



AGENCIA NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
E INNOVACIÓN

# Informe final publicable de proyecto Radón y emisores gamma en los materiales de construcción en Uruguay

Código de proyecto ANII: FCE\_1\_2021\_1\_167264

Fecha de cierre de proyecto: 01/08/2024

**NOGUERA ROCHA, Ana Lía** (Responsable Técnico - Científico)

**BENTOS PEREIRA ARAUJO, Heinkel Yandinoca** (Investigador)

**FORNARO, Laura** (Investigador)

**REBOULAZ MOREIRA, Rodolfo** (Investigador)

---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE (Institución Proponente) \\  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE

## **Resumen del proyecto**

El potasio-40 (40-K) y los radionucleidos de las series de uranio-238 (238-U) y torio-232 (232-Th) están presentes en la corteza terrestre, por lo que se encuentran en los materiales de construcción derivados de ella. La radiactividad natural de estos materiales, junto con la radiactividad del suelo, constituye una de las principales fuentes de exposición de la población a la radiación ionizante. La exposición puede ocurrir tanto en el exterior como en el interior de los hogares y lugares de trabajo. En el interior, la exposición puede ser directa a la radiación gamma de los radionucleidos naturales de las series de 238-U, 232-Th y 40-K, o por contaminación interna mediante la inhalación de radón-222 (222-Rn) y sus productos de desintegración.

El objetivo del proyecto es cuantificar las concentraciones de actividad de los radionucleidos naturales 232-Th, 226-Ra y 40-K en los materiales de construcción utilizados en Uruguay, así como medir la emanación de 222-Rn y evaluar los riesgos radiológicos a los que están expuestos los habitantes. Para ello, se realizaron muestreos de diversos materiales de construcción en el país y se determinaron las concentraciones de actividad de 232-Th, 226-Ra y 40-K mediante espectrometría gamma. La emanación de 222-Rn se cuantificó utilizando detectores de huella de estado sólido. Finalmente, se evaluó el riesgo radiológico asociado a la presencia de radón y radionucleidos emisores de gamma en los materiales de construcción.

Los resultados muestran que los materiales analizados presentan concentraciones de actividad de radionucleidos naturales e índices de riesgo inferiores a los límites recomendados por los organismos internacionales.

**Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias de la Tierra y relacionadas con el Medio Ambiente / Geociencias multidisciplinaria / Contaminación Radiactiva Ambiental**

**Palabras clave: Radón, radiactividad natural, materiales de construcción, NORM / / /**

### **Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.**

El ser humano está expuesto a radiaciones en diversos ámbitos de su vida, las fuentes de exposición pueden ser naturales o artificiales, siendo las primeras responsables del 80% de la dosis efectiva promedio mundial (2.4 mSv anuales) [1]. El mayor aporte a la dosis efectiva debido a fuentes naturales se debe a la inhalación de radón (1.26 mSv anuales) encontrándose lugares que superan los 10 mSv por año, debido principalmente al tipo de viviendas. Tanto el 40-K como los radionucleidos de las series de 238-U y 232-Th, están presentes en la corteza terrestre, distribuidos no homogéneamente, y con enormes variaciones entre países y regiones. A pesar de que todos los radionucleidos de estas series de desintegración están presentes y dada sus características fisicoquímicas, cada radionucleido va a poseer su importancia radiológica. Los de mayor incidencia en la dosis por irradiación externa son los radionucleidos (o sus productos de decaimiento) son emisores gamma Es por ello que para calcular la dosis equivalente anual (AEDE) por irradiación externa se utilizan las concentraciones de actividad de los radionucleidos 40-K, 232-Th, y 226-Ra, aún cuando los demás radionucleidos de las series radiactivas también están presentes. Desde el punto de vista de irradiación interna el que posee mayor incidencia radiológica es el 222-Rn (y sus productos de decaimiento). La concentración de 222-Rn en el interior de los hogares está directamente relacionada con la concentración de actividad de 226-Ra, ya que el 222-Rn es un producto de decaimiento del mismo.

Dada la ubicuidad de los radionucleidos naturales y por tanto de sus productos de decaimiento, los mismos son componentes de diversos materiales naturales. A pesar de su ubicuidad la concentración de actividad varía enormemente entre regiones, algunos materiales provenientes de regiones con concentraciones de actividad natural altas pueden superar la actividad media mundial por valores desde hasta 60 veces.

A los efectos de preservar la salud de las poblaciones, diversas entidades internacionales han publicado recomendaciones para el uso seguro de los materiales de construcción. La "International Atomic Energy Agency (IAEA)" recomienda la presencia máxima de 1 Bq/g para Radionucleidos naturales de la serie de 238-U y 232-Th y 10 Bq/g para el 40-K [4], la misma recomendación es brindada por la normativa Europea (Directive 2013/59) [5]. Además la IAEA posee diversos documentos relativos a la protección radiológica en industrias y lugares de trabajo con exposición a radón [6-10].

Para evaluar el exceso de radiación gamma debido al uso de los materiales de construcción existen diversos índices desarrollados por diversos investigadores y recomendados por Organismos Internacionales [5,11]. Todos los índices se calculan en base a la concentración de actividad de 226-Ra, 232-Th y 40-K, y considerando el aporte a la tasa de dosis de cada uno de ellos. Un valor que supere el valor recomendado implica que el nivel de referencia de dosis equivalente efectiva anual de 1 mSv.yr<sup>-1</sup> puede ser excedido, y puede que no es recomendable (hay que verificar la dosis en la construcción) su uso como material de construcción de viviendas, pero pueden ser utilizados con otros fines.

El 222-Rn está presente de forma natural en el medio ambiente, esto hace que establecer niveles mínimos a partir de los cuales tomar medidas correctoras sea difícil; debido a ello es que según el país de origen existen valores distintos como consecuencia de su problemática particular, su capacidad de acción y la sensibilidad pública existente [6]. Entre estas recomendaciones cabe mencionar la dada por la "International Commission on Radiological Protection (ICRP)", en la cual se establecen niveles de acción entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup> para viviendas y entre 500 y 1500 Bq/m<sup>3</sup> para lugares de trabajo [12-13], y por la "US Environmental Protection Agency (EPA)" la cual recomienda que la concentración de Radón no debe superar los 4 pCi/L en aire (150 Bq/m<sup>3</sup>). Según la Organización mundial de la Salud (WHO) el Radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en muchos países, siendo la causa del 15 % del cáncer pulmonar a nivel mundial [14]. El exceso de irradiación interna debido a la inhalación de gas 222-Rn se puede estimar a partir de las concentraciones de actividad de 226-Ra, 232-Th y 40-K, calculando el índice de riesgo interno (Hin) [15-16]. Además la concentración de actividad de 222-Rn que emana de los distintos materiales de construcción (y se acumula en los hogares) se puede cuantificar mediante métodos activos por ejemplo bombeo de aire y detección por espectrometría gamma (midiendo los productos de decaimiento) o mediante métodos pasivos por ejemplo: detectores de polímeros (CR-39, LR-115, etc) denominados detectores de huellas de estado sólido, "Solid State Nuclear Track Detectors" (SSNTD). La selección del sistema detector está directamente relacionada con el tiempo de exposición, las cuantificaciones de corto tiempo se realizan por espectrometría gamma y las de larga exposición por SSNTD [17-23].

En nuestro país no existen directrices que recomienden la concentración de actividad de los radionucleidos naturales en los materiales de construcción que se importan, fabrican, comercializan y utilizan. Esta carencia de recomendaciones es común a los países sudamericanos.

El Reglamento Básico de Protección y Seguridad Radiológica (NORMA UY100), en su revisión de 2022 [24], establece límites de dosis para el público, fijados en 1 mSv/año, así como límites para la concentración de radón-222 (222-Rn) en los hogares. La Norma UY100 establece que el nivel de referencia para la

concentración de 222-Rn en viviendas y otros edificios, con elevados factores de ocupación para miembros del público, no debe exceder un promedio anual de 300 Bq/m<sup>3</sup> [24].

En lo que refiere a la Investigación científica, es un tema actual e internacional, diversos grupos de investigación han realizado estudios al respecto. A nivel regional se ha estudiado en Argentina [25-26] y Brasil [2, 27-29]. A nivel Internacional, Italia [30-32], Grecia [33], Turquía [34-35], Holanda [36], Suecia [37], Hungría [38-39] Serbia [40], Japón [41], India [42], China [43-44], Pakistán [45], Camerún [46], Egipto [47-48], Nigeria [49], entre otros.

En los últimos años diversos países han comenzado a realizar mapeos de 222-Rn en los hogares de sus territorios, obteniendo resultados muy diversos y requiriendo en algunos sitios medidas de remediación. A modo de ejemplo se puede citar el compendio de información en los países de la Unión Europea, así como estudios individuales [50-51], de Estados Unidos [52] - donde dicho mapeo lleva años de desarrollo -, y más recientemente en Brasil [53], Suiza [54] e India [55] .

En Uruguay, el grupo proponente de este Proyecto ha realizado estudios en arenas y suelos del Departamento de Rocha, determinando las concentraciones de actividades de 226-Ra, 232-Th y 40-K y evaluando su riesgo radiológico, incluyendo su potencial uso como material de construcción. [56-60].

Uruguay es importador de materiales de Construcción, por lo que es necesario un estudio profundo de concentración de actividad de radionucleidos para evaluar su uso seguro -desde el punto de vista radiológico- como material de construcción, de acuerdo a lo antes expuesto. El proyecto aporta al conocimiento de los materiales de construcción utilizados, brinda las herramientas para la elaboración de un mapa nacional de 222-Rn en hogares - recomendado por organismos internacionales y en elaboración en diversos países-, y genera la información para un futuro marco regulatorio, si las autoridades competentes lo estiman pertinente. Es así que son beneficiarios del mismo tanto la comunidad científica como la sociedad, permitiendo disponer de valores nacionales de la concentración de Radionucleidos en los materiales disponibles, así como también de los niveles de dosis de exposición externa y dosis de contaminación interna a la que están expuestos los habitantes. Con la información por el Proyecto brindada se pueden realizar estudios que impliquen, combinaciones de ellos en viviendas para lograr minimizar los riesgos radiológicos en los hogares. El Proyecto también colabora con la formación de Recursos Humanos calificados en el área contaminación radiactiva ambiental, área aún en desarrollo en Uruguay. En lo que respecta a los aportes a la sociedad, los mismos son directos e indirectos. Los aportes directos se pueden apreciar en que los conocimientos adquiridos durante la ejecución del Proyecto los cuales se difundieron a través de los cursos de grado y posgrado dictados en el Centro Universitario Regional del Este (CURE), así como los cursos que se participa en la Facultad de Química, y en actividades de difusión al público y en congresos nacionales e internacionales. Como aportes indirectos a la sociedad, los resultados del proyecto quedan a disposición de las entidades competentes las cuales podrán utilizar los datos del Proyecto - si lo creen adecuado- para formular recomendaciones que promuevan la seguridad radiológica de su población en lo referente al uso de los materiales de construcción.

## OBJETIVO GENERAL

Estudiar la incidencia de los materiales de construcción utilizados en Uruguay en la dosis equivalente anual (externa e interna) de la población del país.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar las concentraciones de actividades de radionucleidos naturales emisores gamma en materiales de construcción tradicional más utilizados en Uruguay (ladrillos, cementos, recubrimientos, granitos).

Cuantificar la concentración de actividad de  $^{222}\text{Rn}$  que emana de materiales de construcción tradicional más utilizados en Uruguay (ladrillos, cementos, recubrimientos, granitos).

Evaluar el riesgo radiológico - externos e internos - debido a los materiales de construcción en el Uruguay.

#### **Metodología/Diseño del estudio**

Se muestrearon por conveniencia materiales disponibles en el mercado, tanto de origen nacional como importado. Los materiales muestreados fueron clasificados en 5 categorías - ladrillos-ticholos-bloques, recubrimientos cerámicos, yeso, granito y cementos.

Para la cuantificación de las concentraciones de actividades, las muestras se acondicionan - muelen y tamizan - para llevar a un tamaño de partículas representativo, se secan, se cuartean y colocan en un recipiente adecuado para la determinación (Marinelli).

Los Radionucleidos emisores gamma se cuantifican por espectrometría gamma - utilizando un espectrómetro de germanio de alta pureza (HPGe), ORTEC, GMX35P4-76-RB-, y se determinan luego del cerrado hermético de los recipientes tipo Marinelli (30 días) para alcanzar el equilibrio secular entre el  $^{226}\text{Ra}$  y sus productos de decaimiento de período de semidesintegración corto.

Para cuantificar el radionucleido  $^{232}\text{Th}$  se utilizó el fotopico del radionucleido  $^{228}\text{Ac}$  (911.2 keV), para el radionucleido  $^{226}\text{Ra}$  los fotopicos del  $^{214}\text{Bi}$  (609.3 keV) y  $^{214}\text{Pb}$  (351.9 keV) mientras que para cuantificar el radionucleido  $^{40}\text{K}$  se utilizó su propio fotopico (1460.8 keV). El tiempo de medida de cada muestra fue de 150000 segundos.

La concentración de actividad de los distintos radionucleidos se calcula a partir del área neta de los fotopicos brindada por el software GammaVision, la eficiencia del detector, la probabilidad de emisión, el tiempo de medida y la masa de la muestra.

La eficiencia para el fotopico se calcula midiendo estándares de la IAEA utilizando los mismos fotopicos y rango de energía (en el sistema "Region of interest", (ROI)) que para la muestra y la relación cuentas por segundo en el fotopico y desintegraciones por segundo del estándar. La cuantificación de Radionucleidos naturales utilizando esta metodología ha sido validada en el Departamento de Desarrollo Tecnológico (DDT) previamente [56].

Para cada tipo de material se evaluó las concentraciones máximas, mínimas, y medias de los Radionucleidos naturales, y se compararon con resultados y recomendaciones internacionales.

Para evaluar la emanación de  $^{222}\text{Rn}$  se diseñó y fabricó y verificó (en el DDT) una cámara de chequeo que permitió evaluar la emanación de  $^{222}\text{Rn}$  de los materiales de construcción muestreados mediante detectores de huella de estado sólido (solid-state nuclear track detector (SSNTD) de CR-39).

Los detectores de CR-39 se colocaron dentro de la cámara junto con el material, a una distancia fija por un período de tiempo de 3 meses. Los "track" o huellas generados por el impacto de las partículas alfa fueron revelados mediante "etching" químico básico y cuantificados por microscopía óptica ( $\text{tk}/\text{cm}^2$ ) en un medidor de huellas Politrack Mi.am Srl. Para cuantificar  $^{222}\text{Rn}$  mediante detectores de SSNTD es necesario su calibración con una fuente abierta de  $^{226}\text{Ra}$  certificada ( $\text{tr}/\text{cm}^2$  por  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Dicha calibración fue realizada por el Instituto Politecnico di Milano. La concentración de  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) fue calculada considerando el tiempo de exposición y los valores obtenidos fueron comparadas con los valores recomendados [13-14].

Una vez cuantificadas las concentraciones de actividades de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , y la emanación de  $^{222}\text{Rn}$

Rn se evaluaron los riesgos radiológicos a los cuales están expuestos los habitantes debidos a ellos, utilizando índices recomendados por organismos internacionales.

Para evaluar la exposición externa se utilizó el Índice de concentración de actividad (I), que se calculó a partir de las concentraciones de actividades medidas. Los valores obtenidos fueron comparados con los de uso seguro de materiales de construcción recomendados [11, 5].

La evaluación de la exposición interna se realizó en base al estudio de índices radiológicos debidos a las concentraciones de los radionucleidos naturales antes evaluados 226-Ra, 232-Th y 40-K. Se utilizó para ello el índice de daño interno (internal hazard index Hin) y el índice alfa (Ialfa). Dichos valores fueron comparados con los valores de uso seguro recomendados por OECD y la IAEA [61].

Aquellas muestras que se consideren de relevancia - por su concentración de Radionucleidos Naturales - se les realizó un análisis por Difracción de Rayos X (XRD) para identificar los minerales pesados presentes. Se identificó el grupo de materiales con mayor potencial de emanación de 222-Rn y mayor índice de concentración de actividad para profundizar los estudios de evaluación de dosis en hogares.

Finalmente se difundieron los resultados obtenidos, en congresos nacionales e internacionales, en actividades de enseñanza y de extensión para escolares, liceales y público en general. Se está en proceso de elaboración de manuscrito para publicación en revista internacional con referato.

### **Resultados, análisis y discusión**

Se llevaron a cabo todas las actividades planificadas para alcanzar tanto los objetivos específicos como los generales del proyecto. A continuación se detallan algunos de los resultados obtenidos, no se muestra el detalle de los mismos ya que están aún en proceso de elaboración de manuscrito para publicar en revista internacional con revisión por pares.

Los materiales analizados presentan una concentración de actividades de emisiones gamma, medida a través de los radionucleidos 226-Ra, 232-Th y 40-K, que varía en un amplio rango de valores expresados en Bq/kg, sin seguir una distribución normal. Esta variabilidad es esperable debido a la distribución de estos radionucleidos en la corteza terrestre y a la diversidad de los materiales analizados.

La concentración de actividad del 226-Ra fluctúa entre  $3.07 \pm 0.59$  y  $138.7 \pm 8.0$  Bq/kg, la del 232-Th varía desde el límite mínimo de concentración de detectable (MDA) ( $1.0$  Bq/kg) hasta  $216 \pm 13$  Bq/kg, y la del 40-K oscila entre  $11.1 \pm 4.0$  y  $1330 \pm 104$  Bq/kg. Las mayores concentraciones de actividad para los tres radionucleidos se encuentran en materiales graníticos. Los valores obtenidos se encuentran en el mismo orden que los obtenidos para materiales de construcción en Brasil [62]. En todos los casos, los valores se mantienen por debajo de los límites recomendados por organismos internacionales [5,6,61].

En cuanto al potencial de emanación de 222-Rn, la concentración medida varía entre menos del límite de detección ( $40$  Bq/m<sup>3</sup>) y  $640 \pm 97$  Bq/m<sup>3</sup>. Los valores más altos de emanación de 222-Rn se encuentran en los materiales graníticos. Es importante destacar que estos valores corresponden al máximo potencial de emanación, ya que la muestra fue evaluada en su estado molido. Para una evaluación en contextos residenciales, se debe considerar el material en su forma a granel (bulk). En este caso, la emanación real dependerá de factores como la porosidad del material, la densidad, la capacidad de blindaje del entorno, así como de las condiciones habitacionales, incluyendo la ventilación del hogar.

Los valores de índice de concentración de actividad (I), utilizado para evaluar el riesgo radiológico por exposición externa a emisores gamma y el valor de índice alfa (Ialfa), utilizado para evaluar el riesgo radiológico por exposición interna a 222Rn se encuentran en el rango  $0.024 - 1.96$  y  $0.018 - 0.694$  respectivamente.

Los materiales que presentan mayores valores de ambos índices son los granitos. Ambos índices se encuentran por debajo de los valores recomendados como límite seguro para materiales de construcción en

bulk. Dichas recomendaciones son conservadoras y se calculan para que el límite de dosis para público de 1 mSv anual no sea excedido aún cuando todo el hogar sea construido con ese material.

Para materiales bulk la IAEA [61] recomiendan un valor de 1 para el índice de concentración de actividad (I) mientras que para materiales de recubrimiento (como es el caso de los granitos) valores mayores. Dicha recomendación también es brindada por la Unión Europea, la cual indica que el valor 1 del índice de concentración de actividad puede usarse como herramienta de cribado conservadora para identificar aquellos materiales que puedan ocasionar la superación del nivel de referencia establecido en el artículo 75, apartado 1. El cálculo de la dosis debe tener en cuenta otros factores, como la densidad, el espesor del material y factores relativos al tipo de construcción y al uso previsto del material (en grandes cantidades o como recubrimiento) [5].

De los resultados obtenidos se puede concluir que los materiales de construcción analizados presentan índices seguros para su uso en hogares. Como trabajo futuro, los granitos podrían ameritar una evaluación de aporte a la dosis en hogares, ya sea in-situ o a través de código de simulación como es el desarrollado por el National Argonne Laboratory, RESRAD Built [63].

### **Conclusiones y recomendaciones**

Se logró evaluar la influencia de los materiales de construcción utilizados en Uruguay sobre la dosis equivalente anual (externa e interna) recibida por la población.

Se logró determinar la concentración de actividad radionucleidos naturales emisores gamma, cuantificar el potencial de emanación de  $^{222}\text{Rn}$  en estos materiales y evaluar el riesgo radiológico a ellos asociado.

A partir de los resultados, se concluye que los materiales de construcción analizados presentan índices que son seguros para su uso en hogares. Además, se recomienda que los materiales de tipo granito sean objeto de una evaluación adicional del aporte a la dosis en contextos residenciales, ya sea mediante mediciones in situ o mediante simulaciones, como el software RESRAD Built desarrollado por el National Argonne Laboratory.

## Productos derivados del proyecto

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
Resumen de conferencia publicado	Radionucleidos naturales en materiales de construcción utilizados en Uruguay	A. Nogueraa, R. Reboulaz, H. Bentos Pereira, L. Fornaro		<a href="https://hdl.handle.net/20.500.12381/3552">https://hdl.handle.net/20.500.12381/3552</a>	Finalizado
Resumen de conferencia publicado	First attempts to assess the radiological risk due to the presence of natural radionuclides in construction and building materials used in Uruguay	Ana Noguera, Rodolfo Reboulaz, Heinkel Bentos Pereira, Laura Fornaro		<a href="https://hdl.handle.net/20.500.12381/3554">https://hdl.handle.net/20.500.12381/3554</a>	Finalizado
Resumen de conferencia publicado	Evaluación del riesgo radiológico potencial por exposición residencial al <sup>222</sup> Rn en Uruguay	Reboulaz R. , Bentos Pereira H., Fornaro L., Noguera A.		<a href="https://hdl.handle.net/20.500.12381/3553">https://hdl.handle.net/20.500.12381/3553</a>	Finalizado

## Referencias bibliográficas

1. UNSCEAR, The 2008 Report to the General Assembly, 2008.
2. Máduar MF, Campos MP, Mazzilli BP, Villaverde FL. Assessment of external gamma exposure and radon levels in a dwelling constructed with phosphogypsum plates. J Hazard Mater. 2011 Jun 15;190(1-3):1063-7. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.03.019. Epub 2011 Mar 12. PMID: 21458158.



3. Radiation protection 112, "Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials", 1999.
4. ICRP82, "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure", Ann. ICRP 29 (1-2), 1999.
5. Council Directive Directive 2013/59/EURATOM. <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>. 2013.
6. IAEA "International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for safety of radiation sources", 1994.
7. IAEA "Occupational radiation protection in the mining and processing of raw materials", RS-G-1.6, 2004.
8. IAEA "Radiation and waste safety in the oil and gas industry", 34, 2003.
9. IAEA "Radiation protection against radon in workplaces other than mines" 33, 2003.
10. IAEA "Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials" 49, 2006.
11. OECD, Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Nuclear Energy Agency, Paris, 1979.
12. ICRP65, "Protection Against Radon-222 at Home and at Work", 23, 2, 1994.
13. ICRP82, "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure", Ann. ICRP 29 (1-2), 1999.
14. <http://www.epa.gov/radon>
15. Panteli?, G.K., Todorovi?, D.J., Nikoli?, J.D. et al. Measurement of radioactivity in building materials in Serbia. J Radioanal Nucl Chem 303, 2517–2522 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3745-2>
16. UNSCEAR "Sources and effects of ionizing radiation", 2000.
17. George AC (1990) An overview of instrumentation for measuring environmental radon and radon progeny. IEEE Trans Nucl Sci 37:892–901
18. El-Bradry B.A, Al-Naggger T.I., J. of Radiation Research and Applied Science 11(4): 355-360, 2018.
19. Nur Syamsi Syam, Sooyeon Lim, Hae Young Lee, Sang Hoon Lee, Determination of radon leakage from sample container for gamma spectrometry measurement of  $^{226}\text{Ra}$ , Journal of Environmental Radioactivity, 220–221, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106275>.
20. I. Lopez-Coto, J. L. Más, E. G. San Miguel, J. P. Bolivar, D. Sengupta, (2009) A comparison between active and passive techniques for measurements of radon emanation factors. Applied Radiation and Isotopes, 67, 849-853
21. Andrey Tsapalov, Konstantin Kovler, Control of radon emanation at determination of activity concentration index for building materials, Construction and Building Materials, 160, 2018, 810-817, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.116>.
22. Scholten JC, Osvath I, Pham MK (2013)  $^{226}\text{Ra}$  measurements through gamma spectrometric counting of radon progenies: how significant is the loss of radon? Mar Chem 156:146–152. doi:10.1016/j.marchem.2013.03.001
23. Girault, F. & Perrier, F., Measuring effective radium concentration with large numbers of samples. Part 2 —general properties and representativity, J. Environ. Radioact., 113, 177–188, 2012.
24. Norma UY 100 - Reglamento básico de protección y seguridad radiológica (Revisión IX), <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/norma-100-reglamento-basico-proteccion-seguridad-radiologica-revision-ix>, visitado 2 de agosto de 2024.
25. R.M. Anjos, N. Umisedo, A.A.R. da Silva, L. Estellita, M. Rizzotto, E.M. Yoshimura, H. Velasco, A.M.A. Santos, Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina, Journal of Environmental Radioactivity, 101,2, 2010, 153-158, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.010>.
26. Canoba, A.C.; Arnaud, M.I.; López, F.O. y Oliveira, A.A. Mediciones de gas radón en el interior de viviendas de la República Argentina PI-16/98 de la Autoridad Regulatoria Nuclear, Argentina, 1998.
27. A.O. Ferreira, B.R.S. Pecequilo and R.R. Aquino, Application of a "Sealed Can Technique" and CR-39 detectors for measuring radon emanation from undamaged granitic ornamental building materials,

Radioprotection, vol. 46, n 6, 2011.

28. Cazula. C, Pires-Campos M, Mazzilli B.P. Gamma exposure due to building materials in a residential building at Peruibe, So Paulo, Brazil, J. Radioanal Nucl Chem, 306, 637-640, 2015. [10.1007/s10967-015-4362-4](https://doi.org/10.1007/s10967-015-4362-4)

29. Máduara M.F, Mazzillia B.P., Nistia M.B. Radiation hazard indices in the application of phosphogypsum mixtures as a building material: proposal for a Brazilian regulation, B. Journal of Radiation Sciences), 07-03, 2019.

30. Giuseppe La Verde, Adelaide Raulo, Vittoria D'Avino, Vincenzo Roca, Mariagabriella Pugliese, Radioactivity content in natural stones used as building materials in Puglia region analysed by high resolution gamma-ray spectroscopy: Preliminary results, Construction and Building Materials, 239 117668, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117668>.

31. C. Sabbarese, F. Ambrosino, A. D'Onofrio, V. Roca, Radiological characterization of natural building materials from the Campania region (Southern Italy), Construction and Building Materials, 268, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121087>.

32. S. Righi, S. Verità, A. Albertazzi, P.L. Rossi, L. Bruzzi, Natural radioactivity in refractory manufacturing plants and exposure of workers to ionising radiation,, J. Of Environmental Radioactivity 100, 2009, 540-546. Dentoni V et al. Construction and Building Materials 247, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.03.008>

33. S. Pavlidou, A. Koroneos, C. Papastefanou, G. Christofides, S. Stoulos, M. Vavelides, Natural radioactivity of granites used as building materials, Journal of Environmental Radioactivity, 89, 1, 2006, 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.03.005>

34. Hatungimana D. et al. Evaluation of Natural Radioactivity Levels and Potential Radiological Hazards of Common Building Materials Utilized in Mediterranean Region, Turkey Journal of Green Building (2020) 15 (1): 107–118.

35. H.S. Gökçe, B. Canbaz Öztürk, N.F. Çam, Ö. Andiç-Çakır, Natural radioactivity of barite concrete shields containing commonly used supplementary materials, Construction and Building Materials 236, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117569>.

36. de Jong, P; van Dijk, W; van der Graaf, E R.; More, NATIONAL SURVEY ON THE NATURAL RADIOACTIVITY AND <sup>222</sup>Rn EXHALATION RATE OF BUILDING MATERIALS IN THE NETHERLANDS Health Physics, 91, 3, 2006, 200-210. [10.1097/01.HP.0000205238.17466.1c](https://doi.org/10.1097/01.HP.0000205238.17466.1c)

37. M. Dose, J. Silfwerbrand, C. Jelinek, J. Tragårdh, M. Isaksson, Naturally occurring radioactivity in some Swedish concretes and their constituents e Assessment by using I-index and dose-model J. Of Environmental Radioactivity 15-156, 105-111, 2016.

38. Sas Z, Somlai J, Szeiler G, Kovács T (2015) Usability of clay mixed red mud in Hungarian building material production industry. J Radioanal Nucl Chem 306(1):271–275. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3966-z>

39. Sos. K, et al., Advances in Natural Science, 8 (2), 10-15, 2015.

40. Kuzmanovic et al. Radioactivity of building materials in Serbia and assessment of radiological hazard of gamma radiation and radon exhalation, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020. [10.1007/s10967-020-07130-8](https://doi.org/10.1007/s10967-020-07130-8)

41. K. Iwaoka, M. Hosoda, N. Suwankot, Y. Omori, T. Ishikawa, H. Yonehara, S. Tokonami, Natural radioactivity and radon exhalation rates in man-made tiles used as building materials in Japan, Radiation Protection Dosimetry, 1-3, 2015. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv230>

42. G. Senthilkumar, Y. Raghu, S. Sivakumar, A. Chandrasekaran, D. Prem Anand, R. Ravisankar, Natural radioactivity measurement and evaluation of radiological hazards in some commercial flooring materials used in Thiruvannamalai, Tamilnadu, India, Journal of Radiation Research and Applied Sciences,, 1(7), 116–122 , 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2013.12.009>

43. Xinwei, L. (2005). Natural radioactivity in some building materials of Xi'an, China. Radiation

Measurements, 40, 94-97.

44. Feng, T, Lu, X, Indoor and Built Environment, 1-9, 2015.

45. M Tufail et al. Natural radioactivity hazards of building bricks fabricated from saline soil of two districts of Pakistan, J. O Radiol. Prot., 27, 4, 2007, 481. 10.1088/0952-4746/27/4/009

46. M. Ngachin, et al. Assessment of natural radioactivity and associated radiation hazards in some Cameroonian building materials, Radiation Measurements, 42, 1, 2007, 61-67.

47. M. A. M. Uosif , et al. Experimental Evaluation of Radiological Hazards in Ceramic Tiles Used in the Jos-South, Area of Plateau State, Nigeria, International Journal of Advanced Science and Technology Vol.80 (2015), pp.19-30.

48. Ferdoas S. et al. Journal of Nuclear and Radiation Physics, Vol. 2, No. 1, 2007, pp. 25-36.

49. Arabi, A.S., Funtua, I.I., Dewu, B.B.M. et al. Background radiation and radiological hazard associated with local building materials around Zaria, Nigeria. Radiochemistry 57, 207–212 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1066362215020149>

50. Pantelic G. et al. (2018) "Literature review of Indoors radon surveys in Europe", JRC Technical report. European Commission.

51. C. Sabbarese, F. Ambrosino, A. D'Onofrio, M. Pugliese, G. La Verde, V. D'Avino, V. Roca, The first radon potential map of the Campania region (southern Italy), Applied Geochemistry 126(3):104890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104890>

52. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/zonemapcolor.pdf>

53. Silva N.C. et al Towards a Brazilian radon map: consortium radon Brazil Radiation Protection Dosimetry 160(1–3): 226–230, 2014. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu089>

54. Vienneau D. et al. Residential radon e Comparative analysis of exposure models in Switzerland. Environmental Pollution 271, 15 2021, 116356. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116356>

55. Sharma S et al. Dose estimation from the exposure to radon, thoron and their progeny concentrations in the environs of Kangra area, Himachal Himalayas, India. Groundwater for Sustainable Development Volume 11, October 2020, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100409>

56. A. Noguera (Tesis) "Irradiación y contaminación radiactiva natural en el ecosistema costero del Departamento de Rocha, Uruguay, y su incidencia en aspectos sociales, laborales y productivos", 2018.

57. A. Noguera, H. Bentos Pereira, L. Fornaro. "Natural radionuclide survey in the coastal strip of the 290 Ramsar site, Uruguay", Env.Earth.Science 22, 2018. 10.1007/s12665-018-7944-y

58. Noguera, A., Bentos Pereira, H., Fornaro L, "Assessment of radiation hazard indices due to naturally occurring long-life radionuclides in the coastal area of Barra de Valizas, Uruguay" ., L. Environ Geochem Health (2023). <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01654-0>

59. A. Noguera, G. Azcune, H. Bentos Pereira, Fornaro, L. "Radionuclide distribution in the Barra de Valizas - Aguas Dulces Region, Uruguay"., Environmental Earth Sciences, v.: 81 p.:195, DOI:10.1007/s12665-022-10318-8, 2022

60. Noguera, A., Bentos Pereira, H. & Fornaro, L. Radiometric Investigation of Black Sands as Naturally Occurring Radioactive Materials for Building Materials in Aguas Dulces, Uruguay. Pure Appl. Geophys. 181, 495–506 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03438-8>

61. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control of Exposure Due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials, Safety Reports Series No. 117, IAEA, Vienna (2023)

62. C.L. Moura, A.C. Artur, D.M. Bonotto, S. Guedes, C.D. Martinelli, Natural radioactivity and radon exhalation rate in Brazilian igneous rocks, Applied Radiation and Isotopes, Volume 69, 7, 2011, 1094-1099, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.03.004>.

63. <https://resrad.evs.anl.gov/codes/resrad-build/>

