiza sobre muestras de flujo de lava y de escorias altamente vesiculadas procedentes del periodo de actividad eruptiva de 2021 del volcán de la Cumbre Vieja en La Palma, Islas Canarias, España.

El porcentaje de radón desgasificado durante la erupción se estima de forma indirecta, haciendo uso de la técnica de espectrometría- γ , con la que se registran las tasas de conteo asociadas a su progenie [7]. Se utiliza para ello un detector de germanio de alta pureza (HGPe), con el que se contabiliza la evolución de las tasas de conteo asociadas a los picos de interés, que son los del ^{214}Pb (en 295,2 y 359,2 keV) y el del ^{214}Bi (609,3 keV). A partir de la evolución en las tasas de conteo asociadas a estos radionucleidos, es posible remontarse al instante de la erupción, evaluando el porcentaje de radón desgasificado y las cantidades liberadas a la atmósfera.

Análisis de la desgasificación de radón en muestras de reciente erupción

La evolución temporal de las tasas de conteo gamma asociadas a cada pico se convierte para que ajuste a una función exponencial dependiente del tiempo. Siendo las cuentas registradas proporcionales a la actividad de una muestra, la tasa de conteo puede relacionarse con la evolución temporal exponencial, tal y como especifica la Ecuación 1, donde: " $C\gamma$ " es la tasa de conteo gamma de cada pico en cuentas por hora por gramo de muestra (cph/g), " t " el tiempo transcurrido desde la erupción en días, " C_{Rn0} " es la tasa de conteo que se atribuiría a la actividad de radón a tiempo cero (cph/g), " $C_{Ra} - C_{Rn0}$ " corresponde con la diferencia entre las tasas de conteo relativas al radio y el radón (cph/g) y " λ_{Ra} " la constante de desintegración del radón ($0,1813 \text{ días}^{-1}$).

$$C\gamma(t) = C_{Rn0} + (C_{Ra} - C_{Rn0}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{Ra}t}) \quad (1)$$

Las Figuras 4 y 5 muestran la evolución de las tasas de conteo gamma asociadas a cada tipo de muestra tras su ajuste a una exponencial. Cada tasa de conteo registrada se señala con un símbolo de forma y color según el pico energético al que pertenece. Aparecen indicados también los tiempos de emisión y muestreo, así como, en el caso de la muestra de flujo de lava, el instante en el que la lava deja de fluir y pasa a asentarse.

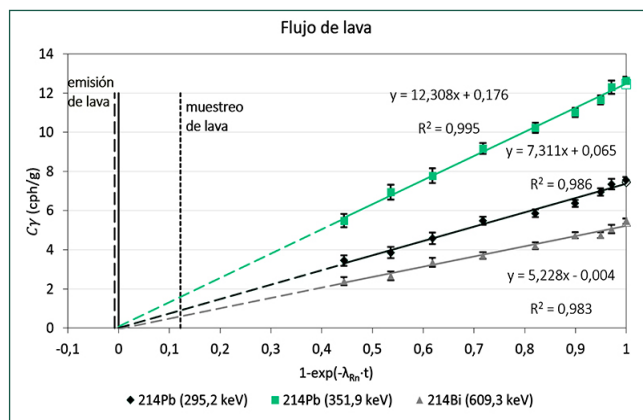


Figura 4. Modelización inversa de la evolución de los emisores- γ - Flujo de lava.

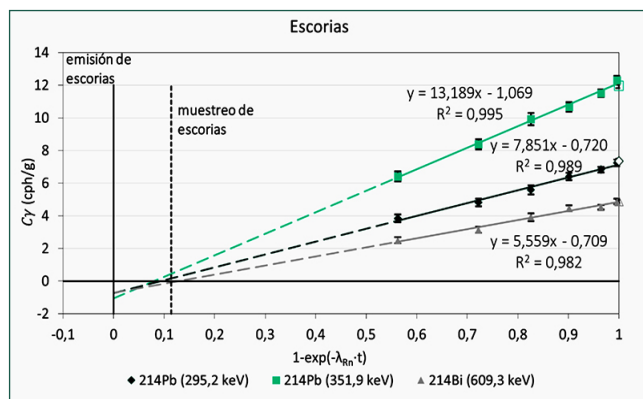


Figura 5. Modelización inversa de la evolución de los emisores- γ - Escorias vesiculadas.

Se realiza un ajuste lineal sobre los valores de tasa de conteo registrados, representados en las Figuras 4 y 5 mediante líneas continuas del color asociado a cada pico. Extrapolando el ajuste a tiempo cero, se estiman las tasas de conteo que se atribuyen al instante de la erupción. En ambas muestras, flujo de lava y escorias, las regresiones presentan valores de R^2 por encima del 0,98 para todos los ajustes.

Dado que la actividad es proporcional a las tasa de conteo, la tasa de desgasificación del sistema (ϵRn) se estima a partir de la relación entre la tasa de conteo atribuible al radón previo y tras la erupción, Ecuación 2. Siendo " C_{Rn0} " la tasa de contaje atribuible al radón en el instante de la erupción, equivalente al origen de coordenadas de las ecuaciones de ajuste de las Figuras 4 y 5. " C_{Rn-eq} " es la tasa de conteo de radón que se daría en el equilibrio. Esta última se estima bajo la hipótesis de equilibrio radiactivo entre ^{226}Ra y ^{222}Rn en el magma antes de desgasificar [8], que equivale a la tasa de conteo del radio (C_{Ra}), es decir la suma de la pendiente y el origen de coordenadas de los ajustes.

$$\epsilon Rn (\%) = \left(1 - \frac{C_{Rn0}}{C_{Rn-eq}} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{C_{Rn0}}{C_{Ra}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Se obtiene un valor medio de ϵRn del flujo de lava del $99,3 \pm 0,7\%$, lo que sugiere una desgasificación total o casi total del radón. Esta tendencia se observa también en la Figura 4, ya que las regresiones lineales convergen a tiempo cero (en el instante de la erupción) apuntando a tasas de conteo nulas. Para el caso de las escorias, las regresiones de la Figura 5 también convergen sobre el mismo punto, no obstante, a tiempo cero tienden a valores negativos. Al realizar el cálculo de ϵRn para las escorias esta tendencia se traduce en un valor medio del $110,1 \pm 1,8\%$, lo que no es materialmente posible. Este resultado indicaría una posible pérdida del radón después de la erupción tras la emisión de las escorias. Estas, dado su pequeño tamaño, solidifican en el mismo instante que se emiten, cesando la desgasificación. Por tanto, estaría teniendo lugar otro proceso de pérdida de radón post-erupción, como podría ser la emanación espontánea de radón que se conoce se da en otras rocas como es el caso de rocas enriquecidas en uranio [9].

Ambos análisis sugieren que se produce una desgasificación completa del radón inicialmente contenido en los magmas. La liberación de radón constituye una potencial fuente de exposición para la población de la zona. Por ello se determinan las cantidades totales de radón que habrían sido liberadas durante la totalidad de la erupción que tuvo lugar en 2021 en La Cumbre Vieja. Se calcula una densidad de los productos de 2915 kg/m^3 , una concentración de radón inicial en el magma de $50,67 \text{ Bq/m}^3$ (medida por espectrometría- γ a partir del pico energético del precursor del radón en equilibrio, el ^{226}Ra en 186 MeV) y, conociendo que 200 millones de m^3 de material volcánico fueron emitidos [10], se estima que 30 TBq de radón fueron liberados durante el proceso eruptivo. Los gases volcánicos tras su emisión se diluyen rápidamente en la atmósfera, por lo que la población no se encuentra directamente expuesta a tales concentraciones. No obstante, este proceso de desgasificación magmática estaría contribuyendo a los altos niveles de radón reportados en provincias volcánicas.

EMANACIÓN ESPONTÁNEA DE RADÓN EN MUESTRAS DE ZONA ACTIVA

Tras la emisión de los productos volcánicos durante la erupción, éstos solidifican, cerrándose el sistema y finalizando el proceso de desgasificación. El caso previo sugiere que, además de la desgasificación, otro proceso post-erupción estaría interviniendo en la liberación de radón en muestras de escorias altamente vesiculadas. La emanación espontánea es un fenómeno que, de darse, podría justificar la pérdida del radón contenido en las muestras sólidas después de la erupción. En ese caso, este proceso constituiría una fuente potencial de liberación de radón post-erupción. El presente caso de estudio plantea un procedimiento con el que poder estimar la emanación espontánea de radón (EE_{Rn}) en muestras basálticas, dado que hasta la fecha pocos estudios han realizado estos análisis sobre muestras de

Colaboraciones

origen volcánico, menos aun analizando esta tipología en particular [9].

Materiales y método

Tras desgasificar el radón durante el proceso eruptivo, este vuelve a formarse a medida que el ^{226}Ra contenido en los productos volcánicos va decayendo. El estudio de la EE_{Rn} se realiza sobre muestras sólidas una vez se ha reestablecido el equilibrio entre el radón y su precursor. Se analizan muestras de escorias de la erupción de la Cumbre Vieja de 2021 y de escorias y cenizas de erupciones acontecidas en el Monte Etna en 2021.

Se escoge la técnica de conteo alfa para determinar la emanación espontánea de radón (EE_{Rn}) sobre las muestras objeto de estudio, método utilizado con anterioridad en el estudio de la EE_{Rn} de suelos y rocas de distinta procedencia y tipología [11]. Las muestras sólidas son tamizadas y segregadas en fracciones según su granulometría (medida en unidades ϕ (φ), equivalente al $\log_2(\varnothing_{partícula})$ (mm)). Las fracciones segregadas por tamaño se disponen en recipientes que actúan de cámara de acumulación durante 22 días en los que permanecen sellados. Este periodo equivale a más de 5 periodos de desintegración del radón. Tras este tiempo, el radón contenido en el aire en el momento del sellado habrá decaído. Por tanto, los niveles de radón registrados al medir el aire de las cámaras procederán únicamente de la emanación espontánea de los sólidos. Se muestrea el aire de cada cámara y se inserta en un frasco de centelleo de la casa comercial Algade, que se mide en un contador alfa de bajo nivel 7286 de Littlemore Scientific. Se registran las tasas de conteo asociadas a cada fracción y se calcula en cada caso el coeficiente EE_{Rn} .

El cálculo de EE_{Rn} se basa en la comparación entre la actividad de radón del sólido, en equilibrio con el radio y del que se conoce su actividad en la muestra, y la actividad de radón estimada en la fase aire de la cámara. Esta última se calcula a partir de las tasas de conteo registradas en el contador α , según las especificaciones de cálculo que indica la casa suministradora del frasco de centelleo para relacionar conteaje y actividad.

Análisis de la emanación espontánea de radón según el tamaño de grano

La señal que el contador α registra para todas las fracciones estudiadas se encuentra por encima del valor de conteo de fondo atribuido al frasco de centelleo y al detector. Sin embargo, las tasas de conteo obtenidas se encuentran cerca de este valor de fondo estimado. Puesto que esta experiencia se corresponde con un primer enfoque de este análisis en muestras basálticas, todas las tasas de conteo registradas se emplean en el cálculo del factor de EE_{Rn} . En el caso futuro en que se disponga de más cantidad de muestra, factor limitante en este proceso, se obtendrá una señal más robusta.

Las Figuras 6 y 7 recogen los valores obtenidos de EE_{Rn} de las muestras segregadas en fracciones de Cumbre Vieja y el Monte Etna, respectivamente. La Figura 7 distingue entre dos tipos de muestras. Bajo la etiqueta "Et-E&C" se agrupan las muestras recogidas en una localización, compuestas por escorias y cenizas, mientras que "Et-CF" corresponde con cenizas finas muestreadas en otra ubicación.

En el caso de las muestras de Cumbre Vieja se obtiene un valor medio de EE_{Rn} del 0,58%, mientras que las fracciones del Monte Etna presentan valores entre un 0,33% y un 1,39%. Todos estos valores se encuentran por encima del valor de emanación espontánea de radón considerado previamente para rocas basálticas que, según bibliografía previa, se estimaba en un 0,1413% [9].

Con respecto a la influencia del tamaño de grano sobre el factor de EE_{Rn} , puesto que las cantidades dispuestas por fracción eran limitadas, esta primera estimación no ha registrado variaciones significativas entre las fracciones de

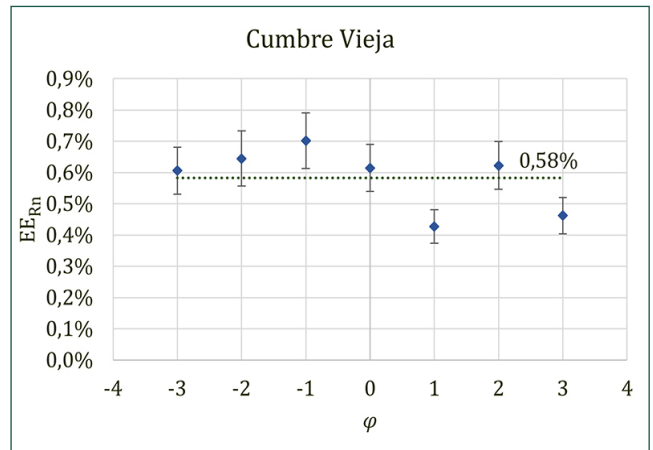


Figura 6. Factor de Emanación Espontánea (EE_{Rn}) de Escorias de Cumbre Vieja.

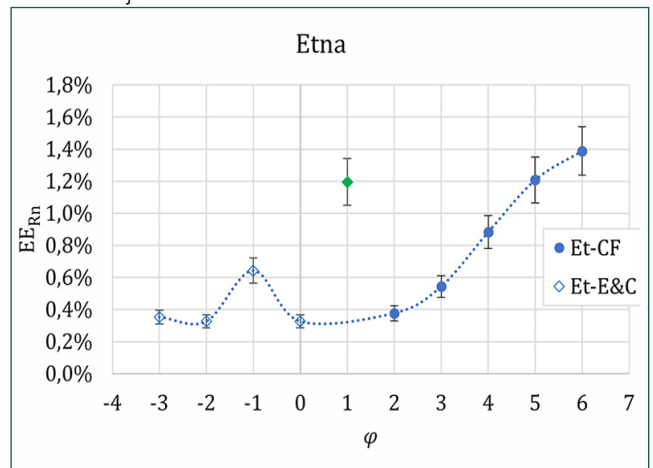


Figura 7. Factor de Emanación Espontánea (EE_{Rn}) de Escorias y Cenizas del Monte Etna.

Cumbre Vieja. No obstante, para el caso de las muestras del Monte Etna se advierte que, a mayor φ , es decir, a menor tamaño de grano, el factor de EE_{Rn} tiende a incrementar. Esta afirmación se observa por una parte en la fracción más pequeña de "Et-E&C". Esta se representa como un rombo verde en la Figura 7 y corresponde con la base de recogida de este grupo de muestras, que contiene las partículas desde $\varphi=1$ en adelante. Se registra un valor del 1,20% para esta fracción, dado que el conjunto contiene tanto partículas de $\varphi=1$, como mucho más pequeñas, cuya contribución a EE_{Rn} sería mayor. Esta tendencia también se observa para las últimas fracciones del grupo "Et-CF", dado que el factor EE_{Rn} se incrementa a medida que φ aumenta, alcanzando el valor máximo de 1,39% para la fracción más pequeña.

El estudio del factor de emanación espontánea de radón realizado en rocas basálticas registra valores que superan a los reportados previamente en bibliografía e indica que menores tamaños de grano favorecerían la liberación de radón. Con ello se comprueba que uno de los mecanismos que podría estar induciendo parte de la pérdida de radón post-erupción, reportado en el caso de estudio anterior, sería la emanación espontánea.

RADÓN EN ZONA INACTIVA

Las muestras basálticas, como las escorias objeto de estudio del caso anterior, están presentes en más entornos volcánicos como son las zonas inactivas, también conocidas como durmientes. Por ello, el presente caso de estudio atiende a caracterizar el factor de emanación espontánea de radón en muestras de escorias procedentes de una zona volcánica no activa, cuya emisión se produjo hace miles de años, pasando a formar parte del entorno hasta la fecha. A su vez, con el fin de ampliar la imagen general acerca del radón en entornos durmientes, este caso de estudio analiza la presencia de radón en las burbujas de gas de las piscinas naturales en burbujeo del mismo tipo de zona.

Materiales y método

La zona volcánica estudiada se trata de la región inactiva de l'Auvergne, en Francia. Las muestras de escorias, procedentes de distintas erupciones acontecidas en el pasado, son recogidas del Puy de la Vache, Puy de Côme y el Cráter Kilian.

El estudio de la emanación espontánea de radón (EE_{Rn}) se realiza en muestras de escorias del mismo tamaño y distinta antigüedad y contenido en radio. Tras la recolección, se tamizan las escorias y se separa la fracción del tamaño a estudiar. El procedimiento de medida que sigue corresponde con el descrito en el caso de estudio anterior, con el que se analizan las muestras por conteo- α y se calcula el factor de EE_{Rn} de cada una.

El muestreo del radón contenido en las burbujas de gas de aguas de manantial se realiza en las piscinas naturales y fuentes de Montoute, Chanat, la Gargouillère y Goyon, localizadas también en la región d'Auvergne de Francia.

La medida de la desgasificación de radón de las aguas de manantial consiste en captar las burbujas de gas que emergen a la superficie de las piscinas y medir su contenido en radón. El muestreo se realiza, una vez los gases que ascienden por las aguas se acumulan en un embudo insertado en la piscina natural, accionando una jeringuilla conectada a un sistema que, tras la toma de muestra, permite su inserción y medida en una cámara hermética que contiene el detector de radón en continuo "RadonEye+".

Análisis de la emanación espontánea de radón en muestras de zona inactiva

La fracción de escorias estudiada comprende partículas de entre 250 y 500 μm de diámetro (equivalentes a $\varphi=2$ y $\varphi=1$, respectivamente). La Tabla 2 recoge los resultados de emanación espontánea determinados (EE_{Rn}), junto con los datos de antigüedad y el contenido en radio (A_{226Ra}) de cada muestra.

	Antigüedad (años)	A_{226Ra} (Bq/kg)	EE_{Rn} (%)
La Vache	8600	19,67	8,38 \pm 0,93
Kilian	9400	60,06	19,18 \pm 1,56
Côme	13700	30,59	29,75 \pm 3,22

Tabla 2. Antigüedad, actividad ^{226}Ra y EE_{Rn} de muestras de zona inactiva

Los valores de EE_{Rn} estimados superan el cálculo realizado para la fracción del mismo tamaño en las escorias procedentes de una zona en activo (cuantificada en menos de un 1%), las cuales se miden cuando tienen menos de un año de antigüedad. Los resultados obtenidos sugieren que el fenómeno de emanación espontánea de radón se vería favorecido a mayor antigüedad de muestra, obteniéndose un valor máximo de cerca de $EE_{Rn} = 30\%$ para las escorias más antiguas, provenientes de Puy de Côme. Los cristales volcánicos, como resultado del rápido enfriamiento de los magmas, cuentan con una estructura desordenada que, incluso a temperatura ambiente, se deteriora con facilidad por los efectos del agua y el clima [12]. Este envejecimiento de las rocas podría provocar un desgaste de los cristales que favorezca que el radón contenido en los mismos fugue. Otra posibilidad que podría contribuir al proceso de emanación espontánea sería la aparición de daños nucleares en la estructura física del cristal como consecuencia del efecto de la propia radiactividad de la roca.

Con respecto al contenido en actividad de cada muestra, no se distingue una relación directa entre la cantidad de radio de la muestra, y por tanto de radón, y el factor de EE_{Rn} . Sin embargo, entre las muestras de similar antigüedad (La Vache y Kilian) sí se aprecia diferenciación. Esta observación sugiere que, para un desgaste por el paso del tiempo similar,

Colaboraciones

la EE_{Rn} sería superior en aquellas rocas más activas, dado que contienen más radionucleidos disponibles para su liberación.

Desde el punto de vista geológico, una pérdida continuada de radón implicaría que el equilibrio secular a lo largo de la cadena de desintegración del ^{238}U no se alcanzaría. En consecuencia, la fuga de una cantidad notable de radón se traduce en el cese parcial de la producción de su progenie. Para una emanación espontánea de radón del 30%, la ratio de actividad $^{210}Pb/^{226}Ra$ se situaría en un 0,7 en lugar del valor de 1 que corresponde al equilibrio. Estas observaciones podrían repercutir sobre las consideraciones a realizar a la hora de aplicar métodos de datación en rocas que fundamentan sus estimaciones bajo la premisa de equilibrio secular a lo largo de toda la cadena de desintegración.

La emanación espontánea de radón en provincias volcánicas antiguas es un proceso de liberación que hasta el momento no había sido considerado. Con todo, este proceso podría estar contribuyendo a los niveles de radiactividad natural de estas zonas, incrementando el riesgo al que se expone la población ocupante de las mismas.

Análisis de la presencia de radón en las burbujas de gas de aguas de manantial

La Tabla 3 recoge la concentración de actividad de radón "[A_{Rn}]" presente en los gases captados de las burbujas emergentes que, tras alcanzar la superficie de las aguas de manantial, son liberados en la atmósfera.

	Chanat	Gargouillère	Montout	Goyon
[A _{Rn}] (kBq/m ³)	46,59	20,22	36,83	18,49

Tabla 3. Concentración de radón estimada – Gases en burbujeo Región d’Auvergne.

Se registran concentraciones de radón del orden de decenas de kilobequerelios por metro cúbico en los gases procedentes de las aguas de manantial. El valor máximo obtenido en Chanat (46,59 kBq/m³) corresponde con una zona granítica con elevados niveles de uranio y, en consecuencia, de radón. Los dominios volcánicos, como son Montout y Goyon, corresponden con zonas con menor presencia de uranio (y, por tanto, radón). Ambas estimaciones se encuentran por debajo de los niveles medidos en la zona granítica de Chanat. Las diferencias registradas entre los puntos de Montout y Goyon se deben a una contribución notable de gases del manto profundo que presenta la zona de Montout, lo que se traduce en mayores concentraciones de radón. Por último, la fuente de la Gargouillère se sitúa en un dominio sedimentario, con el contenido en uranio más bajo de todos, por lo que se esperaría registrar concentraciones de radón equivalentes. Sin embargo, se conoce que sobre este punto de nuevo tiene lugar una clara contribución de gases del manto

profundo, que estarían propiciando que se alcancen los 20,22 kBq/m³ contabilizados en esta zona.

En todos los casos se observan altos niveles de concentración de radón que alcanzan la superficie y se liberan a la atmósfera, diluyéndose en la misma. De cara a futuras líneas de investigación se plantea la posibilidad de caracterizar la influencia estacional con respecto a las concentraciones de radón. Estos análisis servirían para vincular las concentraciones de radón medidas a las de otros gases nobles como el helio y el argón, lo que podría proporcionar información de las fuentes de gases localizadas en las profundidades de los suelos de la región d’Auvergne.

CONCLUSIONES

Se ha evaluado la presencia de radón en el aire de una zona en activo, el proceso de desgasificación de los magmas durante una erupción, la emanación espontánea de radón en rocas de zonas activas e inactivas y la presencia de radón en los gases de las piscinas naturales en burbujeo de una zona inactiva. Las principales conclusiones sintetizadas a partir de los casos de estudio analizados se presentan a continuación:

La existencia de elevados niveles de radón en zonas activas podría estar vinculada a la desgasificación de suelos en presencia de sistemas hidrotermales y fumarolas. La exposición al radón procedente del lago de lava en el Masaya no superaría el límite de 100 Bq/m³ de exposición que recomienda la OMS.

La desgasificación de radón de los productos volcánicos sólidos emitidos en el proceso eruptivo de la Cumbre Vieja de 2021 habría sido total o casi total, liberándose y diluyéndose en la atmósfera cantidades en torno a los 30 TBq de radón.

Se plantea y aplica un procedimiento que permite calcular la emanación espontánea de radón en muestras de escorias basálticas cuyos resultados se encuentran por encima de los reportados anteriormente en bibliografía para el mismo tipo de roca. Por tanto, este fenómeno estaría contribuyendo, al menos en parte, a la liberación de radón post-erupción. Los análisis realizados sugieren que el factor de EE_{Rn} se vería favorecido a menor tamaño de partícula y mayor antigüedad de muestra.

Otra contribución de radón en zonas durmientes se trata de las concentraciones de radón emitidas por las burbujas emergentes de las piscinas naturales de aguas de manantial, que ascienden al orden de decenas de kBq/m³.

Los estudios llevados a cabo constatan que las provincias volcánicas, tanto activas como durmientes, constituyen una fuente de procedencia de emisiones de radiactividad notable sobre el entorno, como es el caso del radón. Aunque los niveles reportados no representan una fuente de exposición directa para la población, estarían favoreciendo y contribuyendo a los altos niveles ambientales presentes en provincias volcánicas. La OMS indica que no hay nivel por debajo del cual la exposición a radón pueda considerarse

segura, no estando acotados los efectos derivados de una exposición continuada a bajos niveles. Por ello, los altos niveles de radiación de fondo en presencia de radón

podrían estar contribuyendo, en parte, al aumento de la incidencia de patologías respiratorias que previamente ha sido reportado en zonas volcánicas.

REFERENCIAS

- [1]. Amaral A, Rodrigues V, Oliveira J, Pinto C, Carneiro V, Sanbento R, et al. Chronic exposure to volcanic environments and cancer incidence in the Azores, Portugal. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2006 Aug 15 [cited 2023 Mar 19];367(1): 123-8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.024>
- [2]. United Nations Environment Programme. Radiation: effects and sources. [Internet]. 2016. [cited 2023 19 Mar] Available from: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790>
- [3]. Organización Mundial de la Salud. Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública [Internet]. 2015. [cited 2023 Agt 17]. Available from: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf
- [4]. Gauthier PJ, Sigmarsson O, Gouhier M, Haddadi B, Moune S. Elevated gas flux and trace metal degassing from the 2014-2015 fissure eruption at the Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [Internet]. 2016 Mar [cited 2023 Mar 19];121(3):1610–30. Available from: <https://doi.org/10.1002/2015JB012111>
- [5]. Baxter PJ. *Volcanoes and Human Health*. Elsevier eBooks [Internet]. 2011 Jan 1 [cited 2023 Mar 19];672–80. Available from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00666-8>
- [6]. Terray L, Gauthier PJ, Breton V, Giammanco S, Sigmarsson O, Salerno G, et al. Radon Activity in Volcanic Gases of Mt. Etna by Passive Dosimetry. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth* [Internet]. 2020 Sep 1 [cited 2023 Mar 19];125(9). Available from: <https://doi.org/10.1029/2019JB019149>
- [7]. Gill JB, Williams RW, Bruland KW. Eruption of basalt and andesite lava degasses ^{222}Rn and ^{210}Po . *Geophysical Research Letters* [Internet]. 1985 Jan 1 [cited 2023 Mar 19];12(1):17–20. Available from: <https://doi.org/10.1029/GL012i001p00017>
- [8]. Gauthier P-J, Condomines M. ^{210}Pb – ^{226}Ra radioactive disequilibria in recent lavas and radon degassing: inferences on the magma chamber dynamics at Stromboli and Merapi volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters* [Internet]. 1999 Oct [cited 2023 Mar 19];172(1-2):111–26. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00195-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00195-8)
- [9]. Sakoda A, Ishimori Y, Yamaoka K. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes* [Internet]. 2011 Oct 1 [cited 2021 Oct 17];69(10):1422–35. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.06.009>
- [10]. González PJ. Volcano-tectonic control of Cumbre Vieja. *Science*. [Internet]. 2022 Mar 25;375(6587):1348–9. 2022 Mar [cited 2023 Jul 17];69(10):1422–35. Available from: <https://doi.org/10.1126/science.abn5148>
- [11]. Perrier F, Girault F. Measuring effective radium concentration with less than 5 g of rock or soil. *Journal of Environmental Radioactivity* [Internet]. 2012 Nov [cited 2022 Nov 17];113:45–56. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.04.010>
- [12]. Fisher RV, Schmincke HU. *Pyroclastic Rocks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg [Internet]. 1984 [cited 2023 Mar 21]. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6> ■