A large, stylized graphic on the left side of the page. It features a crown at the top, followed by a shield containing four green triangles pointing upwards. The entire graphic is rendered in a light green color against the dark green background.

Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias



**Guía técnica de buenas prácticas
frente a la exposición al radón
en las instalaciones hidráulicas
subterráneas de Canarias**

Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias

Servicio de Minas. Dirección General de Industria.
Gobierno de Canarias



Gobierno de Canarias

Consejería de Turismo,
Industria y Comercio

Dirección General de Industria

Edición: la guía de recomendaciones técnicas y buenas prácticas para la protección frente a la exposición del gas radón en galerías de agua y pozos en Islas Canarias, ha sido editada conjuntamente por la Dirección General de industria y la Universidad de La Laguna, con la colaboración del Consejo de Seguridad Nuclear.

Autores: Juan Carlos Santamarta Cerezal, (Dr. en Geología Ambiental y Aplicada, Ingeniero Técnico de Minas, Universidad de La Laguna). Noelia Cruz Pérez, (Graduada en Ingeniería Civil, Universidad de La Laguna). Jesica Rodríguez Martín, (Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Laguna). Luis E. Hernández Gutiérrez (Doctor en Ciencias Geológicas, Gobierno de Canarias). Marta García Talavera, (Doctora en Ciencias Físicas, Subdirección de Protección Radiológica Ambiental, Consejo de Seguridad Nuclear). Rayco Marrero Díaz, (Doctor en Ciencias Geológicas)

Dirección y Coordinación Técnica:

Ángel Morales González-Moro. Servicio de Minas. Dirección General de Industria. Gobierno de Canarias. Ingeniero de Minas.

Rafael J. Lario Báscones. Servicio de Minas. Dirección General de Industria. Gobierno de Canarias. Ingeniero de Minas.

Coordinación Científica:

Juan Carlos Santamarta Cerezal. Universidad de La Laguna.

1ª Edición: noviembre 2020

ISBN: 978-84-09-25247-3

Depósito legal: TF 695-2020

DOI: <https://doi.org/10.25145/b.GuiahidraulicasCanarias.2020>

Cómo citar esta guía:

Santamarta, J.C., et al. (2020). *Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias*. Tenerife: Gobierno de Canarias y Universidad de La Laguna, doi: <https://doi.org/10.25145/b.GuiahidraulicasCanarias.2020>

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso escrito del autor y editores.

Prólogo

El agua es el recurso vital por antonomasia para el ser humano, de su disponibilidad depende nuestra subsistencia, como seres vivos y como sociedad.

En nuestras islas, el suministro de agua ha estado íntimamente ligado al aprovechamiento de la que se almacena en el subsuelo. El acceso a estos almacenamientos de agua conlleva riesgos, dificultad y un duro trabajo. La perforación de profundas galerías y pozos ha permitido a nuestros campos, a nuestra industria y a nuestra sociedad en general crecer y desarrollarse, pero a un alto precio, el precio del esfuerzo y la tenacidad de todas aquellas personas que han trabajado para hacer aflorar del interior de la tierra el preciado líquido.

Muchos son los peligros que afrontan las personas que trabajan en la minería del agua, la penosidad y peligrosidad de esta labor es evidente: desprendimientos, espacio confinado, temperaturas elevadas, atmósfera nociva, herramientas pesadas, explosivos, etc.

En su afán de velar por la seguridad en estas labores y como Autoridad Minera competente, la Dirección General de Industria, a través del personal del Servicio de Minas y con el respaldo del Consejo de Seguridad Nuclear, ha estado llevando a cabo, en colaboración con la Universidad de La Laguna un proyecto de evaluación del riesgo que implica la presencia del gas radón para las personas que trabajan en la perforación y mantenimiento de las galerías y pozos de agua canarios.

Los datos manejados en la Guía que ahora presentamos actualizados, incluyen las últimas medidas realizadas en 2020 y las conclusiones que se extraen de aquellos, así como las implicaciones que para la seguridad laboral tienen en cuenta, no sólo la legislación vigente sino las previsiones de modificación de la misma, con base en los diferentes proyectos legislativos a nivel nacional y europeo.

Esperamos que esta Guía sirva para mejorar la seguridad en los trabajos subterráneos relacionados con el agua, aunque sus conclusiones y recomendaciones bien pueden hacerse extensibles a otros campos de actividad análogos, como la minería tradicional o la perforación de túneles. Desde la Dirección General de Industria, seguiremos trabajando siempre con el objetivo del avance y desarrollo de nuestra tierra pero sin perder de vista la seguridad de aquellas personas que, con su trabajo y esfuerzo, los hacen posible.

Yolanda Luaces Hernández
Directora General de Industria
Gobierno de Canarias

Índice de contenido

1.	Introducción	13
2.	Objetivos	14
3.	El radón en las Islas Canarias	15
3.1.	Radiactividad y radiaciones ionizantes	15
3.1.1.	Abundancia	16
3.1.2.	Migración	17
3.2.	El radón en terrenos volcánicos	20
3.3.	Las galerías/minas de agua en los terrenos volcánicos	27
3.4.	Procedimientos constructivos de las galerías	31
3.5.	Pozos en terrenos volcánicos	35
3.6.	Relación de las aguas subterráneas con el radón	36
3.7.	Antecedentes en estudios relacionados con el radón y la actividad laboral en las galerías de agua y pozos tradicionales de las Islas Canarias	37
4.	Reglamentación y normativa aplicable	45
5.	Sistemas de medición del gas radón	46
6.	Declaración de actividad laboral, estudios de riesgo y medidas de protección radiológica en lugares de trabajo	50
7.	Exposición al gas radón en los puestos de trabajo	63

8. Cálculo de la dosis por radón	66
9. Recomendaciones	68
10. Referencias y bibliografía recomendada	70
APÉNDICE: Definiciones	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Niveles máximos, mínimos y promedios de radón (expresado en $Bq \cdot m^{-3}$) en diferentes ambientes superficiales y subsuperficiales. Fuente: Modificado de USGS (1992)	20
Tabla 2. Abundancia del uranio y torio en algunas rocas más frecuentes de la corteza terrestre. Modificado de: Hernández (2018). Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear. (2000)	22
Tabla 3. Resultados de las concentraciones de gas radón en las minas seleccionadas de La Palma, el Hierro y Tenerife	41
Tabla 4. Resultados de la concentración de gas radón medidos en 5 pozos de la isla de Gran Canaria	44

Índice de Figuras

Figura 1. Basalto masivo (izq.) dentro de una galería y escombro (der.) basalto perforado mediante explosivos. Al romperse la roca se libera más cantidad de radón en el ambiente. Fuente: Santamarta J.C.	21
Figura 2. Mapa del potencial de radón en las Islas Canarias. Fuente: CSN	24
Figura 3. Mapa del potencial de radón de Tenerife. P90 es la distribución de los niveles de radón medidos en los edificios de esa zona; el 10 % supera este nivel. Fuente: CSN	25

Figura 4. Sección de una galería de agua, con un canal abierto a la derecha. Fuente: Santamarta J.C.	27
Figura 5. Frentes de galería con agua (izq.) y seca (der.). Fuente: Santamarta J.C.	28
Figura 6. Galería en fase de reperforación para aumentar los caudales. Fuente: Santamarta J.C.	32
Figura 7. Diferentes materiales atravesados por el trazo de la galería. Fuente: Santamarta J.C.	34
Figura 8. Revestimiento interior de un pozo canario. Fuente: Santamarta, J.C.	35
Figura 9. Localizaciones de los puntos de estudio en las islas de La Palma, El Hierro y Tenerife	39
Figura 10. Detector pasivo colocado en una galería, en el techo se marca una señal con un reflectante. Fuente: Santamarta, J.C.	40
Figura 11. Detectores pasivos utilizados en el proyecto para medir el gas radón en las galerías	40
Figura 12. Localización de los pozos seleccionados para la medición de gas radón en la isla de Gran Canaria	45
Figura 13. Dosímetro de radón de solapa. Fotografía cortesía de Radonova Laboratories	48
Figura 14. Detector activo colocado en una galería (izq.), este tipo de detectores necesitan un tiempo para poder facilitar una primera lectura (der.). Fuente: Santamarta, J.C.	49
Figura 15. Esquema de medida puntual de gas radón y torón en el suelo. Fuente: Padrón (2008) ^{II}	50
Figura 16. Mapa de potencial de radón de España. Fuente: CSN	53
Figura 17. Detectores pasivos de radón en el momento del suministro	58
Figura 18. Colocación del detector pasivo de gas radón	59
Figura 19. Esquema del origen del radón y su peligro para la salud. Fuente: CSN (2013)	62

1. Introducción

El radón es un elemento radiactivo que se presenta en la naturaleza en forma de tres isótopos, siendo el más abundante el Rn-222, en adelante, radón. La cadena de desintegración de los isótopos que participan en la generación del radón (Rn-222), se inicia con el uranio (U-238), pasando por otros radionúclidos como el torio-230 o el radio-226, que a su vez se desintegra en el radón. Dado que el radón es un gas procedente en su mayor parte de las rocas y de los suelos, si se dan las condiciones adecuadas, tiende a acumularse en el aire interior de las estructuras subterráneas (túneles, sótanos, galerías, pozos, etc.) y de los edificios, pudiendo llegar a niveles que son perjudiciales para la salud. Estudios médicos y ambientales indican que las radiaciones asociadas al radón son la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco y la primera para los no fumadores. Por ello, las autoridades han desarrollado una normativa que establece los niveles máximos permitidos de exposición al radón, especialmente en recintos cerrados, como viviendas o lugares de trabajo.

La radiactividad de este gas hace que sea necesaria la realización de unas recomendaciones técnicas específicas para Canarias, que minimicen los riesgos derivados de la expo-

sición al radón para los trabajadores de las galerías y pozos de agua.

2. Objetivos

En el presente documento se dan las pautas necesarias a realizar para la medición del gas radón en las instalaciones de extracción de agua potable, como son los pozos y las galerías. Además, se ofrecen recomendaciones para la protección del personal vinculados a las infraestructuras de aguas subterráneas en las Islas Canarias frente al gas radón, con la finalidad de reducir la exposición a este gas y, por lo tanto, los riesgos para su salud derivados de dicha exposición, así como dar cumplimiento a la reglamentación aplicable en materia de protección radiológica ocupacional.

La Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad requiere que se lleven a cabo medidas de radón en el aire interior en los siguientes lugares de trabajo: *i)* obras subterráneas; *ii)* lugares de trabajo en los que se trate o aproveche agua de origen subterráneo; *iii)* lugares de trabajo en «áreas identificadas» por presentar un riesgo significativo de inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta. Estas zonas se corresponden con aquellas cuya geología pueda generar o favorecer el transporte al interior de lugares cerrados de grandes cantidades de radón, tales como zonas graníticas, zonas volcánicas o zonas de fallas activas. Por este motivo, las Islas Canarias, de origen volcánico, requieren de una especial atención y en los mapas del CSN figuran como una región con zonas de mayor exposición potencial al radón.

3. El radón en las Islas Canarias

3.1. Radiactividad y radiaciones ionizantes

La radiactividad fue descubierta de forma casual por Henri Becquerel (1896) en París, cuando experimentaba, con sales de uranio y con unas placas fotográficas, la producción de rayos X por acción de los rayos del sol. El cielo se nubló unos días y guardó en un cajón de su laboratorio las sales junto con las placas; su sorpresa fue que las placas quedaron intensamente impresionadas, deduciendo que la radiación provenía del uranio contenido en las sales. Años más tarde, trabajando en la misma línea, Marie Skłodowska Curie y su marido Pierre Curie (1898) descubrirían un nuevo elemento químico, el radio, lo que les hizo valedores del premio Nobel.

La emisión de radiación por parte de los elementos atómicos está asociada a los denominados isótopos radiactivos. La estructura de los átomos se puede simplificar en un núcleo formado por protones y neutrones, con una nube de electrones que lo rodea. Un elemento atómico tiene un número fijo de protones en el núcleo, pero el número de neutrones puede variar, dando lugar a distintos isótopos de ese elemento. Los isótopos pueden tener núcleos estables o inestables. Los primeros mantienen el mismo número de protones y de neutrones de forma permanente, pero los segundos pueden perder neutrones con el paso del tiempo y dar lugar a nuevos isótopos; a estos se les conoce como isótopos radiactivos o radionucleidos. Así pues, la radiactividad es una propiedad por la que los isótopos ra-

diactivos se desintegran dando lugar a nuevos átomos y emitiendo a la vez radiaciones en forma de partículas (alfa, beta, neutrones, protones) o radiación gamma. Al conjunto de estas radiaciones se las conoce como radiación ionizante, porque al interactuar con la materia que la rodea puede disociarla formando iones.

3.1.1. Abundancia

Las rocas con mayor contenido de elementos de la serie de desintegración del uranio son las rocas ígneas intrusivas y efusivas ácidas, como los granitos o las riolitas, así como las rocas sedimentarias ricas en fosfatos y las rocas metamórficas derivadas de las mismas o de origen ígneo. Son estos tipos de rocas, por tanto, y los suelos formados de su meteorización, los que suelen presentar unas tasas más elevadas de generación de radón

Dado que el radón es un gas, su movilidad es mucho mayor que la de sus progenitores (de la serie de desintegración del uranio), los cuales se fijan en la fase sólida de las rocas y el suelo. Cada átomo de radio, que está en estado sólido, se desintegra emitiendo su núcleo, en un sentido, una partícula alfa y, en el sentido opuesto, el nuevo núcleo de radón en fase gaseosa. De esta forma, la profundidad a la que se localiza el átomo de radio en el grano mineral y la dirección hacia la que es emitido el átomo de radón (si es hacia la superficie o hacia el interior del grano) determinará si el nuevo átomo de radón ocupará el espacio intergranular o se quedará retenido en el ensamblaje mineral. Si el espacio intergranular hacia donde escapa el nuevo átomo

de radón está ocupado por agua (subterránea/edáfica), su movimiento se ralentiza inmediatamente, por lo que resulta más difícil que éste vuelva al grano mineral donde sería otra vez inmovilizado. De esta forma, las rocas y los terrenos más porosos, donde existe un mayor volumen de espacio intergranular, favorecen la liberación del gas radón al aire intersticial, así como el paso de este a la atmósfera.

3.1.2. Migración

La migración del gas radón, una vez generado por desintegración radiactiva del radio-226 presente en las rocas y los suelos derivados, se produce a través de dos mecanismos de transporte: difusión molecular y advección (o convección). La difusión es el mecanismo por el cual los átomos de radón se desplazan en función de los gradientes de concentración hacia los lugares donde la concentración es más baja. Por otro lado, la advección está relacionada con la permeabilidad del terreno, que condiciona el flujo de fluidos (especialmente del agua subterránea), pero también del gas de suelo, como el CO₂, el cual puede actuar como vehículo transportador del radón desde la zona de generación en profundidad hasta la superficie. Los gradientes de presión creados en los fluidos (gases o líquidos) que rellenan los espacios (poros y fisuras) de un terreno dan lugar a movimientos convectivos (si son verticales) y/o advectivos (si son laterales).

Como es de prever, el radón se mueve más fácilmente a través de suelos permeables, como las gravas y arenas gruesas, que a través de suelos arcillosos, los cuales son muy porosos pero poco permeables al aire, siempre que el con-

tenido volumétrico de agua se mantenga en niveles aceptables. A su vez, el radón disuelto en el agua se desplaza mucho más lentamente que el radón en el aire. La distancia que el radón se puede mover antes de que se desintegre en rocas y suelos saturados en agua es de tan sólo unos centímetros, mientras que en terrenos secos suele ser de hasta varios metros, aunque está documentado que el transporte advectivo de radón puede ocurrir en distancias de incluso unos pocos kilómetros a través caminos preferenciales (fallas, fisuras o cavidades y conducciones subterráneas).

Por esta razón, en áreas con concentraciones de radón en el gas del suelo relativamente normales (entre 1.000 y 50.000 Bq/m³)^[1] pero cuyo subsuelo sea muy permeable y seco, se pueden detectar niveles elevados de radón en el aire interior de los edificios o de las obras subterráneas.

Por otro lado, el agua de origen subterráneo también representa una fuente potencial de radón, ya que una vez éste se incorpora (disuelve) en ella, puede ser transportado hasta la zona donde es captada y consumida. Las áreas que presentan un mayor peligro por radón por el agua son aquellas en que las rocas o el suelo por las que discurrieron sus aguas poseen altos niveles de uranio, o bien zonas kársticas.

Independientemente de la composición de las rocas, los ríos y reservorios superficiales (embalses, presas, etc.)

¹ Becquerelios por metro cúbico es una unidad de actividad radioactiva por volumen de aire, está vigente como unidad en España, es unidad del Sistema Internacional. Es equivalente a una desintegración por segundo. Anteriormente la unidad de medida era el curio (Ci), su equivalencia es 1 curio equivale a 37000 millones de becquerelios.

suelen tener bajos niveles de radón ($< 2.000 \text{ Bq/m}^3$)^[2] ya que la mayor parte del radón que pudiera venir disuelto, procedente del agua subterránea, escapa hacia la atmósfera gracias a la agitación de estas, o a que, en abastecimientos superficiales, suele pasar el suficiente tiempo hasta que el agua llega al punto de consumo como para que decaigan casi por completo el radón disuelto y sus descendientes de vida corta (aproximadamente 4-5 días desde su formación).

En zonas cuyo suministro proviene de captaciones de agua subterránea con un contenido elevado en radón, sin embargo, se pueden dar acumulaciones de radón importantes en el aire interior de las viviendas o infraestructuras abastecidas con esa agua, y pueden suponer un problema para la salud. A modo orientativo, se estima que un agua corriente con una concentración de radón de 1.000 Bq/l podría dar lugar a un incremento de 100 Bq/l en la vivienda.

Las aguas subterráneas obtenidas en fuentes situadas en rocas graníticas, sieníticas, pegmatíticas, rocas volcánicas ácidas y gneis ácidos, presentan concentraciones de radón que varían de 50.000 a 500.000 Bq/m^3 . Por otro lado, en España, según datos del Consejo de Seguridad Nuclear, las mayores concentraciones de radón en el agua subterránea se dan en zonas kársticas: Cantabria, Comunidad Valenciana.

² Ministerio de Sanidad Consumo y Bienestar Social. (2019). Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano (p. 73). p. 73. Retrieved from https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/RA-DIActividad_EN_ACH_V2.pdf

Como resumen, el nivel o la abundancia de radón en un determinado punto del subsuelo depende de varios factores: la geología de la zona, que condiciona la concentración de elementos radiactivos (radio-226), y el grado de saturación de agua y de fracturación de la roca o la porosidad del suelo, que determinarán la permeabilidad y, por lo tanto, la facilidad con la que migra el radón una vez generado.

En la Tabla 1 se recogen los rangos típicos de variabilidad de la concentración de radón en la atmósfera, en el aire interior, en el aire edáfico o en el agua subterránea.

Ambiente	Máximo	Mínimo	Promedio
Agua subterránea	100.000.000	5.000	500.000
Aire edáfico	5.000.000	1.000	10.000
Aire interior	100.000	10	50
Aire exterior	1.000	1	10

Tabla 1. Niveles máximos, mínimos y promedios de radón (expresado en Bq·m⁻³) en diferentes ambientes superficiales y subsuperficiales. Fuente: Modificado de USGS (1992).

3.2. El radón en terrenos volcánicos

Las rocas ígneas presentan una gran variedad de contenidos de uranio y torio, en función de que el tipo de magmatismo sea más félsico/ácido o máfico/básico (Tabla 2). De esta forma, las rocas (y minerales) derivadas de magmas evolucionados o diferenciados (ricos en feldespatos y síli-

ce), poseen elevados contenidos de estos progenitores del radón (Figura 1), ya que, durante el transcurso de la fusión parcial y la cristalización fraccionada del magma, el uranio y el torio que se concentran en la fase líquida son incorporados a los productos más ricos en sílice³. Por el contrario, aquellas rocas (y minerales) productos de magmas menos evolucionados y, por lo tanto, ricos en hierro y magnesio y pobres en sílice, poseen contenidos de uranio y torio prácticamente despreciables.



Figura 1. Basalto masivo (izq.) dentro de una galería y escombros (der.) de basalto perforado mediante explosivos. Al romperse la roca se libera más cantidad de radón en el ambiente. Fuente: Santamarta J.C.

³ Hopke, P. (1987). The indoor radon problem explained for the layman. En: Hopke P, ed. Radon and its decay products. Washington, DC. American Chemical Society, 572-586.

TIPO DE ROCA	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U
Rocas ígneas			
Ultrabásicas	0,1	0,02	5
Intrusivas y efusivas básicas	3	0,6	5
Intrusivas y efusivas intermedias	5	2	2,5
Intrusivas y efusivas ácidas	15	4,5	3,3
Rocas sedimentarias			
Arenitas y ruditas (areniscas, arcosas, grauvacas y conglomerados)	5	1,5	3,3
Lutitas, arcillas y pizarras	12	3,5	3,4
Precipitados (calizas, dolomías, sideritas)	1	1,5	0,6
Precipitados (chert y chert de hierro)	3	2	1,5
Evaporitas (yesos y anhidritas)	0,2	0,1	2
Evaporitas (halita y silvina)	0,2	0,1	2
Rocas metamórficas			
Cuarcitas, metagrauvacas y metaconglomerados	5	1,5	3,3
Mármoles y dolomías cristalinas	1	0,5	2
Filitas, metargilitas, pizarras	10	2,5	4
Esquistos formados a partir de rocas ígneas	6	2	3
Esquistos de origen sedimentario	10	2	5
Anfibolitas formadas a partir de rocas ígneas	2	0,5	4
Anfibolitas de origen sedimentario	8	2	4
Gneises y granulitas	10	3	3,3
Serpentinitas	0,1	0,02	5
Hornfelds (formados a partir de rocas sedimentarias)	10	2	5
Skarn (formados a partir de rocas sedimentarias)	15	3	5

Tabla 2. Abundancia del uranio y torio en algunas rocas más frecuentes de la corteza terrestre. Modificado de: Hernández (2018). Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear. (2000).

Debido a esta variabilidad petrológica, resulta complejo extrapolar las propiedades radiológicas de los terrenos volcánicos de unas zonas a otras y se hace necesaria la caracterización de las formaciones geológicas de cada región. Dicha variabilidad es especialmente notable en las Islas Canarias donde, dadas las singularidades de su volcanismo (coexistencia de magmas básicos, intermedios y ácidos gracias a la existencia de edificios centrales y nula subsi-

dencia), se pueden encontrar rocas de un amplio abanico geoquímico.

Hay innumerables estudios científicos sobre el nivel de radón en las aguas, suelos y rocas de las Islas Canarias^[4]. Con respecto a las aguas subterráneas, los principales resultados de dichos estudios indican que los niveles de radón en las mismas están condicionados por uno o varios de los siguientes factores:

- El contenido en elementos progenitores del radón (serie del U-238) de las **rocas** por las que han circulado. Los mayores niveles de radón se correlacionan con circulación por rocas ígneas ácidas o diferenciadas (riolitas, sienitas, traquitas y fonolitas principalmente).
- Si han circulado o no a través de fallas, fracturas, fisuras u otras zonas de relativamente **elevada permeabilidad** que reciben un aporte de radón de zonas más profundas.
- La **mezcla con aguas** que presenten bajas concentraciones de radón, como por ejemplo las aguas de recarga o los retornos de riegos.

⁴ Marrero, M. (2010). Modelo Hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. 499 pp + anexos.

Santamarta, Juan C.; Hernández-Gutiérrez, Luis E.; Rodríguez-Martín, J.; Lario-Bascones, Rafael J.; Morales-González-Moro, Á.; Cruz-Pérez, N. (2020). Radon measurements in groundwater mines in La Palma and El Hierro, Canary Islands (Spain). Archives of Mining Sciences, 65(4), 864-876. <https://doi.org/10.24425/ams.2020.135182>

El mapa de potencial de radón de España, desarrollado por el Consejo de Seguridad Nuclear de España, utilizando un método híbrido que combina mediciones de radón en viviendas con información litoestratigráfica y medidas de tasa de exposición a la radiación gamma ambiental, identifica las islas de Tenerife y Gran Canaria entre las regiones que presentan niveles de potencial más elevados de toda España ($P90 > 400 \text{ Bq/m}^3$). Por el contrario, el resto de las islas se encuentra en el rango de niveles más bajos ($P90 < 100 \text{ Bq/m}^3$); ver Figura 2. En la Figura 3 se muestra el mapa de potencial de radón de la isla de Tenerife, en su versión simplificada para consulta on-line en la web del CSN^[5].

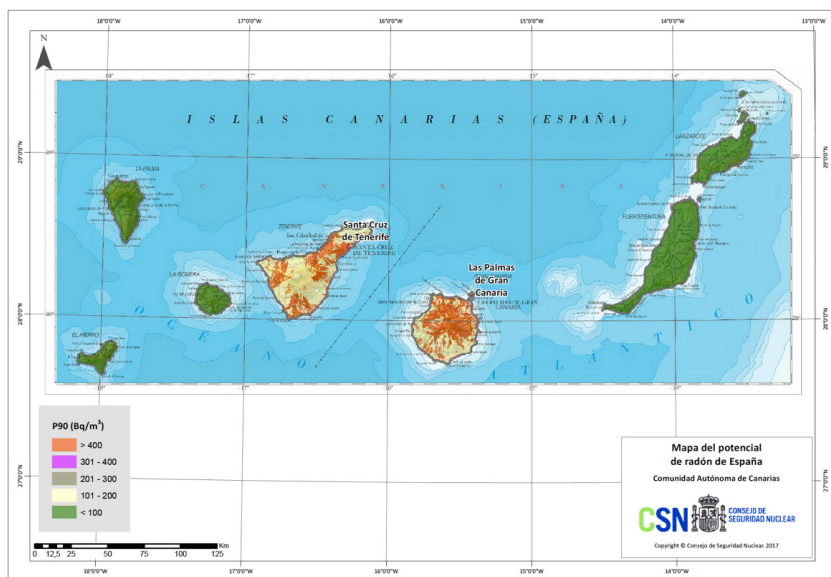


Figura 2. Mapa del potencial de radón en las Islas Canarias. Fuente: CSN

⁵ <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>

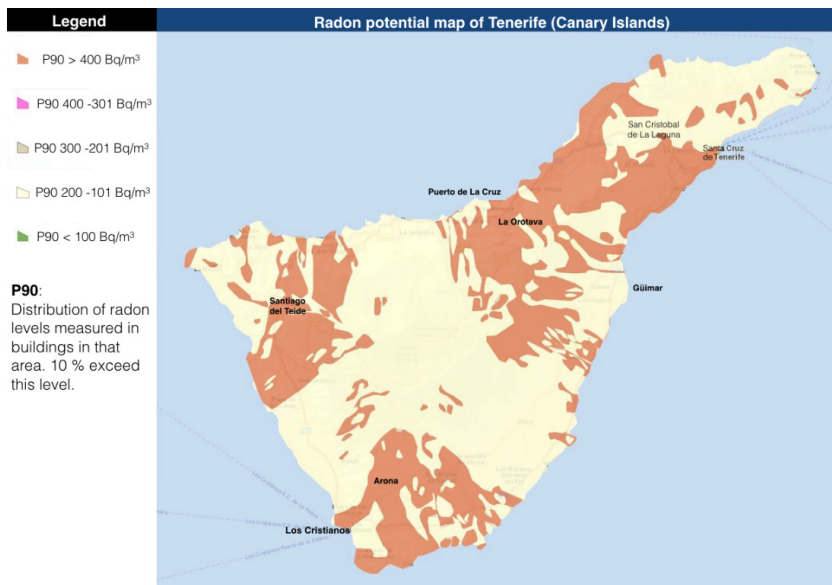


Figura 3. Mapa del potencial de radón de Tenerife. P90 es la distribución de los niveles de radón medidos en los edificios de esa zona; el 10% supera este nivel. Fuente: CSN

Para tener una referencia del contenido de gas radón en el agua subterránea se hace referencia a un estudio^[6] donde se midió el gas radón en el agua correspondiente a 28 muestras de pozos en bombeo en el norte de Gran Canaria. Las concentraciones medidas variaban en un rango de 0,3 a 76,9 Bq/l (300 a 76.900 Bq/m³), siendo todas inferiores al nivel de 100 Bq/l de referencia propuesto por la Comisión Europea para el radón disuelto en agua de con-

⁶ Alonso, H. (2015). El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 184 pp. + Anexos.

sumo humano^[7]. No obstante, la citada directiva permite, teniendo en cuenta las circunstancias nacionales, aumentar ese valor hasta 1.000 Bq/l. En la reglamentación española se ha adoptado un nivel de referencia para radón en abastecimientos de consumo humano de 500 Bq/l^[8].

Análogamente a las aguas subterráneas, el nivel de radón en los suelos está condicionado por factores similares, como el contenido de elementos progenitores en los mismos, o la presencia de zonas de mayor permeabilidad que favorezcan el aporte de radón profundo. No obstante, hay que destacar que también se ha identificado un importante control volcano-estructural en la distribución de los mayores niveles de actividad del radón, encontrándose las actividades más altas en el cono de cumbre del Teide, en Tenerife, y en las proximidades de las erupciones históricas y recientes de la isla^[9]. Esta distribución responde posiblemente a los procesos advectivos asociados con un flujo

⁷ Comisión Europea (2013). Commission Recommendation of 22 October 2013 on laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. Official Journal L 296/12, 2013/51/Euratom.

⁸ BOE. (2016). Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se modifican el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que (p. 21). p. 21. Madrid.

⁹ Martín-Luis, M. C., Steinitz, G., Soler, V., Quesada, M. L., Casillas, R. (2015). ²²²Rn and CO₂ at Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). The European Physical Journal Special Topics, 224 (4), 641-657. doi: 10.1140/epjst/e2015-02397-7

preferencial de CO₂ (gas) endógeno en dichas zonas, por ser áreas de mayor conexión con el sistema volcánico-hidrotermal profundo, el cual actúa como vehículo transportador del radón desde la zona de generación en profundidad hasta la superficie.

3.3. Las galerías/minas de agua en los terrenos volcánicos

En general, las minas o galerías de agua son perforaciones o túneles con una sola boca, denominada bocamina en el argot minero, y una sección media de 1,5 x 2 metros o incluso menor, aunque las realizadas por la Administración Canaria son de dimensiones sensiblemente mayores. Estas



Figura 4. Sección de una galería de agua, con un canal abierto a la derecha. Fuente: Santamarta J.C.

captaciones, tienen un solo punto de acceso al interior, pero pueden tener una o más bifurcaciones (ramales) secundarias, por lo que pueden alcanzar longitudes acumuladas superiores a los 6-7 km, aunque las longitudes más frecuentes están entre 2-3 km (Figura 4). Se denomina frente de la galería al punto más profundo de la misma, aunque también existen galerías con cierres hidráulicos antes del frente, por lo que no siempre coincide con el punto accesible más profundo. Normalmente los alumbramientos más importantes de aguas subterráneas se producen en el frente de la galería principal y/o los ramales. No obstante, suelen existir alumbramientos más o menos importantes a lo largo de la traza de la galería.

Sólo en las islas Canarias hay más de 1.500 galerías perforadas. Los trabajos de perforación se realizaban antiguamente con medios mecánicos, aunque el uso de explosivos se



Figura 5. Frentes de galería con agua (izq.) y seca (der.). Fuente: Santamarta J.C.

generalizó a mediados del siglo XX. Se disponen mediante una perforación ligeramente inclinada, por lo que no hace falta bombear el agua para su aprovechamiento.

La galería tiene como finalidad alcanzar el acuífero y extraer el agua (Figura 5). Normalmente, cuando se llega a la zona saturada, se produce un alumbramiento abundante y se drenan las denominadas aguas de reserva (más cargadas de sales, con mayor tiempo de residencia en el acuífero). Posteriormente, los caudales tienden a estabilizarse mediante las aguas renovables o de recarga (más jóvenes). La producción de las galerías oscila entre unos pocos litros por segundo y los dos centenares.

A continuación, se propone una clasificación de los tipos de galerías que existen en Canarias^[10]:

Galerías de nacientes

En el caso de las islas Canarias, existía un desconocimiento del acuífero insular, simplemente por observación, se notaba que existían unos nacientes en las vertientes —procedentes de acuíferos colgados—, por donde brotaba el agua, con unos caudales que para aquella época eran insuficientes. La iniciativa privada emprendió la tarea de excavar esos manantiales, con la esperanza de alcanzar caudales mayores, lo que dio lugar a otra modalidad de

¹⁰ Santamarta J.C. (2016). Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas. Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España: Sevilla.

mina, aquella que aprovecha antiguos nacientes en la ladera, vinculados a acuíferos colgados. Por este motivo, tienen poca longitud, de 10 a 100 metros, en comparación con las otras galerías convencionales. La idea principal era aumentar los caudales de los nacientes. Muchas de estas minas de nacientes, han acabado siendo minas o galería de agua, en algunos casos con más de 6 kilómetros de longitud.

Galería «en trancada»

Otro tipo son las galerías, son las denominadas «en trancada», denominadas inclined shaft en Hawai. Se trata de una mina que parte de la costa, con una inclinación hasta que alcanza el nivel freático. Una vez allí, se ejecutan varios ramales para aprovechar la mayor cantidad de recurso hídrico procedente de la descarga del acuífero.

Pozo-galería

El pozo galería, como indica su denominación es un pozo, típicamente en la zona de costa y una galería que parte del fondo de la captación vertical, generalmente cuando esta llega al nivel freático. En ocasiones, en estas captaciones, en lugar de galerías en el fondo, se perforan sondeos o catas, con el fin de ahorrar costes y por la rapidez de ejecución. Es posible, también, que en vez de una sola galería se construyan varias con el fin de aumentar las posibilidades de drenaje.

Galería tipo socavón

Es una galería convencional que nunca ha alumbrado agua, sus funciones eran de investigación, con el propósito de encontrar agua subterránea, están abandonadas. Existen galerías «socavón» de hasta 800 metros de profundidad, aunque lo normal es que alcancen menores profundidades.

Minas de agua (Gran Canaria)

Sistema consiste en la búsqueda de las aguas subálveas de los barrancos, a través de unas zanjas que seccionaban los cauces. Las aguas captadas a lo largo de la mina continúan por efecto de la gravedad, a lo largo de una acequia, hacia un pequeño estanque regulador. Las minas pueden tener centenares de metros de longitud, con unas medidas que permitan el paso para su limpieza, que consideramos de unos 0,5 a 0,8 metros de ancho por 0,8 a 1,75 metros de alto. A lo largo de su recorrido subterráneo disponen, a tramos, de unas aberturas o respiraderos hacia la superficie para facilitar las labores de limpieza dentro de las mismas; son unas lumbreras de ventilación o registros que se denominan campanas, debido a que los operarios que trabajaban en las labores de limpieza de las minas solían emplear unas campanillas para comunicarse.

3.4. Procedimientos constructivos de las galerías

Los trabajos de perforación se realizaban antiguamente con medios mecánicos, aunque el uso de explosivos se ge-

neralizó a mediados del siglo XX, realizando una perforación ligeramente inclinada que permite no bombear el agua para su aprovechamiento. La galería tiene como finalidad alcanzar el acuífero y extraer el recurso hídrico. Normalmente, cuando se llega a la zona saturada se produce un alumbramiento abundante, las denominadas aguas de reserva (más cargadas de sales, con mayor tiempo de residencia en el acuífero) y, posteriormente, los caudales tienden a estabilizarse mediante las aguas renovables o de recarga (aguas más jóvenes) (Figura 6).

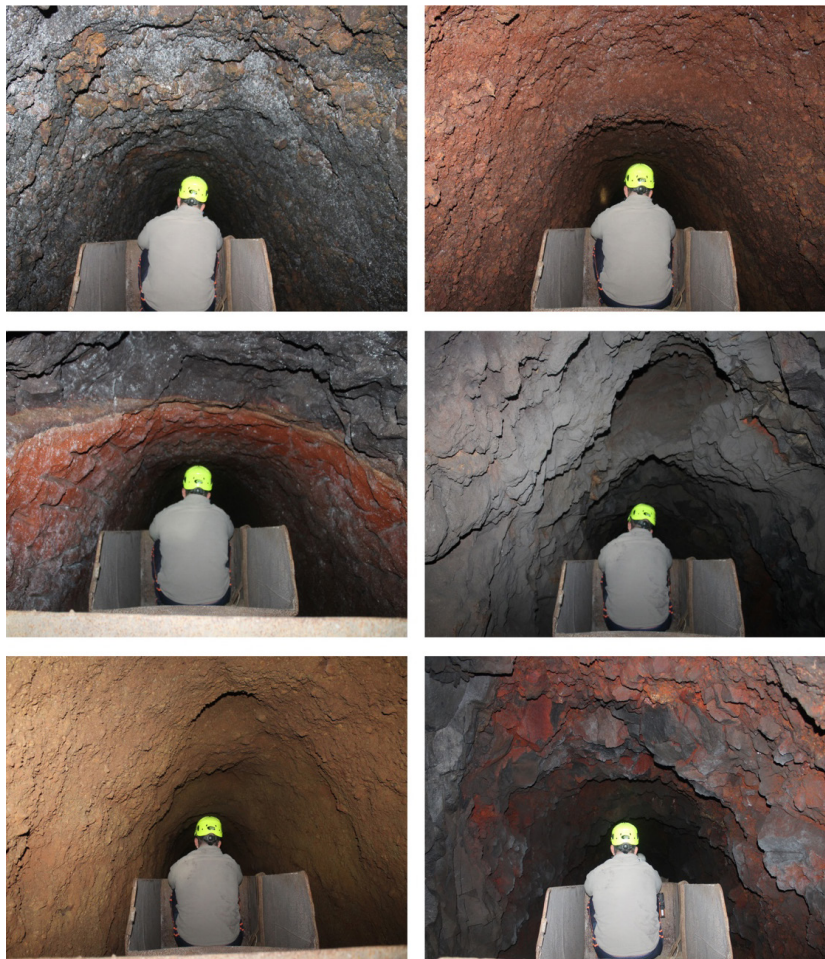


Figura 6. Galería en fase de reperfóraci3n para aumentar los caudales. Fuente: Santamarta J.C.

Los aspectos geotécnicos son una de las cuestiones más complicadas a la hora de diseñar o ejecutar un proyecto subterráneo en un terreno volcánico. Los materiales volcánicos son extremadamente heterogéneos, discontinuos y

difíciles de predecir. La configuración habitual del terreno en ambientes volcánicos insulares consiste en la acumulación de distintas sucesiones de emisiones lávicas, producto de erupciones efusivas, que configuran un paisaje dominado en su mayoría por lavas y depósitos piroclásticos (Figura 7). Dependiendo de la tasa efusiva, de la explosividad de la erupción y de las características reológicas de los materiales emitidos, éstos se pueden distribuir espacialmente de forma más o menos caótica y desordenada, lo que les confiere el carácter heterogéneo mencionado. Por lo tanto, al tratar sobre problemas geotécnicos se suele prestar más atención a aquellos factores que tienen que ver con el aseguramiento de la estabilidad de la obra. Sin embargo, uno de los principales retos que se plantean durante la ejecución de una obra subterránea es el de la perforación en sí. La gran heterogeneidad de los terrenos dificulta, por no decir que impide, la automatización de la perforación obligando a alternar sistemas de arranque mecánico con el uso de explosivos; e incluso en este último caso, las dificultades que se presentan son considerables, tanto por las propiedades mecánicas de algunos basaltos, como por la precaución que se requiere al llegar a un dique tras el que puede encontrarse un acuífero confinado a gran presión.

Durante la perforación de un túnel es necesario conocer el comportamiento del terreno, donde en terrenos volcánicos se pueden encontrar todos los litotipos existentes. La obtención de la información geológica de las obras subterráneas a ejecutar, se pueden estimar consultando bibliografía de trabajos realizados en materiales similares. Respecto a las características geotécnicas del terreno que se va a excavar, generalmente el terreno masivo, no presenta proble-



*Figura 7. Diferentes materiales atravesados por el trazo de la galería.
Fuente: Santamarta J.C.*

mas de estabilidad. En la parte granular (escorias y piroclastos), sin embargo, se suele producir una sección más redondeada, siendo necesario recurrir a sistemas de sostenimiento (cerchas, gunitado), con la función de armar el terreno en estos tramos.

3.5. Pozos en terrenos volcánicos

Se trata de obras de excavación vertical que buscan encontrar agua, especialmente en las zonas costeras o en zonas de cumbre en la isla Gran Canaria, cuya profundidad habitual ronda los 100 metros, aunque pueden llegar a 800 metros de profundidad y cuyo diámetro ronda los 3 metros. Es el denominado «pozo canario» singular de las Islas Canarias.

Debido a las características del terreno volcánico, generalmente es necesario revestir la cara interior del pozo (Figura 8), para evitar los derrumbes de las paredes, como consecuencia de la existencia de terreno suelto (piroclastos) que no presentan cohesión y pueden dificultar las labores de avance en la excavación del pozo.



Figura 8. Revestimiento interior de un pozo canario. Fuente: Santamarta, J.C.

Los pozos deben disponer de instalaciones auxiliares, entre ellas, destacan las siguientes: winches, para el transporte de los operarios y del material; escalera tipo caracol, para poder acceder al interior del pozo (especialmente cuando la profundidad de estos no es excesiva); iluminación interior del pozo; ventilación forzada, para intentar disipar la concentración de gases nocivos como CO₂, radón, etc.; equipo de bombeo del agua.

Los pozos, explotan el acuífero costero o de cumbre, en algunas islas también pueden ser de interior, como en Fuerteventura. La principal diferencia entre ambos acuíferos es que el costero está afectado por la influencia de las mareas, pudiendo verse afectado por el fenómeno de intrusión marina ^[11].

La perforación de pozos se generalizó, sobre todo, en las islas orientales: Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, especialmente a finales del siglo XIX y alcanzó su mayor desarrollo a mediados del siglo XX, en el contexto económico de la expansión de la agricultura de exportación. Por ejemplo, en la isla de Gran Canaria existen aproximadamente 2318 pozos, que alcanzan una longitud total de 218 km y algunos tienen profundidades cercanas a los 800 metros.

3.6. Relación de las aguas subterráneas con el radón

El agua de lluvia al llegar a la superficie de la tierra se filtra a través de los poros o diaclasas del terreno, almacenándo-

¹¹ Santamarta, J. C. (2009). La minería del agua en el archipiélago canario. Revista de La Sociedad Española Para La Defensa Del Patrimonio Geológico y Minero, 12, 1-8.

se entre capas impermeables o en el manto del acuífero. El radón presente en el gas del suelo suele encontrarse en concentraciones entre 10.000 Bq/m³ y 50.000 Bq/m³^[12], mientras que la concentración media de radón al aire libre varía de 1 Bq/m³ a 40 Bq/m³, aunque localmente puede alcanzar valores de varios cientos de Bq/m³^[13].

En las aguas subterráneas, por el contacto prolongado agua-roca, hay más cantidad de radón que en las aguas superficiales. Como el radón es muy soluble en el agua, el acuífero puede presentar ese gas en concentraciones elevadas.

3.7. Antecedentes en estudios relacionados con el radón y la actividad laboral en las galerías de agua y pozos tradicionales de las Islas Canarias

Debido a todos los aspectos recogidos a lo largo de este apartado introductorio, la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento del Gobierno de Canarias, durante los años 2018 y 2019, encargó a la Fundación General de la Universidad de La Laguna la ejecución de un proyecto de medición de radón (y su análisis y difusión de resultados), en galerías de explotación de

¹² Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). (1995). NTP 440: Radón en ambientes interiores. Ministerio, pp. 1-7. Retrieved from https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf

¹³ CSN. (2013). Red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica ambiental (REA) del CSN. Operación y resultados. Años 2010 y 2011 (p. 102). p. 102.

aguas subterráneas en las islas de Tenerife, El Hierro y La Palma. Con ese proyecto se perseguía determinar las concentraciones de gas radón en las galerías de agua y sus implicaciones en la explotación de los recursos hídricos, mediante medidores homologados y posterior análisis científico de los resultados indicando su relación con la salud laboral. No se contempló el estudio del gas radón en las islas de La Gomera, Fuerteventura y Lanzarote, dado que no existían explotaciones de captaciones de agua con trabajos activos en el interior, que implicaran permanencia del personal en los años de desarrollo de los proyectos.

La Palma y El Hierro son las islas más jóvenes del archipiélago, y en ambas se han producido erupciones volcánicas en los últimos 50 años. Por su parte, Tenerife cuenta con un sistema hidrogeológico complejo, con miles de galerías y pozos que alcanzan el nivel freático a diferentes profundidades y altitudes, y con erupciones históricas, la última hace algo más de 100 años. En La Palma se seleccionaron cinco puntos de muestreo, cuatro galerías de aguas subterráneas y una de aguas termales. En El Hierro se seleccionaron cuatro puntos, tres galerías y un túnel de servicio, y en la isla de Tenerife nueve galerías. Las localizaciones pueden verse en la Figura 9.

Los detectores pasivos de trazas nucleares CR-39 (Figuras 10 y 11) se colocaron en el frente de la galería donde se estaban desarrollando los trabajos de perforación y donde los trabajadores pasan la mayor parte del tiempo. También se colocaron a la mitad de las galerías para poder comparar diferentes condiciones de ventilación, trabajos, explosi-



Figura 9. Localizaciones de los puntos de estudio en las islas de La Palma, El Hierro y Tenerife

vos, etc... En ambos casos, los detectores cubrieron periodos de medición de tres meses, a lo largo de un año completo. Este es el periodo de medida recomendado en la Guía 11.4 del CSN^[14] para caracterizar el promedio anual

¹⁴ CSN. (2012). Guía de Seguridad 11.4: Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Guías de Seguridad, p. 34.

de concentración de radón en lugares de trabajo subterráneos.



Figura 10. Detector pasivo colocado en una galería, en el techo se marca una señal con un reflectante. Fuente: Santamarta, J.C.



Figura 11. Detectores pasivos utilizados en el proyecto para medir el gas radón en las galerías

Tan pronto como los detectores se retiraban tras los periodos de medida, eran enviados a un laboratorio acreditado según la ISO/IEC 17025 para su análisis. En el laboratorio,

los detectores fueron analizados usando un escáner de imagen de última generación y se emitió para cada uno de los detectores un informe con los resultados de concentración de radón obtenidos, así como su intervalo de incertidumbre.

A continuación, se recogen los valores de concentración de radón obtenidos en todas las galerías de estudio (Tabla 3):

Concentraciones de gas radón en el frente de la galería						Concentraciones de gas radón en la mitad de la traza de la galería					
Isla	Municipio	Longitud	Mínimo	Media	Máximo	Isla	Municipio	Longitud	Mínimo	Media	Máximo
		m	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³			m	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³
La Palma 1	Garafía	3.800	1.570	1.920	2.270	La Palma 1	Garafía	1.900	2.110	2.580	3.050
La Palma 2	Puntallana	2.000	5.810	7.090	8.370	La Palma 2	Puntallana	1.000	3.040	3.710	4.380
La Palma 3	Los Llanos	3.278	3.660	4.470	5.280	La Palma 3	Los Llanos	2.700	3.960	4.840	5.720
La Palma 4	Breña Alta	2.185	5.010	6.120	7.230	La Palma 4	Breña Alta	1.000	4.280	5.230	6.180
La Palma 5	Fuencaliente	170	890	1.050	1.210	La Palma 5	Fuencaliente	145	430	500	570
Isla	Municipio	Longitud	Mínimo	Media	Máximo						
		m	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³						
El Hierro 6	Valverde	300	41	71	101						
El Hierro 7	Valverde	80	460	530	600						
El Hierro 8	La Frontera	Zona de bombeo	2.440	2.980	3.520						
El Hierro 9	Valverde	20	410	480	550						
Isla	Municipio	Longitud	Mínimo	Media	Máximo	Isla	Municipio	Longitud	Mínimo	Media	Máximo
		m	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³			m	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³
Tenerife 10	Güímar	2.236	3.500	4.280	5.060	Tenerife 10	Güímar	2.000	5.040	6.150	7.260
Tenerife 11	Santiago del Teide	3.500	2.510	3.060	3.610	Tenerife 11	Santiago del Teide	1.800	1.860	2.270	2.680
Tenerife 12	La Guancha	2.492	12.670	15.840	19.010	Tenerife 12	La Guancha	1.407	10.070	12.590	15.110
Tenerife 13	Guía de Isora	5.000	2.760	3.370	3.980	Tenerife 13	Guía de Isora	2.500	1.860	2.270	2.680
Tenerife 14	Los Realejos	2.200	19.480	24.360	29.240	Tenerife 14	Los Realejos	1.300	-	>47.300	-
Tenerife 15	Fasnia	4.650	3.960	4.840	5.720	Tenerife 15	Fasnia	3.525	2.970	3.630	4.290
Tenerife 16	Guía de Isora	3.105	-	>22.400	-	Tenerife 16	Guía de Isora	1.600	10.280	12.860	15.440
Tenerife 17	Arico	3.700	2.920	3.560	4.200	Tenerife 17	Arico	3.015	3.200	3.910	4.620
Tenerife 18	La Orotava	3.570	-	>21.000	-	Tenerife 18	La Orotava	3.000	6.100	7.630	9.160

Tabla 3. Resultados de las concentraciones de gas radón en las minas seleccionadas de La Palma, el Hierro y Tenerife

El rango de concentración de radón en el aire de las galerías estudiadas parte desde 410 Bq/m³ a más de 47.300 Bq/m³.

Se descartan las mediciones de dos explotaciones, una por ser un túnel de servicio y otra por ser de aguas termales. Los valores más bajos se dan en la isla de El Hierro.

En prácticamente la totalidad de las galerías estudiadas, se supera el nivel de referencia de radón en aire, de 300 Bq/m³, marcado por la Directiva Europea 2013/59/Euratom, por un elevado margen.

Los niveles de radón alcanzados pueden deberse a la presencia de materiales ígneos dentro del acuífero, ya que diversos estudios han probado que altas concentraciones de radón están relacionadas con materiales ricos en uranio, como son los volcánicos. La ventilación también juega un papel fundamental en las concentraciones de radón de un lugar, en efecto, la única galería cuyos niveles de radón eran inferiores a 100 Bq/m³, cuenta con dos entradas que favorecerían el movimiento del aire dentro de la mina.

Alguno de los aspectos relacionados con las concentraciones de radón y que dependen de las condiciones ambientales de las galerías que se han observado en este estudio y reflejados en diferentes publicaciones científicas ^[15], han sido los siguientes:

- A mayor permeabilidad y porosidad de los materiales que conforman el interior de la galería, se han medido

¹⁵ Santamarta, Juan C.; Hernández-Gutiérrez, L.E.; Rodríguez-Martín, J.; Marrero, Rayco; Lario Bascones, Rafael J.; Morales, Ángel; Cruz-Pérez, N. (2020). Radon measurements in water galleries in Tenerife, Canary Islands (Spain). Air Qual. Atmos. Health. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11869-020-00882-y>

las mayores concentraciones de radón. En aquellas galerías gunitadas, los valores han sido menores.

- A mayor concentración de gas CO₂ dentro de la galería, mayores valores de radón.
- Las galerías sin ventilación presentaron mayores concentraciones de radón que aquellas con ventilación. Al dejar de trabajar en la galería durante periodos largos, la cantidad de radón aumenta.
- En las zonas con mayor saturación de agua se encontraron niveles de radón más elevados que en las zonas secas de la galería.

Existen los siguientes casos particulares, que se pasan a comentar:

- En ocasiones los valores promedio de gas radón obtenidos en la mitad de la traza, son sensiblemente superiores a los obtenidos en el frente. Esto puede ser debido a que existen diferentes alumbramientos de aguas subterráneas a lo largo de la galería que también aportan gas radón a la atmósfera interior de la misma.
- La oscilación de radón en los diferentes ciclos de medición (verano e invierno) tal vez sea debida a las diferentes temperaturas externas a la galería. En verano aumentan las concentraciones de gas radón en las galerías y en invierno se reducen.

Con respecto a la experiencia en pozos, se realizó un estudio en la isla de Gran Canaria, donde se realizaron medidas

de la concentración de radón en lugares de trabajo interiores empleando detectores pasivos de trazas nucleares, por un periodo de exposición de 3 meses. Las medidas corresponden a un total de 5 lugares de trabajo (Figura 12) en los que se colocaron 9 detectores en total. Los lugares de trabajo están repartidos en cuatro municipios de la Isla de Gran Canaria: Santa María de Guía, San Bartolomé de Tirajana, Agüimes y Mogán. Las instalaciones estudiadas son pozos canarios que realizan extracción de agua potable en el acuífero costero. La evaluación general de los resultados obtenidos permite establecer que en un alto porcentaje (más del 90%) los lugares de trabajo se encontrarían por encima de los niveles de referencia que recomienda la OMS no superar y muy por encima de lo que dicta la Directiva europea 2013/59/EURATOM, por lo que la valoración es negativa (Tabla 4).

Pozo	Municipio	Profundidad (metros)	Concentración radón (Bq/m ³)
GC01	Santa María de Guía	50	6210 ± 1242
		100	5820 ± 1050
		200	1090 ± 170
		300	270 ± 40
		400	1340 ± 214
GC02	Santa María de Guía	100	12470 ± 2490
GC03	Agüimes	40	2830 ± 510
GC04	San Bartolomé de Tirajana	100	1010 ± 160
GC05	Mogán	80	1280 ± 230

Tabla 4. Resultados de la concentración de gas radón medidos en 5 pozos de la isla de Gran Canaria

Se viene a confirmar que la geología es uno de los principales factores condicionantes de la presencia de radón en el

interior de los lugares de trabajo, ya que la naturaleza fundamentalmente basáltica de la isla de Gran Canaria indicaba a priori una exhalación de gas radón que podía ser elevada.

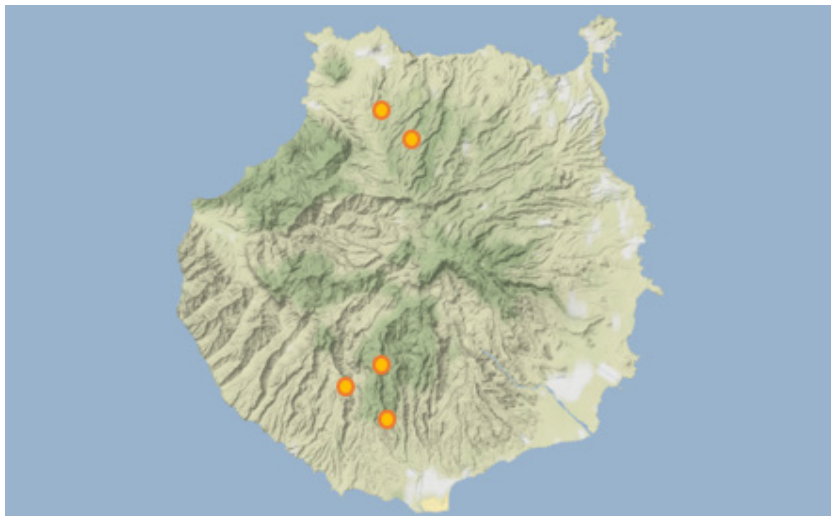


Figura 12. Localización de los pozos seleccionados para la medición de gas radón en la isla de Gran Canaria

4. Reglamentación y normativa aplicable

- Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.
- Instrucción IS-33 del CSN sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural

- Guía de Seguridad 11.4, de 12 de diciembre de 2012, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre la Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo.
- Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- Documento Básico DB HS-6: *Protección frente a la exposición al Radón* del Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.

5. Sistemas de medición del gas radón

Para medir la concentración de gas radón en el aire interior pueden utilizarse dispositivos activos o pasivos. La principal diferencia entre ambos medidores es que los dispositivos activos requieren de una fuente de energía (sea eléctrica o mediante una batería) y los dispositivos pasivos no. Los medidores pasivos dan una medida integradora de la concentración de radón existente durante el periodo de exposición. Los medidores activos son monitores en continuo (basados en detectores de silicio) que permiten caracterizar las variaciones de la concentración de radón a lo largo del periodo de medida.

Dentro de los **dispositivos pasivos**, podemos enumerar los siguientes:

- **Detectores de carbón activo:** cuentan con filtros de carbón activo en su interior que cuentan con gránulos de carbono que adsorben el radón ambiental durante 48 horas. El análisis de los resultados es rápido ya que pueden dar resultados en aproximadamente 5 horas después de las mediciones. El resultado que ofrece es la media de concentración de radón en los dos días que dura la medición.

Este tipo de detectores presentan algunos inconvenientes. Son muy sensibles a las variaciones de las concentraciones de radón y la mayor parte del radón adsorbido corresponde con el periodo final de la exposición. Por otro lado, son especialmente sensibles a la humedad y precisan de una corrección para este parámetro. Del mismo modo, cambios en la composición del carbón activo pueden alterar el resultado de la medida.

- **Detectores de trazas nucleares:** pequeños detectores que recogen las trazas generadas por el impacto de las partículas alfa procedentes de la desintegración del radón. Proporcionan el valor de la magnitud exposición de gas radón (kBq h m^{-3}). Necesitan un periodo de exposición de 2 a 6 meses, lo que les convierte en un método de medida excelente para poder considerar las variaciones en las concentraciones de radón que suelen ser importantes en periodos de 24 horas y varios días. Una vez se retiran del lugar en el que estaba instalados, deben enviarse a laboratorio para interpretación de los resultados.

En los lugares de trabajo, a fin de comparar la estimación del promedio anual de concentración de radón con el nivel de referencia establecido en la reglamentación, se requieren mediciones de al menos tres meses de duración, por lo que los cartuchos de carbono activo no son aconsejables. Los detectores de trazas nucleares, por otro lado, pueden utilizarse también como dosímetro personal de radón (ver figura 13).



Figura 13. Dosímetro de radón de solapa. Fotografía cortesía de Radonova Laboratories

Independientemente del método seleccionado, se recomienda que las medidas se hagan por un laboratorio acreditado según la ISO/IEC 17025 para ese tipo de análisis.

Por otro lado, los **medidores activos** o **monitores en continuo** permiten dar resultados de la concentración del ra-

dón en ciclos de medida cortos (típicamente desde unos pocos minutos a una hora de duración), aunque por consideraciones económicas, suelen utilizarse como apoyo a los detectores integradores, a fin de localizar focos de entrada de radón, caracterizar variaciones diurnas/nocturnas, o definir zonas homogéneas de concentración de radón (Figura 14).



Figura 14. Detector activo colocado en una galería (izq.), este tipo de detectores necesitan un tiempo para poder facilitar una primera lectura (der.). Fuente: Santamarta, J.C.

Además de medir la concentración de radón en el aire, los monitores en continuo dotados de bomba de aspiración pueden utilizarse, junto con una sonda específica, para hacer determinaciones de radón en el gas del suelo o medir la concentración de radón en agua. La concentración de radón en agua, no obstante, suele medirse en el laboratorio mediante centelleo líquido o espectrometría gamma. En la Figura 15 se presenta un ejemplo de medida puntual de gas radón en la atmósfera del suelo:

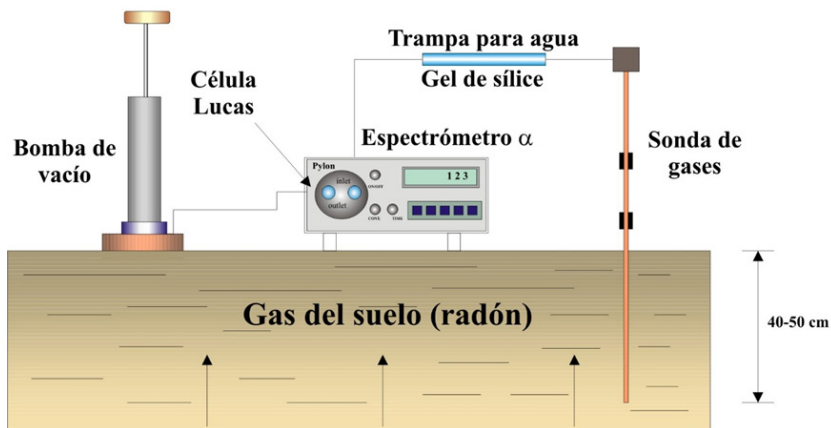


Figura 15. Esquema de medida puntual de gas radón y torón en el suelo. Fuente: Padrón (2008)^[16]

6. Declaración de actividad laboral, estudios de riesgo y medidas de protección radiológica en lugares de trabajo

El Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes requiere que los titulares de los lugares de trabajo con especial exposición a la radiación natural, y específicamente al radón, declaren su actividad ante el órgano competente en materia de industria de la Comunidad Autónoma y que lleven estudios del riesgo radiológico asociado a su actividad. En Canarias, el órgano competente es la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento.

¹⁶ Padrón, E. (2008). Emisión difusa de dióxido de carbono y otros volátiles en el volcán Cumbre Vieja, La Palma, Islas Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna (Tenerife).

Los niveles de referencia de concentración de radón en interiores varían en función de la normativa empleada. De forma general, estos niveles de referencia son 300 Bq/m^3 o inferiores y pueden diferir para viviendas y lugares de trabajo.

El último informe de la OMS ^[17] expone que a partir de 100 Bq/m^3 , una exposición residencial prolongada al radón puede tener un efecto nocivo para la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda utilizar este nivel como referencia para el radón residencial, dado que el riesgo que padecer cáncer de pulmón varía de manera lineal con la exposición, incrementándose un 16% por cada 100 Bq/m^3 que aumente la concentración de radón en la vivienda.

En España, el Código Técnico de Edificación fija un nivel de referencia de 300 Bq/m^3 para la el radón en edificios de obra nueva y en las rehabilitaciones.

Para lugares de trabajo es de aplicación la Instrucción IS-33 sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural fija, que fija para los lugares de trabajo los niveles de referencia siguientes:

- De 0 a 600 Bq/m^3 : no es necesario control.
- A partir de 600 Bq/m^3 : se debe aplicar un nivel bajo de control.
- A partir de 1.000 Bq/m^3 : se debe aplicar un nivel alto de control.

¹⁷ OMS (2015). Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública - Capítulo 2. Mediciones de radón. 102 pp. ISBN 978-92-4 354767-1.

Salvo para lugares de trabajo de uso residencial, y para centros educativos, para los que se establece un nivel de referencia de 300 Bq/m^3 .

No obstante, una vez transpuesta la directiva 2013/59/Euratom a la legislación española, el nivel de referencia a adoptar para el promedio de concentración de radón en los lugares de trabajo será con carácter general de 300 Bq/m^3 .

En las galerías de agua de las Islas Canarias se supera claramente ese umbral, con valores medios que superan ampliamente los 6.000 Bq/m^3 . Hay que considerar, sin embargo, que el nivel de referencia de 300 Bq/m^3 asume por defecto un tiempo de permanencia en el lugar de trabajo de 2000 horas/año. Expresado en términos de exposición corresponde a un nivel de $600.000 \text{ Bq}\cdot\text{h/m}^3$. La directiva 2013/59/Euratom requiere que cuando las dosis efectivas debidas al radón de los trabajadores superen los 6 mSv/año , los Estados miembro garanticen que se adopten las medidas apropiadas de control radiológico operacional. En España estas medidas serán las que establezca el Reglamento de Protección de la Salud contra a los riesgos derivados de la exposición a las Radiaciones Ionizantes.

Adicionalmente, en la Directiva 2013/59/EURATOM se indican los lugares de trabajo en los que es más probable que se superen los valores de referencia de concentración de radón. Estos incluyen:

- Trabajos subterráneos tales como cuevas turísticas, **galerías y minas** de cualquier tipo.

- Establecimientos termales.
- Instalaciones donde se almacenen y traten aguas de origen subterráneo.
- Lugares de trabajo en áreas geográficas en las que la concentración de radón supere ampliamente el promedio nacional.

Cabe destacar que todos estos lugares de trabajo están considerados en el Anexo de la IS-33 del CSN. No obstante, está pendiente en España la definición con carácter normativo de las «áreas geográficas» con concentraciones elevadas de radón. Esta definición se hará mediante Instrucción del CSN sobre la base del mapa de potencial de radón (ver Figura 16).

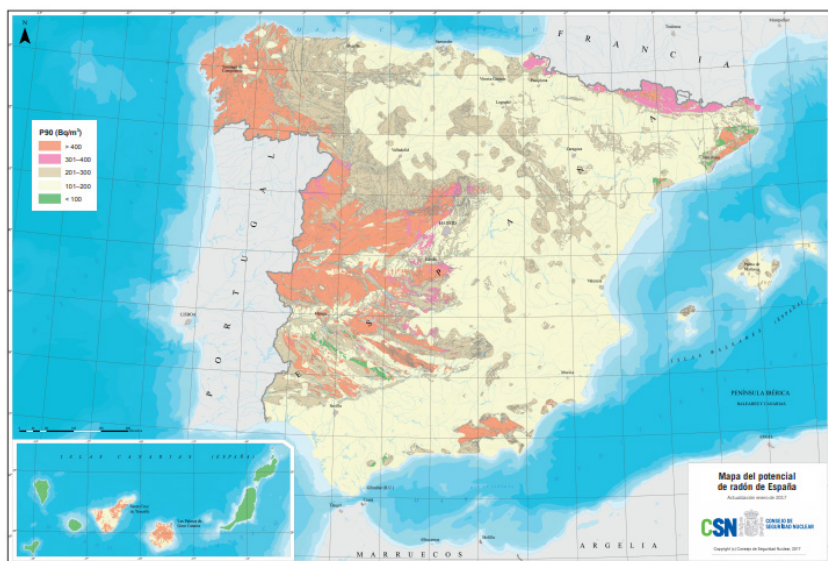


Figura 16. Mapa de potencial de radón de España. Fuente: CSN

Aplicación reglamentaria en pozos y galerías

Para la evaluación de riesgo radiológico que requiere el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, el primer paso antes de acometer un trabajo minero en las galerías o pozos visitables «tipo canario», es medir la concentración de radón presente en la zona de trabajo.

La cantidad de radón presente en una galería o pozo depende principalmente de la concentración de uranio en las rocas que conforman el lugar, de las condiciones atmosféricas y de la existencia de ventilación. Por lo tanto, en espacios cerrados sin ventilación se pueden acumular altas concentraciones de radón en el aire atrapado. En las instalaciones activas puede instalarse un sistema de ventilación forzada que ayude a mantener las concentraciones de radón por debajo de los límites especificados por la normativa vigente. Sin embargo, en galerías en desuso o abandonadas esta es una opción que en la mayoría de los casos no es viable.

Los pasos que se pueden seguir para realizar la medición de concentración de gas radón en una galería son los que se exponen a continuación:

a) Planificación del estudio

En esta fase se deberán estudiar todos los aspectos relacionados con la manera en la que se desarrolla el trabajo en la instalación estudiada. Se deberán recabar planos del lugar, horarios de los empleados, periodos en los que se

interrumpe la actividad (festivos, fines de semana, etc.), número de estancias donde se desarrollan trabajos y tiempos de permanencia de los trabajadores en estas, ubicación de las instalaciones de ventilación, gradientes térmicos, etc. Es decir, toda información que sea relevante para conseguir la fotografía del desarrollo del trabajo en el lugar objeto de estudio. Una vez se ha estudiado toda la información anterior en detalle, se decide dónde se ubicarán los detectores en las zonas homogéneas^[18]. Para determinar las zonas homogéneas se pueden emplear métodos activos de medida de radón o pasivos con tiempos de exposición de unos cuantos días.

Las mediciones deben realizarse en lugares que sean representativos de la ocupación real o razonablemente previsible de los trabajadores. Para ello deberá indicarse claramente dónde se han colocado y cuántos detectores se han puesto (para decidir en qué lugares se llevan a cabo las medidas, se puede emplear como referencia la tabla 1 de la instrucción IS-33 del CSN). Por esta razón, no será necesario realizar mediciones en áreas tales como pasillos, sala del compresor y ventilación, baños, etc., que estén desocupados o que estén ocupados con poca frecuencia. Se puede considerar que un área poco ocupada es aquella en la que es poco probable que una persona pase más de 100 horas al año de su tiempo de trabajo (aproximadamente dos horas por semana).

¹⁸ Se denomina zona homogénea a los recintos en los que la concentración de radón en todo su volumen es homogénea o poco variable. Esta circunstancia está condicionada por la tipología de la construcción, el régimen de ventilación, la geología de la zona, las variables ambientales y los hábitos de los trabajadores.

Para las galerías de agua, al tratarse de espacios subterráneos, se recomienda que las mediciones abarquen «al menos 3 meses», aunque es aconsejable medir durante un año completo, preferiblemente colocando medidores pasivos en cuatro periodos de tres meses de duración cada uno. En los túneles y galerías incluidos en este estudio, se ha puesto de manifiesto, de hecho, que, en algunos casos, se da un marcado efecto estacional.

Es recomendable que las medidas preventivas relacionadas con el gas radón en espacios subterráneos las realicen los técnicos competentes en materia de minas, según la Ley de Minas. Es deseable, además, que los técnicos dispongan del Título de Técnico Superior de Prevención de Riesgos Laborales, especialidad en Higiene Industrial.

b) Realización de las exposiciones y análisis de los dispositivos de medida

Una vez retirados los detectores pasivos que llevan colocados tres meses, se deben enviar inmediatamente a laboratorio acreditado para su análisis; se recomienda, adicionalmente, realizar mediciones con un monitor en continuo para seleccionar los puntos de medida y tener un orden de magnitud de la concentración de radón existente previo a la colocación de los detectores pasivos.

El laboratorio típicamente dará los resultados como exposición de radón (expresado en $(\text{Bq}/\text{m}^3)\cdot\text{h}$), junto con el valor de la incertidumbre expandida. En algunos casos, y a partir de los datos del tiempo de exposición facilitados por el

cliente, se consignan también los resultados como concentración de radón (Bq/m^3).

El laboratorio que realice las medidas deberá estar acreditado de acuerdo con la Norma ISO/IEC 17025 por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), o bien por otro organismo nacional de acreditación designado de acuerdo con la normativa europea. El titular de la explotación minera (galería, mina o pozo) asumirá la responsabilidad de verificar que el laboratorio de medida cuente con una acreditación en vigor.

A la hora de colocar los detectores pasivos se deberán tener en cuenta las siguientes indicaciones:

- i. Ubicación de los detectores: de acuerdo con la Guía de Seguridad GS 11.1 del CSN, se situarán a una altura no inferior a los 50 cm del suelo y separados 30 cm de las paredes, y nunca dentro de armarios u otros objetos. No deben colocarse tampoco cerca de corrientes de aire, con humedad o agua, zonas de ventilación y/o fuentes de calor. En el caso de que los detectores se deban colocar en espacios con humedad elevada (superior a 70% de humedad relativa) se deberá garantizar que el detector pasivo no se ve afectado por este fenómeno. Para ello los detectores pueden disponerse dentro de un plástico o funda, que lo proteja de la humedad sin interferir con la medida de radón (consultar con el laboratorio de medida).
- ii. Instalación de los detectores: los detectores deberán suministrarse dentro de bolsas herméticas cerradas al va-

cío que no permitan que estos se abran hasta el momento de la instalación (Figura 17). Igualmente, los detectores deberán incluir una fecha de caducidad:



Figura 17. Detectores pasivos de radón en el momento del suministro

En el momento de instalarlos se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Se deberá abrir la bolsa hermética y romper el precinto momentos antes de la instalación del detector. A continuación, se deberá colocar el detector atándolo a algún elemento fijo, preferiblemente con una brida, para asegurar su permanencia (Figura 18).
- Se deberá recolectar la siguiente información para cada detector: descripción del lugar de trabajo, dirección del lugar de medida, dimensiones del recinto, esquema en el que se represente gráficamente la localización de los detectores, número de trabajadores en el recinto, tiempo de permanencia de los trabajadores en el recinto, identificación del detector, fecha y hora de la instalación, cualquier incidencia observada en el momento de la ins-

talación y una fotografía del detector donde se pueda ver su identificación, así como del recinto medido.



Figura 18. Colocación del detector pasivo de gas radón.

- iii. Retirada de los detectores: transcurridos los tres meses desde la instalación se retirarán los detectores, enviándose de inmediato al laboratorio acreditado.
- iv. Informe sobre la actividad realizada en el interior del recinto donde ha sido instalado el detector. Por ejemplo, si es en una galería, calendario de horas trabajadas, horas de ventilación forzada, número de trabajadores, actividades (explosivos, limpieza del canal, etc.), etc.

c) Expresión de los resultados y toma de decisiones

Para cada zona homogénea se deberá conocer su valor de concentración media anual de radón y su incertidumbre. Si

en una zona homogénea se colocase más de un detector, el valor de concentración medio será igual a la media aritmética de los resultados obtenidos de los diferentes detectores.

d) Diseño e implantación, si procede, de medidas de protección radiológica

Se deberán controlar en todo momento las exposiciones de los trabajadores al gas radón, minimizando las concentraciones del gas en la medida de lo posible, o cuando esto no fuera posible, reduciendo el tiempo de exposición.

Para ello, se deberán ejecutar soluciones constructivas o técnicas y/o, en su defecto, implantar medidas administrativas cuyo coste sea asumible por la organización. Dentro de las medidas técnicas o constructivas se incluyen los sistemas de extracción y/o ventilación forzada mientras que las medidas administrativas estarían fundamentalmente dirigidas a controlar los tiempos de permanencia de los empleados en las zonas con mayores concentraciones de radón. En determinados casos, podría estar indicado el uso de EPIs.

En cualquier caso, cuando a pesar de las medidas de mitigación adoptadas, en una zona homogénea cuyo promedio anual de concentración de radón supere los 300 Bq/m^3 haya personas que realicen su trabajo de forma continuada, el empleador deberá contactar con una Unidad Técnica de Protección Radiológica autorizada por el CSN a fin de que esta lleve a cabo una estimación dosimétrica y, si procede, proponga las medidas de protección y vigilancia a adoptar.

Análogamente, cuando en una instalación subterránea no se haya completado el estudio de riesgo radiológico y deban realizarse trabajos con una duración superior a 100 horas, se contactará previamente con una Unidad Técnica de Protección Radiológica, que determinará si en la realización de estos trabajos son necesarias medidas de protección y, en su caso, gestionará la dosimetría individual de los trabajadores.

Los dosímetros personales de cada trabajador serán analizados por un servicio de dosimetría personal autorizado por el CSN. El cálculo de la dosis se hará aplicando el coeficiente de dosis por radón que especifique el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI).

En este sentido, el Reglamento de Protección de la Salud contra los riesgos derivados de la exposición a las Radiaciones Ionizantes (por el que se derogará el actual RPSRI) incorporará los nuevos coeficientes de dosis por radón de la Publicación 137 parte 3 de la ICRP (ver sección 9. *Cálculo de dosis por radón*), Efectos sobre la salud del gas radón.

En cuanto a la salud de las personas, la naturaleza radiactiva del radón no implica en sí mismo un riesgo, ya que en la corteza terrestre hay multitud de elementos radiactivos que forman parte de los minerales que la conforman, y que en su mayoría se presentan en estado sólido; sin embargo, el hecho de que el radón sea un gas es su verdadero peligro, porque puede llegar hasta las personas por el aire e introducirse en el cuerpo por las vías respiratorias. Por tanto, el radón supone un riesgo potencial para la salud de las personas por la inhalación de este.

Los problemas de salud asociados al radón se deben a que éste, al ser un gas noble, tiene una capacidad de reaccionar para formar compuestos moleculares muy pequeña. Esto hace que posea la capacidad de migrar fácilmente hasta la superficie donde puede ser inhalado, así como los productos sólidos de su desintegración (^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Bi , ^{210}Bi , ^{214}Pb y ^{210}Pb), los cuales se depositan en partículas finas y polvo en suspensión que al respirarlo pueden adherirse a los tejidos sensibles de los pulmones (Figura 19).



Figura 19. Esquema del origen del radón y su peligro para la salud. Fuente: CSN (2013)^[19]

¹⁹ CSN. (2013). Red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica ambiental (REA) del CSN. Operación y resultados. Años 2010 y 2011 (p. 102). p. 102

La desintegración radiactiva del radón y sus descendientes produce la emisión de partículas ionizantes que irradian directamente el tejido pulmonar y aumenta el riesgo de cáncer de pulmón. En efecto, según la Organización Mundial de la Salud, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco y la primera para los no fumadores. El riesgo de desarrollar cáncer de pulmón para un fumador con una exposición a radón de 0 Bq/m^3 es del 10% mientras que para un no fumador expuesto a 400 Bq/m^3 es de 0,7%, según los estudios de Darby^[20]. La inhalación de radón y de sus descendientes constituye, según el Consejo de Seguridad Nuclear, la principal fuente de radiación ionizante para la población en general, tres órdenes de magnitud superior a la que representan las centrales nucleares para los habitantes que residen en su entorno.

7. Exposición al gas radón en los puestos de trabajo

Hoy en día, el ser humano desarrolla en gran medida su vida laboral y personal en edificios, siendo el porcentaje que pasa el hombre urbano en ambientes cerrados de hasta un 75%. La Ley General de Sanidad, en su Capítulo IV

²⁰ Darby S et al. (2005). Radon in homes and lung cancer risk: a collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330:223-227.

Darby S et al. (2006). Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*, 32(1):1-83.

dedicado a la Salud Laboral, recoge entre otras las siguientes premisas:

- Determinar y prevenir los factores de microclima laboral en cuanto puedan ser causantes de efectos nocivos para la salud de los trabajadores.
- Vigilar la salud de los trabajadores para detectar precozmente e individualizar los factores de riesgo y deterioro que puedan afectar a la salud de estos.

Estas dos indicaciones de la Ley estatal se pueden aplicar directamente en el caso del radón, ya que el microclima al que pueden estar sometidos los trabajadores a lo largo de su jornada laboral, puede provocar un aumento en sus probabilidades de sufrir cáncer de pulmón.

Las categorías de exposición a la radiación se pueden clasificar en tres:

- **Exposición ocupacional**^[21]: Radiación recibida durante el desarrollo del trabajo (sean fuentes radiactivas artificiales o naturales).
- **Exposición médica**: Consecuencia de pruebas médicas que emitan radiación.
- **Exposición del público**: Comprende las exposiciones que no están relacionadas con las dos anteriores.

²¹ Es la que aplica en el caso de trabajadores de galerías. Es importante, a la hora de adquirir los dosímetros personales para los trabajadores, que estos sean para exposición ocupacional

Cuando el radón penetra desde el terreno hacia los recintos cerrados de trabajo, debe considerarse como una situación de exposición ocupacional, dado que la presencia del radón es en gran medida independiente de las actividades humanas realizadas dentro del lugar de trabajo. Tales exposiciones pueden ser significativas en determinadas zonas o en tipos específicos de lugares de trabajo que corresponde determinar a los Estados miembros, y, en caso de superarse el nivel de referencia nacional, se deben tomar las medidas adecuadas de reducción del radón y de la exposición. Si los niveles continúan siendo superiores al nivel de referencia nacional, esas actividades humanas realizadas dentro del lugar de trabajo no deben considerarse como prácticas. No obstante, los Estados miembros deben velar por que se notifiquen esos lugares de trabajo y porque, en los casos en que la exposición de los trabajadores pueda superar un valor correspondiente de exposición al radón integrada en el tiempo, dichos lugares se gestionen como una situación de exposición planificada, se apliquen límites de dosis, y se determinen los requisitos de protección operacional que hayan de aplicarse. Los Estados miembros requerirán que las mediciones de radón lleven a cabo la identificación de los tipos de lugares de trabajo y edificios con acceso público, por ejemplo, escuelas, lugares de trabajo subterráneos o los situados en determinadas zonas, en los que se requieren la realización de medidas sobre la base de una evaluación del riesgo, teniéndose en cuenta, por ejemplo, las horas de ocupación.

8. Cálculo de la dosis por radón

El radón es un gas químicamente inerte, por lo que por sí sólo no supone un daño radiológico significativo debido a su bajo nivel de retención en el organismo humano. Los responsables de este daño son los descendientes de vida corta del gas: ^{218}Po ($T_{1/2} = 3.11$ min.), ^{214}Pb ($T_{1/2} = 26.8$ min.), ^{214}Bi ($T_{1/2} = 19.8$ min.) y ^{214}Po ($T_{1/2} = 162$ s), principalmente por las emisiones α del ^{218}Po y el ^{214}Po que se depositan en las distintas regiones del tracto respiratorio. El siguiente radionucleido de la serie es el ^{210}Pb , que tiene un periodo de desintegración de 22,3 años y, por tanto, no influye de forma significativa en los cálculos dosimétricos.

Si bien el riesgo radiológico ligado a la exposición al radón en aire es consecuencia de la inhalación de estos productos de desintegración de vida corta, la mayoría de los sistemas de medida existentes determinan, por motivos prácticos, la concentración de radón en aire en lugar de medir sus descendientes.

No obstante, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha desarrollado coeficientes de dosis que permiten relacionar la exposición al radón con la dosis efectiva, utilizando modelos dosimétricos junto con una serie de hipótesis sobre las características típicas de la situación de incorporación (relativas a la distribución de aerosoles en el lugar de trabajo y a la tasa de respiración).

Recientemente, la ICRP, ha revisado sus coeficientes de dosis para dosimetría por exposición interna ocupacional que

remplazarán todo el material dosimétrico^[22] y en las que se incluye la dosimetría del radón. Específicamente, la publicación 137 Parte 3 de la ICRP^[23] establece los siguientes coeficientes de dosis para distintas circunstancias de incorporación:

Table A.11. Calculated values of effective doses per exposure to radon and thoron progeny for indoor workplaces, mines, and tourist caves. Dose from inhaling ²²²Rn or ²²⁰Rn gas is excluded. Calculations apply to a reference worker with an average breathing rate of 1.2 m³ h⁻¹.

Place	Unattached fraction, f_p	F	Effective dose per exposure*		
			mSv WLM ⁻¹	mSv per mJ h m ⁻³	mSv per Bq h m ⁻³
Radon (²²² Rn) progeny					
Indoor workplace	0.08	0.4	20	5.6	1.2×10^{-5}
Mine	0.01	0.2	11	3.1	–
Tourist cave	0.15	0.4	23	6.6	1.5×10^{-5}
Thoron (²²⁰ Rn) progeny					
Indoor workplace	0.02	–	5.6	1.6	$1.2 \times 10^{-4}\ddagger$
Mine	0.005	–	4.8	1.4	$1.0 \times 10^{-4}\ddagger$

f_p , unattached fraction in terms of the potential alpha energy concentration; F , equilibrium factor; WLM, working level month.

*For radon, 1 WLM = $(6.37 \times 10^5 / F)$ Bq h m⁻³; for thoron, 1 WLM = 4.68×10^4 Bq h m⁻³ of equilibrium equivalent concentration of ²²⁰Rn; 1 WLM = 3.54 mJ h m⁻³.

‡In terms of mSv per Bq h m⁻³ of equilibrium equivalent concentration of ²²⁰Rn.

A partir de la Tabla anterior, y aplicando redondeos, la ICRP recomienda utilizar como valor por defecto del coeficiente

²² ICRP, 1997. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers (preface and glossary missing). ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27 (3-4).
ICRP, 1994. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24 (4).

²³ ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

de dosis para cuevas turísticas y para casos en los que los trabajadores llevan a cabo una actividad física intensa, 20 mSv WLM⁻¹ (frente al valor de 5 que recoge el Reglamento en vigor), y para el resto de casos (lugar de trabajo interior y actividad sedentaria), un valor de 10 mSv WLM⁻¹.

Por otro lado, es posible desarrollar coeficientes de dosis específicos para el lugar de trabajo, basados en mediciones de los parámetros que más influyen en el cálculo. Estos son:

- **El factor de equilibrio (F)**, que relaciona la concentración equivalente en equilibrio de una mezcla de descendientes de radón (C_{eq}), y la concentración de radón (C_0).
- **La fracción libre (f_p)**, que representa la proporción de descendientes de radón de vida corta no vinculados a aerosoles.

Este estudio, debe ser llevado a cabo por un servicio de dosimetría autorizado por el CSN.

9. Recomendaciones

La presente Guía busca fomentar un mejor cumplimiento de la reglamentación vigente en materia de protección radiológica en las galerías de agua y pozos de las Islas Canarias a los que deban acceder trabajadores.

Se recomienda informar a estos trabajadores de los riesgos a los que están expuestos durante los trabajos subterrá-

neos con respecto al radón, así como de las medidas de protección a aplicar.

Además, sería positivo abrir un espacio de colaboración con otras regiones mineras españolas, para la mejora del conocimiento del funcionamiento del gas radón en las explotaciones, así como para la mitigación de este y reducción de los efectos en los trabajadores.

Por otra parte, en los casos en los que el promedio anual de concentración de radón en aire sea superior al nivel de referencia, debe consultarse con una Unidad Técnica de Protección Radiológica, que asesorará sobre las medidas de protección a aplicar. Estas pueden incluir el empleo de dosímetros de radón individuales que indiquen la radiación recibida por los trabajadores durante su jornada laboral, es decir, que den información acerca de la dosis efectiva a la que están expuestos en su puesto de trabajo.

En cualquier caso, es recomendable —siempre que sea posible técnicamente y efectivo en términos de reducción de dosis— disponer de ventilación forzada (extracción mecánica) en las galerías de agua y los pozos, manera fin de minimizar la concentración de radón en estas instalaciones.

Se ha observado que en las instalaciones que presentan un gunitado en sus paredes presentan niveles de concentración de radón más bajos, al aislar el terreno natural del espacio de trabajo, por lo que, en las instalaciones que no dispongan de este, esta sería otra posible medida de mitigación a valorar. En este sentido, hay hormigones especiales que pueden utilizarse como barrera contra el radón.

10. Referencias y bibliografía recomendada

Alonso, H., Cruz-Fuentes, T., Rubiano, J.G., González-Guerra, J., Cabrera, M.D.C., Arnedo, M.A., Tejera, A., Rodríguez-Gonzalez, A., Pérez-Torrado, F.J., Martel, P. (2015). Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer. *Water*, 7, 2575-2590.

Alonso, H. (2015). El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. *Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*, 184 pp. + Anexos.

British Caving Association Radon Working Party. (1996). Radon exposure during underground trips: A set of guidelines for caving and mine exploration. London, 22pp

Centro de Seguridad Nacional – CSN (2013). El mapa predictivo de exposición al radón en España. *Colección Informes Técnicos* 38.2013. M-1014-2013.

Comisión Europea (2013). Commission Recommendation of 22 October 2013 on laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. *Official Journal L* 296/12, 2013/51/Euratom.

Darby S et al. (2005). Radon in homes and lung cancer risk: a collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330:223-227.

- Darby S et al. (2006). Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*, 32(1):1-83.
- GSG (2012). Guía de Seguridad GSG-11.02: Control de exposiciones a fuentes naturales de radiación. Editado por el Consejo de Seguridad Nuclear.
- Hernández-Gutiérrez, L.E., Santamarta, J.C., Gutiérrez-Villanueva, J.L. (2019). Gas Radón y Salud Laboral en Canarias. Universidad de La Laguna: S.C. Tenerife.
- Hopke, P. (1987). The indoor radon problem explained for the layman. En: Hopke P, ed. *Radon and its decay products*. Washington, DC. American Chemical Society, 572-586.
- ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21 (1-3).
- Marrero, M. (2010). Modelo Hidrogequímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife. *Tesis Doctoral*, Universitat Politècnica de Catalunya. 499 pp + anexos.
- Martin-Luis, M. C., Steinitz, G., Soler, V., Quesada, M. L., Casillas, R. (2015). ^{222}Rn and CO_2 at Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *The European Physical Journal Special Topics*, 224 (4), 641-657. doi: 10.1140/epjst/e2015-02397-7

- OMS (2015). Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública - Capítulo 2. Mediciones de radón. 102 pp. ISBN 978-92-4 354767-1.
- Otton, J., Gundersen, L., Randall, R. (1992). The Geology of Radon. U.S. Geological Survey, 29 pp., ISBN 0-16-037974-1.
- Padrón, E. (2008). Emisión difusa de dióxido de carbono y otros volátiles en el volcán Cumbre Vieja, La Palma, Islas Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna (Tenerife).
- Padilla, G., Hernández, P.A., Padrón, E., Barrancos, J., Pérez, N.M., Melián, G., Nolasco, D., Dionis, S., Rodríguez, F., Calvo, D., Hernández, I. (2013). Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011-2012 submarine eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* – G3, 14, 2, 432-447. doi: 10.1029/2012GC004375
- Pérez, N.M., Hernández, P.A., Padrón, E., Melián, G., Marro, R., Padilla, G., Barrancos, J., Nolasco, D. (2007). Precursory subsurface ^{222}Rn and ^{220}Rn degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 164(12), pp. 2431-2448.
- Quindós, L.S., Sainz, C., Fuente, I., Fernández, A., Celaya, S., Rábago, D., Quindós, L., Fernández, E., López, D., Quindós, J., Gutiérrez, M. (2019). Manual: Cuestiones que Delegados/as de Prevención han de conocer sobre el gas radón. Blanca Impresores SL, 102pp.

- Ródenas, C., Gómez, J., Soto, J. Maraver, F. (2008). Natural radioactivity of spring water used as spas in Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277, 625-630.
- Santamarta J.C. (2016). Tratado de minería de recursos hídricos en islas volcánicas oceánicas. Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Sur de España: Sevilla.
- Santamarta J.C., Hernández-Gutiérrez L.E., Rodríguez-Martín J., Lario-Bascones R.J., Morales-González-Moro Á. (2020a) Radon Gas and Groundwater: Study of Risks in Water Galleries in Tenerife (Canary Islands, Spain). In: Fernandes F., Malheiro A., Chaminé H. (eds) *Advances in Natural Hazards and Hydrological Risks: Meeting the Challenge. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer.
- Santamarta J.C., Hernández-Gutiérrez L.E., Rodríguez-Martín J., Marrero Díaz, R.; Lario-Bascones R.J., Morales-González-Moro Á. (2020b). Radon measurements in water galleries in Tenerife, Canary Islands (Spain). *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13, 1287-1292. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00882-y>
- Santamarta, Juan C.; Hernández-Gutiérrez, Luis E.; Rodríguez-Martín, J.; Lario-Bascones, Rafael J.; Morales-González-Moro, Á.; Cruz-Pérez, N. (2020c). Radon measurements in groundwater mines in La Palma and El Hierro, Canary Islands (Spain). *Archives of Mining Sciences*, 65(4), 864-876. <https://doi.org/10.24425/ams.2020.135182>

Suárez, E. Fernandez, J.A. Baeza, A. Moro, M.A. García, D. Pozo, J.M., Lanaja, J.M. (2000). Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. *Colección Informes Técnicos 04.02*. CSN. Madrid.

Voronov, A. N. (2004). Radon-rich waters in Russia. *Environmental Geology*, 46, 630-634.

APÉNDICE: Definiciones

Becquerelio (Bq): Unidad en la que se mide la frecuencia de desintegración o transformación de un elemento radiactivo. Para determinar el nivel de radioactividad, normalmente se referencia a un volumen de aire o agua, Bq/m³, pero también a su concentración en la roca, por ejemplo, Bq/kg.

Exhalación: Cantidad de gas radón emitida por una superficie.

Emanación: Capacidad del gas radón para escapar de la estructura de la roca.

Carcinógeno: Agente químico o físico específico que tiene la capacidad de causar cáncer en individuos expuestos a él.

Concentración del gas radón: Se mide en Bq/m³ y sus límites dentro de los edificios y/o instalaciones están marcados por normativas nacionales e internacionales.

Dosis absorbida: Cantidad de energía cedida por la radiación ionizante a la unidad de masa de material irradiado. Se mide en Gray (Gy).

Dosis efectiva: Cantidad de radiación obtenida multiplicando las dosis equivalentes para los distintos tejidos y órganos por el factor de riesgo ponderado correspondientes a cada uno de ellos y sumando los productos. Se mide en Sievert (Sv) y es la dosis que da información acerca de los radionucleidos ingeridos y/o inhalados.

Dosis equivalente: Cantidad obtenida multiplicando la dosis absorbida por un factor de ponderación de las radiaciones incidentes que tiene en cuenta el distinto daño biológico que las diferentes radiaciones ionizantes producen en los tejidos. Su unidad es el Sievert (Sv).

Factor de equilibrio: La relación entre la concentración equivalente de equilibrio y la concentración de gas radón.

Frente de galería: Zona más profunda de la galería, es decir, es la última zona a la que ha llegado la perforación de la galería.

Galería: Captación de agua subterránea realizada mediante perforaciones o túneles con una sola boca.

Gas noble: Elemento químico monoatómico, inodoro e incoloro en condiciones normales. No puede congelarse, tiene altísimos puntos de ebullición y sólo puede licuarse bajo grandes presiones.

Isótopo radiactivo: Átomo de un elemento con el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones.

Partícula alfa: Partícula compuesta de dos protones y dos neutrones.

Radionucleido: isótopo inestable que se desintegra espontáneamente emitiendo radiaciones alfa, beta, gamma o de neutrones.

Radiación ionizante: La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio, en forma de ondas electromagnéticas o partículas, siendo las radiaciones ionizantes las que tienen energía suficiente como para producir la ionización de los átomos de la materia que atraviesan.

Radiactividad: La radiactividad es el proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía mediante la emisión de una radiación.

Radón: Elemento químico perteneciente al grupo de gases nobles. En su forma gaseosa es incoloro, inodoro e insípido.

Uranio: Elemento químico levemente radiactivo que está presente de forma natural en los suelos.

Vida media: Velocidad a la que los elementos radiactivos se desintegran.

Zona homogénea de concentración de radón: Área de un edificio o instalación en las que, debido a sus condiciones de temperatura, permeabilidad, localización, etc., puede considerarse que la concentración de radón es homogénea en todo su volumen.



Universidad
de La Laguna



Gobierno de Canarias

