



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“ESTUDIO E INTERCOMPARACIÓN DE DIFERENTES
MÉTODOS DINÁMICOS PARA LA MEDICIÓN DE RADÓN
INTRAMUROS, Y SUS APLICACIONES.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

RICARDO ALAN RETANA GONZÁLEZ

TUTOR:

DR. GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A todos los gigantes que me permitieron posar sobre sus hombros para ver más allá

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han influenciado mi vida para llegar hasta este punto.

A mi familia por brindarme su apoyo incondicional y a mis amigos del *Balcón* y de la licenciatura que siempre estuvieron ahí para alentarme.

Al Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM), ya que este estudio fue realizado usando las facilidades y laboratorios del “Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría” y para el proyecto PAPIIT IN-102819 intitulado “Determinación de contenidos radioactivos en agua, aire, suelos y alimentos (parte V)”.

Al Dr. Guillermo C. Espinosa García por la propuesta y dirección de este trabajo.

A José Ignacio Golzarri y Moreno por el apoyo técnico.

A los miembros del jurado: Dr. Guillermo C. Espinosa, Dr. Eugenio Ley Koo, Dra. María Isabel Gamboa de Buen, Dr. Juan López Patiño y M. en C. Manuel René de Jesús Garduño López por su tiempo y sus consejos para la mejora de mi tesis así como por haber participado en mi examen profesional.

Introducción

El radón es la fuente de radiación natural más importante para el ser humano, esto significa que es el elemento radioactivo que presenta mayor riesgo radiológico en la salud de los seres vivos, por lo que resulta de interés social, económico, de salud y de la física evaluar las concentraciones del radón en sus diferentes ámbitos.

Debido al gran interés científico que hay sobre el radón, con 943 publicaciones tan solo en el último año [1], así como la evaluación de la concentración del mismo desde el punto de vista académico y de salud pública, en la actualidad existe un gran número de marcas de instrumentos de medición del radón intramuros. La mayoría de usuarios utiliza instrumentos comerciales para la recolección de datos sin considerar la calidad y la confianza de las mediciones obtenidas, lo que ocasiona una brecha entre la información colectada de un instrumento y el valor real de la concentración del radón intramuros, datos que son esenciales para el cálculo de la dosis y los posibles efectos en los seres vivos.

En este trabajo se presenta el estudio e intercomparación de diferentes instrumentos y métodos dinámicos para la medición del radón intramuros, la estadística de este proceso y sus aplicaciones en diferentes campos de la ciencia, la tecnología y la salud.

El objetivo es evaluar diferentes métodos dinámicos para la medición del radón intramuros, además de su caracterización y sus aplicaciones y, lo más importante, su precisión y exactitud, así como la incertidumbre que presenta cada uno de los instrumentos analizados en su operación. Los instrumentos para la medición del radón intramuros que se usaron son: a) DurrIDGE Rad7, b) Sarad RTM1688-2, c) Sun Nuclear 1027, d) Sun Nuclear 1029,

e) Airthings Corentium Home y f) AlphaGuard D2000.

Esta intercomparación es muy importante para poder conocer y entender la operación y dinámica de los instrumentos comerciales actuales. Lo anterior, con el fin de poder identificar la calidad de la medición de cada uno de ellos pues existe un gran número de publicaciones sobre los niveles de concentración intramuros, pero desafortunadamente muy pocos sobre la precisión, exactitud y confiabilidad de los datos obtenidos por los instrumentos.

El trabajo está dividido en cinco capítulos: en el primero se discuten los aspectos fundamentales de la física de radiaciones, la relación de ésta con la salud y las recomendaciones internacionales ante las concentraciones del radón. En el segundo capítulo se abordan los distintos métodos que existen para la detección y medición del radón, tanto los dinámicos como los pasivos. En el tercer capítulo se muestran las principales características de los instrumentos empleados en este trabajo, sus rangos de funcionamiento, los métodos que emplean y su costo y versatilidad, asimismo, se describe el método experimental para lograr su intercomparación. En el cuarto capítulo se señalan los resultados obtenidos de la intercomparación realizada y se presenta su análisis, al igual que una caracterización del monitor *Corentium Home*. En el quinto se exponen las distintas aplicaciones que se le pueden dar a los monitores estudiados. Además se expresan algunas recomendaciones en cuanto a los niveles de concentración del radón intramuros. Por último se exhiben las conclusiones, el glosario, los apéndices y la bibliografía.

Índice general

Agradecimientos	II
Introducción	III
1. Aspectos fundamentales de física.	1
1.1. Origen del radón	1
1.1.1. Origen y distribución del radón en el mundo.	1
1.1.2. Dinámica y movilidad del radón.	5
1.1.3. Interacción de la radiación con la materia.	9
1.1.3.1. Radiación alfa.	10
1.1.3.2. Radiación beta.	11
1.1.3.3. Radiación gamma.	12
1.1.3.4. Reacciones Nucleares	12
1.1.3.5. LET (<i>linear energy transfer</i>).	13
1.2. Riesgos en salud pública por gas radón intramuros.	14
1.2.1. Acumulación de la concentración del radón.	15

1.2.2.	Recomendaciones y normas internacionales y nacionales.	17
2.	Métodos de medición del radón y sus aplicaciones.	20
2.1.	Métodos dinámicos o activos.	20
2.1.1.	Detectores de centelleo.	21
2.1.2.	Cámara de ionización.	24
2.1.3.	Detectores de estado sólido.	27
2.1.3.1.	Detectores de unión por difusión.	29
2.1.3.2.	Detectores PiN.	30
2.1.3.3.	Detectores de implantes pasivos planos.	31
2.1.4.	Celda de Lucas.	32
2.1.5.	Método de dos filtros.	33
2.2.	Métodos pasivos.	35
2.2.1.	Carbón activado.	36
2.2.2.	Captura en gel	37
2.2.3.	Electret	39
2.2.4.	Termoluminiscencia.	40
2.2.5.	Trazas nucleares.	41
3.	Características de los diferentes instrumentos de medición del radón y su intercomparación.	45
3.1.	Rad7	45

3.2.	Sarad RTM1688-2	48
3.3.	Sun Nuclear 1027	49
3.4.	Sun Nuclear 1029	50
3.5.	<i>Airthings</i> Corentium Home	51
3.6.	AlphaGuard D2000	53
3.7.	Métodos de intercomparación	58
3.7.1.	Primer método de intercomparación	58
3.7.2.	Segundo método de intercomparación	59
4.	Intercomparación de resultados	61
4.1.	Primer intercomparación	61
4.2.	Segunda intercomparación	72
5.	Aplicaciones y recomendaciones	76
5.1.	Elaboración de mapas del radón.	76
5.1.1.	Mapas de radón en EUA	77
5.1.2.	Mapas de radón en Europa	79
5.1.3.	Mapas de radón en México	82
5.1.4.	Mapa de radón <i>Airthings</i>	84
	Conclusiones	86
	Glosario	89

Apéndices	96
A. Tablas de resultados	97
B. Unidades	102
C. Estadística	104
Bibliografía	109

Índice de figuras

1.1. Cadena de decaimiento del uranio-238. [8]	2
1.2. Cadena de decaimiento del torio-232. [8]	2
1.3. Cadena de decaimiento del uranio-235. [8]	3
1.4. Contribución porcentual de exposición de distintas fuentes de radiación. [11]	4
2.1. Principio de producción de la luz de centelleo producida por radiación in- cidente. [19]	22
2.2. Principio de trabajo de un PMT. [19]	23
2.3. Configuración básica de un fotodiodo PiN. [18]	24
2.4. Esquemas de cámaras de ionización.	25
2.5. Características del voltaje y corriente en una cámara de ionización. [18] . .	26
2.6. Impurezas en semiconductores. [33]	28
2.7. Región de depleción. [33]	28
2.8. Comportamiento de un detector semiconductor al interaccionar con radiación	29
2.9. Esquema básico de un diodo PiN polarizado en inversa. [19]	30
2.10. Celda de Lucas.	33

2.11. Diagrama del método de doble filtro.	35
2.12. Detectores de absorción de carbón activado	37
2.13. Espectro gamma de gel expuesto a radón. [43]	38
2.14. Detectores para el método de electret.	40
2.15. Mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos. [47]	42
2.16. Geometría de la formación de trazas mediante ataque químico. [47]	43
2.17. Trazas formadas en un CR-39 por radiación alfa proveniente del radón.	44
3.1. Imagen de un Rad7. [48]	45
3.2. Esquema de la cámara de detección del Rad7.	47
3.3. Distintos espectros obtenidos por el Rad7. En todos los casos el eje hori- zontal presenta una escala en MeV y el vertical en Cuentas. La ventana A representa los isótopos de ^{218}Po (6 MeV) mientras que la C los de ^{214}Po (7.69 MeV). En (b) radón nuevo hace referencia a las detecciones ocasio- nadas por el ^{218}Po mientras que en (c) radón viejo hace referencia a las ocasionadas por el ^{214}Po . Espectros similares se obtienen para el caso del torón. [48]	47
3.4. Imagen de un Sarad RTM1688-2. [49]	48
3.5. Imagen de un Sun Nuclear 1027. [50]	49
3.6. Imagen de un monitor 1029 de Sun Nuclear. [51]	50
3.7. <i>Airthings</i> Corentium Home.	52
3.8. Fotodiodo PiN dentro del Corentium Home.	53

3.9. Imagen de un AlphaGuard D2000.	53
3.10. Esquema de un AlphaGuard en modo de difusión. [55]	54
3.11. Montaje experimental. 1) AlphaGuard D2000-A. 2) Sun Nuclear 1027-A. 3) Corentium Home. 4) Sun Nuclear 1029. 5) AlphaGuard D2000-B. 6) Rad7. 7) Sun Nuclear 1027-B. 8) Sarad RTM1688-2.	59
3.12. Equipos Corentium Home dentro de una cámara de radón.	60
4.1. Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con concen- traciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.	63
4.2. Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con con- centraciones medias. Las barras de incertidumbre así como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.	64
4.3. Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con con- centraciones altas. Las barras de incertidumbre así como la banda azul re- presentan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.	65
4.4. Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 2 días de monitoreo.	65
4.5. Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentra- ciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.	66

4.6. Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentraciones medias. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.	67
4.7. Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentraciones altas. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.	68
4.8. Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 5 días de monitoreo.	68
4.9. Concentración de radón obtenida en 20 días de estudio con concentraciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.	69
4.10. Concentración de radón obtenida en 20 días de monitoreo con concentraciones medias. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.	70
4.11. Concentración de radón obtenida en 20 días de monitoreo con concentraciones altas. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.	71
4.12. Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 20 días de monitoreo.	72
4.13. Comportamiento de los monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón.	73

4.14. Concentración de radón correspondiente al 03/03/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones bajas. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.	74
4.15. Concentración de radón correspondiente al 28/02/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones medias. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.	74
4.16. Concentración de radón correspondiente al 26/02/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones altas. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.	75
5.1. Mapa de concentración del radón por condado de EUA. La zona 3 tiene bajos niveles de concentración mientras que la zona 1 tiene niveles elevados de radón. [62]	78
5.2. Mapa de concentraciones de radón en el estado de Kentucky con una particular ampliación al condado de Logan. La zona 1 representa condados con promedios de radón predichos mayores que 4 pCi/l, la zona 2 con valores de entre 2 y 4 pCi/l y la zona 3 con valores menores que 2 pCi/l. [60]	78
5.3. Ejemplo de un nuevo mapa de radón del estado de Kentucky que muestra niveles de peligro basados en mediciones de radón intramuros e información geológica. Los niveles de radón por tipo de roca van de 0.0 a 2.7 pCi/l (azul), 2.71 a 4.00 pCi/l (verde), 4.01 a 8.00 pCi/l (amarillo), 8.01 a 16.00 pCi/l (café) y 16.01 a 25.30 pCi/l (rojo). [60]	79
5.4. Promedios aritméticos en celdas de 10x10 km de las concentraciones del radón en habitaciones de primera planta. Información actualizada al 28/09/18. [63]	80

5.5. Mediciones de radón intramuros de 1992 a 2013 en Irlanda. [58]	81
5.6. Mapas modelados de Irlanda que muestran la concentración promedio de radón intramuros y los casos anuales esperados de cáncer debido a este último. [58]	81
5.7. Nuevo mapa de radón intramuros de la República de Irlanda (2017). Las predicciones están basadas en las mediciones del radón intramuros, el sustrato de suelo, la geología cuaternaria, la permeabilidad del subsuelo y el tipo de acuífero. [59]	82
5.8. Mapa de concentración promedio de radón intramuros en México. [66] . . .	83
5.9. Distribución del radón intramuros en las 16 alcaldías de la Ciudad de México. [65]	84
5.10. Mapa dinámico desarrollado por <i>Airthings</i> . [67]	85

Índice de tablas

1.1. Coeficientes de difusión del gas radón en distintos medios. [8], [12]	9
1.2. Valores de la LET para distintos tipos de radiación en agua. [21]	14
1.3. Niveles recomendados por distintos organismos de protección radiológica y salud. [4], [27], [28], [29], [30]	18
1.4. Niveles de referencia recomendados para radón en países de la Unión Europea. El símbolo * representa niveles obligatorios. En los países donde se presentan dos valores el que no tiene * representa solamente niveles recomendados. [8]	18
1.5. Niveles de referencia recomendados para radón en países europeos que no pertenecen a la Unión Europea. El símbolo * representa niveles obligatorios. En los países donde se presentan dos valores el que no tiene * representa solamente niveles recomendados. [8]	19
3.1. Especificaciones técnicas del Rad7, Sarad RTM1688-2 y Sun Nuclear 1027. [48], [49], [50]	56
3.2. Especificaciones técnicas del Sun Nuclear 1029, Corentium Home y AlphaGuard D2000. [51], [52], [55]	57

A.1. Tabla de datos correspondiente a la segunda intercomparación. La tabla muestra la concentración de radón en Bq/m ³ detectada por 5 equipos Co-rentium Home dentro de una cámara de radón.	97
A.2. Concentración promedio de radón obtenida por los distintos instrumentos estudiados en la primer intercomparación. Todos los valores de concentración están en Bq/m ³	98
A.3. Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones bajas del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m ³ , la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].	99
A.4. Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones medias del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m ³ , la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].	100
A.5. Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones altas del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m ³ , la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].	101

Capítulo 1

Aspectos fundamentales de física.

1.1. Origen del radón

1.1.1. Origen y distribución del radón en el mundo.

En el año 1900, Friedrich Ernst Dorn descubrió el radón mientras estudiaba las emisiones del bromuro de radio [2], sin embargo, no fue hasta 1923 cuando se agregó oficialmente a la tabla periódica bajo el nombre de “radón” y el símbolo “Rn” [3]. Este elemento pertenece al grupo de los gases nobles, y su número atómico es el 86. Es incoloro, inodoro, insípido, radioactivo y extremadamente tóxico [4], [5], además posee 3 radioisótopos que se encuentran de manera natural en el ambiente [6]: 1) el radón-222 (^{222}Rn) comúnmente llamado radón, el cual presenta una vida media ($t_{1/2}$) de 3.8235 días; 2) el radón-220 (^{220}Rn) también conocido como torón, con $t_{1/2}$ igual a 55.6 segundos y 3) el radón-219 (^{219}Rn) o actinón, con $t_{1/2}$ de 3.19 segundos [5], [7].

El ^{222}Rn es producido por el decaimiento del radio-226 (^{226}Ra), mismo que surge de la cadena de decaimiento del uranio-238 (^{238}U). Esta cadena de decaimientos se puede observar en la figura 1.1. Por otra parte, el ^{220}Rn surge de la cadena natural del torio-232 (^{232}Th), tal y como se observa en la figura 1.2, mientras que, finalmente, el ^{219}Rn se genera

del decaimiento del uranio-235 (^{235}U) mostrado en la figura 1.3.

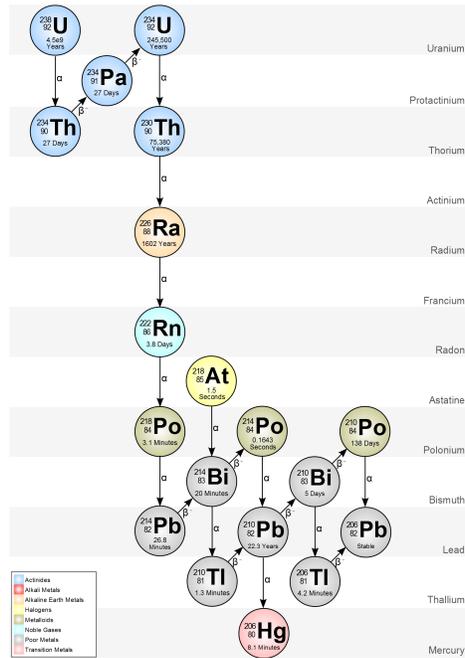


Fig. 1.1: Cadena de decaimiento del uranio-238. [8]

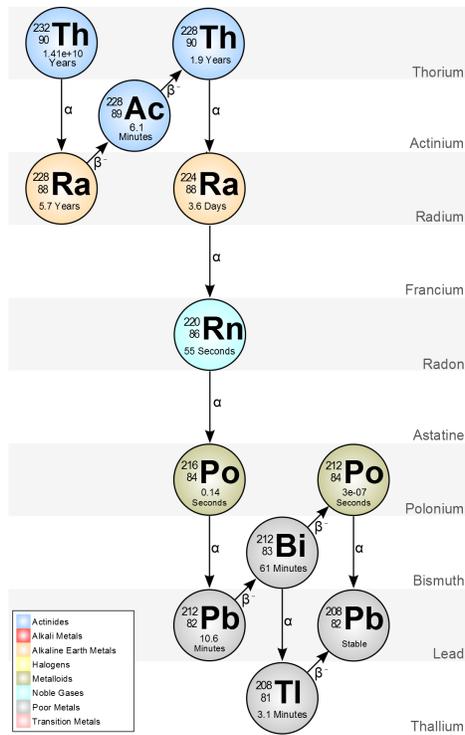


Fig. 1.2: Cadena de decaimiento del torio-232. [8]

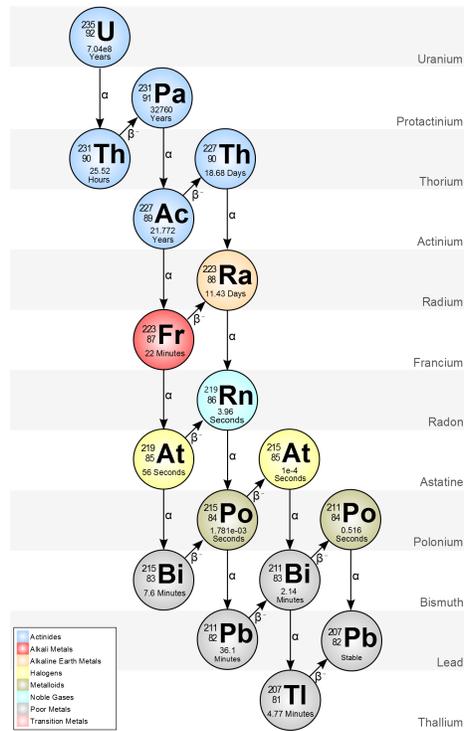


Fig. 1.3: Cadena de decaimiento del uranio-235. [8]

Debido a que los radionúclidos que producen los isótopos principales del radón son esencialmente ubicuos en la corteza terrestre, el radón tiene presencia en casi todas las rocas, suelos y aguas del planeta [9], además, al ser un gas noble, a través de poros, grietas y fallas, el radón emana fácilmente del suelo ya sea por difusión molecular o por advección¹ [10], convirtiéndose en parte de la atmósfera terrestre, donde decae de forma natural mientras emite partículas α . Éste también puede desplazarse a depósitos de agua subterráneos y, al ser soluble, acumularse en ellos [6] o, incluso, puede quedarse atrapado en el suelo dentro de las rocas [8].

Ya que el radón y el torón están presentes tanto en el aire y suelos, como en aguas de ríos y lagos, estos son considerados como los mayores contribuyentes a la exposición de radioactividad natural que recibe la población ocupando un 73 % y abarcando un 37 % de la exposición proveniente de distintas fuentes² tal y como se muestra en la figura 1.4 [11].

¹Infra p.5

²En este contexto se hacen 5 grandes divisiones de exposición: las naturales o de fondo, las médicas, las de consumo, las de actividades industriales y de investigación y por último las ocupacionales.

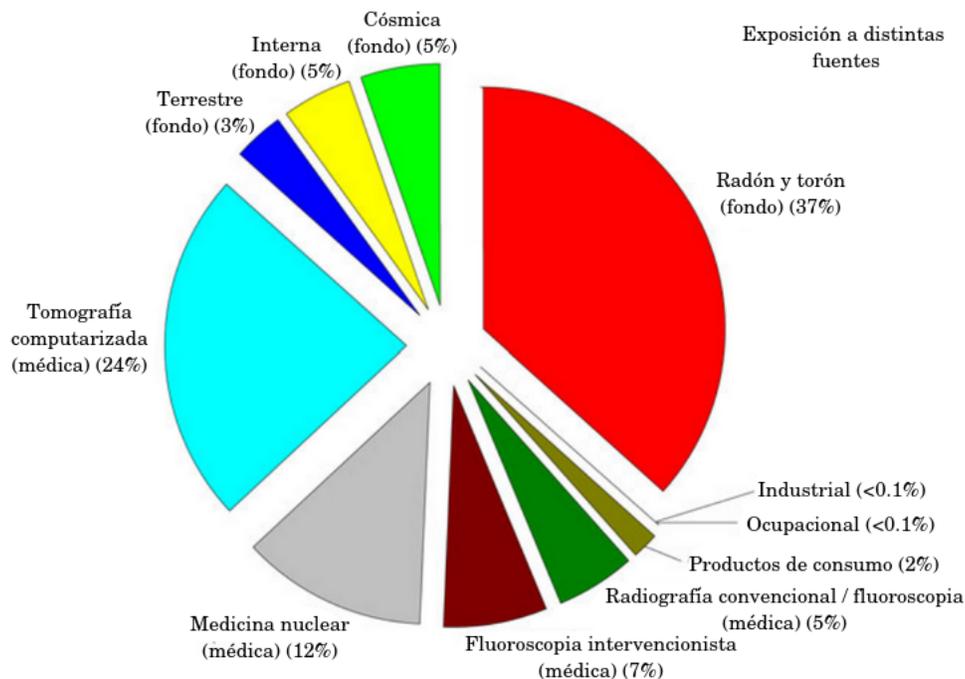


Fig. 1.4: Contribución porcentual de exposición de distintas fuentes de radiación. [11]

Como consecuencia de la necesidad de confirmar la relación entre la exposición al radón del público en general, con los riesgos de desarrollar cáncer de pulmón, distintos países como Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Irlanda, Francia, Alemania, España, Suiza, Italia, Países Bajos, República Checa, Dinamarca, Suecia, Noruega, Finlandia, Rusia, Israel, Japón e India han creado programas nacionales para el estudio del radón intramuros y extramuros [6].

Gracias a estas actividades y a través del monitoreo de las concentraciones del gas radón, se ha podido conocer un estimado de su acumulación a lo largo del globo terráqueo.

Se ha observado que la liberación más importante del radón hacia la atmósfera es desde el suelo, pues se han medido tasas de emanación promedio del orden de 59.2 Bq/cm^2 por año; si se considera el área aproximada de suelo de la Tierra ($\approx 150,000,000 \text{ km}^2$) se obtiene una emanación total de $8.88 \times 10^{19} \text{ Bq}$ de radón por año, en cambio, la liberación desde la superficie marina solo contribuye con 0.22 Bq/cm^2 por año [8].

Con lo anterior se estima que, en todo momento existen del orden de $1.3 \times 10^{18} \text{ Bq}$ de

radón en la atmósfera terrestre. De esta manera se puede inferir una concentración promedio superficial de 2.59 Bq/m^3 , sin embargo, el promedio de concentración en la superficie continental varía entre 3.7 y 7.4 Bq/m^3 , mientras que la medición hecha sobre la superficie marina es de alrededor de 5 veces menos [8].

A pesar de las estimaciones generales de concentración, los niveles del radón varían conforme a distintos factores. Su distribución en aire depende de las condiciones tanto meteorológicas como geográficas. Los nucleidos hijos del radón son isótopos de metales pesados que se pueden adherir fácilmente a las partículas de aerosol suspendidas en el aire, de esta forma, la deposición en seco, o la lluvia y otros procesos de precipitación, eliminan del aire los aerosoles cargados con la progenie del radón [10]. Por otra parte, la presión atmosférica influye directamente en la distribución del radón, pues a menor presión habrá una mayor expansión del gas radón. De lo anterior se vuelve claro que la altitud, la temperatura, la estación del año, la altura respecto del suelo y la hora del día también tendrán influencia en la distribución del gas y su expansión [8], [12].

1.1.2. Dinámica y movilidad del radón.

Aunque factores como la temperatura, la presión u otros elementos de la meteorología influyen en la distribución del radón, la migración y el movimiento de este gas dependerán del medio en el que se produzcan. Asimismo, su desplazamiento en suelos y materiales de construcción dependerá de distintos mecanismos, que estarán en función de la densidad, la composición y la estructura del material [8].

El radón se genera en el medio en función de la concentración del ^{226}Ra . La fracción de átomos del radón que llega a los poros del material se denomina “coeficiente de emanación f ”, mismo que depende de la distribución del tamaño de grano, la porosidad y la humedad.

Ya que el radón está en el volumen del poro del sólido, éste migra mediante dos mecanismos: difusión y flujo advectivo. La difusión se describe por la ley de Fick, que relaciona un gradiente de concentración a un flujo a través del coeficiente de difusión. La ley de Fick

se puede escribir como

$$\phi_d = -D_e \nabla C_{Rn} \quad (1.1)$$

donde ϕ_d es la densidad de flujo difusivo de la actividad del radón por unidad de área del poro del suelo ($\text{Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$), D_e es el coeficiente de difusión efectivo; y C_{Rn} es la concentración de actividad intersticial del radón (Bq m^{-3}) [8].

El flujo advectivo, por otra parte, sigue la ley de Darcy, que relaciona la velocidad aparente del flujo a través del sólido con el gradiente de presión en el medio, de esta forma se tiene

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (1.2)$$

donde v es el vector de velocidad superficial (ms^{-1}), siendo el flujo por unidad de área geométrica definida sobre un elemento de volumen relativamente grande comparado con los poros individuales, pero relativamente pequeño con relación a la dimensión total del suelo; P es la presión del medio; k es la permeabilidad del gas del suelo, que describe cuan fácil puede fluir un gas en el suelo; y, finalmente, μ es la viscosidad dinámica de la fase gaseosa de los poros del suelo [8].

La actividad del radón a través del área del poro se calcula multiplicando la velocidad de Darcy por la concentración de actividad del radón en los poros del suelo dividido por la porosidad del suelo. Así, se obtiene

$$\phi_a = \frac{C_{Rn}}{\epsilon} v = -\frac{C_{Rn}k}{\epsilon\mu_e} \nabla P. \quad (1.3)$$

El flujo total de radón es la suma de los flujos advectivo y difusivo:

$$\phi = \phi_d + \phi_a = -D_e \nabla C_{Rn} - \frac{C_{Rn} k}{\epsilon \mu_e} \nabla P. \quad (1.4)$$

Conforme a lo anterior, la migración del radón en el suelo se debe a dos procesos independientes, el movimiento de los átomos del radón como función del gradiente de la concentración del radón (difusión) y al flujo debido al gradiente de presión del mismo (advección) [8].

Ahora, es posible describir la migración del radón en el suelo con una ecuación de transporte. La ecuación de transporte más general es quizás la dada por Nazaroff y Nero (1988) [13]

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial (C_g \epsilon_g + C_w \epsilon_w)}{\partial t} = \nabla D'_e \nabla C_g - \nabla C_g \frac{v'}{\epsilon_g} + f' \rho_{gr} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} - \frac{1}{\epsilon} \lambda_{Rn} (C_g \epsilon_g + C_w \epsilon_w) \quad (1.5)$$

donde ϵ es la porosidad del suelo (adimensional); C_g es la concentración de actividad de radón en el volumen lleno de gas de los poros del suelo (Bq m^{-3}); ϵ_g es la porosidad del gas, definida como la razón entre el volumen lleno de gas de los poros del suelo y el volumen total de los poros; C_w es la concentración de actividad de radón en el volumen lleno de agua de los poros del suelo (Bq m^{-3}); ϵ_w es la porosidad del agua, definida como la razón entre el volumen lleno de agua de los poros del suelo y el volumen total de los poros ($\epsilon = \epsilon_g + \epsilon_w$); D_e es el coeficiente de difusión efectivo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) corregido por el efecto del contenido de agua; v' es el vector de velocidad superficial del gas del suelo (m s^{-1}); f' es el factor de emanación corregido por el efecto del contenido de agua; ρ_{gr} es la densidad de los granos del suelo (Bq kg^{-1}); λ_{Rn} es la constante de decaimiento del radón y A_{Ra} es la concentración de actividad de radio en el suelo (Bq/kg) [8], [13].

El primer término en el lado derecho de la ecuación corresponde al transporte por difusión, el segundo al transporte advectivo, el tercero a la generación de radón y el cuarto al decaimiento de este último [8].

La ecuación 1.5 puede simplificarse más si se considera que el contenido de agua es despreciable, describiendo el vector de velocidad superficial mediante la ley de Darcy y haciendo que el suelo sea isotrópico y homogéneo con respecto al coeficiente de difusión, a la permeabilidad, a la porosidad, al factor de emanación, al contenido de radio y a la densidad del medio. Así, la ecuación de transporte queda expresada como

$$\frac{\partial(C_g)}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_g + -\frac{k}{\epsilon \mu} \nabla P \nabla C_g + G - \lambda_{Rn} C_g \quad (1.6)$$

donde:

$$G = f \rho_{gr} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} A_{Ra} \lambda_{Rn} \quad (1.7)$$

es el término de generación del radón [8].

La solución de esta ecuación de transporte se da en dos partes; primero considerando una capa de suelo homogénea y semi-infinita (solución para difusión) y después considerando la velocidad del gas en el suelo constante (solución para advección). Al sumar las dos soluciones se obtiene la solución de la ecuación de transporte unidimensional

$$C_g(x) = C_\infty \left\{ 1 - \exp \left[\frac{1}{2l_d^2} \left(l_a - \sqrt{l_a^2 + 4l_d^2} \right) x \right] \right\} \quad (1.8)$$

donde $l_{a,d}$ es, respectivamente, la longitud de advección y de difusión del suelo [13].

La migración del radón en los materiales de construcción es igual que en los suelos. Dichos materiales son entendidos como medios porosos con un cierto contenido de radio [8]. En la tabla 1.1 se muestra el coeficiente de difusión del radón en diferentes medios.

Algunos estudios sugieren que la difusión es el mecanismo dominante mediante el cual el radón entra en la atmósfera desde el suelo. Además, debido a que el radón es químicamente inerte, el transporte en aguas subterráneas se debe básicamente a la difusión molecu-

lar y al flujo del agua misma, pues esta última presenta un coeficiente de difusión del orden $10^{-5} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ [8].

Medio	Coeficiente de difusión D (cm^2s^{-1})	Longitud de difusión l_d (m)
Aire	10^{-2}	2.4
Agua	10^{-5}	1.5
Arena	3×10^{-2}	0.9
Argilita	8×10^{-5}	
Concreto	2×10^{-5}	0.04-0.26
Cristales minerales	$10^{-9}-10^{-20}$	

Tabla 1.1: Coeficientes de difusión del gas radón en distintos medios. [8], [12]

1.1.3. Interacción de la radiación con la materia.

El proceso general mediante el cual los núcleos pueden emitir espontáneamente radiación ionizante se llama decaimiento radioactivo. Éste usualmente involucra uno de los tres decaimientos básicos posibles: decaimiento alfa (α), decaimiento beta (β) o decaimiento gamma (γ), en los cuales un núcleo inestable cambia espontáneamente en un estado más estable y emite alguna radiación [14].

Este hecho fue descubierto por Rutherford, quien mostró que estos tres procesos ocurren en una muestra natural de uranio. Las radiaciones emitidas α , β y γ fueron designadas conforme a su poder de penetración y de ionización. Es importante mencionar que las tres poseen características y naturalezas diferentes [15], [16].

Además de los decaimientos radioactivos, también se puede emitir radiación mediante una reacción nuclear, esto es, mediante la estimulación de un núcleo con una partícula. En general, la partícula proyectil le dota energía al núcleo, y esta energía se vuelve “disponible” para la emisión de una o más partículas. Algunas de estas reacciones son (n, α) , (n, β) , (n, γ) entre otras [17].

Todas estas radiaciones interaccionan con la materia de forma distinta y esto depende de su carga y su masa [18].

1.1.3.1. Radiación alfa.

Las partículas alfa están formadas por un sistema ligado de 2 protones y 2 neutrones y son consideradas como partículas pesadas con carga. Éstas son generalmente emitidas por núcleos pesados que contienen demasiados nucleones para permanecer estables [14]. El tipo alfa se caracteriza por ser la radiación natural más ionizante, sin embargo, puede ser detenida con algo tan simple como una hoja de papel. Las partículas generalmente son bastante energéticas ($E_\alpha = 4-6 \text{ MeV}$), pero, debido a su doble carga, $+2e$, interactúan fuertemente con los electrones del material que estén atravesando [18].

La emisión de las partículas alfa ocurre de manera natural en el decaimiento nuclear. Este proceso puede ser escrito como



donde X y Y son las especies nucleares inicial y final, y A y Z son, respectivamente, número de masa y número atómico [18].

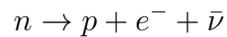
Para partículas alfa y en general para partículas pesadas con carga, la interacción más importante con la materia es la fuerza de Coulomb [16].

La fuerza de Coulomb hace interactuar, principalmente, a las partículas positivamente cargadas con los electrones orbitales³, haciendo que estos se puedan elevar a un estado más energético (excitación) o removerlos completamente del átomo (ionización) [18]. El resultado de estas interacciones es la reducción de la energía de la partícula incidente [19] y, dado que existe un gran número de electrones en la materia, se puede tratar esta pérdida de energía como continua [16].

³Pues también puede ocurrir la interacción de las partículas cargadas positivamente con los núcleos, sin embargo esto raramente ocurre y no es normalmente significativo en la respuesta de los detectores de radiación [18].

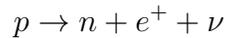
1.1.3.2. Radiación beta.

Las partículas β^- y β^+ son, respectivamente, electrones y positrones rápidos. Ambos resultan de la interacción débil del decaimiento de un neutrón o protón en un núcleo que contiene un exceso de los respectivos nucleones. Por ejemplo, en un núcleo rico en neutrones, cualquiera de ellos puede transformarse en un protón mediante el decaimiento β^- . Este fenómeno está descrito como



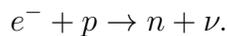
donde un electrón (β^-) y un antineutrino son emitidos. El núcleo hija ahora contiene un protón extra, de esta forma, su número atómico incrementa en 1 [14].

De manera análoga, si el núcleo tiene un exceso de protones, el decaimiento β^+ puede ocurrir,



donde ahora son emitidos un positrón (β^+) y un neutrino, y el número atómico ahora disminuye por 1 [14].

Además de estos dos procesos, existe un tercero que se considera una “alternativa” al decaimiento β^+ , pues los núcleos ricos en protones también pueden transformarse mediante la captura de un electrón proveniente de una de las órbitas atómicas

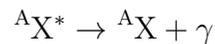


Esta reacción es esencialmente la misma que la del decaimiento β^+ , pero con la partícula beta transpuesta del lado izquierdo [14].

La forma en que un electrón puede interaccionar con el medio depende de la energía que éste tenga. Para energías bajas y moderadas los principales modos de interacción son la excitación y la ionización. A energías mayores, la emisión de Bremsstrahlung domina [19].

1.1.3.3. Radiación gamma.

Las partículas características de la radiación gamma son fotones con energías que van desde cientos de keV hasta unos pocos MeV [14]. Esta radiación resulta del decaimiento gamma, donde un núcleo que se encuentra en un estado excitado libera su exceso de energía mediante la emisión de radiación electromagnética.



donde el símbolo * representa un estado de excitación del núcleo. La emisión de un rayo gamma se puede obtener de la transición de un estado excitado alto a uno más bajo del mismo núcleo, sin que esto implique necesariamente que vuelva a su estado base [19].

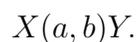
Aunque se conoce un gran número de interacciones posibles para la radiación gamma solo tres juegan un rol importante en su medición: el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares. Todos estos procesos conllevan a la transferencia parcial o total de la energía de la radiación gamma a un electrón o positrón [14].

1.1.3.4. Reacciones Nucleares

Este tipo de reacción ocurre cuando un núcleo blanco es bombardeado con partículas nucleares. Generalmente se denotan de la forma [20]



En la reacción nuclear, el núcleo blanco X es bombardeado por la partícula a , y, como resultado de la partícula despedida b , se produce Y . La energía de la reacción nuclear es la diferencia entre las masas de los reactivos y los productos, denominada Q [20]. Otra manera de escribir la reacción nuclear es



El bombardeo con neutrones produce un caso particular de esta clase de reacciones. Los neutrones son partículas que carecen de carga, por lo que su interacción con la materia es resultado de dispersiones o absorciones por el núcleo [16].

Si se bombardea un núcleo con neutrones, estos darán origen a reacciones nucleares. Algunas de estas son

$$(n, \alpha), (n, \beta), (n, \gamma)$$

en las cuales, la principal característica consiste en la emisión de radiación como la de los decaimientos previamente explicados.

1.1.3.5. LET (*linear energy transfer*).

La transferencia lineal de energía, o LET por sus siglas en inglés, es una medida de la energía absorbida en un medio por unidad de distancia recorrida cuando partículas cargadas pasan a través de él (MeV/cm). Este concepto suele confundirse con el poder de detención, no obstante, la LET excluye los rayos delta (electrones) producidos como consecuencia de la interacción de la radiación, haciendo que la LET sea mayormente usada para el análisis de la radiación en objetos pequeños como células biológicas o polímeros, donde los rayos delta no son absorbidos y no causan ningún efecto apreciable [19].

Las partículas alfa tienen un gran valor de LET, es decir, toda su energía es absorbida por el material en una distancia muy corta [21]. En la tabla 1.2 se muestran los valores de la LET para distintos tipos de radiación con energías de 1 MeV en agua.

Radiación	Rango proyectado (partículas α , β , protones); grosor medio (gamma/neutrón) en agua (g/cm^{-2})	LET Promedio ($\text{keV}/\mu\text{m}$)	Comentario
Alfa	5.93×10^{-4} cm	169	El rango proyectado para un α de 5 MeV (la energía aproximada de muchos actínidos emisores de α) es 37.3×10^{-4} cm.
Beta	0.437 cm	0.23	A 1 MeV, la atenuación gamma es dominada por la dispersión Compton.
Gamma	9.9 cm	0.1	
Protones	2.44×10^{-3} cm	41	D ₂ O es un moderador menos eficiente de neutrones. El grosor medio para un neutrón de 1 MeV en D ₂ O es de 5.1 cm.
Neutrón	0.13 cm	-	

Tabla 1.2: Valores de la LET para distintos tipos de radiación en agua. [21]

1.2. Riesgos en salud pública por gas radón intramuros.

Los primeros indicios del riesgo radiológico que el radón presenta provienen del año 1597, cuando un médico observó muchos casos de afecciones de pulmón en mineros que trabajaban en los Montes Metálicos entre Saxony y Bohemia. Ya que el trabajo de minería se continuó, en 1879 dos médicos alemanes concluyeron que la mayor parte de las muertes de los mineros eran causadas por cáncer de pulmón, y en 1921 Margaret Uhlig sugirió que las emanaciones de radio habrían sido las principales causas [12].

Tiempo después el radón volvería a ser de interés pues, en 1957, se encontraron concentraciones de éste en el agua y apareció por primera vez, de manera formal, el concepto

working level (WL) [12]. En los años sesenta y setenta surgió el interés por conocer el comportamiento y las concentraciones de radón en hogares y lugares de trabajo [8].

Fue hasta 1960 cuando en los trabajadores de minas de uranio de Estados Unidos, aparecieron casos de cáncer de pulmón asociados a minerales radioactivos. Esto confirmó los estudios realizados por Rajewsky, con lo cual se pudo establecer una relación causal entre el radón y el cáncer de pulmón. Algunos años después se confirmó que, efectivamente, la exposición a radón conlleva un riesgo de salud pública [6].

También se ha sugerido una correlación entre la incidencia de leucemias, melanomas, cáncer de mama, cáncer en menores y los niveles de radón intramuros en varios países [22], [23], [24]. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), se calculan 21,000 defunciones al año debido a cáncer de pulmón ocasionado por radón [25].

Para evitar los efectos dañinos en la salud y lograr una acción oportuna por parte de las autoridades correspondientes, se ha vuelto necesario monitorear los niveles de concentración del radón extramuros e intramuros, así como establecer límites en sus niveles.

1.2.1. Acumulación de la concentración del radón.

Como ya se ha discutido con anterioridad, los nucleidos que dan origen al radón son prácticamente ubicuos en la corteza terrestre, por lo que la presencia del radón en suelos y aguas es casi total y, a pesar de que se ha encontrado que los niveles promedio de concentración del radón extramuros⁴ son menores a 10 Bq/m³, dentro de viviendas, edificios, construcciones y cuevas la situación es distinta.

El radón tiende a acumularse en lugares cerrados o aislados (no ventilados) como lo son cuevas o casas. En un inicio, este hecho fue estudiado en Colorado en 1971 donde se concluyó que lugares aislados concentran una cantidad mayor de radón y, por tanto, constituyen una aportación de dosis mayor [8].

⁴*Supra* p.5

Las concentraciones dentro de espacios cerrados son, en su mayoría, superiores a las halladas en el ambiente externo. En 1984 una de las mayores concentraciones de radón se originó en un hogar de Pennsylvania, donde se registraron hasta $96,200 \text{ Bq/m}^3$ [12]. Incluso, estudios más recientes [26] han mostrado niveles de 748.5 Bq/m^3 en algunos hogares de España.

Existen cuatro fuentes básicas de radón en interiores:

- Niveles de radón ambiental en la atmósfera procedente del suelo.
- Filtración del radón desde las rocas que cimentan las construcciones.
- La liberación de radón desde el agua que se usa en la cocina, el baño y el lavado de ropa.
- La emanación de los materiales de construcción que contienen radio y uranio como lo son el granito, la toba volcánica italiana, el hormigón ligero, entre otras [10], [8].

Al estar en una atmósfera con un alto índice de radón y derivados, el epitelio bronquial de los individuos se ve expuesto a radiación ionizante (en su mayoría α y β), lo cual puede dar origen a cáncer pulmonar, cánceres en el sistema respiratorio, cáncer en el estómago y leucemias [6].

Los estudios epidemiológicos confirman que el radón en las viviendas aumenta el riesgo de cáncer de pulmón en la población en general, pues se estima que la proporción de casos de este padecimiento asociados al radón varía con respecto al total entre un 3 % y un 14 % [27].

Asimismo, tres análisis agrupados [18] obtuvieron datos sólidos que indican que el riesgo de adquirir cáncer pulmonar aumenta incluso por debajo de los 200 Bq/m^3 . De la misma manera, con estos estudios se estimó que hay un aumento de riesgo del 20 % por cada 100 Bq/m^3 . La existencia de estas pruebas demuestra que, a pesar de que las concentraciones presentes en viviendas sean normales, el radón constituye una causa de cáncer pulmonar en la población general [27].

1.2.2. Recomendaciones y normas internacionales y nacionales.

Debido a los riesgos radiológicos en salud pública por el radón intramuros, organizaciones internacionales y nacionales como la IAEA, la ICRP, la OMS, la EURATOM, la USEPA y otras más, han dado recomendaciones y/o normas sobre los niveles de concentración de radón intramuros. Estas sugerencias presentan variaciones en función de las características geológicas y locales de cada país, siempre considerando y previniendo algún efecto nocivo en la salud de la población. En la tabla 1.3 se observan algunas recomendaciones de los principales organismos internacionales y nacionales.

La IAEA en su *Basic Safety Standard* (BSS) establece que el gobierno de cada país es quien establece sus propios niveles, ya que es su obligación brindar información de los niveles de radón intramuros y de los riesgos de salud asociados, así como de tener un plan de acción para la reducción de las concentraciones de radón de ser necesario [28]. Consecuentemente muchos países no practican los niveles recomendados. En la tabla 1.4 se presentan algunos niveles de referencia sugeridos en países de la Unión Europea. Por otro lado, en la tabla 1.5 se presentan algunos niveles de referencia para países Europeos que no pertenecen a la Unión Europea.

En América Latina, la mayor parte de los niveles de concentración de radón se encuentran por debajo de los 100 Bq/m³. En 17 estados de la República Mexicana se ha reportado un rango de valores que van por debajo de los 40 Bq/m³ hasta cerca de los 200 Bq/m³, lo cual condujo a un valor promedio de 111.6 Bq/m³ [26], mismo que se encuentra dentro de los niveles aceptables referentes de la tabla 1.3. A pesar de ello, es necesario hacer un mayor número de mediciones para tener valores más asertivos o incluso un monitoreo continuo de las viviendas para que, de esta forma, sea posible atender y prevenir casos de concentraciones grandes del radón que podrían incrementar los casos de cáncer o, incluso, ocasionar la muerte.

Lugar	IAEA (Bq/m ³)	ICRP (Bq/m ³)	EURATOM (Bq/m ³)	OMS (Bq/m ³)	USEPA (Bq/m ³)
Vivienda	300	100-300	200	100-300	148
Trabajo	1000	100-1000	600	100-300	400

Tabla 1.3: Niveles recomendados por distintos organismos de protección radiológica y salud. [4], [27], [28], [29], [30]

País	Nivel de referencia en casas existentes (Bq/m ³)	Nivel de referencia en casas nuevas (Bq/m ³)
Alemania	1000	250
Austria	400	200
Bélgica	400	-
Dinamarca	400	200
España	200	-
Estonia	400	200
Finlandia	400	200
Grecia	400	200
Irlanda	200	200
Letonia	600* 300	300*
Lituania	400*	200*
Luxemburgo	150	150
República Checa	500	250
República Eslovaca	500*	250*
Suecia	200*	200*

Tabla 1.4: Niveles de referencia recomendados para radón en países de la Unión Europea. El símbolo * representa niveles obligatorios. En los países donde se presentan dos valores el que no tiene * representa solamente niveles recomendados. [8]

País	Nivel de referencia en casas existentes (Bq/m ³)	Nivel de referencia en casas nuevas (Bq/m ³)
Bielorrusia	400* 200	200*
Eslovenia	400	200
Noruega	400	200*
Polonia	400	200*
Reino Unido	200	200*
Rusia	400*	200*
Suiza	1000* 400	400*
Yugoslavia	400* 200	200*

Tabla 1.5: Niveles de referencia recomendados para radón en países europeos que no pertenecen a la Unión Europea. El símbolo * representa niveles obligatorios. En los países donde se presentan dos valores el que no tiene * representa solamente niveles recomendados. [8]

Capítulo 2

Métodos de medición del radón y sus aplicaciones.

El procedimiento general para lograr la medición del gas radón consiste en la detección de la radiación emitida por su decaimiento radioactivo natural y el de su progenie. De esta forma, la detección y medición de radón se puede hacer de manera directa midiendo solamente radón, o bien a través de sus productos de decaimiento. Sin embargo, por ser relativamente simples, de menor costo y eficaces, las mediciones de gas radón suelen preferirse a las de sus productos de desintegración [8], [27]. En la actualidad se cuenta con diversos métodos para la medición del radón intramuros. En general, estos métodos se pueden dividir en dos grupos: los métodos dinámicos y los pasivos [6], [8].

2.1. Métodos dinámicos o activos.

Los métodos dinámicos se caracterizan por ser de lectura directa y por ser utilizados para mediciones de corto plazo. Estos requieren de alimentación para su funcionamiento y son usados normalmente para mediciones puntuales tanto en el tiempo como en el espacio, además permiten obtener un registro continuo de la concentración y las fluctuaciones del

gas radón durante el periodo de medición. Estos métodos funcionan tomando la muestra de aire en un instante y cuantificando la concentración del radón a través de la radiación α detectada [6], [8], [27].

En la actualidad hay gran variedad de medidores dinámicos para radón intramuros, desde unos muy simples y baratos hasta otros con mayores avances tecnológicos, sistemas digitales, computarizados y con programas más sofisticados [6]. No obstante, todos ellos tienen en común el uso de detectores de radiación para la medición de concentraciones del radón. Los detectores más comúnmente empleados para este propósito son los detectores de centelleo, la cámara de ionización y los detectores de estado sólido.

2.1.1. Detectores de centelleo.

La detección de radiación ionizante por luz de centelleo producida en ciertos materiales es una de las técnicas más antiguas. Se sabe desde hace mucho tiempo que ciertos materiales producen un centelleo cuando interactúan con una partícula cargada, siendo Rutherford el pionero en usar pantallas de ZnS (sulfuro de zinc) para sus experimentos de dispersión de partículas α [31].

Los contadores por centelleo utilizados actualmente fueron desarrollados en los años cincuenta, mismos que consisten de cristales orgánicos e inorgánicos. Estos cristales centelladores son materiales aislantes que entre sus bandas de valencia y de conducción tienen centros de luminiscencia, los cuales juegan el rol central en la producción de luz por centelleo. Como se muestra en la figura 2.1, los centros de luminiscencia están generalmente compuestos por dos niveles de energía con una diferencia que es igual a la energía de los fotones dentro y fuera del rango visible del espectro electromagnético. Un fotón puede ser emitido si un electrón pasa de un nivel de energía alto de este centro a un nivel más bajo⁵ [19].

Cuando la radiación atraviesa un centellador, ésta pierde parte de su energía a lo largo

⁵También existe la posibilidad de transferencia sin emisión de radiación en la que la energía será disipada por los fonones.

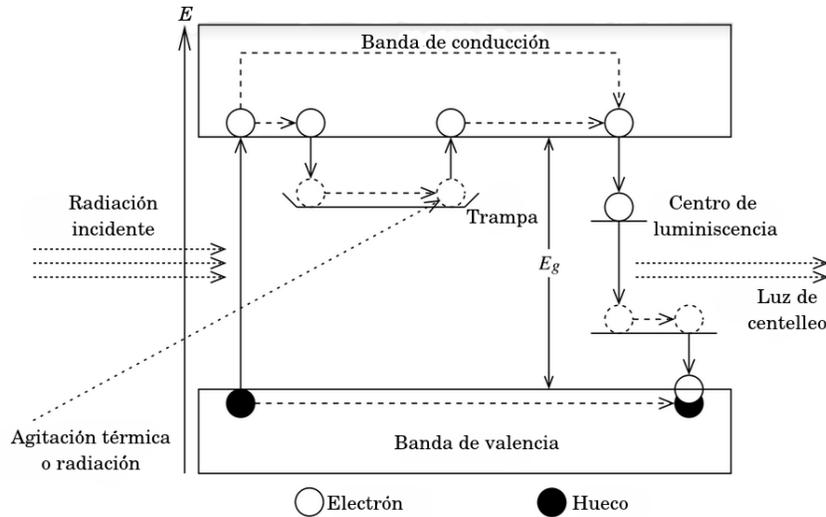


Fig. 2.1: Principio de producción de la luz de centelleo producida por radiación incidente. [19]

del material. Si la energía es mayor que la del espacio entre bandas, los electrones en la banda de valencia pueden subir a la banda de conducción. El electrón en la banda de conducción es libre de moverse hasta que eventualmente baja de nivel energético. Si este nuevo nivel es un centro de luminiscencia, entonces ocurre el fenómeno explicado en el párrafo previo. Cuando el electrón baja de nuevo a la banda de valencia se combina con un hueco como se muestra en la figura 2.1. Este fenómeno es conocido como fluorescencia y es el responsable de la detección de radiación mediante centelleo, sin embargo, otro efecto que también produce luz es la fosforescencia. Un buen centellador debe convertir rápidamente la mayor cantidad posible de radiación en fluorescencia y evitar la fosforescencia [18], [31], [19].

Los fotones emitidos por la fluorescencia son luego colectados con un fotodetector y convertidos en una señal eléctrica. Para lograr esto, los cristales centelladores se acoplan a un tubo fotomultiplicador (PMT) o a un fotodiodo.

Los tubos fotomultiplicadores son dispositivos capaces de convertir luz en un gran número de electrones. Se componen de un fotocátodo, una estructura multiplicadora de electrones y un electrodo de lectura. Los fotones que inciden en el fotocátodo dan lugar al efecto fotoeléctrico y, en consecuencia, hay una emisión de electrones (fotoelectrones). Es-

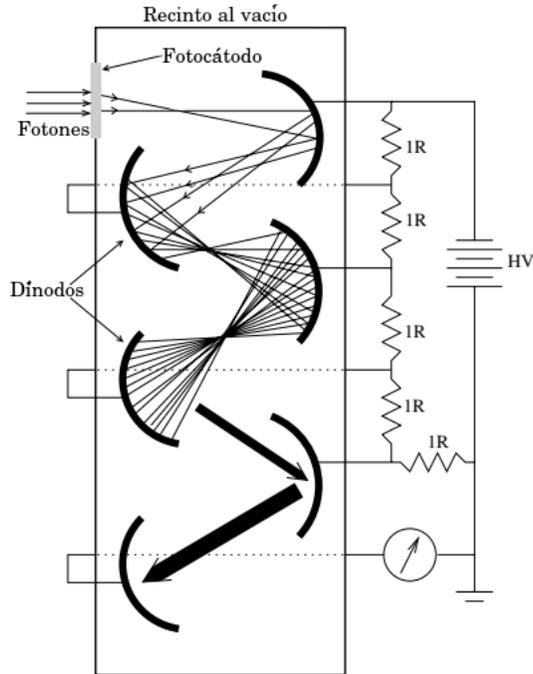


Fig. 2.2: Principio de trabajo de un PMT. [19]

tos electrones después son acelerados por medio de una diferencia de potencial hacia una placa metálica llamada dínodo, que multiplica el número de electrones incidentes. Estos nuevos electrones son acelerados hacia otro dínodo y el proceso se repite hasta que una gran cantidad de electrones son producidos y son acelerados hacia el último dínodo, donde la corriente resultante es medida y asociada a la radiación incidente [19]. En la figura 2.2 se muestra un esquema básico de un PMT.

Por otra parte, los fotodiodos son dispositivos de estado sólido sensibles a la luz incidente. Generalmente, tres diseños son empleados para este uso: los fotodiodos convencionales (también llamados fotodiodos PiN), los de avalancha y los fotomultiplicadores de silicio. Aunque estos diseños son diferentes entre sí, trabajan de una forma en común capturando los pares electrón-hueco producidos por la luz incidente [18].

Los fotodiodos PiN son los más sencillos y usados. Cuando incide luz en uno de estos dispositivos se producen pares electrón-hueco que son generados de forma similar a cuando incide radiación sobre un semiconductor⁶. Una configuración común de un fotodiodo de

⁶En la sección "Detectores de estado sólido" se explica este proceso. *Infra*, p.27

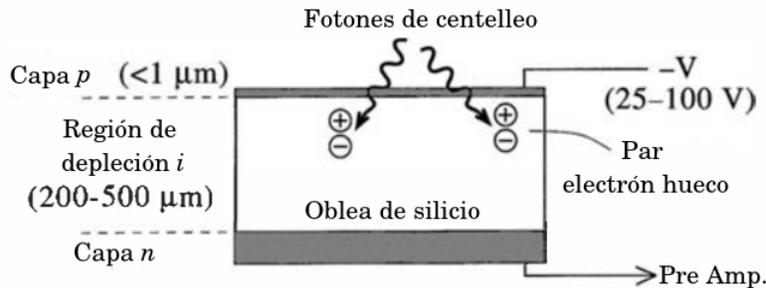


Fig. 2.3: Configuración básica de un fotodiodo PiN. [18]

silicio se muestra en la figura 2.3. La luz incide sobre una capa de material p^7 que se mantiene lo más delgada posible para permitir el paso de la luz hacia el volumen activo (región de depleción i) de silicio. Debido al campo eléctrico presente a causa del voltaje aplicado, los pares electrón-hueco producidos en esta zona son colectados en la frontera de la región de depleción i^8 . Luego, la correspondiente carga inducida es procesada y preamplificada para producir la señal de salida [18], [19].

Los detectores de centelleo siguen siendo ampliamente utilizados en el campo de detección de radiaciones, sin embargo, por los avances tecnológicos, en el área de detección del radón, han presentado un rezago y sustitución por otros detectores como la cámara de ionización o los detectores de estado sólido.

2.1.2. Cámara de ionización.

El término cámara de ionización es convencionalmente usado para los tipos de detectores en los cuales son colectados pares de iones de un gas. Las cámaras de ionización son, en principio, los detectores de gas más simples. Su operación normal se basa en la recolección de todas las cargas creadas por la ionización directa dentro del gas a través de la aplicación de un campo eléctrico [18].

La constitución básica de estos instrumentos se muestra en la figura 2.4(a). Aunque

⁷*Infra*, p.27

⁸*Infra*, p.27

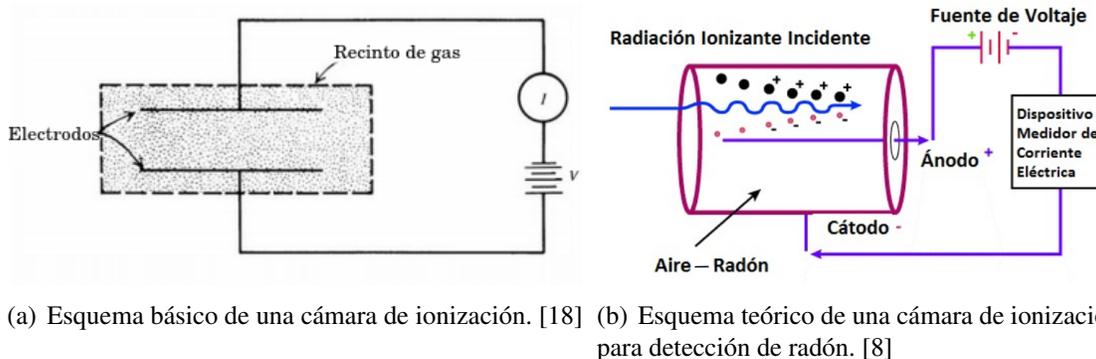


Fig. 2.4: Esquemas de cámaras de ionización.

la geometría de las cámaras de ionización puede variar, la cilíndrica, donde el caparazón externo es operado en potencial de tierra y un alambre axial es quien lleva la corriente, es preferida, tal y como se observa en la figura 2.4(b).

Cuando la radiación atraviesa el gas dentro de la cámara, a lo largo de su trayectoria se producen moléculas excitadas e ionizadas. Después de que una partícula neutral es ionizada, el ion positivo y el electrón libre resultantes son llamados *par-ion* y funcionan como el componente básico de la señal eléctrica desarrollada por la cámara. Al haber un campo eléctrico, el movimiento de las cargas positivas y negativas, representadas por los iones y los electrones, constituye una corriente eléctrica. Si un volumen dado del gas permanece en un estado estable de irradiación, la razón de formación de pares de iones será constante. Si todas las cargas son recolectadas eficientemente, la continuidad de corriente producirá una medida precisa de la razón a la que son formados los pares de iones dentro del volumen. La medición de esta corriente de ionización es el principio de detección de estos dispositivos [18], [19].

Las características de corriente y voltaje se muestran en la figura 2.5. En ella se aprecia que cuando el voltaje es nulo, no hay flujo de corriente pues no existe ningún campo eléctrico dentro del gas. Los iones creados desaparecerán por recombinación o difusión. Conforme el voltaje aumenta, el campo eléctrico resultante comienza a separar los pares de iones cada vez más rápido, y la recombinación disminuye. Las cargas positivas y negativas

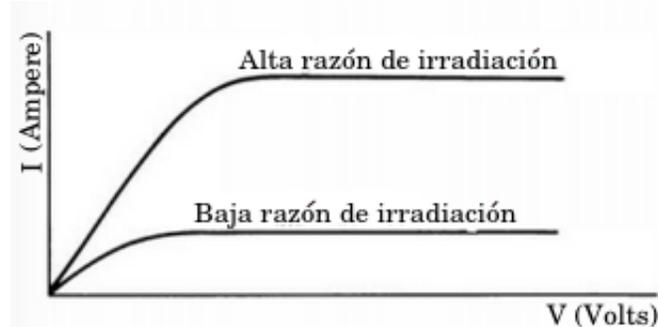


Fig. 2.5: Características del voltaje y corriente en una cámara de ionización. [18]

son movidas a su electrodo respectivo con un aumento de la velocidad de deriva⁹, reduciendo el equilibrio de concentración de iones dentro del gas y, por lo tanto, suprimiendo la recombinación de volumen entre el punto de origen y los electrodos colectores. La corriente medida aumenta con el voltaje aplicado conforme estos efectos reducen la cantidad de cargas originales que se pierden. Para un voltaje lo suficientemente alto, el campo eléctrico es lo bastante grande para suprimir con efectividad las consecuencias de la recombinación a un nivel despreciable y todas las cargas originales creadas por el proceso de ionización contribuyen a la corriente de ionización. Aumentar más el voltaje no aumentará la corriente de ionización pues todas las cargas ya han sido colectadas y su razón de formación es constante. Esta es la región de *saturación* donde estas cámaras son usualmente utilizadas [18].

El método de detección del radón reside en el hecho de que los gases radioactivos pueden ser convenientemente medidos incorporándolos como un elemento del gas interno de una cámara de ionización [18]. El aire de interés es bombeado al interior de la cámara o se le permite la difusión al interior de la misma [32]. Una vez dentro, las partículas alfa emitidas en el decaimiento del radón y sus hijos ionizan el aire en la cámara como se muestra en la figura 2.4(b) [8]. Se puede medir la ionización total en la cámara o los pulsos individuales causados por las partículas alfa. Esta última técnica ofrece la ventaja de poder discernir entre pulsos causados por diferentes productos del decaimiento del radón pudiendo hacer un espectro de las partículas que se encuentran en el aire [32].

⁹La velocidad de deriva para iones positivos es en dirección convencional del campo eléctrico, mientras que los electrones libres y los iones negativos se mueven en la dirección opuesta.

2.1.3. Detectores de estado sólido.

Los semiconductores son sólidos cristalinos en los que sus átomos se encuentran retenidos mediante enlaces covalentes. El principio de este tipo de materiales se basa en la estructura de bandas de los sólidos. El enrejado periódico de los cristales establece bandas de energía permitidas para los electrones que existen dentro del sólido. De esta forma, un electrón que no posea suficiente energía no podrá pasar a la banda de conducción ni podrá moverse por el material, sin embargo, si se le dota energía suficiente mediante estimulación térmica o radiación ionizante, éste puede subir a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. A este par se le llama *par electrón-hueco* y es el equivalente al par-ion de las cámaras de ionización. El electrón en la banda de conducción y el hueco en la banda de valencia pueden ser desplazados bajo la influencia de un campo eléctrico lo que contribuye en la conductividad del material [18] [19].

En un semiconductor puro, conocido como semiconductor intrínseco o material tipo i, se pueden producir, sólo mediante excitación térmica o radiación ionizante, pares electrón-hueco, por lo que no es sencillo producir un flujo de carga. No obstante, las características de un material semiconductor se pueden alterar con la adición de impurezas. Con este método es posible formar materiales con exceso de cargas negativas (electrones) o con exceso de cargas positivas (huecos); este tipo de semiconductores se llaman, respectivamente, semiconductor tipo n y semiconductor tipo p, un ejemplo de ellos se muestra en la figura 2.6. Un material tipo n y uno tipo p se pueden unir para formar un diodo semiconductor [18], [19], [33].

Al momento de la unión, los electrones y los huecos en la región de la unión se combinan y provocan una carencia de portadores libres en la región próxima a la unión. Esta unión lleva por nombre “región de depleción” [19]. Si se aplica un potencial externo de V volts a través de la unión p-n, con la terminal positiva conectada al material tipo n y la negativa al material tipo p, el número de iones positivos revelados en la región de depleción del material tipo n se incrementará por la gran cantidad de electrones libres atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. Por las mismas razones, el número de iones negati-

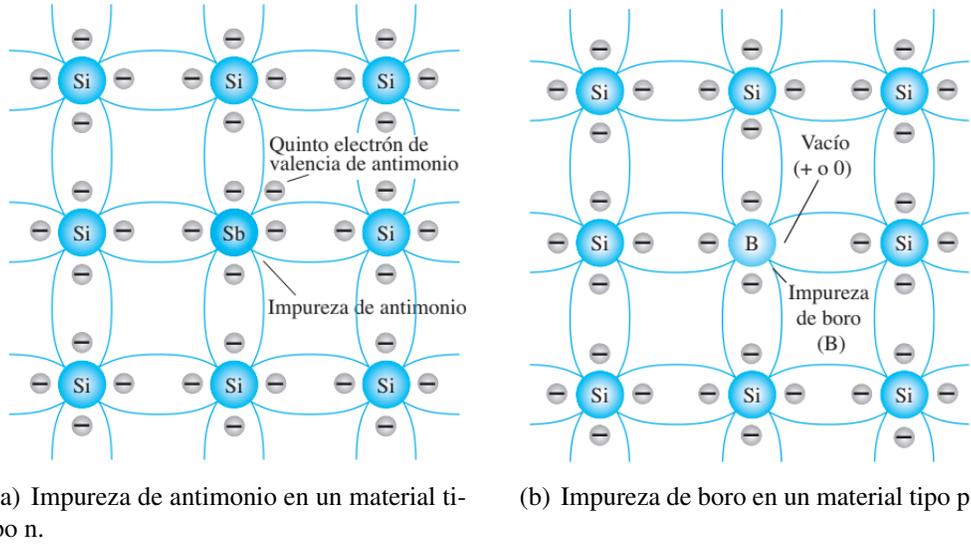


Fig. 2.6: Impurezas en semiconductores. [33]

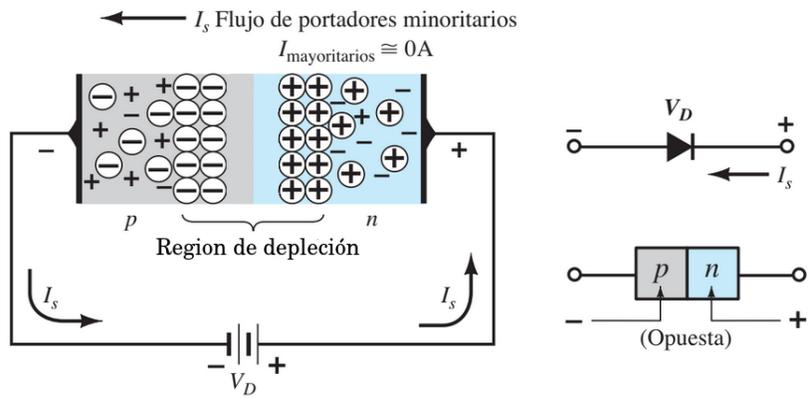
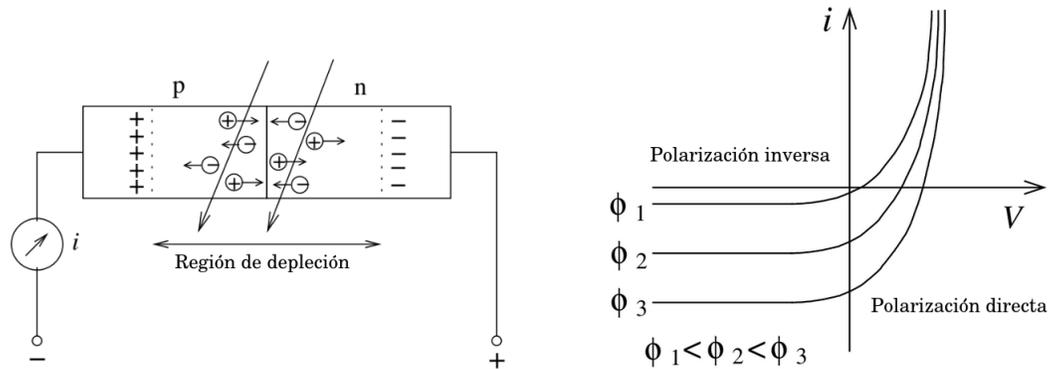


Fig. 2.7: Región de depleción. [33]

vos no revelados se incrementará en el material tipo p. El efecto neto, por consiguiente, es una mayor apertura de la región de depleción. Esto crea una barrera demasiado grande para que los portadores mayoritarios la puedan superar, por lo que el flujo de estos se reduce efectivamente a cero, es decir, no hay corriente aparente, en la figura 2.7 se muestra este comportamiento, [18], [33].

Cuando radiación ionizante atraviesa la región de depleción, la creación de pares electrón-hueco toma lugar. Al haber un campo eléctrico intenso en esta región, los pares cargados se mueven hacia sus polaridades inversas como en la figura 2.8(a). Este movimiento de las cargas crea entonces una corriente eléctrica. La magnitud de esta corriente es proporcional



(a) Producción de pares electrón-hueco en la región de depleción de un diodo semiconductor cuando radiación atraviesa. [19]

(b) Curva típica de corriente-voltaje de un diodo semiconductor en la presencia de radiación. Conforme el flujo de radiación aumenta, el número de pares electrón-hueco lo hace también lo que aumenta la corriente. [19]

Fig. 2.8: Comportamiento de un detector semiconductor al interactuar con radiación

a la energía depositada por la radiación incidente. En la figura 2.8(b) se aprecia el comportamiento de la corriente con respecto al flujo de radiación incidente [18], [19]. Después esta corriente recibida se amplifica y puede ser medida directamente o ser convertida en pulsos de voltaje en un circuito RC.

Actualmente existen muchas configuraciones de detectores de estado sólido para lograr una mejor eficiencia de detección. Algunas de las configuraciones más utilizadas son las de detectores de unión por difusión, PiN e implantes pasivos planos.

2.1.3.1. Detectores de unión por difusión.

Éste fue uno de los primeros métodos para la fabricación de detectores de diodo semiconductor¹⁰. Para su fabricación se expone una cara de la superficie de un material tipo p al vapor de un material tipo n, esto convierte una región superficial del cristal tipo p en tipo n, creando así una unión pn . Los grosores de la capa difusa n suelen ser del rango 0.1 a 0.2 μm . A causa del gran dopaje de la superficie n en comparación con la p, la región de depleción se extiende principalmente del lado p de la unión, originando que gran parte de

¹⁰Detector de estado sólido o diodo semiconductor son nombres equivalentes.

la superficie quede fuera de la región de detección, representando una capa muerta o ventana de captación de radiación grande, traduciéndose en una pérdida de energía considerable antes de que las partículas puedan llegar a ser detectadas [18].

2.1.3.2. Detectores PiN.

Aunque una simple unión de diodo pn puede ser usada como un detector de radiación, este método presenta algunas desventajas, siendo la principal de ellas una región de depleción pequeña. Un aumento en el voltaje podría solucionar este problema, sin embargo, no siempre es posible. Una solución conveniente para aumentar la región de depleción es introduciendo una capa de material semiconductor tipo *i* entre los tipo *p* y *n*. Esta configuración es llamada PiN (tipo *P*, tipo *i* y tipo *N*) y es una de las más usadas en los detectores de estado sólido. La mayor ventaja de introducir un material intrínseco en el medio es que ajusta la región de depleción al ancho del material tipo *i*. De esta forma, se puede tener una gran región de depleción sin la necesidad de utilizar grandes voltajes en polarización inversa [19]. En la figura 2.9 se muestra un diagrama de este tipo de detectores.

En años recientes se ha demostrado que los fotodiodos PiN, como los de la figura 2.3, presentan características que los hacen aptos para la detección de radiación alfa [34], [35], [36], por lo cual han comenzado a ser ampliamente empleados para la detección de radón, sobre todo en sistemas digitales compactos como en el Corentium Home, figura 3.8.

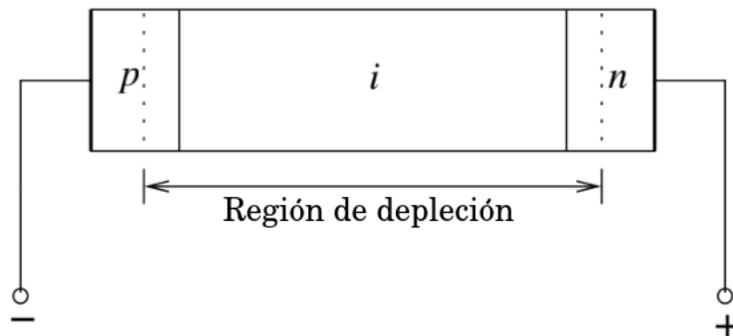


Fig. 2.9: Esquema básico de un diodo PiN polarizado en inversa. [19]

2.1.3.3. Detectores de implantes pasivos planos.

Éste es el método más moderno para la fabricación de detectores de unión PiN ya que combina las técnicas de implantación iónica y de fotolitografía para producir detectores con muy pocas pérdidas de corriente. El proceso de la fabricación en plano¹¹ generalmente comienza con silicio altamente puro que tiene algunas características de tipo n debido a impurezas residuales donadoras. Esta oblea de silicio se pule y después una de sus superficies es pasivada a través de la creación de una capa de óxido a alta temperatura. Enseguida, las técnicas de litografía son empleadas para remover áreas selectas del óxido, donde las ventanas de radiación estarán localizadas. La unión pn se forma al convertir pequeñas y delgadas capas del silicio dentro de las ventanas en tipo p por medio de la implantación de iones aceptores (boro) usando un acelerador. La superficie trasera de la oblea es convertida en un tipo n⁺ mediante la implantación de iones donantes (arsénico). El daño por radiación en las capas implantadas es removido con un recocido a altas temperaturas. Finalmente, para proveer pequeños contactos eléctricos, se evapora y estampa aluminio mediante fotolitografía [18].

La ventaja de los detectores *Passivated Implanted Planar Silicon* (PIPS) reside en la potencial delgadez y uniformidad que pueden cobrar las ventanas de entrada de radiación, misma que permite el paso de partículas pesadas cargadas hacia la zona de depleción con la menor pérdida de energía posible, concediendo una mejor resolución en los espectros de energía de la radiación incidente. Además, la capa pasivada de óxido mantiene las pérdidas de corriente en niveles más bajos que en otros detectores [18]. No obstante, por el proceso de elaboración, son detectores costosos y empleados en sistemas profesionales.

Para la detección de radón se puede insertar alguno de los detectores antes descritos dentro de una cámara, a la cual se le hace circular aire ambiental de interés y de esta forma detectar la radiación alfa emitida por el gas. Otro método bastante usado con estos detectores es el de colección electrostática: dentro de la cámara se puede disponer una diferencia

¹¹La palabra plano en este contexto se refiere a los distintos pasos en el procesamiento de la oblea semiconductor y no debe confundirse con la misma palabra utilizada para describir la geometría plana de un detector semiconductor.

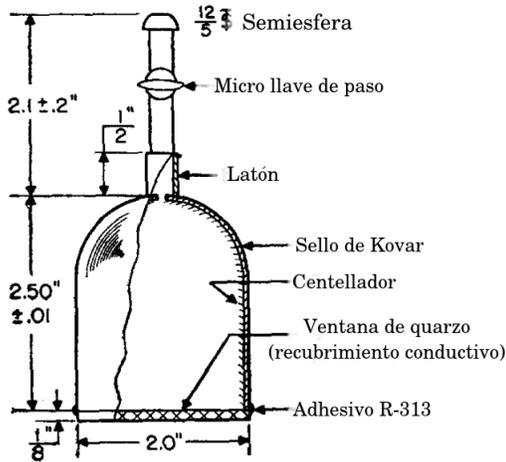
de potencial eléctrico, así, cuando un núcleo de radón dentro de la cámara decae en un ion positivo de polonio-218 (^{218}Po)¹², éste es acelerado hacia el detector. En la superficie del mismo, el ^{218}Po decae rápidamente y la radiación alfa, con su energía característica, es emitida al diodo semiconductor [37], [38].

Los detectores de estado sólido ofrecen la ventaja de poder reconocer diferentes energías de los radioisótopos que se están detectando, por lo que son ampliamente usados en espectrometría. Además, por los avances tecnológicos que se presentan en estos detectores, están presentes en los nuevos instrumentos digitales. Los equipos de medición del radón Rad7, Sarad RTM1688-2, Sun Nuclear 1029 y 1027, así como el Corentium Home, utilizan alguno de los detectores de estado sólido descritos anteriormente. En cambio, las cámaras de ionización son utilizadas principalmente por AlphaGuard, particularmente en el AlphaGuard D2000. Otros métodos dinámicos de detección y medición de concentraciones del radón son las celdas de Lucas y el método de dos filtros.

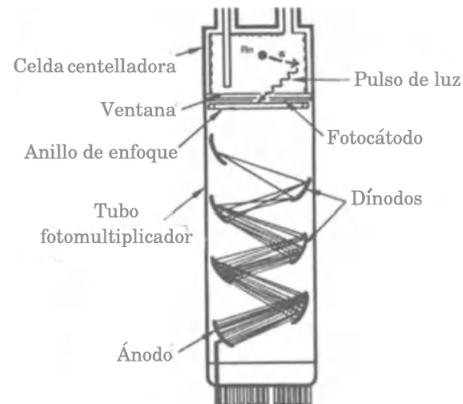
2.1.4. Celda de Lucas.

Uno de los primeros métodos para la medición de concentraciones del radón fue el de centelleo con el uso de la celda de Lucas [12]. Este instrumento consta de una celda de acero inoxidable, hierro, Kovar o plástico, con dimensiones usuales de 0.1 a 2 litros. La base es transparente y se acopla a un tubo fotomultiplicador. Dentro del compartimento las paredes se recubren con un material centellador, comúnmente sulfuro de zinc activado por plata $\text{ZnS}(\text{Ag})$ [8], [12], [39]. En la figura 2.10(a) se muestra una de las primeras celdas de Lucas.

¹²Un proceso análogo ocurre con el núcleo hija del torón, el ^{216}Po .



(a) Celda de Lucas. [39]



(b) Tubo fotomultiplicador acoplado a una celda de Lucas. [12]

Fig. 2.10: Celda de Lucas.

La celda puede ser cerrada al vacío, llevada al ambiente a estudiar y ser abierta. Cuando el aire dentro de la celda se encuentra en equilibrio con el aire externo, el compartimiento es cerrado, almacenando así el aire de interés. Otra forma de análisis es mediante el bombeo continuo de aire dentro de la cámara. Cualquiera que sea el método de captura, la progenie del aire de la muestra puede ser excluida con el uso de un filtro millipore, en consecuencia, sólo la progenie producida por el radón que se encuentra atrapado es detectada [12].

El conteo se ejecuta cuando la radiación interacciona con el material centelleante. La luz emitida por el centellador llega al tubo fotomultiplicador que convierte los pulsos luminosos en señales eléctricas, como se observa en la figura 2.10(b). Luego estas señales pueden ser contabilizadas y asociadas a la concentración de radón que hay dentro de la celda.

2.1.5. Método de dos filtros.

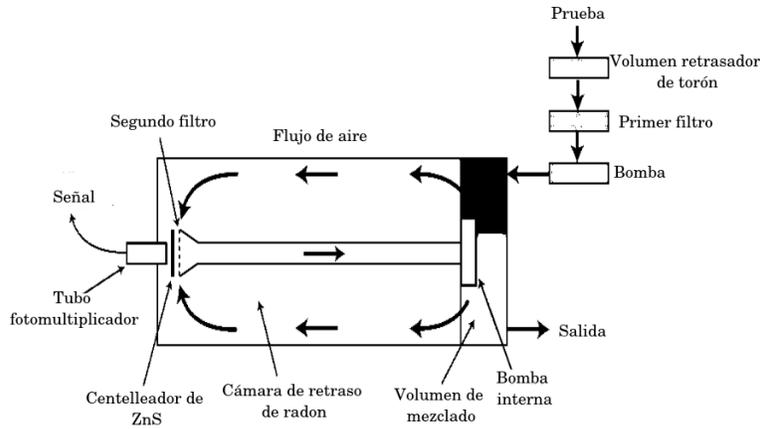
En este método se hace pasar el aire a través de un primer filtro, donde se excluyen la progenie del radón, el polvo y otras partículas, y solamente se permite el paso del gas. El material de este filtro puede variar dependiendo del diseño del instrumento. Cuando el gas

cruza el primer filtro pasa a una cámara, donde el aire se hace pasar por un segundo filtro. En esta cámara el radón decae y sus núcleos hijas se acumulan en el filtro [40], [41], [42].

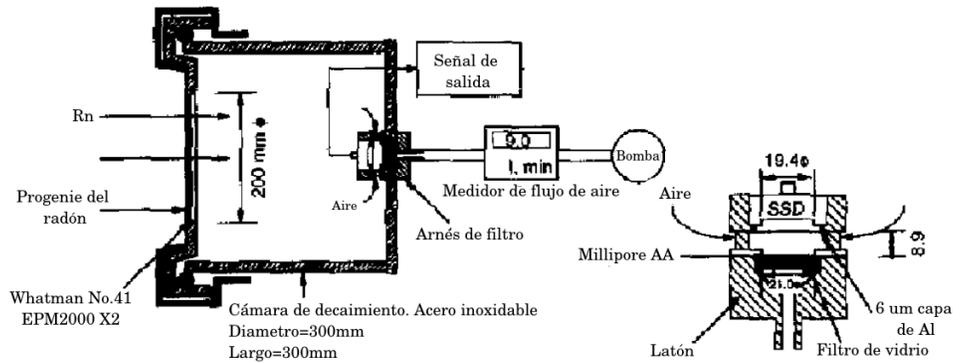
Próximo al segundo filtro se coloca un detector, éste puede ser un detector de centelleo o de diodo semiconductor [40], [41], [42]. En la figura 2.11 se muestra un esquema de un dispositivo que emplea el método de doble filtro con un detector de centelleo y uno de estado sólido.

El funcionamiento de este método se basa en la detección de la radiación α emitida por los núcleos hijas del radón y del torón: el ^{218}Po y el ^{216}Po . El uso de detectores de estado sólido con este método ofrece la ventaja del análisis del espectro de energías para la distinción entre isótopos hijos del radón y del torón. Además, a diferencia del uso del detector centellador, con el semiconductor se puede hacer un estudio continuo del aire [41].

Aun cuando los métodos dinámicos presentan ventajas como la oportunidad de hacer mediciones espacialmente puntuales, de corto tiempo y obtener resultados con rapidez, desventajas como el costo de los equipos, la necesidad de un técnico para su uso, la dependencia de las condiciones de operación y el medioambiente, así como el número de mediciones generalmente bajo, hacen que los métodos pasivos sean preferidos en ciertas situaciones.



(a) Doble filtro con detector de centelleo. [42]



(b) Doble filtro con detector de estado sólido. [40]

Fig. 2.11: Diagrama del método de doble filtro.

2.2. Métodos pasivos.

Los métodos pasivos se basan en la acumulación de los efectos de las partículas emitidas por el radón y su progenie y, a diferencia de los activos, no son de lectura directa [6].

Estos métodos se usan mayormente para mediciones a largo plazo¹³ y mediciones de radón masivas. Esto es, mediciones de concentración del radón a nivel nacional o de regiones grandes cuya densidad de población sea considerable [6].

Además, por su bajo costo, disponibilidad, facilidad de operación, al no requerir el uso

¹³Desde meses hasta incluso un año.

de energía eléctrica y una distribución controlada pero simple, son los preferidos para la medición promedio del radón en distintas organizaciones e instituciones [27].

Algunos de los métodos pasivos más utilizados son:

- Carbón activado.
- Captura en gel.
- Electret.
- Termoluminiscencia.
- Trazas nucleares.

2.2.1. Carbón activado.

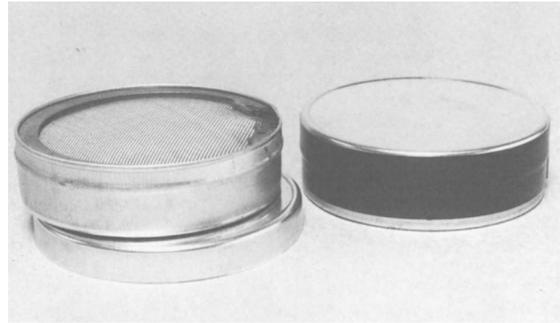
Esta técnica toma sus bases en el hecho de que el carbón activado permite la difusión o absorción parcial del radón [6], [27]. Los detectores de absorción de carbón activado (DCA) son recipientes donde se deposita el carbón activado. Estos pueden ser construidos de distintos materiales siempre y cuando sean impermeables al radón [12]. Los DCA pueden tener una barrera de difusión para evitar la entrada de progenie del radón, así como para reducir los efectos de las corrientes de aire y humedad elevada, condiciones que pueden alterar la respuesta del detector [27]. En la figura 2.12 se muestran algunos DCA.

Los DCA se dejan abiertos en el área de estudio de 1 a 7 días para permitir la absorción del radón así como el equilibrio con el aire externo [12], [27]. Una vez finalizado el tiempo de muestreo, los dispositivos son cerrados, sellados y enviados a un laboratorio para su análisis [12].

El análisis de estos detectores usualmente es mediante la espectrometría gamma de los núcleos hijas del radón [8]. La detección gamma es típicamente ejecutada usando detectores de ioduro de sodio (NaI) o bien de germanio hiperpuro (HPGe) [6]. Otro mecanismo de



(a) Máscara de filtro de aire comercial que se puede usar para almacenar el carbón activado. [6]



(b) Recipientes con filtro. Contenido en ellos está el carbón activado. [12]

Fig. 2.12: Detectores de absorción de carbón activado

análisis es disolver el carbón activado en líquido centelleante y hacer un conteo analítico [12], [27].

Este método ofrece ventajas de costo, accesibilidad y sencillez, sin embargo, también presenta algunos inconvenientes. La respuesta de los DCA se ve afectada por la humedad al igual que por la temperatura, consecuentemente, deben calibrarse para todas las duraciones de exposición y temperaturas que resulten probables en las condiciones reales de uso. Aunado a esto, si se mezclan distintos tipos de carbón, la calibración puede ser inconstante. Como el carbón permite la absorción y desabsorción continuas del radón, el método sólo proporciona una buena estimación de la concentración media del radón durante el periodo de exposición si las variaciones en las concentraciones del radón son bajas. Además, como consecuencia de la vida media del radón, los detectores deben devolverse para su análisis lo antes posible tras el periodo de exposición [27].

2.2.2. Captura en gel

El método de captura en gel es similar al de carbono activado. Este dispositivo consiste de un envase plástico en el cual se inserta gel comercial para cabello (polivinil pirrolidona

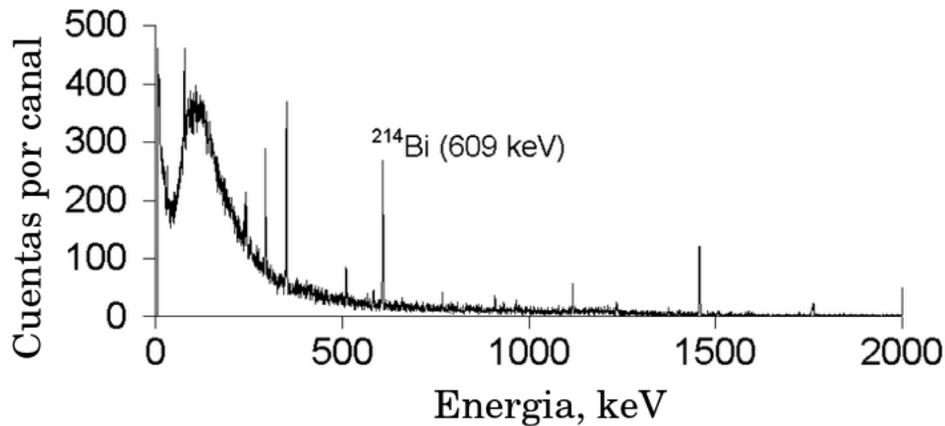


Fig. 2.13: Espectro gamma de gel expuesto a radón. [43]

trietanolamina carbopol en agua)¹⁴. Este envase después es tapado con una malla permeable que permite el paso del radón, pero no la de su progenie o partículas indeseadas y se expone al ambiente de estudio [43].

Una vez que el radón entra al dispositivo, se difunde en el gel, donde después se producen sus núcleos hijas. Luego, el dispositivo es analizado por medio de espectrometría gamma para la identificación y posterior conteo de la radiación proveniente principalmente del bismuto-214 (^{214}Bi) [43], [44]. En la figura 2.13 se muestra un espectro de uno de estos dispositivos.

Este método resulta ser más accesible que el de carbón activado, sin embargo, presenta inconvenientes parecidos a los de este último. Dado que la vida media del ^{214}Bi es de 19.7 minutos, el tiempo entre la exposición al radón y la medida de los espectros gamma es importante y se recomienda tener un procedimiento sistemático para conservar el mismo tiempo entre el término de la exposición y el comienzo del análisis.

¹⁴Se han hecho estudios con otros materiales gelatinosos y acuosos, no obstante, el gel para cabello ha presentado una mejor respuesta [43], [44].

2.2.3. Electret

Un electret es un disco de teflón¹⁵ que posee una carga cuasi permanente [45]. Estos discos adquieren su carga al ser calentados en la presencia de un campo eléctrico y después enfriados para “congelar” los dipolos eléctricos [18]. La cantidad de carga que un electret puede tener es característica de su potencial superficial, su diámetro y su grosor.

Si se pone en contacto una de las caras de un electret, con las paredes conductoras de una cámara iónica, se creará un campo eléctrico en el interior de la cámara debido a la diferencia de voltaje en su superficie inversa [18]. Un E-PERM es una cámara iónica de este tipo. Éste consiste de una pequeña cámara fabricada con un plástico conductor, un electret en el fondo y un filtro de entrada en la parte superior [45]. En la figura 2.14 se observa un esquema de este tipo de cámara.

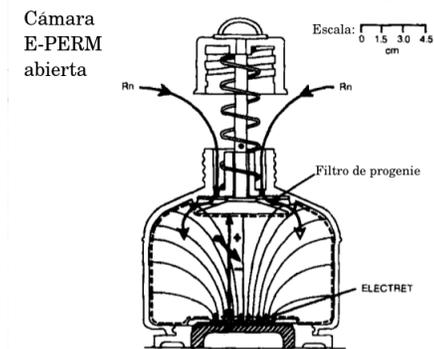
Cuando el dispositivo es abierto en el lugar de estudio, el aire entra en la cámara, pero el filtro impide la entrada de la progenie del radón, así como de iones ambientales [45]. Ya que el radón está dentro, la radiación emitida ioniza el aire dentro de la cámara y, puesto que existe un campo eléctrico dentro del volumen de gas, cualquier par de iones creado será separado y recolectado en la superficie del electret, causando la neutralización parcial de las cargas del mismo, i.e., una reducción de su voltaje [18].

La caída en el voltaje del electret a lo largo de un periodo de tiempo conocido es una medida de la ionización durante ese periodo. Esta información puede ser convertida fácilmente en valores de concentración del radón. Para esto es necesario conocer el voltaje antes de cada prueba así como del tiempo que se dejará abierto el mecanismo [45].

Este dispositivo puede ser usado para periodos de medición de corto o largo plazo¹⁶, pero siempre se debe tener cuidado con las condiciones ambientales en las que será utilizado pues presenta sensibilidad a la humedad y a la radiación gamma de fondo [8].

¹⁵Se pueden utilizar distintos tipos de teflón para mediciones de corto o largo periodo de tiempo [45].

¹⁶Las mediciones a corto plazo se consideran en un periodo de 2 a 7 días, mientras que las de largo plazo lo hacen en un periodo de 1 a 12 meses.



(a) Esquema de un E-PERM para ^{222}Rn en condición de cubierta electret abierta. [45]



(b) Medidor electret. [6]

Fig. 2.14: Detectores para el método de electret.

2.2.4. Termoluminiscencia.

En la sección *Detectores de centelleo*¹⁷ se habló sobre la propiedad de algunos materiales de emitir fotones como respuesta a la radiación ionizante que incide sobre ellos. Si bien, anteriormente solo se mencionaron los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia, la termoluminiscencia es otro fenómeno de luminiscencia que se emplea para la detección de radiación ionizante.

Al igual que en el caso de la fluorescencia, la termoluminiscencia puede ser entendida con el modelo de bandas de los sólidos. En la figura 2.1 se observa que entre la banda de valencia y la de conducción hay trampas de electrones. Cuando estos materiales son expuestos a radiación ionizante los electrones son transferidos de la banda de valencia hacia la banda de conducción. El sistema alcanzará el equilibrio por varios medios, sin embargo, interesa cuando la portadora de carga es atrapada en la trampa de depósito. Cuando el material es calentado, los electrones son térmicamente liberados a la banda de conducción, donde migran de forma aleatoria y son capturados por distintas trampas, no obstante, si estos son capturados por un centro de luminiscencia, se emitirá luz dando lugar a la termo-

¹⁷Supra p.21

luminiscencia. Un buen detector termoluminiscente debe tener una alta concentración de “trampas”, en las que se almacenen los pares electrón-hueco producidos por la radiación ionizante [18], [46].

La luz emitida por estos materiales, al ser térmicamente tratados, puede ser capturada con un tubo fotomultiplicador. La intensidad de la termoluminiscencia está en función de la temperatura T del dosímetro termoluminiscente (TLD). En general, si la luz emitida es graficada contra la temperatura del cristal, se obtiene un termograma termoluminiscente, y este resultado puede ser relacionado con la concentración de radón o la dosis mediante una buena calibración [46].

El procedimiento para considerar solamente la componente de las partículas alfa del radón se basa en dos detectores termoluminiscentes, los cuales son montados en la parte inferior de un recipiente cóncavo. Uno de los detectores se cubre con una lámina delgada de aluminio para excluir todas las partículas alfa y que solamente las partículas beta y la radiación gamma sean detectadas, mientras que el otro detector se deja descubierto. Se leen ambos detectores y por exclusión se obtendrá únicamente la contribución de las partículas alfa [8].

Otra forma de determinar la concentración de radón intramuros del medio ambiente es midiendo las radiaciones gammas emitidas por la progenie del radón. A pesar de ello, por su complejidad para la discriminación de la radiación gamma del uranio, del torio y del radio, este método ha quedado rezagado respecto a otros mucho más simples [8].

2.2.5. Trazas nucleares.

En este método se aprovecha el hecho de que el paso de partículas y de iones pesados a través de la mayoría de los semiconductores sólidos produce patrones finos de daño intenso en la escala atómica. Estos daños dejados por las partículas son llamados trazas nucleares y pueden ser usados para la detección de partículas [47].

Las trazas producidas por las partículas son huellas estables formadas por “centros

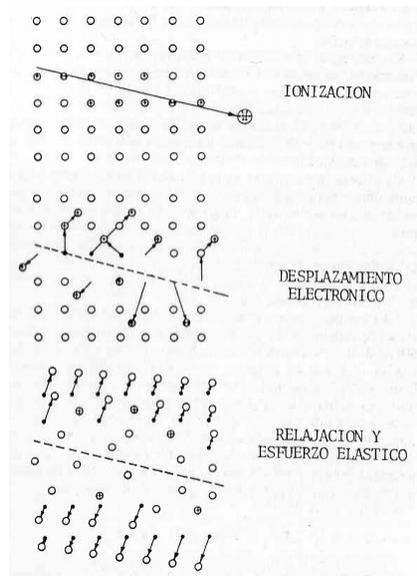


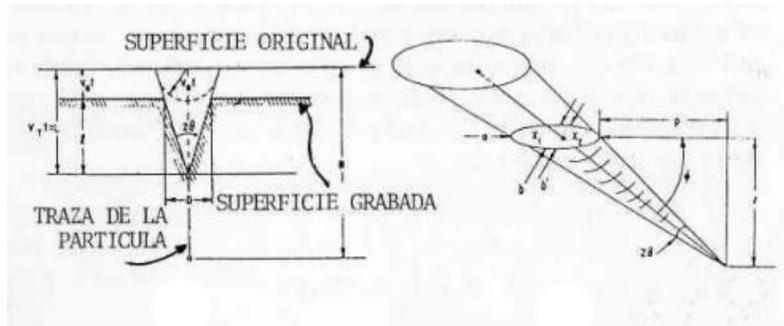
Fig. 2.15: Mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos. [47]

de tensión” que responden al ataque químico, estando estos centros de tensión formados básicamente por desplazamientos atómicos, más que por defectos electrónicos [47].

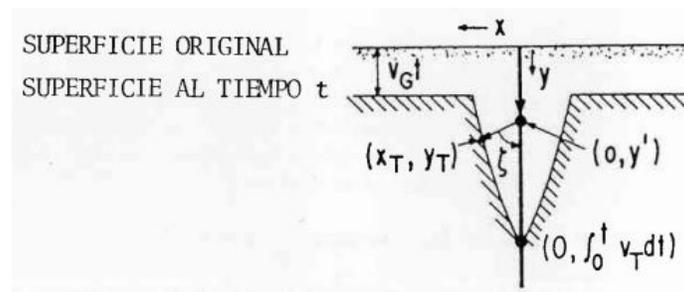
Un modelo para entender la formación de huellas nucleares en sólidos, considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector, es el llamado “punta de explosión iónica”. Éste se refiere fundamentalmente a la formación de una orientación inestable electrostática a lo largo del patrón de ionización de la partícula, produciéndose una repulsión de los iones desde sus sitios originales hacia sus posiciones intersticiales, tal y como se muestra en la figura 2.15.

Seguido de la producción de iones primarios, se genera una formación de iones intersticiales y de sitios de vacancias en la red, resultado de las fuerzas columbianas, disminuyendo el relajamiento elástico, expandiendo el “esfuerzo” en el material hacia los lados de la trayectoria de la partícula nuclear y creando zonas de debilitamiento [47].

Debido al debilitamiento provocado en el material por el paso de la radiación ionizante, es posible hacer un grabado de la traza mediante un ataque químico con hidróxido de potasio (KOH) o de sodio (NaOH). Éste consiste en la disolución química del material a lo largo de la huella de la partícula (V_t) y una disolución o ataque general de la superficie



(a) Geometría de trazas para V_t y V_g constantes.



(b) Geometría de trazas para V_t variable.

Fig. 2.16: Geometría de la formación de trazas mediante ataque químico. [47]

removida del material (V_g) lo que formará un cono como el que se muestra en la figura 2.16(a). En el caso que se tenga V_t variable a lo largo de la trayectoria de la partícula, figura 2.16(b), la geometría de la traza se complica, estando en general el valor V_t en función de la razón de ionización. Esto es que, para cada partícula y energía dada, se tendrá una geometría específica de la traza [47]. De esta manera, dependiendo del protocolo empleado, las trazas presentarán diámetros distintos, pero estarán siempre correlacionados con la energía de la partícula incidente.

Los conos formados por el ataque químico son observados en un microscopio óptico donde son contados y relacionados con la cantidad de partículas que llegan a la superficie del material en un determinado tiempo (actividad) [27], [12], [47]. En la figura 2.17 se muestran algunas trazas formadas por la radiación alfa del radón intramuros.

Los materiales más usados como detectores de trazas son el CR-39, el nitrato de celulosa y uno más basado en policarbonato [8]. Los detectores basados en este método utilizan alguno de estos materiales dentro de un compartimento de volumen conocido. Este com-

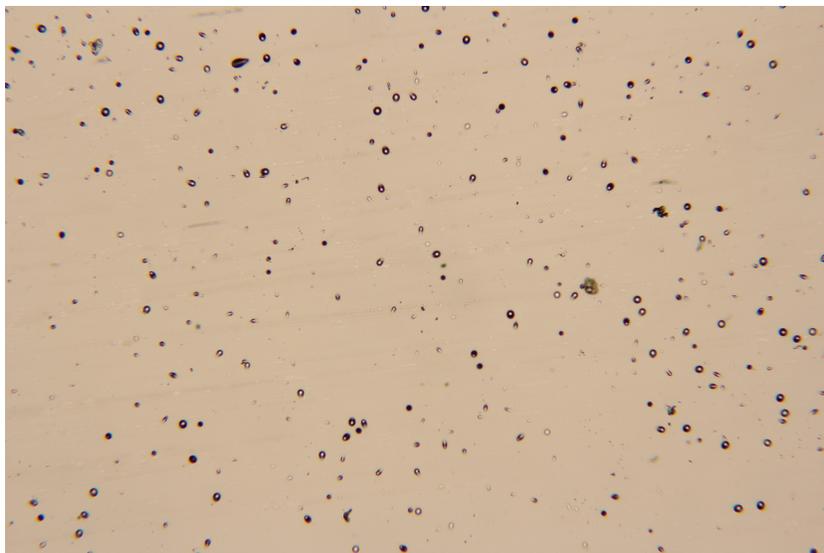


Fig. 2.17: Trazas formadas en un CR-39 por radiación alfa proveniente del radón.

partimento o celda permite la difusión del radón y excluye la progenie del mismo. Dentro, el radón decae y las partículas alfa crean trazas en el material de detección.

La detección por trazas en sólidos (DTS) es un método insensible a cambios de temperatura, de presión atmosférica, de humedad y no requiere de energía eléctrica. Además, los dispositivos de medición son de tamaño pequeño, se pueden transportar y cargar fácilmente y su costo no es elevado, por lo que son los favoritos de muchas instituciones para la medición de concentración del radón intramuros [6], [27]. Este método es empleado para mediciones de concentración del radón de mediano y largo plazo.

En la actualidad, debido a su bajo costo y accesibilidad, los métodos pasivos son preferidos sobre los dinámicos, sin embargo, con los avances tecnológicos presentados en los métodos dinámicos, los precios de estos se han abaratado. Asimismo, los equipos se han vuelto más fáciles de usar y ofrecen ventajas que los pasivos no, como la detección directa y el registro digital de las mediciones. Lo anterior ha provocado que los métodos dinámicos sean de interés tanto para profesionales como para quienes no lo son, por lo que una descripción como la que se detalló en el presente capítulo es esencial para el entendimiento de los instrumentos y la comparación que se abordará en los siguientes capítulos.

Capítulo 3

Características de los diferentes instrumentos de medición del radón y su intercomparación.

3.1. Rad7



Fig. 3.1: Imagen de un Rad7. [48]

El Rad7, figura 3.1, es un dispositivo creado por la compañía americana DurrIDGE. Éste es un dispositivo profesional¹⁸ y portátil para la medición de radón. Para esto, utiliza un detector de estado sólido de implantes pasivos planos con el cual se puede hacer espectrometría alfa para la discriminación e identificación de los radioisótopos que están siendo detectados [48].

Para la detección del radón, este instrumento bombea aire previamente filtrado dentro de una cámara de detección con volumen de 0.7 litros. Esta cámara tiene una forma semi-esférica y está cubierta por un material conductor. En medio está posicionado un detector PIPS. Cuando el aparato está encendido, un circuito de alto voltaje conduce un potencial de 2000 a 2500 V a través de la cubierta semiesférica, esto con el propósito de crear un campo eléctrico. El sistema de detección de este aparato se basa en la detección de la radiación α emitida por los núcleos hijas del radón, el ^{218}Po y el ^{214}Po , así como por los radioisótopos ^{216}Po y ^{212}Po provenientes del torón. Con ayuda del campo eléctrico que se produce dentro de la cámara, estos radioisótopos son conducidos hacia el detector semiconductor donde después es detectada su radiación emitida [48]. En la figura 3.2 se observa un esquema del mecanismo y en la 3.3 se muestran algunos espectros arrojados por el dispositivo.

Este instrumento tiene varios modos de operación, entre los que destacan: el modo *SNIFF* y el modo *AUTO*. En el modo *SNIFF*, el RAD7 calcula las concentraciones de radón solamente con las detecciones ocasionadas por el ^{218}Po , es decir, solo arroja las concentraciones del radón “nuevo”. Este modo es muy útil para mediciones espacialmente puntuales pues da una respuesta rápida y se asegura que solamente sea el radón recién introducido en la cámara el detectado. Por otro lado, en el modo *AUTO*, la detección se comienza en modo *SNIFF* y, después de 3 horas, cambia automáticamente a modo *NORMAL*, donde se calcula la concentración del radón con los isótopos ^{218}Po y ^{214}Po . Este modo es utilizado para mediciones locales de varias horas ya que lanza un valor de concentración más preciso.

Otras funciones de aplicación del Rad7 son: medir torón aislado, radón y torón, concentraciones del radón en agua, emanación del radón en suelos tanto en la superficie como

¹⁸A lo largo de este trabajo se clasificará como profesional a los instrumentos que permitan hacer mediciones de radón en aire, en agua y en suelos o a aquellos que el propio fabricante clasifique como profesional.

a profundidad. Las últimas funciones las logra con el uso de equipo especializado, pero siempre con el instrumento Rad7 como centro de medición.

En adición, el dispositivo contiene sensores de humedad y temperatura, lo que otorga mayor información a la lectura de los datos arrojados. Toda esta información se puede adquirir mediante su pantalla integrada o conectando el instrumento a una PC y utilizando el *software* correspondiente. En la tabla 3.1 se presentan algunas especificaciones técnicas de este instrumento.

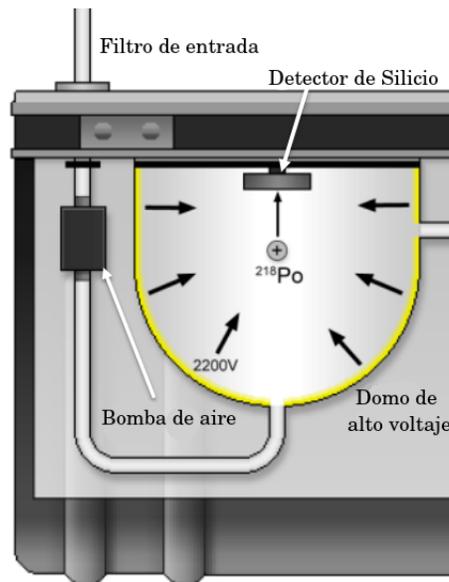


Fig. 3.2: Esquema de la cámara de detección del Rad7.

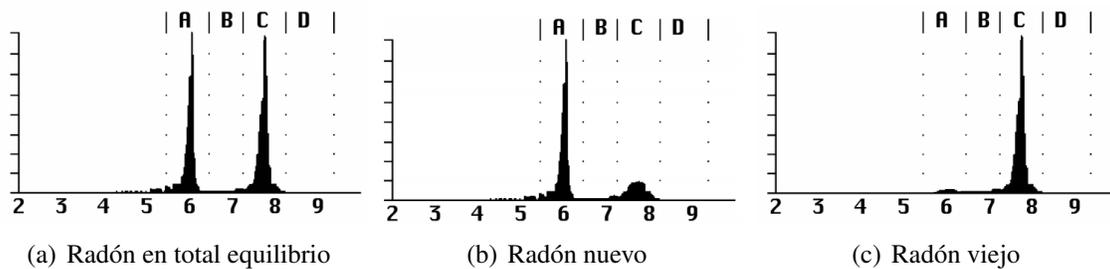


Fig. 3.3: Distintos espectros obtenidos por el Rad7. En todos los casos el eje horizontal presenta una escala en MeV y el vertical en Cuentas. La ventana A representa los isótopos de ^{218}Po (6 MeV) mientras que la C los de ^{214}Po (7.69 MeV). En (b) radón nuevo hace referencia a las detecciones ocasionadas por el ^{218}Po mientras que en (c) radón viejo hace referencia a las ocasionadas por el ^{214}Po . Espectros similares se obtienen para el caso del torón. [48]

3.2. Sarad RTM1688-2



Fig. 3.4: Imagen de un Sarad RTM1688-2. [49]

El monitor Sarad RTM1688-2, que se visualiza en la figura 3.4, es un instrumento portátil diseñado por la compañía alemana Sarad GmbH, el cual otorga mediciones de concentración del radón y del torón presentes tanto en aire como en agua. De forma similar al Rad7, este equipo toma sus bases de detección en los núcleos hijas del radón y del torón, pues el número colectado de iones de ^{218}Po y de ^{216}Po son proporcionales, respectivamente, a las concentraciones del radón y torón en el aire [49].

Para lograr la detección, este dispositivo utiliza un detector semiconductor de radiación alfa con el que se hace un análisis de espectros. Análogo a otros sistemas, éste inserta el aire de estudio dentro de una cámara de medición de aproximadamente 250 ml, con la ayuda de una bomba de aire. Una vez dentro, el radón decae y los isótopos de ^{218}Po son atraídos hacia el detector por causa de un campo eléctrico inducido dentro de la cámara [49].

Este instrumento ofrece dos modos de operación: *Slow* y *Fast*. En el primero de ellos se cuentan las emisiones de radiación α del ^{218}Po y del ^{214}Po , mientras que en el segundo modo solo se cuentan las emisiones del ^{218}Po . Las ventajas del modo *Fast* es la respuesta rápida de los posibles cambios en las concentraciones del radón, ofreciendo la posibilidad de identificar fuentes de emisión del radón. Por otra parte, el modo *Slow* tiene la ventaja de

brindar resultados más precisos, pues se presenta hasta un doble de sensibilidad, reduciendo así el error estadístico de las mediciones [49].

Al igual que otros instrumentos de medición de concentraciones del radón, éste posee sensores de humedad, temperatura y presión atmosférica, así como una pantalla para visualizar los resultados, memoria interna y la posibilidad de conectarse a una PC para transferir los datos obtenidos [49]. En la tabla 3.1 se otorgan más especificaciones técnicas del instrumento.

3.3. Sun Nuclear 1027



Fig. 3.5: Imagen de un Sun Nuclear 1027. [50]

El modelo 1027 que se visualiza en la figura 3.5 pertenece a la gama de monitores para la medición del radón de la compañía Sun Nuclear. Es un modelo sencillo, pero profesional que proporciona la medición continua del gas en espacios cerrados como en habitaciones y estancias. Esto lo logra mediante el uso de un fotodiodo de unión por difusión [50].

Este instrumento permite la entrada del radón por medio de su difusión dentro de una cámara de detección. Una vez dentro, un campo eléctrico conduce a la progenie del radón al fotodiodo, donde su radiación α emitida es detectada. Aunque el sistema de detección

es similar al de otros instrumentos, éste no ofrece una discriminación de los productos del decaimiento del radón. A su vez, al ser un dispositivo sencillo sólo ofrece un modo de operación, el cual es una medición continua a intervalos de una, cuatro, ocho o veinticuatro horas. Esto ocasiona que la pantalla del dispositivo sólo muestre dos valores: el valor promedio, que expresa la concentración promedio del radón desde que el dispositivo fue activado; y el valor actual, que muestra el valor del último intervalo de medición, estos dos valores solamente se muestran en pCi/l. También se puede imprimir un reporte o conectar el instrumento a una PC para la obtención de las mediciones [50]. En la tabla 3.1 se muestra información técnica complementaria.

3.4. Sun Nuclear 1029

El modelo 1029, figura 3.6, también es parte de la gama de monitores profesionales para la medición de concentraciones del radón de la compañía Sun Nuclear, pero a diferencia de su hermano menor (el modelo 1027) éste presenta mayores cualidades y ventajas. Similar al modelo 1027, éste usa un fotodiodo de unión por difusión para la detección de la radiación alfa [51].



Fig. 3.6: Imagen de un monitor 1029 de Sun Nuclear. [51]

Al igual que el modelo 1027, el radón ingresa a una cámara de detección mediante difusión,

donde se induce un campo eléctrico para la captura de la progenie del radón almacenado. La radiación alfa emitida por los productos del decaimiento del radón es la que es detectada, contabilizada y utilizada para la medición de concentración del radón. Estos valores pueden ser mostrados tanto en Bq/m^3 como en pCi/l . Este modelo cuenta además con sensores internos de temperatura, humedad y presión para brindar mayor información a las mediciones. Estos datos pueden ser observados en la pantalla integrada del monitor así como en una PC [51].

El modelo 1029 no puede hacer una discriminación de los isótopos detectados, por lo que su eficiencia para calcular cambios repentinos de concentración no es buena y sólo ofrece un modo de operación: la medición continua del radón a intervalos de 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20 ó 24 horas con duraciones de hasta 999 horas, es decir, el dispositivo puede medir concentraciones del radón en intervalos de n horas repitiendo esto hasta por 999 horas [51]. En la tabla 3.2 se otorgan algunas especificaciones técnicas del instrumento.

3.5. *Airthings* Corentium Home

El Corentium Home, figura 3.7(a), es un dispositivo creado y diseñado por la empresa noruega *Airthings*. Este instrumento representa un avance tecnológico en la detección y medición de concentraciones del radón intramuros pues exhibe un diseño compacto, ligero y versátil con dimensiones de 120 mm x 69 mm x 25.5 mm, además de una precisión que aumenta conforme el tiempo de detección, ya que en un tiempo de tan sólo siete días, la incertidumbre de medición es menor al 20 % [52].

La medición de las concentraciones del radón descansa en la detección de la radiación alfa emitida por el decaimiento natural del radón y su consecuente espectrometría. Esta radiación es detectada por un fotodiodo PiN de silicio que se encuentra ubicado dentro de una cámara de detección fabricada con cromo de 25 cm^3 como se muestra en la figura 3.8. La toma de muestras se hace por medio de la difusión del radón a través de un espacio de 0.2 mm donde después es conducido hacia la cámara de detección [54]. Una imagen del



(a) Imagen del monitor Corentium Home. [53]



(b) Interior del monitor Corentium Home. [54]

Fig. 3.7: *Airthings* Corentium Home.

interior del detector se muestra en la figura 3.7(b).

Este dispositivo sólo ofrece la medición continua de concentraciones de radón, presentando tres valores en pantalla: el promedio desde que el dispositivo se encendió (*long term average*), el promedio de las últimas veinticuatro horas (*short term average* actualizado cada hora) y el promedio de los últimos siete días (*short term average* actualizado diariamente) [52]. El Corentium Home está especialmente diseñado para la medición de concentraciones de radón intramuros en hogares, ya que no ofrece la identificación de radón y torón ni otras características como medición de radón en agua. En la tabla 3.2 se puede encontrar mayor información técnica sobre el aparato.



Fig. 3.8: Fotodiodo PiN dentro del Corentium Home.

3.6. AlphaGuard D2000



Fig. 3.9: Imagen de un AlphaGuard D2000.

El dispositivo AlphaGuard D2000, figura 3.9, es un sistema profesional portátil para la medición de concentraciones del radón y su progenie en el aire extramuros e intramuros.

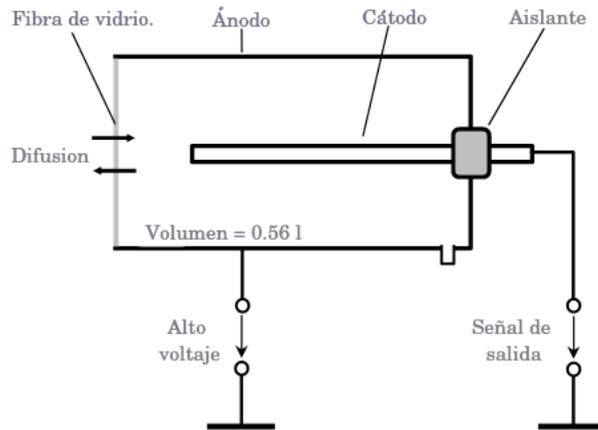


Fig. 3.10: Esquema de un AlphaGuard en modo de difusión. [55]

Este instrumento permite la medición del radón mediante el empleo de una cámara de ionización [55].

La cámara de ionización de este instrumento tiene un volumen de 0.56 l y está fabricada de un material metálico al cual se le suministra un voltaje de +750 V cuando está encendido. A lo largo del eje longitudinal se encuentra el electrodo central con un potencial de 0 V [55]. Un esquema de esta cámara de muestra en la figura 3.10.

La detección del radón se lleva a cabo mediante la difusión del radón dentro de la cámara. Para esto, un filtro de fibra de vidrio se coloca en la entrada de la cámara como se observa en la figura 3.10. En este modo, los ciclos de muestreo pueden ser de 10 ó 60 minutos, de esta forma se pueden obtener resultados con rapidez en comparación a otros sistemas dinámicos. Además de este mecanismo, con el uso de aditamentos adecuados, se pueden hacer mediciones de concentración en suelos (emanación y exhalación) [55]. En la tabla 3.2 se muestran algunas especificaciones técnicas de este equipo.

El AlphaGuard D2000 también implementa una serie de sensores que brindan información sobre la temperatura, la presión y la humedad relativa para poder conocer los factores externos al momento de la medición. Para poder recolectar todos los datos se puede vincular el instrumento con una PC para descargar el historial de mediciones.

Este equipo, al ser un instrumento profesional para la medición del radón requiere de

un técnico así como de calibraciones y purgaciones periódicas para garantizar un buen rendimiento. Esto lo convierte en un monitor de alto costo y poco versátil para un uso doméstico y lo ubica más como un instrumento para un área especializada.

Es fácil apreciar que los instrumentos presentados anteriormente exhiben características en común y otras diferentes, algunos de ellos presentan diseños y funciones para aplicaciones más profesionales, como la investigación, mientras que otros son altamente eficientes sólo para la medición de concentraciones intramuros en viviendas. En consecuencia, se ha vuelto necesario hacer un análisis de cada uno de ellos, así como una intercomparación para poder concluir en qué situaciones y bajo qué criterios es preferible usar un dispositivo con respecto a otro para la medición de concentraciones del radón en aire.

Instrumento	Rad7	Sarad RTM1688-2	Sun Nuclear 1027
Tipo de detector	Estado sólido plano pasivado de silicio	Estado sólido	Fotodiodo de unión por difusión
Método de detección	Colección electrostática de emisores alfa con análisis de espectros	Colección electrostática de emisores alfa con análisis de espectros	Colección electrostática de emisores alfa
Modos de operación	SNIFF respuesta y recuperación rápida	Bombeo continuo	Medición continua a intervalos de 1, 4, 8, o 24 h
	NORMAL alta sensibilidad	Bombeo a intervalos	-
	AUTO cambio automático entre SNIFF y NORMAL después de 3 horas	Fast	-
	THORON radón y torón medidos simultánea e independientemente	Slow	-
Mecanismo de llenado del detector	GRAB análisis de una muestra de aire discreta	Sniff (ruido por cada detección)	-
	WAT análisis automático de agua (accesorios necesarios)	-	-
	Bombeo de aire, 800 ml/min...1 l/min	Bombeo de aire, 250 ml/min	Difusión pasiva
	Rango de medición	4.0...750 000 Bq/m ³	1.0...10x10 ⁶ Bq/m ³
Ambiente de operación	Incertidumbre de la medición	± 5 % dentro del rango total	± 25 % o 1 pCi/l
	Temperatura:	0...45°C	-20...40°C
	Presión atmosférica:	-	800 mbar...1200mbar
Dimensiones	Humedad:	0...100 % rH	20...80 % rH
	295x215x279 mm	232x182x135 mm	203x119x64 mm
Peso	4.35 kg	3.5 kg	0.91 kg
Fuente de poder y consumo	11-15 VDC (12 V nominal), 1.25 A	18 VDC, 1 A	12 VDC, 200 mA, 60 Hz
Costo \$USD	7,300	6,460	1,384

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas del Rad7, Sarad RTM1688-2 y Sun Nuclear 1027. [48], [49], [50]

Instrumento	Sun Nuclear 1029	Corentium Home	Alpha Guard D2000
Tipo de detector	Fotodiodo de unión por difusión	Fotodiodo PiN	Cámara de ionización, HV \approx 750 VDC
Método de detección	Colección electrostática de emisores alfa	Espectrometría alfa	Espectrometría 3D-alfa y modo de corriente
Modos de operación	Medición continua a intervalos de 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20 o 24 h	Medición continua a intervalos de 1 h	Difusión 10 min, 60 min
Mecanismo de llenado del detector	Difusión pasiva	Difusión pasiva	Difusión pasiva rápida
Rango de medición	1.0...99 900 Bq/m ³	0...9999 Bq/m ³	2...2 000 000 Bq/m ³
Incertidumbre de la medición	\pm 25 % o 1 pCi/l	7 días <20 %. 1 mes <10 %	<3 % dentro del rango total
Ambiente de operación	Temperatura: 7...35°C	4...+40°C	-10...50°C
	Presión atmosférica: -	-	700...1100 mbar
	Humedad: 20...80 % rH	<85 % rH	0...95 % rH
Dimensiones	236x122x74 mm	120x69x25.5 mm	329x355x123 mm
Peso	0.91 kg	130 g	6.2 kg
Fuente de poder y consumo	12 VDC, 200 mA, 60 Hz	3 baterías alcalinas AAA	100-240 V (400 mA), 50-60 Hz
Costo \$USD	2,619	220	10,275

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del Sun Nuclear 1029, Corentium Home y AlphaGuard D2000. [51], [52], [55]

3.7. Métodos de intercomparación

Se llevaron a cabo dos intercomparaciones de forma independiente. En la primera de ellas se pusieron a prueba ocho equipos de cinco distintas compañías mientras que en la segunda se estudiaron solamente cinco equipos *Airthings* Corentium Home, esto con el objetivo de realizar un estudio más profundo de estos últimos equipos.

3.7.1. Primer método de intercomparación

Se elaboró el estudio de ocho monitores de medición de concentraciones del radón, los cuales fueron: un Rad7, un Sarad RTM1688-2, un par de Sun Nuclear 1027¹⁹, un Sun Nuclear 1029, un Corentium Home y un par de AlphaGuard D2000²⁰. Para lograr una correcta comparación entre instrumentos -intercomparación- estos debían ser sometidos a los mismos factores ambientales, por lo que todos se colocaron en el laboratorio del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) ubicado en el segundo nivel del edificio “Van Der Graaf” del IFUNAM. La disposición de los equipos se muestra en la figura 3.11. De esta manera todos estarían midiendo el radón de un mismo hábitat en condiciones meteorológicas idénticas, como lo son la temperatura, la presión y la humedad relativa.

Una vez ubicados los instrumentos, se activaron para hacer mediciones continuas de las concentraciones del radón dentro del laboratorio. Cada instrumento trabajó con las configuraciones predeterminadas para la medición del radón intramuros, sin embargo, se cuidó que todos ellos arrojaran los datos de manera sincronizada²¹ para evitar retrasos entre mediciones.

Los instrumentos de medición se dejaron funcionando diariamente del 26 de agosto al 15 de noviembre del 2019. Durante este periodo la concentración del radón dentro del laboratorio se alteró para conseguir distintas concentraciones del mismo. Los primeros 20 días de monitoreo no se hizo ningún ajuste consiguiendo concentraciones bajas. Concluido

¹⁹Que serán clasificados en adelante como Sun Nuclear 1027-A y Sun Nuclear 1027-B

²⁰Que serán clasificados en adelante como AlphaGuard-A y AlphaGuard-B

²¹Pues en los equipos Sun Nuclear 1029 y Corentium Home los datos nuevos eran arrojados cada 24 h.

este tiempo se expuso una fuente de radón para elevar la concentración, misma que alcanzó un nivel de concentración medio de entre 140 y 180 Bq/m³ y se mantuvo así durante 20 días. Al finalizar el tiempo previo se expuso una fuente más de radón para conseguir elevar la concentración entre 700 y 900 Bq/m³ y se dejó así por otros 20 días.

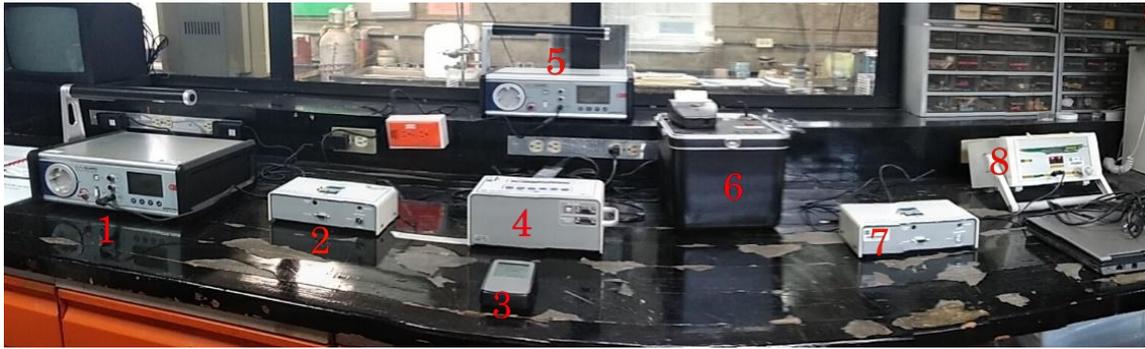


Fig. 3.11: Montaje experimental. 1) AlphaGuard D2000-A. 2) Sun Nuclear 1027-A. 3) Corentium Home. 4) Sun Nuclear 1029. 5) AlphaGuard D2000-B. 6) Rad7. 7) Sun Nuclear 1027-B. 8) Sarad RTM1688-2.

3.7.2. Segundo método de intercomparación

Para el caso especial del equipo *AirThings* Corentium Home, una intercomparación más fue efectuada para una caracterización detallada del dispositivo debido a las ventajas técnicas que presenta en comparación con los demás dispositivos²².

En el interior de una cámara de radón se colocaron 5 monitores Corentium Home previamente reiniciados²³, como se observa en la figura 3.12. Consecuentemente se selló la cámara y se abrió la válvula para permitir el paso del radón desde la fuente hasta la cámara. Una vez se alcanzó una concentración alta (<5000 Bq/m³) se cerró la válvula dejando expuestos a los equipos a una elevada concentración de radón. Los monitores se dejaron en el interior de la cámara del 25 de febrero al 3 de marzo del 2020, no obstante solo se registraron resultados cada 24 horas del 25 al 28 de febrero y del 2 al 3 de marzo²⁴, de esta manera

²²Características que se pueden revisar en la tabla 3.2.

²³Pues de esta manera se calibran y se comienzan lecturas nuevas

²⁴Ésto pues se interpuso un par de días sin acceso al laboratorio. Además no se logró reproducir más experimentos como este puesto que en los días subsiguientes se cerraron los laboratorios del IF como consecuencia de la pandemia de enfermedad COVID-19.

se podrían obtener valores altos, medios y bajos de concentración del radón²⁵, además de poder observar la velocidad de respuesta de estos monitores a cambios de concentración.



Fig. 3.12: Equipos Corentium Home dentro de una cámara de radón.

²⁵Pues al pasar el tiempo el radón decae y la concentración de este disminuye

Capítulo 4

Intercomparación de resultados

4.1. Primer intercomparación

Los resultados de la intercomparación de los distintos instrumentos de medición comerciales se presentan en función de los tiempos de integración de las mediciones: corto plazo (2 días)²⁶, mediano plazo (5 días) y largo plazo (20 días)²⁷ y de las concentraciones a las que fueron sometidos: baja (6-20 Bq/m³), media (140-180 Bq/m³) y alta (700-900 Bq/m³).

Para el primer caso, es decir corto plazo y concentración baja, se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.1. En la figura se muestran distintas características, entre ellas, el valor promedio de concentración obtenido por cada monitor que, a su vez, muestra la dispersión de los resultados en forma de barras de error²⁸, asimismo se expresa la estimación de la concentración promedio total, indicada con una línea horizontal negra, así como su desviación estándar en la forma de una banda azul para indicar la dispersión de los distintos monitores. Esta estimación es el mejor acercamiento al valor “real” de concentración²⁹. Además, con una línea roja se indica el límite inferior de medición, este valor

²⁶Tiempo recomendado por la USEPA en su protocolo de medición [56].

²⁷Considerando que son equipos dinámico, pues en los pasivos se utilizan tiempos superiores.

²⁸Éstas indican la desviación estándar σ . Para cotejar consulte los Apéndices A y C *Infra* pp.98, 105

²⁹Consulte el Apéndice C *Infra* p.105

es considerado pues representa la cota superior del rango de la concentración continental³⁰, es decir, la concentración ambiental que se encuentra en todo momento en la atmósfera, por lo tanto, los valores por debajo de este límite podrían considerarse ambientales y no ocasionados por una acumulación intramuros, lo cual escapa a los objetivos de este trabajo.

En la figura 4.1 se observa que ciertos instrumentos presentan una mayor dispersión en los valores medidos, lo cual indica que algunos equipos registraron mediciones inconsistentes. Ahora, el hecho de que todos los equipos presenten una dispersión relativamente grande –observar la figura 4.4– se debe, en su mayoría, a factores externos y no propiamente al equipo. Estos factores fueron, principalmente los niveles de concentración bajos, la irregularidad del radón (puesto que no se tenía una concentración de radón constante ni conocida) y factores ambientales como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa. Los valores de estos últimos agentes fueron, respectivamente, $24.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$, $779.5 \pm 2.1 \text{ mbar}$ y $50.9 \pm 0.6 \%$.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede considerar que, dado que los instrumentos se encontraban en la misma habitación, todos debieron haber sufrido las mismas alteraciones de concentración del radón, por lo cual se puede estimar que el equipo con menor desviación estándar es, en efecto, el más preciso, pues presentó una menor dispersión de valores, obteniendo así, para este caso en particular, el Rad7 como el equipo con mayor precisión, con un registro de $8.4 \text{ Bq/m}^3 \pm 21 \%$ seguido por el Corentium Home con $12 \text{ Bq/m}^3 \pm 25 \%$ y el AlphaGuard D2000-B con $8 \text{ Bq/m}^3 \pm 25 \%$.

Una vez obtenidos los resultados y dispersiones de cada monitor, se calculó el valor estimado de la concentración del radón en la habitación promediando los valores estimados por los instrumentos, dando como resultado $10 \text{ Bq/m}^3 \pm 20 \%$. De esta forma, los monitores con mayor exactitud fueron el AlphaGuard D2000-A y el par de Sun Nuclear 1027, con residuos³¹ de 1 Bq/m^3 respecto a la estimación de la concentración.

Para el caso de una concentración media del radón se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.2. La temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica fueron,

³⁰*Supra* p.5

³¹Apéndice C *Infra* p.106

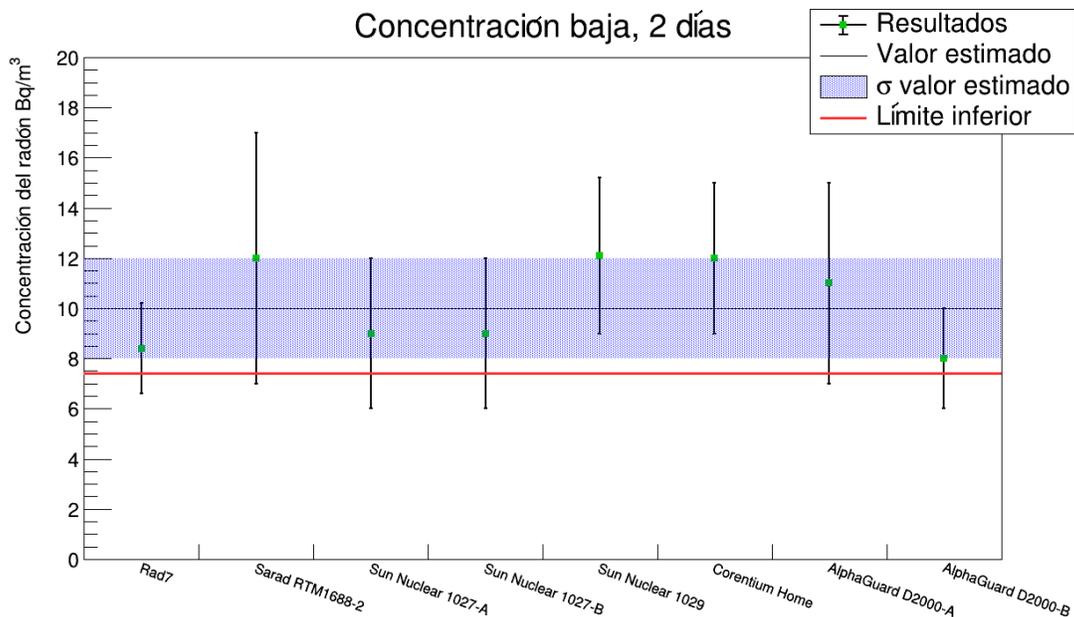


Fig. 4.1: Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con concentraciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.

respectivamente, $23.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$, $53.2 \pm 1.1\%$, 779.1 ± 1.2 mbar. El valor estimado de concentración fue de $158 \text{ Bq/m}^3 \pm 5.6\%$, lo cual refleja una menor dispersión entre los valores de los instrumentos. Por otra parte, las desviaciones relativas de cada instrumento que se muestran en la figura 4.4 también se vieron reducidas, sin embargo, esta vez, el equipo con menor dispersión fue el Sun Nuclear 1029 con un 1.6 % seguido por el Corentium Home con 3.5 %. Con una diferencia de tan solo 1 Bq/m^3 , el instrumento que menos diferencia presentó con el valor estimado, fue también el Sun Nuclear 1029, lo cual implica que, para estas circunstancias, el Sun Nuclear 1029 fue el monitor más preciso y exacto. A pesar de lo anterior, los demás equipos presentaron un comportamiento adecuado con una desviación estándar relativa máxima del 9.6 % por parte del Sun Nuclear 1027-B y una diferencia máxima respecto al valor estimado del 9 % por parte del Corentium Home.

Los resultados del último caso del monitoreo de 2 días se presentan en la figura 4.3. Para este caso, la temperatura fue de $21.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$, la humedad relativa tuvo un valor del $62.5 \pm 1.3\%$ y la presión fue de 777.2 ± 0.1 mbar. El valor estimado de la concentración del radón fue de $806 \text{ Bq/m}^3 \pm 4.6\%$ lo cual representa una dispersión de los resultados aún me-

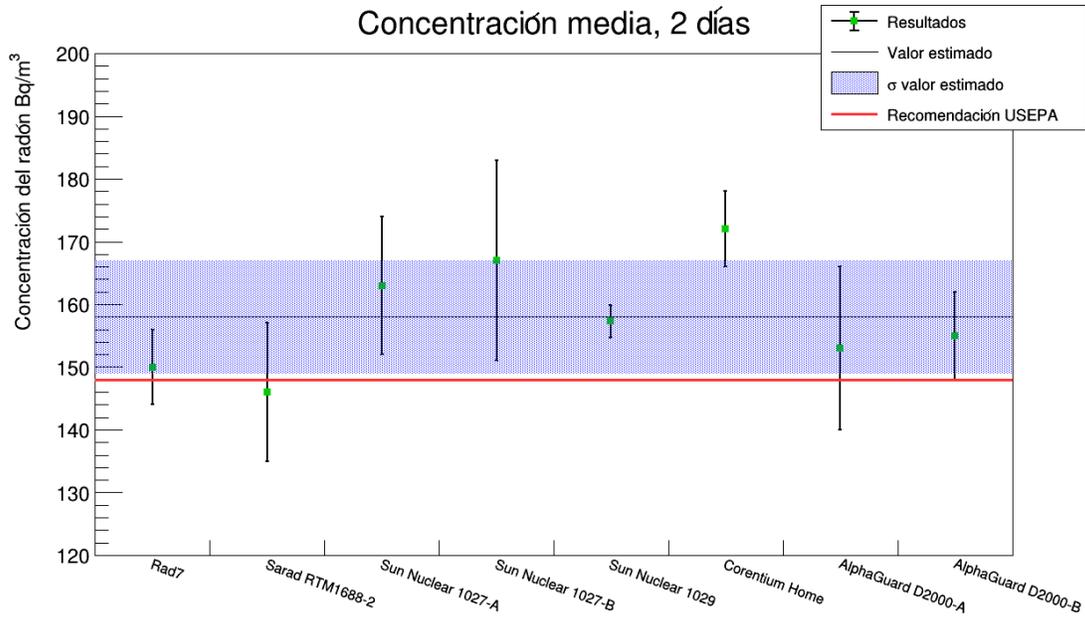


Fig. 4.2: Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con concentraciones medias. Las barras de incertidumbre así como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.

nor que en el caso de concentración media. Este comportamiento insinúa que, al aumentar las concentraciones, los monitores mejoran su exactitud, es decir, los resultados son más cercanos al valor estimado de la concentración de radón. El monitor que presentó mayor consistencia fue el Rad7 con una desviación del 2.7 %, mientras que el equipo con mayor exactitud fue el Sun Nuclear 1029 con una diferencia de 2 Bq/m³ respecto al resultado estimado de la concentración.

Cuando el monitoreo se extendió a cinco días se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.5, para concentraciones bajas. Se registró una temperatura de $24.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$, una humedad relativa del $47.9 \pm 0.9\%$ y una presión de 777.9 ± 0.7 mbar. Se consiguió una concentración estimada de $12 \text{ Bq/m}^3 \pm 25\%$, lo que representa una mayor dispersión conjunta de los instrumentos respecto al caso del estudio de 2 días. Asimismo, en la figura 4.8 se observa que los instrumentos también presentaron un incremento de sus desviaciones estándar con excepción del Sun Nuclear 1029, el cual expuso un decremento. Este comportamiento se puede explicar, pues al incrementar el número de días de muestreo pueden

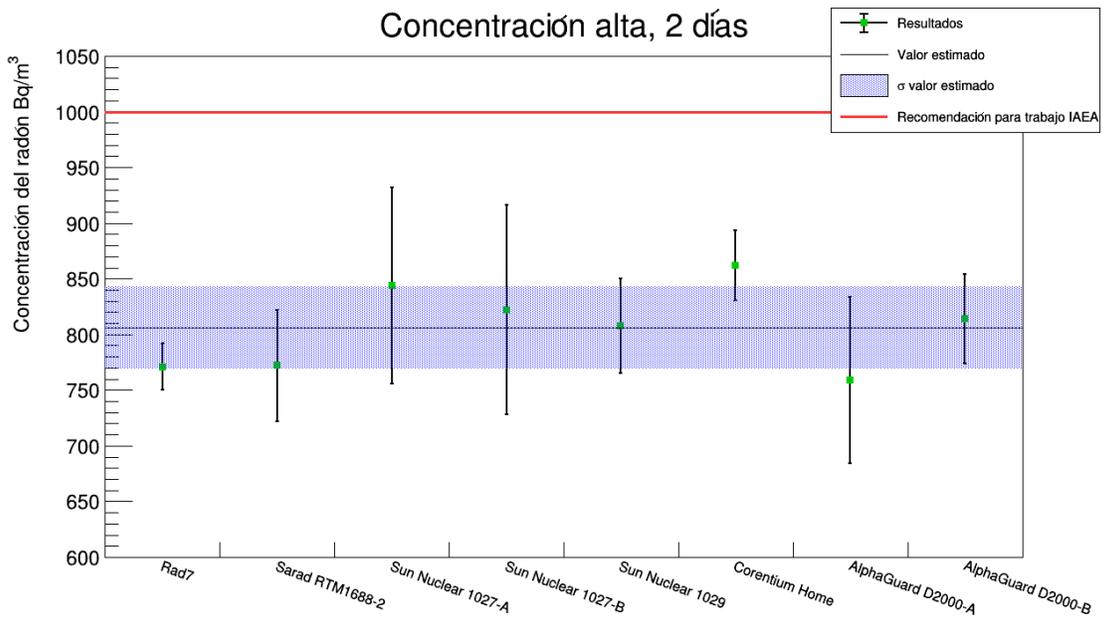


Fig. 4.3: Concentración de radón obtenida en 2 días (48 h) de monitoreo con concentraciones altas. Las barras de incertidumbre así como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.

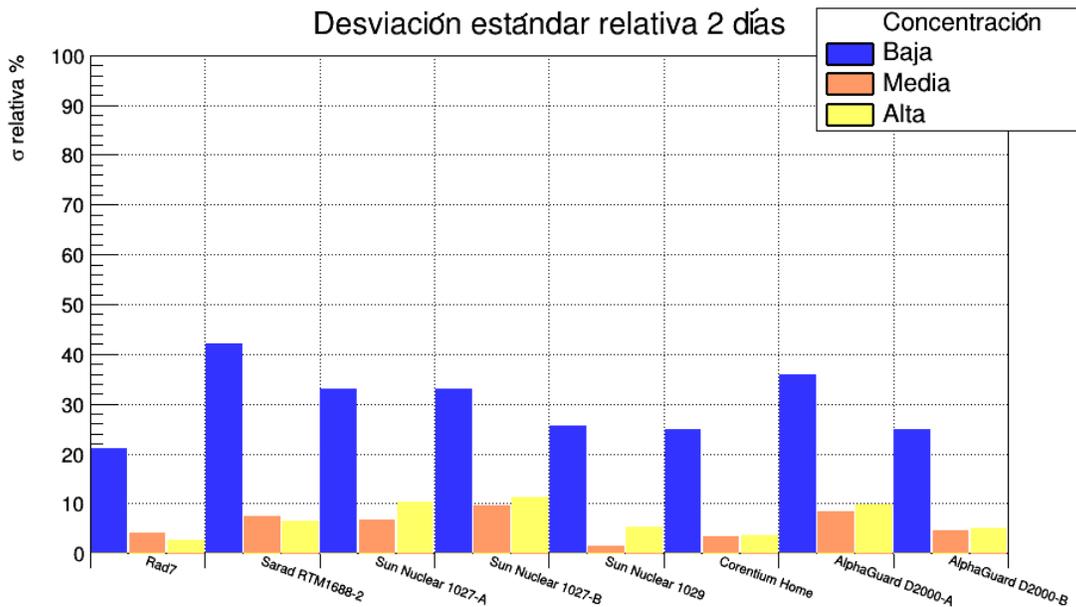


Fig. 4.4: Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 2 días de monitoreo.

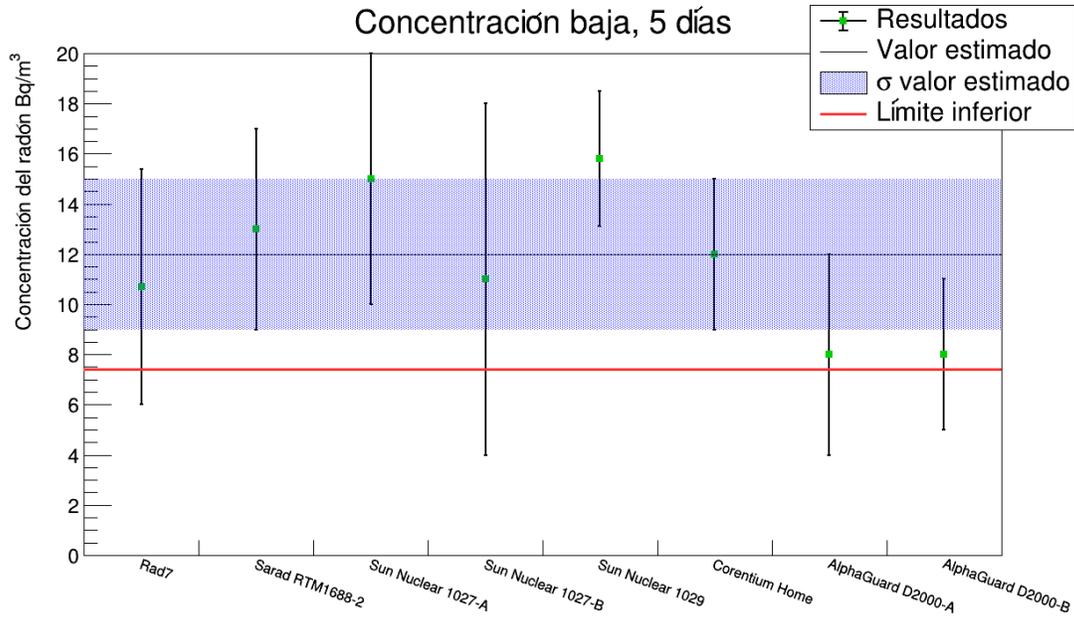


Fig. 4.5: Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentraciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.

ocurrir cambios amplios en la concentración del radón³², además, no son suficientes días para que el radón muestre una uniformidad³³. Ahora, el instrumento con menor dispersión fue el Sun Nuclear 1029 con una desviación estándar del 17.1 %, considerándolo así como el más preciso, sin embargo, el monitor más exacto fue el Corentium Home con una diferencia nula respecto al valor estimado y con una desviación estándar del 25 %, haciéndolo el segundo más preciso.

Para concentraciones medias con el mismo tiempo de monitoreo se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.6. La temperatura tuvo un valor de $23.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$ mientras que la humedad relativa y la presión fueron, respectivamente, $52.3 \pm 0.6\%$ y 778.0 ± 0.7 mbar. Por otra parte, el valor estimado de concentración del radón fue de $162 \text{ Bq/m}^3 \pm 5.6\%$. De forma similar al estudio de 2 días, la dispersión conjunta e individual disminuyó al aumentar la concentración, lo que se traduce en un comportamiento más uniforme entre aparatos. Para este caso, el instrumento más preciso fue el Sun Nuclear 1029 con una des-

³²Recordemos que para las concentraciones bajas no se contó con una fuente de radón sino solamente con la acumulación en el laboratorio por fuentes naturales lo que pudo ocasionar cambios amplios en la concentración.

³³Más adelante cuando se revise el caso del estudio de 20 días se notará un comportamiento más uniforme.

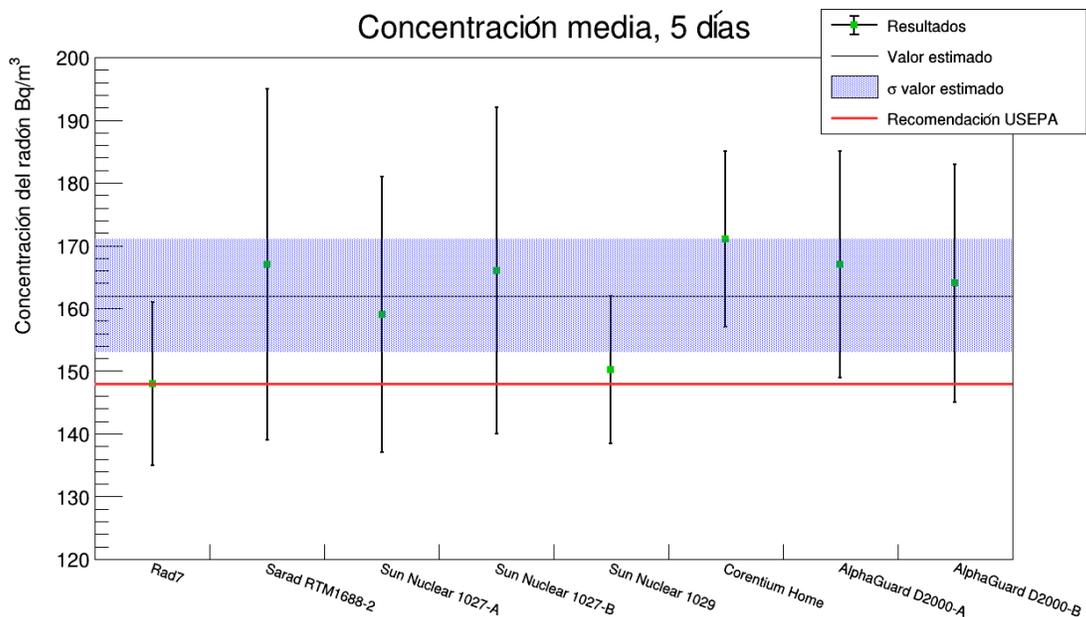


Fig. 4.6: Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentraciones medias. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.

viación estándar del 7.8 %, mientras que el AlphaGuard D2000-B fue el más exacto con una diferencia de 2 Bq/m³ respecto al valor estimado.

Los valores de la temperatura, la humedad relativa y la presión para el último caso del periodo de 5 días fueron los siguientes: $21.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$, $59.7 \pm 2.1\%$ y 776.7 ± 0.6 mbar, respectivamente. Por otro lado, los resultados de los niveles de concentración de radón se presentan en la figura 4.7. Es fácil observar que los valores conseguidos por los instrumentos tienen un comportamiento más uniforme que en los dos casos previos (concentración media y baja), hecho que se verifica con una estimación de concentración de $841 \text{ Bq/m}^3 \pm 3.1\%$. En este caso particular, el equipo con mayor precisión fue el Corentium Home con una desviación estándar del 5.1 %, tal y como se ilustra en la figura 4.8, mientras que el equipo con mayor exactitud fue el Sarad RTM1688-2 con un diferencia de 1 Bq/m³ respecto a la concentración estimada.

Los resultados para concentraciones bajas y un tiempo de monitoreo de 20 días se muestran en la figura 4.9. En este estudio, la temperatura estimada fue de $24.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$, la humedad relativa fue del $48.6 \pm 0.7\%$ mientras que la presión tuvo un valor de 778.3 ± 0.3 mbar.

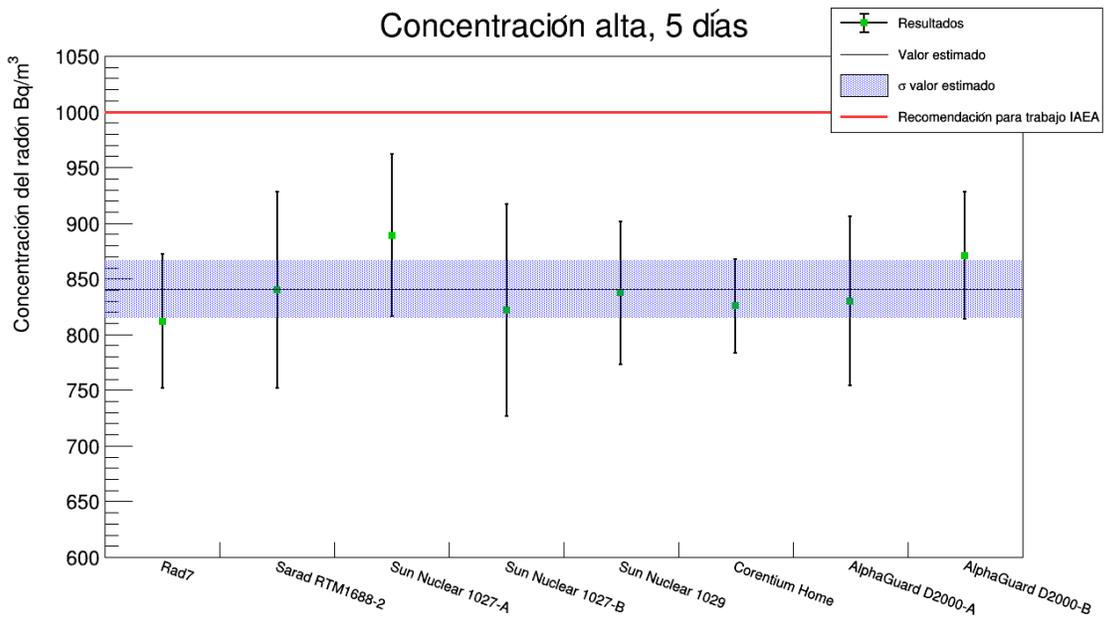


Fig. 4.7: Concentración de radón obtenida en 5 días de monitoreo con concentraciones altas. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.

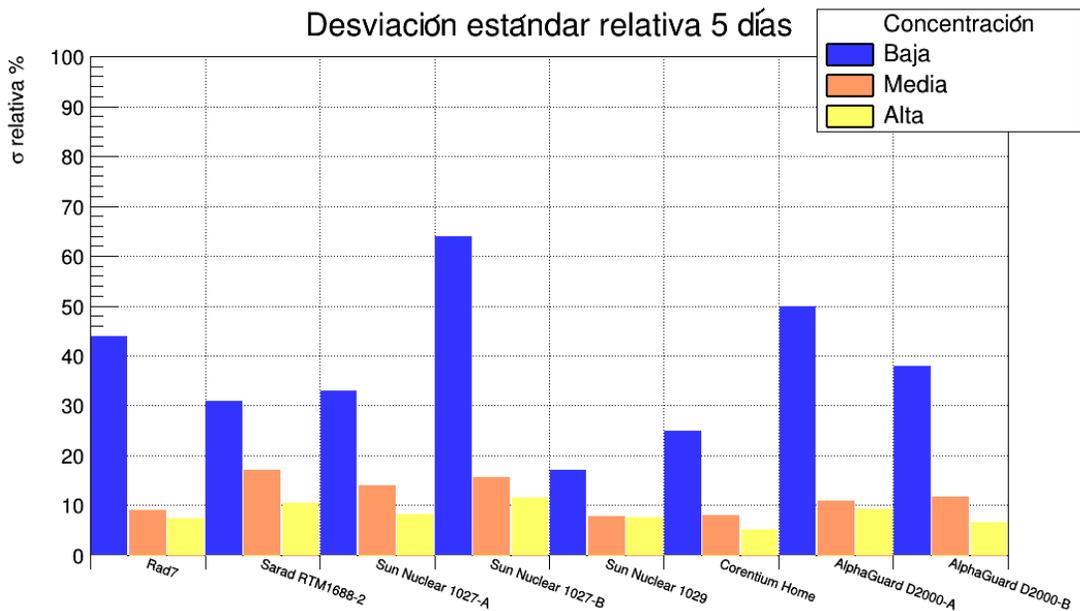


Fig. 4.8: Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 5 días de monitoreo.

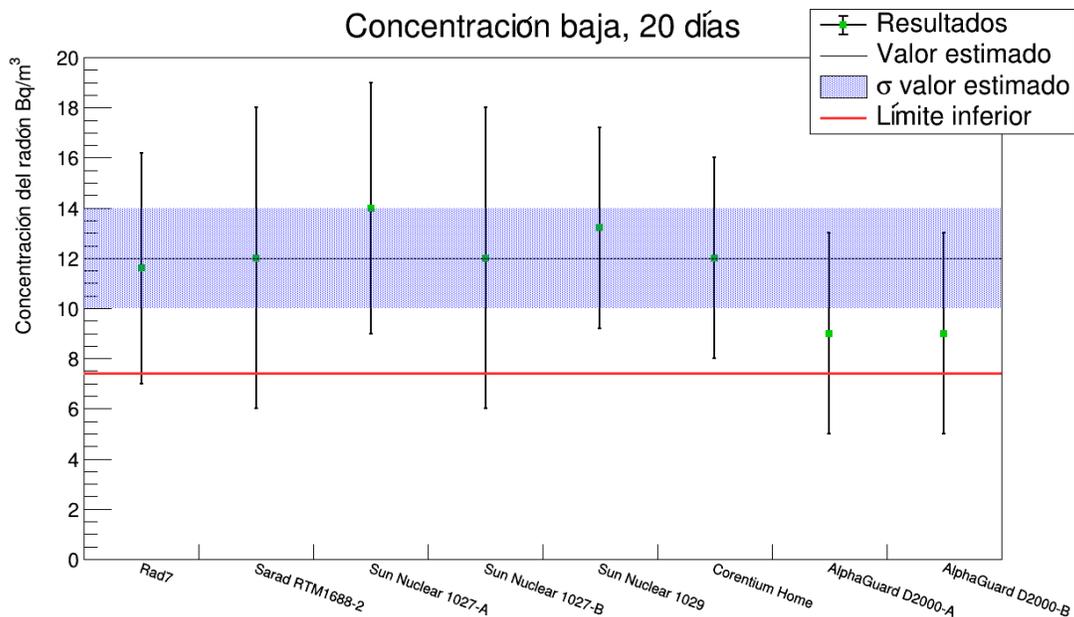


Fig. 4.9: Concentración de radón obtenida en 20 días de estudio con concentraciones bajas. La línea roja muestra el límite inferior de medición. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar.

A partir de los resultados obtenidos por cada instrumento se obtuvo una concentración estimada de $12 \text{ Bq/m}^3 \pm 17 \%$; esto implica que hubo una disminución en la dispersión de los valores arrojados por los distintos monitores en comparación a los estudios previos, sin embargo, como se observa en las figuras 4.4 y 4.12, de manera individual, los monitores presentaron un incremento de sus desviaciones estándar en comparación con el monitoreo de 2 días, no obstante, este comportamiento se explica de la misma manera que en el caso de 5 días.

Con la figura 4.12 resulta sencillo observar que el equipo más preciso para este experimento fue el Sun Nuclear 1029 con una desviación estándar del 30.3 %, por otro lado, los más exactos, es decir, los más próximos al valor estimado, fueron el Corentium Home, el Sarad RTM1688-2 y el Sun Nuclear 1027-B con una estimación de 12 Bq/m^3 .

Cuando se aumentó la concentración del radón se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.10 para la concentración media. De manera análoga a los estudios previos (2 y 5 días), hubo un decremento de la dispersión conjunta pues se estimó una concentración de $154 \text{ Bq/m}^3 \pm 2.6 \%$, así como en la individual, mostrada en la figura 4.12. Aunado a esto,

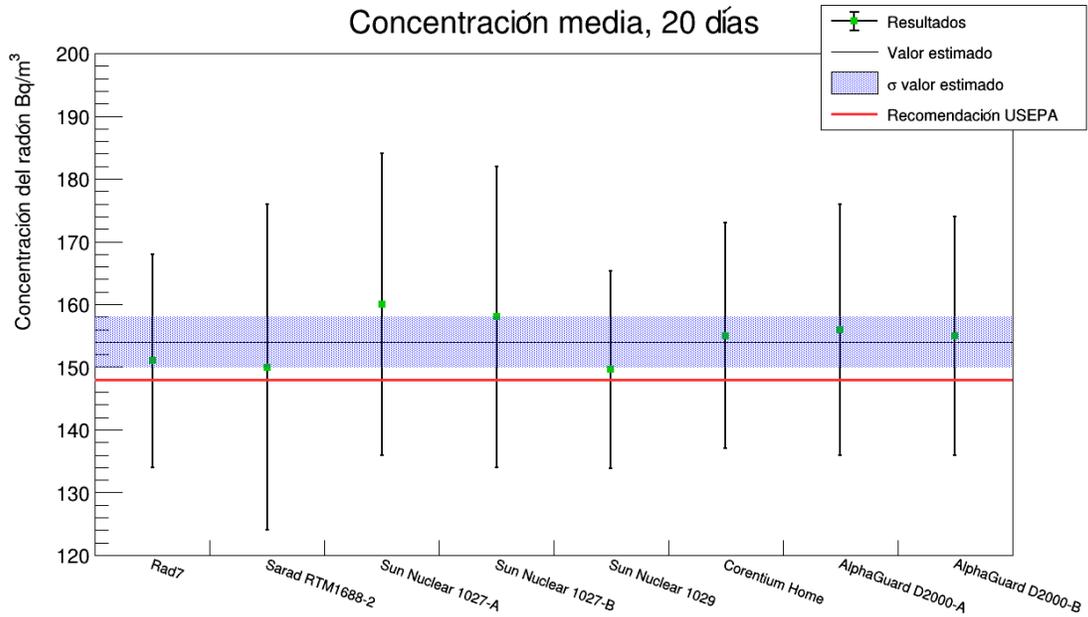


Fig. 4.10: Concentración de radón obtenida en 20 días de monitoreo con concentraciones medias. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para hogares por la USEPA.

el equipo con menor desviación estándar relativa fue el Sun Nuclear 1029 con 10.5 % y los que menor residuo mostraron con respecto al valor estimado de concentración fueron el AlphaGuard D2000-B y el Corentium Home con 1 Bq/m³. Los factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa y la presión se estimaron en $22.7 \pm 0.1^\circ\text{C}$, $53.7 \pm 0.7\%$ y 777.7 ± 0.4 mbar.

Al elevar la concentración de radón, como se muestra en la figura 4.11 los resultados mostraron una mayor uniformidad, obteniendo una concentración estimada de $855 \text{ Bq/m}^3 \pm 1.9\%$. De forma similar, los monitores de manera individual presentaron una disminución de sus desviaciones estándar, como se muestra en la figura 4.12. En este caso, el equipo con menor desviación fue el Corentium Home con un 5.4 % y el que presentó una menor diferencia con respecto al valor estimado fue el Sun Nuclear 1027-A con 3 Bq/m³ de diferencia, seguido por el Corentium Home con 5 Bq/m³. La temperatura, la humedad relativa y la presión tuvieron valores respectivos de $21.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$, $56.7 \pm 1.3\%$ y 777.9 ± 0.4 mbar.

Conforme a lo analizado hasta ahora se pueden destacar dos comportamientos. El primero de ellos es la mejora en la precisión de todos los equipos al incrementar la concen-

tración de radón pues, en general, estos reducen sus desviaciones estándar relativas por debajo del 20 % al estar expuestos a concentraciones medias; y en concentraciones altas logran reducirlo hasta menos del 15 %. El segundo comportamiento relevante es la reducción de la dispersión de los resultados arrojados por los monitores al aumentar el tiempo de monitoreo pues en todos los casos hubo una reducción de la desviación estándar relativa de la estimación promedio de concentración del radón al aumentar de 2 a 20 días de estudio³⁴, sin embargo, esta reducción no fue tan sobresaliente como con el aumento de concentración.

Por otro lado, cabe mencionar los notables resultados de los equipos Sun Nuclear 1029 y Corentium Home pues en la mayoría de pruebas estuvieron presentes por su desempeño; el Sun Nuclear 1029 se ubicó como equipo más preciso en cinco pruebas y como más exacto en dos, mientras que el Corentium Home estuvo presente como equipo más preciso en dos pruebas y con más exactitud en tres. No obstante, todos los equipos trabajaron de forma adecuada, sobre todo al aumentar los niveles de concentración del radón.

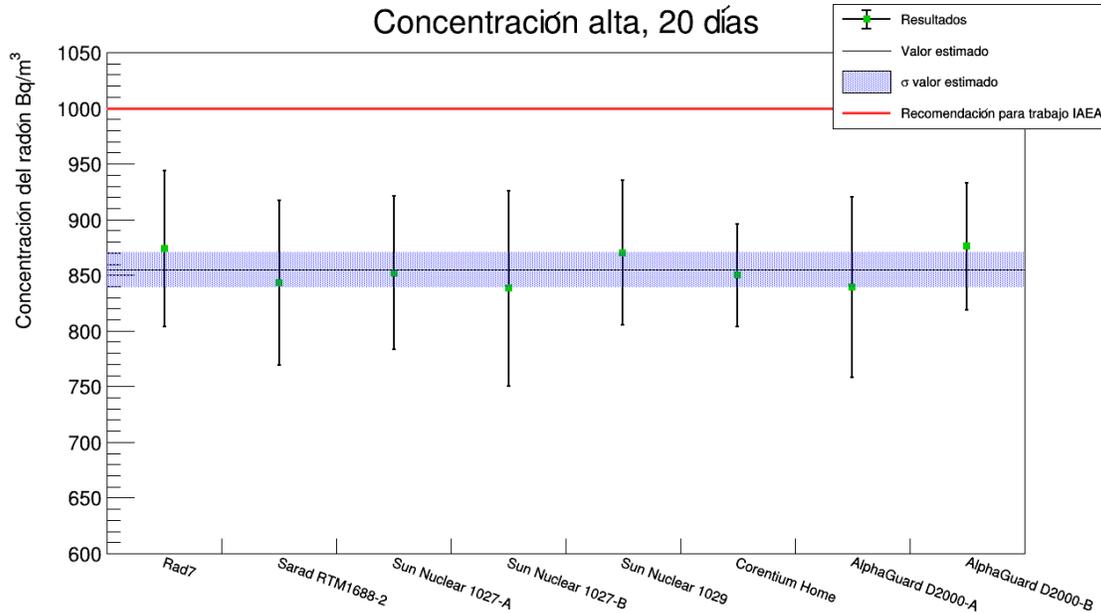


Fig. 4.11: Concentración de radón obtenida en 20 días de monitoreo con concentraciones altas. Tanto las barras de incertidumbre como la banda azul representan la desviación estándar. La línea roja representa el valor máximo recomendado para lugares de trabajo por la IAEA.

³⁴Basta con observar las distintas estimaciones y sus incertidumbres para observar dicho comportamiento.

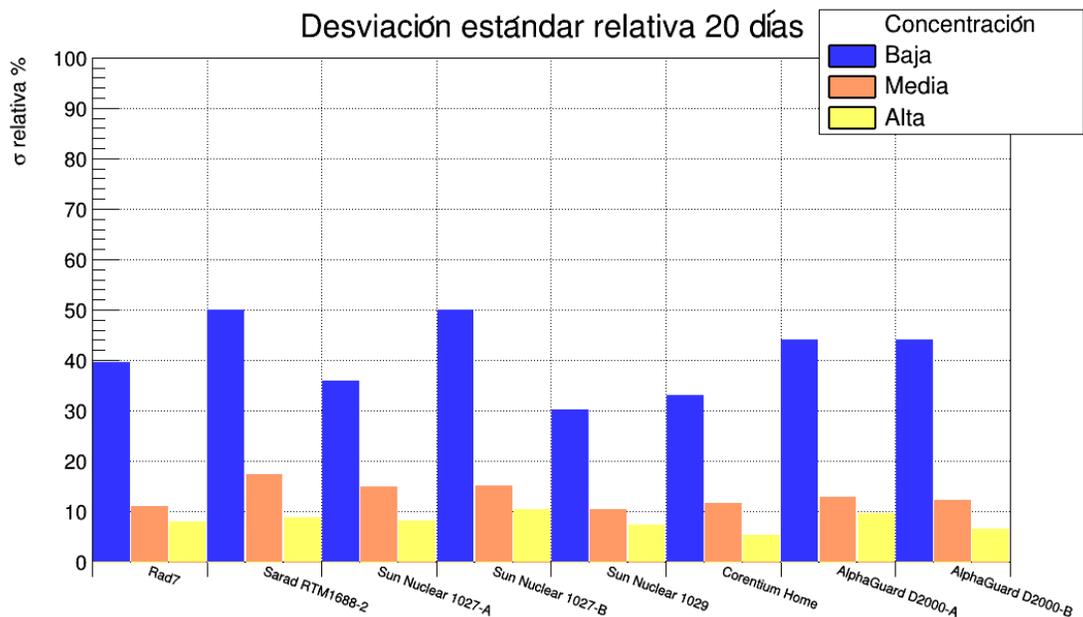


Fig. 4.12: Desviación estándar relativa de cada instrumento obtenida de las distintas exposiciones al radón en un periodo de 20 días de monitoreo.

4.2. Segunda intercomparación

Para la segunda intercomparación se obtuvieron concentraciones de radón mayores las cuales también se dividieron en tres grupos: bajas ($<100 \text{ Bq/m}^3$), medias ($<550 \text{ Bq/m}^3$) y altas ($<5000 \text{ Bq/m}^3$). El comportamiento de los cinco monitores dentro de la cámara de radón se puede observar en la figura 4.13. Es fácil observar la pronta respuesta de todos los instrumentos pues las lecturas tomadas cada 24 h^{35} mostraron, como se esperaba, un decremento de concentración del radón, esto implica que aunque el equipo Corentium Home no está diseñado para detectar cambios inmediatos de concentración del radón como otros equipos³⁶ si muestra cambios importantes en la concentración del radón en espacios cortos de tiempo.

Por otra parte en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16, se visualizan las estimaciones de la concentración de radón dentro de la cámara para una muestra de los tres distintos grupos de

³⁵Con excepción del lapso de tiempo del 28/02/20 al 02/03/20 en el cual no se registraron resultados

³⁶Como el AlphaGuard D2000 el cual puede actualizar las mediciones de concentración cada 10 min

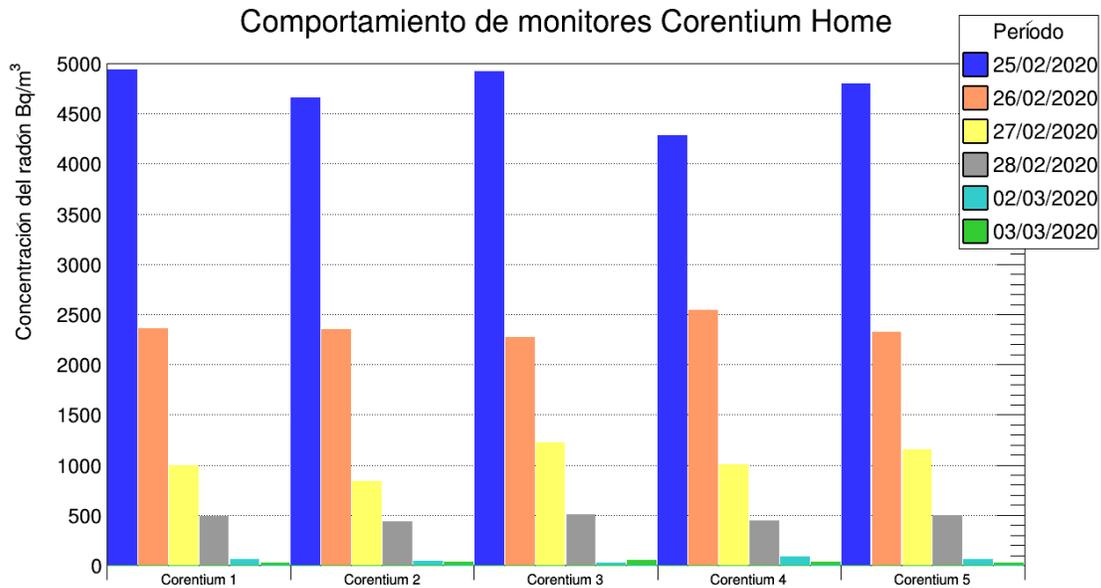


Fig. 4.13: Comportamiento de los monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón.

clasificación antes mencionados, concentración baja, media y alta; las concentraciones estimadas fueron, respectivamente: $36 \text{ Bq/m}^3 \pm 33 \%$, $474 \text{ Bq/m}^3 \pm 6.5 \%$ y $2370 \text{ Bq/m}^3 \pm 4.3 \%$. De los valores obtenidos se nota que se sigue el comportamiento observado con anterioridad en la intercomparación entre distintos monitores, es decir, la dispersión conjunta de los datos arrojados por los instrumentos disminuye conforme aumenta la concentración a la que son expuestos obteniendo así estimaciones más certeras y con menor desviación estándar. Vale la pena resaltar este último hecho pues representa que el equipo funciona de manera excepcional a niveles de concentración que son de alto riesgo para el ser humano.

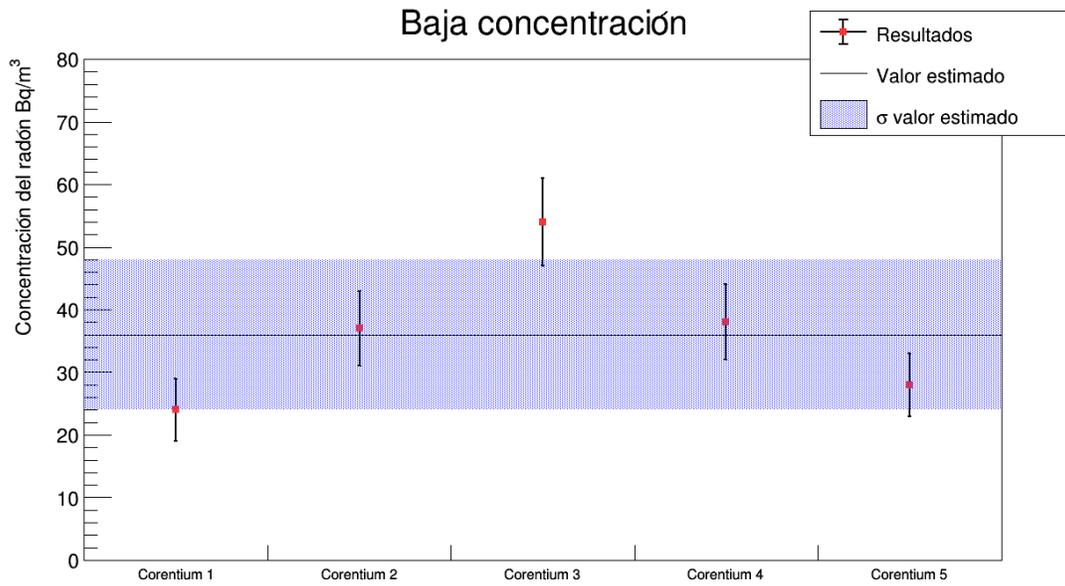


Fig. 4.14: Concentración de radón correspondiente al 03/03/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones bajas. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.

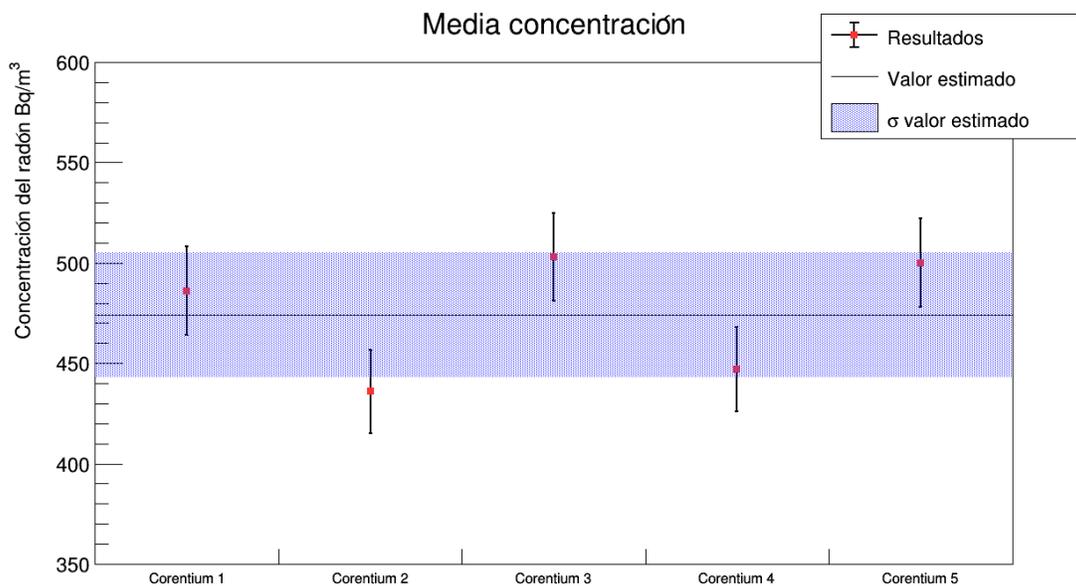


Fig. 4.15: Concentración de radón correspondiente al 28/02/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones medias. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.

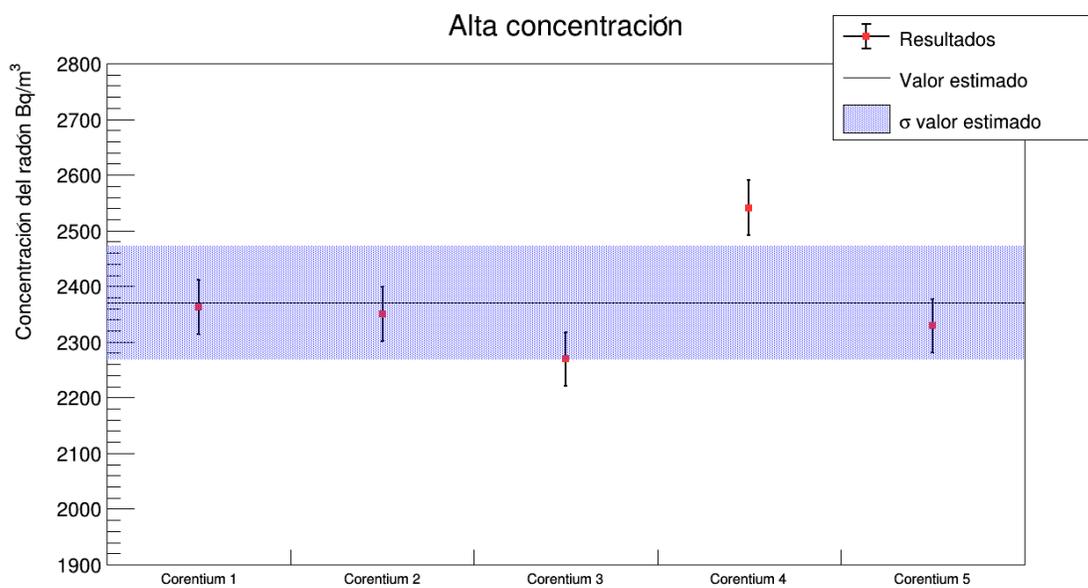


Fig. 4.16: Concentración de radón correspondiente al 26/02/20 obtenida de 5 monitores Corentium Home dentro de una cámara de gas radón con concentraciones altas. La banda azul representan la desviación estándar del valor estimado.

Capítulo 5

Aplicaciones y recomendaciones

Ya que se ha demostrado que los equipos estudiados funcionan adecuadamente para la medición del radón intramuros, incluso en condiciones de concentración baja, un apartado fundamental del estudio consiste en aplicar este conocimiento en el beneficio a la comunidad y la solución de problemas. Una de las mayores aplicaciones de las mediciones del radón intramuros es la elaboración de mapas de concentración del radón, con los cuales a su vez se pueden hacer mapas de probabilidad de riesgo, crear planes de acción y encontrar correlaciones entre ciertos padecimientos o fenómenos y la exposición al radón.

5.1. Elaboración de mapas del radón.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones del radón intramuros se utilizan en gran parte para la elaboración de mapas que muestran los niveles de concentración de este gas en distintas ubicaciones. Estos mapas tienen como objetivo principal estimar el riesgo radiológico de una zona geográfica para informar a la población de dicha entidad [57], sin embargo, también pueden ser utilizados para la estimación de casos de cáncer esperados [58], buscar correlaciones con algunas características geográficas [59] y, a su vez, para hacer evaluaciones económicas [60] o para mejorar la efectividad para buscar edificaciones

antiguas con alta probabilidad de concentraciones elevadas³⁷ [61]. Estos mapas tienen gran importancia y, en todos los casos, la variable dependiente son las mediciones del radón intramuros, por lo cual, un gran número de ellas siempre son necesarias. A continuación se presentan algunos ejemplos de mapas de radón y sus aplicaciones.

5.1.1. Mapas de radón en EUA

Estados Unidos de América es uno de los países con mayor interés en el monitoreo y control del radón en su territorio. La USEPA es la agencia encargada de brindar información sobre el radón a la ciudadanía de ese país y ha desarrollado el mapa que se muestra en la figura 5.1. Este mapa fue elaborado en 1993 para identificar áreas con el potencial de tener niveles elevados de radón intramuros. Fue desarrollado usando datos de mediciones de radón intramuros, geológicas, de radioactividad aérea y con parámetros de los suelos y los tipos de cimientos. El propósito de este mapa es ayudar a los gobiernos y otras organizaciones a enfocarse en actividades y recursos para la reducción de riesgos originados por el radón [62]. Aunque este mapa brinda una gran cantidad de información sobre los niveles de exposición, existen otros más detallados que han sido elaborados tomando en cuenta las emisiones de radón de los suelos.

En la figura 5.2 se muestra el mapa de radón realizado por la USEPA para el estado de Kentucky, con un enfoque particular al condado de Logan, y en la figura 5.3 se observa un nuevo mapa de radón más detallado, el cual se hizo con información de mapas geológicos altamente precisos y con los valores del radón intramuros de alrededor de 60 mil casas. Con esta clase de mapas se buscó que la ciudadanía hiciera una mayor cantidad de mediciones de radón intramuros pues había posibilidad de riesgo incluso en condados con una concentración media, es decir, zonas 2 ó 3 de la figura 5.2. El empleo de estos mapas como estrategia de comunicación implicó el aumento de mediciones en el estado, con lo cual se concluyó que los mapas de radón más detallados son una buena estrategia para fomentar las mediciones de radón intramuros evitando así que la gente se exponga a grandes can-

³⁷Lo cual es de suma importancia pues estos inmuebles carecen de sistemas de mitigación de radón y es necesario ubicarlas para incluirles un sistema de éstos.

tidades del gas y logrando disminuir las tasas de cáncer de pulmón en la población y, en consecuencia, los costos de tratamiento [60].

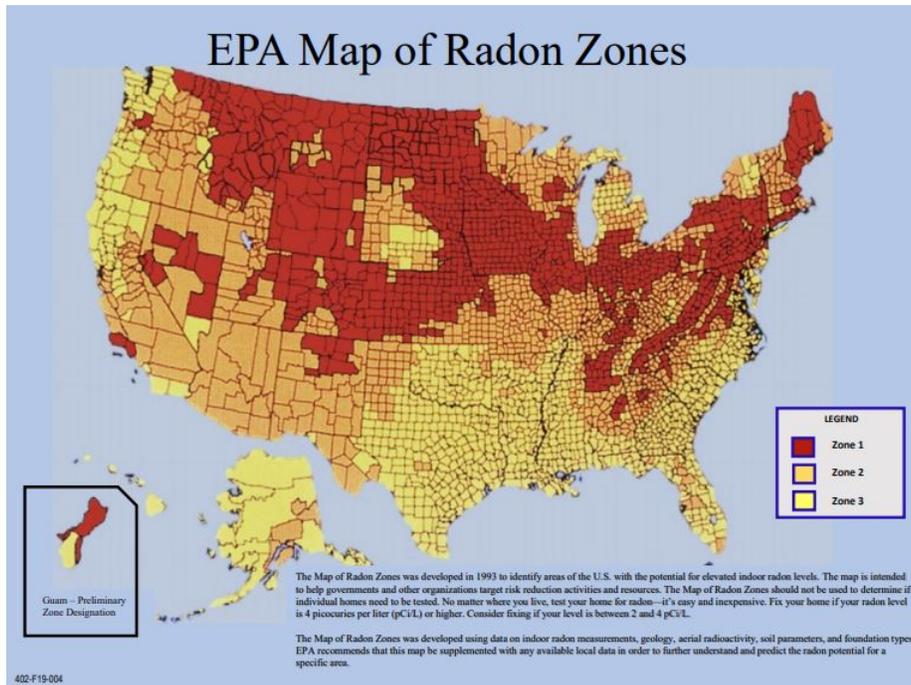


Fig. 5.1: Mapa de concentración del radón por condado de EUA. La zona 3 tiene bajos niveles de concentración mientras que la zona 1 tiene niveles elevados de radón. [62]

KENTUCKY – EPA Map of Radon Zones

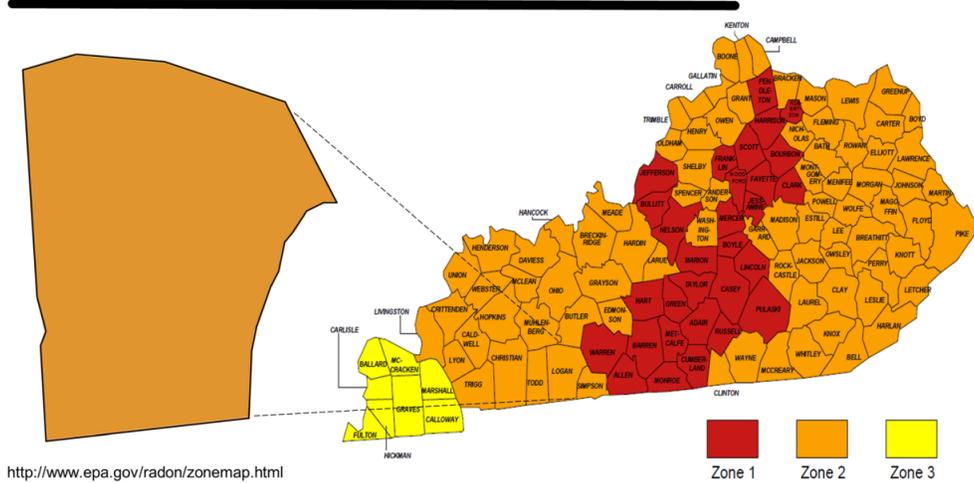


Fig. 5.2: Mapa de concentraciones de radón en el estado de Kentucky con una particular ampliación al condado de Logan. La zona 1 representa condados con promedios de radón predichos mayores que 4 pCi/l, la zona 2 con valores de entre 2 y 4 pCi/l y la zona 3 con valores menores que 2 pCi/l. [60]

Certain types of rock have higher levels of radon:

Radon is a problem in many areas in Kentucky, including Logan County.

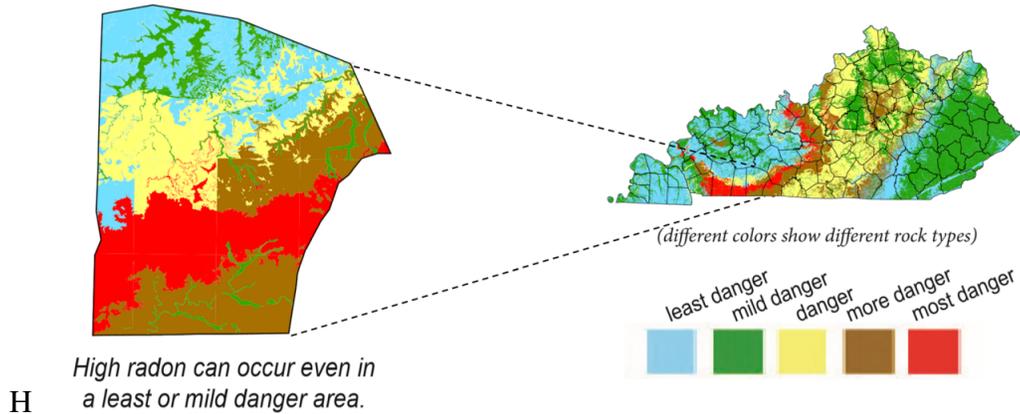


Fig. 5.3: Ejemplo de un nuevo mapa de radón del estado de Kentucky que muestra niveles de peligro basados en mediciones de radón intramuros e información geológica. Los niveles de radón por tipo de roca van de 0.0 a 2.7 pCi/l (azul), 2.71 a 4.00 pCi/l (verde), 4.01 a 8.00 pCi/l (amarillo), 8.01 a 16.00 pCi/l (café) y 16.01 a 25.30 pCi/l (rojo). [60]

5.1.2. Mapas de radón en Europa

Europa es otro de los territorios donde hay gran interés por entender y monitorear el radón intramuros. En 2006 el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea lanzó un proyecto para mapear las concentraciones de radón intramuros como parte de un Atlas de radiación natural en Europa. Hasta el 2018, treinta y cinco países han aportado información sobre el radón intramuros en sus territorios, cubriendo gran parte del continente. Este mapa se observa en la figura 5.4. Con el propósito de mostrar “lo que la tierra entrega” en términos de potencial de radón (RP), en 2008 fue lanzado un mapa de radón geogénico, sin embargo, hasta el día de hoy no se ha finalizado [57], [63].

El mapa de la figura 5.4 se ha elaborado con la información entregada por cada país, cuya responsabilidad ha sido realizar las mediciones correspondientes, es por esto que los valores de cada país también pueden ser consultados de forma individual. Como ejemplo, en la figura 5.5 se muestra un mapa de las mediciones de radón intramuros en Irlanda realizadas desde 1992 hasta 2013 con un total de 32000 medidas [58]. Esta información ha resultado útil para varios estudios, entre los que destaca la elaboración de mapas que evidencian un estimado del valor promedio de la concentración de radón intramuros por

European Indoor Radon Map, September 2018

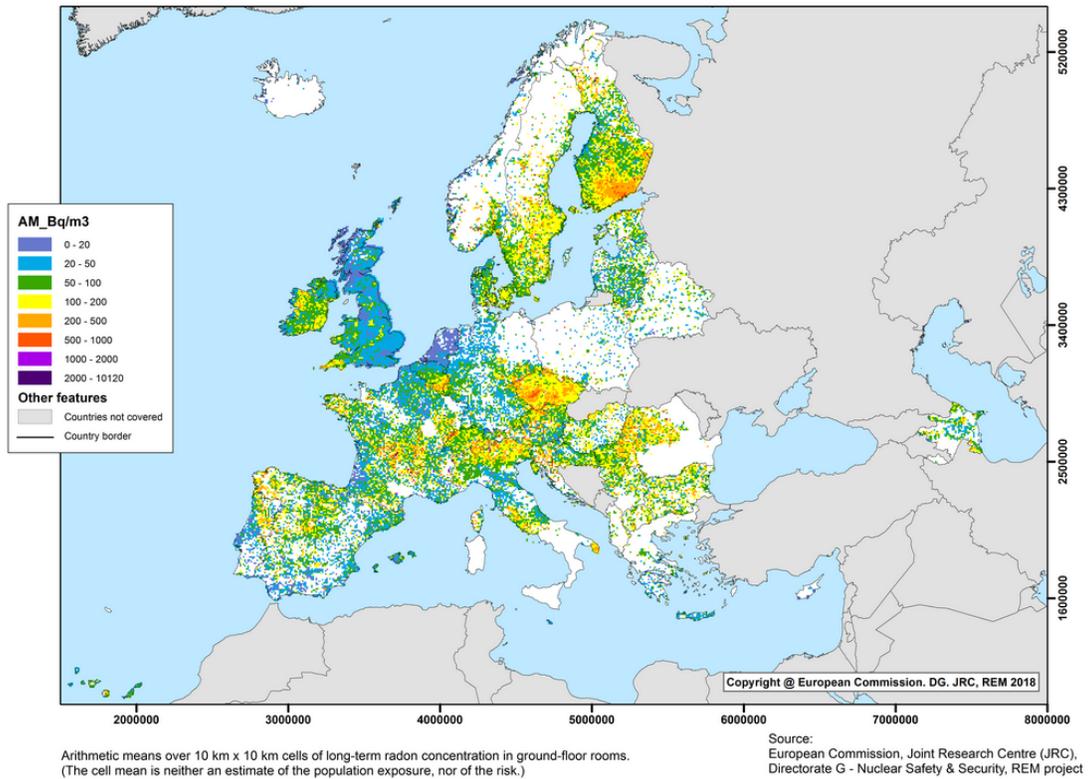


Fig. 5.4: Promedios aritméticos en celdas de 10x10 km de las concentraciones del radón en habitaciones de primera planta. Información actualizada al 28/09/18. [63]

distrito electoral, así como la incidencia esperada de casos de cáncer de pulmón vinculados al radón³⁸ [58], estos se representan en la figura 5.6. Igualmente, se han llevado a cabo estudios para la elaboración de mapas más detallados mediante la correlación del radón con características de los suelos, tales como su permeabilidad, su material e incluso sus aguas subterráneas; de esta forma, se han propuesto mapas de riesgo nuevos como el de la figura 5.7. Todos estos estudios y mapas tienen como objetivo el implementar planes de acción para las zonas de mayor riesgo, así como invitar a la gente a que haga mediciones periódicas del radón en sus casas para evitar distintos tipos de cáncer, sobre todo, el cáncer de pulmón.

³⁸Este estudio fue elaborado con una metodología robusta que toma en cuenta factores como la densidad poblacional y la correlación espacial de las concentraciones de radón medidas.

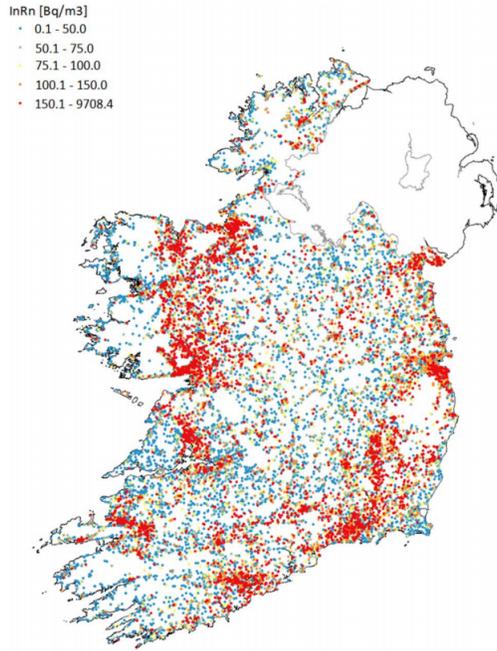
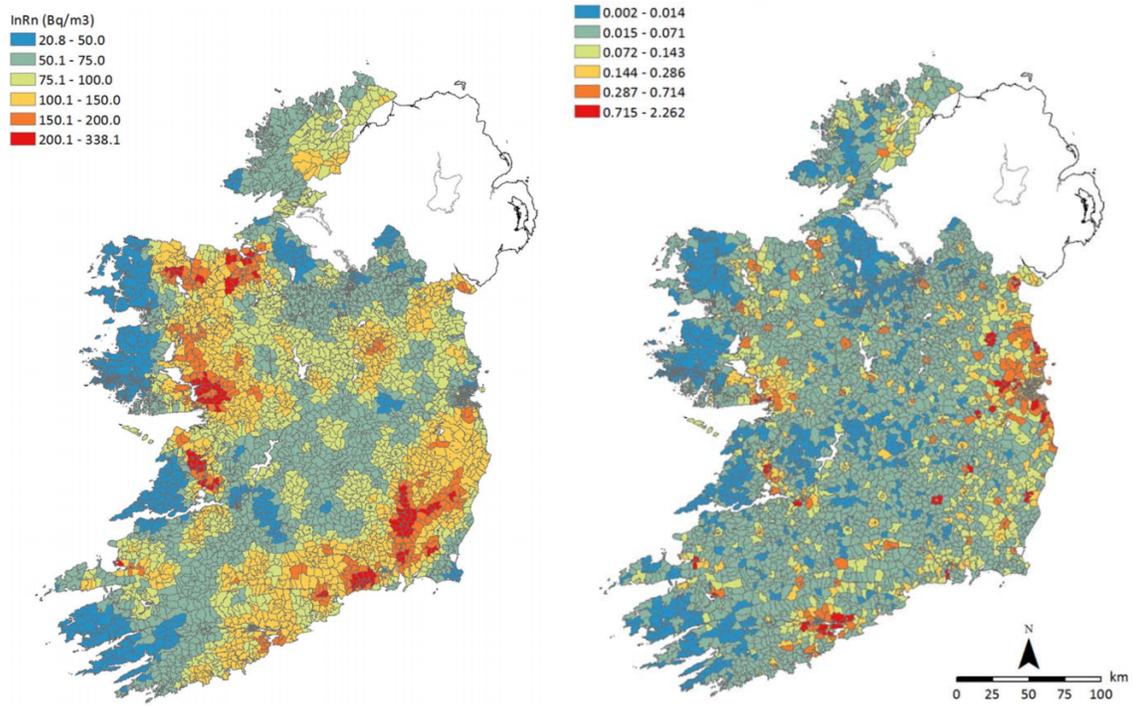


Fig. 5.5: Mediciones de radón intramuros de 1992 a 2013 en Irlanda. [58]



(a) Concentración de radón intramuros promedio. (b) Casos de cáncer de pulmón esperados para 2016.

Fig. 5.6: Mapas modelados de Irlanda que muestran la concentración promedio de radón intramuros y los casos anuales esperados de cáncer debido a este último. [58]

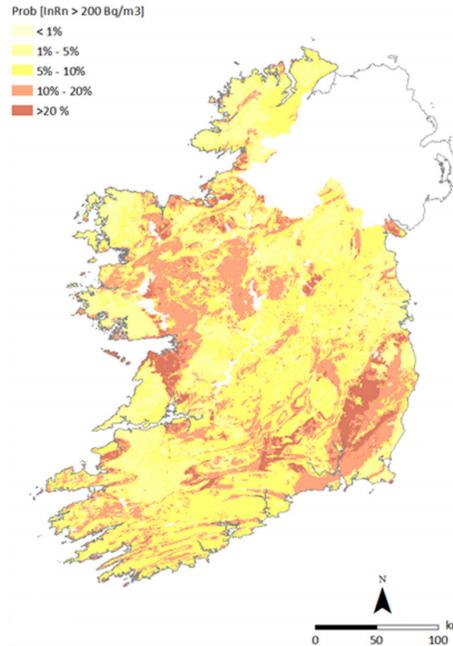


Fig. 5.7: Nuevo mapa de radón intramuros de la República de Irlanda (2017). Las predicciones están basadas en las mediciones del radón intramuros, el sustrato de suelo, la geología cuaternaria, la permeabilidad del subsuelo y el tipo de acuífero. [59]

5.1.3. Mapas de radón en México

Con el objetivo de elaborar mapas de concentración del radón intramuros, a lo largo del territorio mexicano también se han hecho mediciones del radón tanto en hogares como en lugares de trabajo [64], [65], [66], mismos que se muestran en las figuras 5.8 y 5.9. Como se observa, a nivel estatal los niveles promedio son bajos y no se encuentran por encima de ningún nivel de acción de agencias internacionales³⁹ [66], sin embargo, en las alcaldías Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc, dentro del área de la Ciudad de México, se aprecia una concentración mayor que 150 Bq/m^3 , lo cual expresa que mapas más detallados de la república son necesarios y que los estudios que se tienen hasta ahora son escasos, por lo que una mayor cantidad de mediciones es necesaria para vislumbrar el panorama completo del territorio nacional. Con esto se podrían hacer investigaciones como las expuestas en los ejemplos anteriores, con el propósito de diseñar modelos de riesgo, alentar a la gente a que

³⁹*Supra* p. 18, tabla 1.3

haga mediciones del radón en sus hogares y crear planes de acción ante concentraciones elevadas para evitar así futuros casos de cáncer de pulmón.



Fig. 5.8: Mapa de concentración promedio de radón intramuros en México. [66]

Las mediciones del radón intramuros se pueden hacer con cualquiera de los monitores que se han estudiado en este trabajo, pues se ha demostrado que todos funcionan bajo rangos similares de precisión y exactitud. Además, algunos equipos como el AlphaGuard o el Rad7 pueden ser utilizados para medir el radón que la tierra entrega y el que se encuentra en los subsuelos y aguas subterráneas, ayudando así a la creación de mapas más detallados. Debido al costo de la mayoría de los monitores dinámicos, la realización de pruebas masivas con estos equipos no es muy recomendable, no obstante, con el nuevo dispositivo Corentium Home se presentan ventajas que antes no se tenían, al ser un equipo de menor costo y dinámico se pueden tener lecturas directas y actualizadas, con lo cual el número de mediciones se podría incrementar y se podrían hacer mapas dinámicos. Debido a lo anterior, este instrumento se ha ido posicionando para el futuro de las mediciones de radón junto con otros de la misma marca.

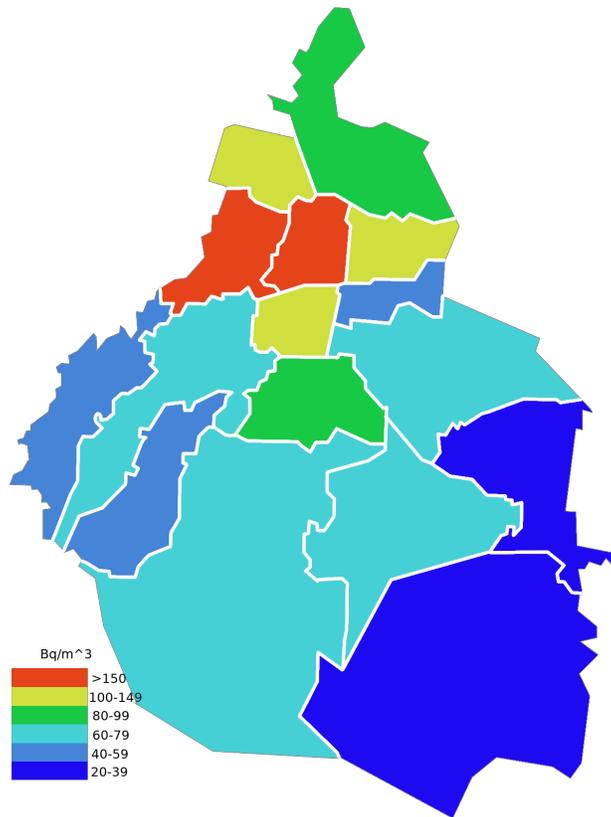


Fig. 5.9: Distribución del radón intramuros en las 16 alcaldías de la Ciudad de México. [65]

5.1.4. Mapa de radón *Airthings*

La compañía que desarrolló el monitor Corentium Home cuenta actualmente con un mapa de radón intramuros, el cual es actualizado continuamente con ayuda de los instrumentos que tiene integrados a su red o con los reportes que se hacen en su sitio web. Los valores que se muestran en el mapa son valores promedio de los detectores que se encuentran en una ubicación próxima, ofreciendo así un estimado de la concentración de radón en zonas geográficas específicas, un ejemplo de ello se muestra en la figura 5.10. Otra ventaja de este mapa es que es global y muestra todas las regiones del mundo en un solo sitio, no obstante, la constitución del mapa depende totalmente de los instrumentos desarrollados por la marca, además los datos son almacenados por la misma, por lo que no pueden ser verificados, haciendo que sea necesario estudiar cada uno de los detectores desarrollados por esta empresa para confirmar su precisión y exactitud, tal y como se ha hecho en este trabajo.

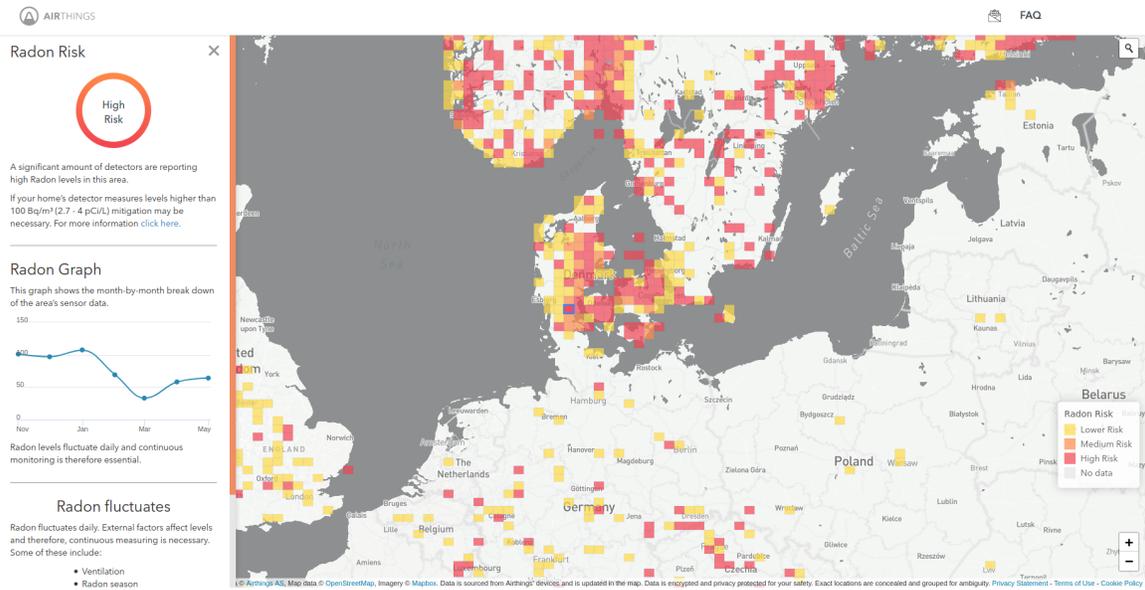


Fig. 5.10: Mapa dinámico desarrollado por Airthings. [67]

Conclusiones

Con el estudio elaborado se consiguieron resultados satisfactorios para la intercomparación de los distintos monitores analizados, así como para elaborar mejores mediciones para futuras pruebas.

Para el caso de la intercomparación de los ocho monitores estudiados fue clara la superioridad de ciertos instrumentos. En general dos equipos se mantuvieron entre los mejores tanto en precisión como en exactitud, estos fueron: el Sun Nuclear 1029 y el Corentium Home; por otra parte, los equipos AlphaGuard D2000-A, Sarad RTM1688-2 y el par de Sun Nuclear 1027 mostraron un menor rendimiento reflejando una mayor dispersión de sus resultados al igual que, en algunos casos, una menor exactitud respecto al valor estimado.

En particular, el equipo Sun Nuclear 1029 destacó sobre los demás consiguiendo ser el más preciso y exacto en el estudio de dos días a concentración media, aspecto que ningún otro equipo logró⁴⁰, aunado a esto, este equipo siempre mostró pocas discrepancias en relación a sus resultados y una diferencia con respecto al valor estimado de concentración pequeña, lo cual lo convierte en una gran opción para el monitoreo de radón intramuros pues además posee un menor precio que otros instrumentos como el Rad7 y el AlphaGuard D2000. No obstante, el Sun Nuclear 1029 resulta ser un instrumento de difícil manejo pues su funcionamiento resulta confuso tanto para observar las mediciones como para iniciar nuevas, sumado a esto, el equipo no ofrece otras ventajas como el estudio de aguas, suelos superficiales o subsuelos.

⁴⁰Ningún otro equipo logró ser el más preciso y el más exacto en una prueba

En este último apartado, los equipos recomendados son el Rad7 y el AlphaGuard D2000, los cuales mostraron un comportamiento óptimo con desviaciones estándar pequeñas⁴¹, en especial el Rad7, el cual, en la mayoría de los casos, superó en precisión y exactitud al par de AlphaGuard D2000⁴². Ambos equipos son fáciles de manipular y ofrecen ventajas más profesionales para el estudio del radón, lo cual los hace equipos ideales para laboratorios e investigaciones, sin embargo, esto mismo hace que sus precios sean mayores y por lo tanto escapen al área exclusiva de monitoreo de radón intramuros en viviendas. Aunque es cierto que podrían ser utilizados para cotejar los resultados de algún otro instrumento o método, su área de trabajo es altamente especializada.

El equipo Corentium Home arrojó resultados similares al de equipos más costosos como el Sun Nuclear 1029 o el Rad7 y, aunque en algunas condiciones mostró un rezago en la exactitud⁴³, sostuvo un comportamiento estable, manteniéndose entre los mejores equipos. Ahora bien, el elemento que lo hace particularmente bueno es su precio pues aunque no ofrece ventajas como los profesionales, sí ofrece una buena calidad de mediciones de radón intramuros, incluso, comparables a las del Sun Nuclear 1029 el cual tampoco ofrece la medición de radón en agua y suelos, por lo que, por un menor precio, mejor movilidad y calidad de resultados la mejor opción para el monitoreo de radón intramuros es el equipo Corentium Home. Además, debido a las ventajas técnicas que ofrece el equipo como poder hacer un reporte en línea, podría ser una alternativa a los métodos pasivos para el monitoreo del radón intramuros en viviendas y en pruebas masivas.

Ahora, en comparación con los otros equipos, los monitores Sun Nuclear 1027, el AlphaGuard D2000-A y el Sarad RTM1688-2 demostraron ser eficientes para la medición del radón intramuros, pero evidenciaron una menor calidad en cuanto a precisión y exactitud. Si bien, el Sun Nuclear 1027 resulta tener un precio más asequible y ser más compacto que el Sun Nuclear 1029, sus mediciones no resultaron ser tan confiables como las del modelo 1029. Por otra parte, el monitor AlphaGuard D2000-A presentó algunas discrepan-

⁴¹Pues en los estudios a concentraciones medias y altas siempre mostraron $\sigma \leq 13\%$

⁴²En particular al AlphaGuard D2000-A el cual mostró una menor precisión y exactitud que el AlphaGuard D2000-B

⁴³Como lo fue en el caso del estudio de dos días en concentración media

cias con respecto al otro de su misma línea, el AlphaGuard D2000-B, lo cual nos invita a pensar que es necesario hacer más estudios de intercomparación de estos dos monitores para poder concluir la causa de estas diferencias en calidad de mediciones. Por otro lado el Sarad RTM1688-2 ofrece la ventaja de poder hacer mediciones en aguas y suelos, como el Rad7 o el AlphaGuard, pero a un menor costo, lo cual lo convierte en la opción económica de un monitor especializado, no obstante, su calidad de mediciones es inferior que la de los equipos antes mencionados.

El estudio también arrojó que, en general, el comportamiento de los monitores de radón mejora sustancialmente al aumentar las concentraciones de radón, esto resulta particularmente útil pues se desea identificar cuando las concentraciones de radón intramuros son altas o están por encima de los valores recomendados. Como se observó, todos los equipos disminuyeron su desviación estándar relativa al medirse concentraciones por encima del valor recomendado por la USEPA y este comportamiento continuaba al aumentar más aún la concentración, lo que demuestra que todos los equipos pueden ser empleados de manera confiable para la identificación de concentraciones medias o altas de radón.

Con la segunda intercomparación, donde se usaron solamente monitores Corentium Home, se verificó lo mencionado anteriormente, pues al aumentar las concentraciones de radón los resultados obtenidos de manera individual por cada monitor discrepaban en menor medida resultando en una estimación de concentración más precisa y exacta. Este último estudio demostró, además, la pronta respuesta del monitor Corentium Home, pues expuso cambios importantes en la concentración del radón en tan solo 24 h lo cual hace que este dispositivo sea apto para identificar cambios en la concentración del radón intramuros de manera eficaz y oportuna.

Asimismo se ha informado de los riesgos en salud pública del radón intramuros y la enorme necesidad de una regulación en el territorio nacional para su identificación y monitoreo. Se ha de considerar así que el trabajo ha logrado identificar los equipos con mejor precisión y exactitud así como las distintas aplicaciones que se les pueden dar, propiciando que sea más fácil para el usuario elegir el monitor que sea más adecuado a sus necesidades.

Glosario

A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | L | M | N | O | P | R | T | U | V | W

A

actínidos Grupo de elementos que forman parte del periodo 7 de la tabla periódica. 14

actividad Número de decaimientos por unidad de tiempo

$$A = \frac{-dN}{dt}.$$

Se reporta en unidades de becquerel o curie. 6, 7, 43

advección Movimiento de una sustancia o transferencia de calor por movimiento del gas (normalmente aire) o líquido (normalmente agua) en que está presente. La IAEA lo emplea frecuentemente para describir el movimiento de un radionucleido a causa del movimiento del líquido en el que está disuelto o en suspensión. 3, 7, 8

aerosol Coloide de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas. 5

antineutrino Antipartícula correspondiente al neutrino. 11

ataque químico Método químico mediante el cual se pueden observar dislocaciones, defectos o centros de tensión de un material. La geometría de las figuras de corrosión formadas dependerá del tipo de alteración que haya sufrido el material. 42, 43

átomo Unidad más pequeña de un elemento químico. 5, 7, 10, 27

B

banda de conducción Banda ocupada por electrones que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente, i.e, electrones libres. 22, 27, 40

banda de valencia Banda ocupada por los electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos, i.e, electrones de valencia. 22, 27, 40

barrera de difusión Cualquier material que sea puesto en un detector para retrasar, mediante el aumento del tiempo de difusión, la razón a la cual el radón o su progenie en aire alcanzan el detector. 36

BSS *Basic Safety Standard*. 17

C

cadena de decaimiento Miembros consecutivos de una familia radioactiva de elementos. Una cadena completa comienza con un núcleo padre de larga vida como el ^{238}U y termina en un elemento estable como el ^{206}Pb . IX, 1, 2, 3

calibración Medición o ajuste de un instrumento, componente o sistema para cerciorarse de que su exactitud, precisión o respuesta es aceptable. 37, 41

circuito RC Circuito eléctrico compuesto de resistencias y capacitores. 29

D

DCA Detector de Carbón Activado. 36, 37

decaimiento Proceso en el que un núcleo atómico inestable cambia espontáneamente a uno estable u otro inestable emitiendo radiación. 1, 2, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 20, 26, 51

deposición en seco Deposición de gases atmosféricos y partículas en la superficie de la Tierra en ausencia de precipitaciones. 5

difusión Movimiento de partículas o moléculas con relación al medio en el que están distribuidas, bajo la influencia de un gradiente de concentración. El término se emplea normalmente en el caso del movimiento de radionúclidos suspendidos en aire y disueltos en aguas. 3, 5, 6, 7, 8, 9, 25, 26, 36, 44, 49, 50, 54

dosis absorbida D Magnitud dosimétrica fundamental D. Se define como:

$$D = \frac{d\epsilon}{dm}$$

Donde ϵ es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen con masa dm . La dosis absorbida está definida en un punto, para el promedio de dosis en un tejido u órgano. La unidad para la D es el Gray (Gy):

$$1Gy = \frac{1J}{kg}$$

. III, 15, 41

DTS Detección por Trazas en Sólidos. 44

E

electrones Partículas elementales cargadas negativamente que orbitan el núcleo atómico. 10, 13, 22, 23, 25, 27, 40

E-PERM *Electret Passive Environmental Radon Monitor* ®. 39

epitelio bronquial Revestimiento celular de los bronquios. 16

espectro Distribución de la frecuencia relativa para radiaciones del mismo tipo y de distintas energías como función de la energía. 21, 26, 31, 34, 38, 46, 48

EURATOM *European Atomic Energy Community*. 17, 18

exposición Exposición de personas a la radiación o a sustancias radioactivas, la cual puede ser externa, o interna. La exposición puede clasificarse en normal o potencial;

ocupacional, médica o del público y, en situaciones de intervención, en exposición de emergencia o crónica. También se utiliza el término exposición en dosimetría para indicar el grado de ionización producido en el aire por la radiación ionizante. IX, 3, 4, 37, 38

F

fluorescencia Tipo de luminiscencia que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente. 22

fosforescencia Fenómeno en el que algunos materiales pueden emitir luz con una longitud de onda mayor en comparación con el fenómeno de fluorescencia y con un tiempo característico que es generalmente más largo. 22, 40

fotón Partícula elemental característica de la radiación electromagnética. 12, 21, 22, 40

G

gases nobles Elementos químicos con propiedades muy similares como ser monoatómicos, inodoros, incoloros y presentar una reactividad química muy baja. Los seis gases nobles que se encuentran en la naturaleza son helio (He), neón (Ne), argón (Ar), kriptón (Kr), xenón (Xe) y radón (Rn). 3

geología cuaternaria Rama de la geología que estudia los desarrollos desde hace 2.6 millones de años en adelante. XIV, 82

gradiente Variación de una magnitud en función de la distancia, a partir de la línea en que esta variación es máxima en las magnitudes cuyo valor es distinto en los diversos puntos de una región del espacio. Se denota con el símbolo ∇ y puede demostrarse su expresión en diferentes sistemas de coordenadas. Para este contexto se emplean coordenadas cartesianas y su expresión es simplemente:

$$\nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial\phi}{\partial y}\hat{y} + \frac{\partial\phi}{\partial z}\hat{z}$$

. 5, 6, 7

I

IAEA *International Atomic Energy Agency*. XI, XII, 17, 18, 65, 68, 71

ICRP *International Commission on Radiological Protection*. 17, 18

IFUNAM Instituto de Física UNAM. 58

iones Átomos o moléculas con carga eléctrica positiva o negativa. 24, 25, 26, 27, 31, 39, 41, 48

ionización Proceso en el que un átomo o molécula adquiere carga positiva o negativa mediante la pérdida o ganancia de electrones. 9, 10, 11, 24, 26, 39, 42, 43

isótopo Átomos de un mismo elemento (mismo número atómico) que tienen una cantidad diferente de neutrones y, por lo tanto, difieren en masa. 3, 5, 34, 46, 48, 51

isotrópico Igual en todas direcciones . 8

J

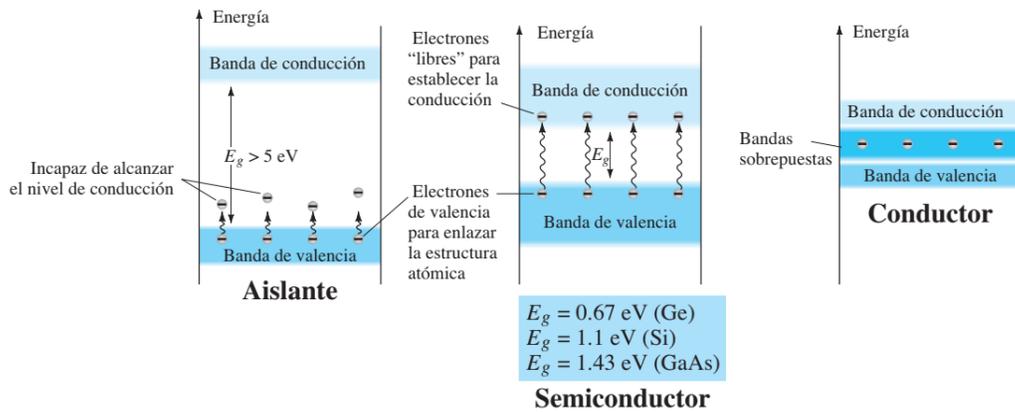
JRC Centro de Investigación Conjunto de la Comisión Europea. 79

L

LET *Linear Energy Transfer*. 13, 14

M

material aislante Material que tiene completamente llena la banda de valencia y cuya diferencia entre la banda de valencia y de conducción es mayor que 5 eV, lo que se traduce en que sus cargas eléctricas internas no puedan moverse libremente con facilidad



Estructura de bandas de distintos materiales

. 21

molécula Conjunto de al menos dos átomos enlazados que forman un sistema estable y eléctricamente neutro. 25

N

neutrino Partícula subatómica de tipo fermiónico sin carga. 11

neutrones Partículas eléctricamente neutras que forman parte del núcleo atómico. 10, 11, 13

nucleido Una especie de un átomo caracterizada por la constitución de su núcleo. **Núclido** es un nombre equivalente. 5, 15

núcleo Parte central de un átomo constituida por protones y neutrones. 9, 10, 11, 12, 13, 32, 34, 38, 46, 48

nucleones Componentes del núcleo atómico, se puede referir indistintamente a protones o neutrones. 10, 11

número atómico Número de protones que hay en el núcleo de un átomo. 1, 11

O

OMS Organización Mundial de la Salud. 17, 18

P

PAD Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría. 58

pasivación Proceso de formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material. 31

PC *Personal Computer*. 47, 49, 50, 51, 54

permeabilidad Capacidad de un sólido de transmitir un fluido. 6, 8

PIPS *Passivated Implanted Planar Silicon*. 31, 46

PMT *Photomultiplier Tube*. IX, 22, 23

poder de detención Es la razón a la cual la radiación pierde energía por unidad de longitud recorrida al atravesar un material. 13

positrones Antipartículas de los electrones. 11

progenie Productos de la descomposición radioactiva de un radionúclido. En el ^{222}Rn , por ejemplo, incluye la cadena de desintegración hasta el ^{210}Pb , pero sin incluirlo. 5, 20, 33, 35, 36, 38, 39, 44, 49, 51, 53

protones Partículas cargadas positivamente y que forman parte del núcleo atómico. 10, 11

R

radiación ionizante Radiación que tiene la suficiente energía para remover electrones de átomos creando iones. 9, 16, 21, 27, 28, 40, 42

radioisótopo Isótopo que emite radiación. 1, 32, 46

radionúclido Núclido que emite radiación. 3

radón Nombre del isótopo del radón en la cadena del uranio-238 y nombre genérico para todos los isótopos con número atómico 86. 1

recombinación Fenómeno en el cual los electrones son capturados por iones positivos y se regresa a un estado de carga neutra. 25, 26

riesgo radiológico Riesgo asociado a la exposición de radiación ionizante. 14

RP *Radon Potential*. 79

T

TLD *Thermoluminescent Dosimeter*. 41

U

USEPA *United States Environmental Protection Agency*. XI, XII, 15, 17, 18, 61, 64, 67, 70, 77, 88

V

vida media Tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo. 1, 37, 38

viscosidad dinámica Resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento.
6

W

working level Unidad de concentración de energía alfa potencial, es decir, la energía alfa potencial por unidad de volumen de aire producida por la presencia de la progenie del radón o la progenie del torón, igual a $1,3 \times 10^8$ MeV/m³. En unidades del SI, el WL es 2.1×10^{-5} J/m³ aproximadamente. 15

Apéndice A

Tablas de resultados

A continuación se presentan las tablas con los resultados obtenidos por los distintos instrumentos que se estudiaron.

Día	Equipo Corentium				
	C1	C2	C3	C4	C5
25/02/20	4936±70	4655±68	4923±70	4285±65	4798±69
26/02/20	2363±49	2350±48	2269±48	2541±50	2329±48
27/02/20	995±32	842.9±29.0	1226±35	1006±32	1156±34
28/02/20	486±22	435.9±20.9	503±22	447.0±21.1	500±22
02/03/20	58±8	47.7±6.9	30±6	87.7±9.4	59±8
03/03/20	24±5	37±6	54±7	38±6	28±5

Tabla A.1: Tabla de datos correspondiente a la segunda intercomparación. La tabla muestra la concentración de radón en Bq/m³ detectada por 5 equipos Corentium Home dentro de una cámara de radón.

Instrumento	Concentración baja		
	2 días	5 días	20 días
Rad7	8.4±1.8	10.7±4.7	11.6±4.6
Sarad	12±5	13±4	12±6
Sun 1027-A	9±3	15±5	14±5
Sun 1027-B	9±3	11±7	12±6
Sun 1029	12.1±3.1	15.8±2.7	13.2±4.0
Corentium	12±3	12±3	12±4
Alpha-A	11±4	8±4	9±4
Alpha-B	8±2	8±3	9±4
	Concentración media		
	2 días	5 días	20 días
Rad7	150±6	148±13	151±17
Sarad	146±11	167±28	150±26
Sun 1027-A	163±11	159±22	160±24
Sun 1027-B	167±16	166±26	158±24
Sun 1029	157.3±2.6	150.2±11.7	149.6±15.7
Corentium	172±6	171±14	155±18
Alpha-A	153±13	167±18	156±20
Alpha-B	155±7	164±19	155±19
	Concentración alta		
	2 días	5 días	20 días
Rad7	771±21	812±60	874±70
Sarad	772±50	840±88	843±74
Sun 1027-A	844±88	889±73	852±69
Sun 1027-B	822±94	822±95	838±88
Sun 1029	807.9±42.4	837.2±64.1	869.9±64.9
Corentium	862.1±31.4	825.5±41.9	850.0±45.9
Alpha-A	759±75	830±76	839±81
Alpha-B	814±40	871±57	876±57

Tabla A.2: Concentración promedio de radón obtenida por los distintos instrumentos estudiados en la primer intercomparación. Todos los valores de concentración están en Bq/m³.

Día	Instrumento										Condiciones		
	Rad7	Sarad	Sun 1027-A	Sun 1027-B	Sun 1029	Corentium	Alpha-A	Alpha-B	Temperatura	Humedad	Presión		
1	7.09	8	11	7.4	9.9	10	13	9	24.1	50.4	778.0		
2	9.70	15	7.4	11	14.3	14	8	6	24.1	51.3	781.0		
3	5.86	10	19	3.7	14.4	16	4	6	24.6	48.0	777.4		
4	8.74	11	15	15	13.3	14	6	7	24.3	45.1	776.0		
5	17.9	13	19	3.7	14.9	11	11	13	24.3	49.4	777.2		
6	12.7	21	7.4	19	20.3	10	6	6	24.9	50.0	778.9		
7	8.31	11	15	15	16	8.9	13	9	24.4	47.0	780.0		
8	11.0	5	15	15	24.2	4.8	6	4	24.0	48.5	777.2		
9	7.78	5	11	11	13.7	15	8	13	24.1	45.9	778.0		
10	11.0	5	11	7.4	12.2	11	6	9	24.7	41.4	778.7		
11	21.8	24	15	11	6.1	5.9	4	18	23.7	43.6	780.1		
12	11.3	5	15	15	10.3	18	6	13	23.9	48.6	779.8		
13	9.05	8	7.4	11	13.2	13	6	9	24.4	48.1	777.3		
14	8.48	21	19	11	14.5	10	11	11	24.4	48.6	776.0		
15	9.71	13	11	15	15.2	10	13	13	24.3	49.0	777.3		
16	9.04	8	22	11	11.6	16	8	9	24.4	50.5	778.8		
17	18.3	9	19	30	8.8	14	4	6	23.7	55.5	777.0		
18	9.04	25	26	11	10.4	8.9	16	11	24.4	51.2	777.0		
19	18.6	13	11	7.4	9.3	6.7	13	13	23.1	47.4	779.3		
20	17.5	12	7.4	11	11.5	17	15	4	23.6	52.9	780.2		

Tabla A.3: Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones bajas del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m³, la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].

Día	Instrumento										Condiciones		
	Rad7	Sarad	Sun 1027-A	Sun 1027-B	Sun 1029	Corentium	Alpha-A	Alpha-B	Temperatura	Humedad	Presión		
1	154	153	170	178	159.1	177	162	160	24.3	52.1	777.9		
2	145	138	155	155	155.4	168	144	150	22.7	54.2	780.3		
3	129	160	128	130	130.3	150	161	146	23.6	52.0	776.1		
4	163	211	188	200	156.9	189	193	194	22.3	52.3	777.6		
5	147	173	152	168	149.5	171	176	172	22.4	50.8	778.0		
6	173	108	186	167	125.5	164	161	140	22.4	54.3	779.5		
7	168	151	104	136	148.8	155	165	141	22.8	47.8	778.4		
8	144	146	172	173	155.7	172	175	141	22.3	51.4	779.1		
9	138	119	184	177	140.2	160	130	163	22.5	56.4	779.5		
10	179	171	164	206	148.5	157	174	177	23.2	54.6	775.3		
11	137	171	164	132	160.8	163	159	161	23.2	51.0	778.0		
12	154	141	146	146	179.7	132	130	161	23.3	50.3	777.5		
13	140	149	135	158	146.5	167	160	139	23.5	52.3	777.0		
14	155	98	152	111	163.5	149	151	155	22.8	60.9	776.1		
15	158	178	173	136	140.1	153	158	109	22.3	56.7	777.0		
16	131	152	143	159	125.5	114	152	153	22.3	53.7	778.1		
17	122	158	160	164	166.4	159	103	156	22.7	56.6	781.2		
18	171	156	204	132	135.0	141	153	168	22.2	52.7	775.3		
19	138	150	139	173	129.5	126	144	176	22.0	54.3	774.5		
20	174	115	187	154	174.5	138	168	131	21.7	59.0	778.2		

Tabla A.4: Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones medias del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m³, la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].

Día	Instrumento										Condiciones		
	Rad7	Sarad	Sun 1027-A	Sun 1027-B	Sun 1029	Corentium	Alpha-A	Alpha-B	Temperatura	Humedad	Presión		
1	756	807	906	755	837.9	839.9	812	843	21.0	63.8	777.2		
2	785	736	782	888	777.9	884.3	706	786	21.3	61.2	777.3		
3	808	828	881	950	914.8	781.3	867	928	21.4	59.3	774.8		
4	797	851	988	719	885.5	833.1	866	898	22.0	62.2	776.0		
5	913	976	887	798	769.8	788.8	899	901	22.0	52.0	778.0		
6	912	774	827	849	887.9	807.9	807	917	20.8	58.6	778.8		
7	910	786	823	938	858.9	884.1	971	968	21.1	56.3	779.3		
8	899	872	808	745	843.2	821.7	893	869	21.1	56.2	781.1		
9	914	765	780	887	990.9	877.2	844	891	22.1	48.3	779.7		
10	960	864	824	828	806.6	882.3	701	959	21.7	46.8	777.9		
11	853	879	841	676	807.4	943.6	857	889	21.6	55.5	777.9		
12	952	773	775	828	1030.1	922.6	787	882	20.9	55.2	775.2		
13	878	991	917	773	899.1	825.3	889	865	21.2	60.2	780.4		
14	791	901	844	996	915.0	835.7	793	861	21.1	61.7	778.8		
15	776	868	966	856	860.2	779.2	774	778	21.0	63.1	778.8		
16	979	770	937	803	902.2	880.2	688	945	21.9	60.8	775.0		
17	834	922	736	782	842.0	866.3	853	830	21.2	51.6	779.1		
18	919	844	798	991	811.8	878.0	967	809	21.4	50.0	776.6		
19	972	917	802	796	895.9	867.4	891	910	22.1	46.8	779.3		
20	866	744	912	899	861.5	801.7	917	783	21.5	65.0	777.3		

Tabla A.5: Monitoreo del radón durante 2, 5 y 20 días en concentraciones altas del gas radón. La concentración de radón se presenta en unidades de Bq/m³, la temperatura en grados celsius [°C], la humedad se refiere a humedad relativa [%] y la presión en milibares [mbar].

Apéndice B

Unidades

Magnitud	Unidad	Símbolo
Actividad	becquerel	Bq
	curio	Ci
Área	metro cuadrado	m ²
Concentración de actividad	becquerel por metro cúbico	Bq/m ³
	curio por litro	Ci/l
Corriente eléctrica	ampere	A
Energía	electronvolt	eV
	<i>joule</i>	J
Humedad relativa	-	%
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Nivel de trabajo	<i>working Level</i>	WL
Potencial eléctrico	volt	V
Presión	bar	bar
Temperatura	grado celsius	°C
Tiempo	segundo	s
	minuto	min
	hora	h
	día	d
Volumen	metro cúbico	m ³
	litro	l

Múltiplos y submúltiplos

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10^{12}	tera	T	10^{-1}	deci	d
10^9	giga	G	10^{-2}	centi	c
10^6	mega	M	10^{-3}	mili	m
10^3	kilo	k	10^{-6}	micro	μ
10^2	hecto	h	10^{-9}	nano	n
10^1	deca	da	10^{-12}	pico	p

Equivalencias

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/s}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ desintegraciones/s}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 27.027 \text{ pCi}$$

$$1 \text{ Bq/m}^3 = 0.001 \text{ Bq/l}$$

$$1 \text{ Bq/m}^3 = 0.027 \text{ pCi/l}$$

$$1 \text{ pCi/l} = 1000 \text{ pCi/m}^3$$

$$1 \text{ pCi/l} = 37 \text{ Bq/m}^3$$

$$1 \text{ WL} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$$

Apéndice C

Estadística

Si se supone una colección de N mediciones independientes de la misma magnitud física⁴⁴:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N$$

se pueden obtener dos propiedades elementales:

$$\textit{Suma} : \Sigma \equiv \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{C.1})$$

$$\textit{Promedio experimental} : \bar{x}_e \equiv \Sigma/N \quad (\text{C.2})$$

donde el promedio experimental está escrito con un subíndice para distinguirlo del valor verdadero.

También es posible derivar otro parámetro, llamado varianza de la muestra, que sirve para cuantificar las fluctuaciones internas en el conjunto de datos. El primer paso es definir el residuo de los datos como la cantidad por la cual difieren del promedio experimental:

⁴⁴La información mostrada en este anexo ha sido sustraída de [18]

$$d_i \equiv x_i - \bar{x}_e \quad (\text{C.3})$$

De esta relación se observa que pueden obtenerse valores negativos, sin embargo si se toma el cuadrado de cada residuo el resultado será siempre un número positivo.

Ahora, también se puede definir la *desviación* de los datos como la cantidad por la que difieren del valor promedio verdadero \bar{x} :

$$\epsilon_i \equiv x_i - \bar{x} \quad (\text{C.4})$$

La desviación definida de esta manera es similar al residuo (ecuación C.3), excepto que la distancia al valor promedio verdadero \bar{x} aparece en la definición en lugar del promedio experimental \bar{x}_e . Se puede introducir, entonces, la definición de la varianza de la muestra como el valor promedio de cada una de estas desviaciones después de ser elevadas al cuadrado:

$$\sigma^2 \equiv \bar{\epsilon}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{C.5})$$

donde σ es la desviación estándar verdadera.

La varianza de la muestra es un índice útil del grado de dispersión interna de los datos o como una medida de que tan diferentes son un número del otro.

La definición presenta dificultades prácticas, pues nunca se puede saber el valor exacto del valor promedio verdadero \bar{x} sin haber coleccionado un número infinito de datos. Lo mejor que se puede hacer es usar el valor del promedio experimental \bar{x}_e que se ha medido, y con lo cual, se tendrían que usar los residuos en lugar de las desviaciones. Pero el proceso de usar el valor experimental en lugar del verdadero afectaría el valor calculado de la varianza, por lo que no se puede simplemente sustituir \bar{x}_e en la ecuación C.5. En lugar de eso, si se agrega y se sustrae el valor promedio verdadero \bar{x} de la ecuación C.3 es posible relacionar

el residuo con la desviación:

$$\begin{aligned}d_i &= (x_i - \bar{x}) + \bar{x} - \bar{x}_e \\&= \epsilon_i + \bar{x} - \bar{x}_e \\&= \epsilon_i + \frac{1}{N} \cdot N\bar{x} - \frac{1}{N} \cdot N\bar{x}_e\end{aligned}\tag{C.6}$$

recordando las ecuaciones C.1 y C.2 se obtiene:

$$\begin{aligned}d_i &= \epsilon_i + \frac{1}{N} \sum_1^N \bar{x} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \\&= \epsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x}) \\d_i &= \epsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_j\end{aligned}\tag{C.7}$$

elevando al cuadrado de ambos lados

$$\begin{aligned}d_i^2 &= \left(\epsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_j \right)^2 \\&= \epsilon_i^2 - \frac{2}{N} \epsilon_i \sum_{j=1}^N \epsilon_j + \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i=1}^N \epsilon_i \right)^2\end{aligned}\tag{C.8}$$

Sumando sobre todos los datos

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N d_i^2 &= \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i \sum_{j=1}^N \epsilon_j + \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{i=1}^N \epsilon_i \right)^2 \\
&= \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \epsilon_i \right)^2 \\
&= \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 + \sum_{i,j=1}^N \epsilon_i \epsilon_j \right) \text{ con } i \neq j
\end{aligned} \tag{C.9}$$

El término $\sum_{i,j=1}^N \epsilon_i \epsilon_j$ sumará cero pues ϵ_i y ϵ_j están no correlacionados y habrá un número igual de contribuciones positivas y negativas. Queda entonces

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N d_i^2 &= \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 \\
&= \frac{N-1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2
\end{aligned} \tag{C.10}$$

así

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N d_i^2 \tag{C.11}$$

y sustituyendo las expresiones C.3 C.4 y C.5 se obtiene:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_e)^2 \tag{C.12}$$

Con lo cual, finalmente se puede obtener la expresión llamada desviación estándar experimental⁴⁵, que no es más que la raíz cuadrada de la varianza recién obtenida:

⁴⁵En [18] se le denota a esta expresión con s , sin embargo por practicidad se le ha denominado como σ_e

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_e)^2} \quad (\text{C.13})$$

Esta expresión es válida cuando se usa el promedio experimental. Además, como es esencialmente una medida del valor promedio del cuadrado de las desviaciones de cada punto, σ_e ⁴⁶ es una medida efectiva de las fluctuaciones del conjunto de datos original al rededor de un promedio y por lo tanto de la dispersión. Un conjunto de datos con una distribución estrecha tendrá una desviación estándar pequeña con respecto al promedio. Por otro lado, un conjunto con muchas fluctuaciones en sus datos tendrá una distribución amplia y un valor de desviación grande, así como también una varianza correspondiente mayor.

⁴⁶En el cuerpo del texto a esta medida se le denotará solo como σ pues se entiende que, al ser un proceso experimental, ésta será la expresión utilizada para obtener el valor de la desviación estándar.

Bibliografía

- [1] “Record for Radon”, *Web of Science*, 2020. [En línea]. Disponible: http://wcs.webofknowledge.com/RA/analyze.do?product=WOS&SID=6Dr7qxip3j7EcZlhhTt&field=TASCA_JCRCategories_JCRCategories_en&yearSort=false. [Consultado: 14-abr-2020].
- [2] J. Partington, “Discovery Of Radon”, *Nature*, vol.179, p.912, 1957, doi:10.1038/179912a0.
- [3] A. Helmenstine, “Radon Chemical and Physical Properties”, *ThoughtCo*, (1-mar-2019). [En línea]. Disponible: <http://thoughtco.com/radon-facts-606584>. [Consultado:18-dic-2019].
- [4] “What is Radon?”, *US EPA*, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/radon/what-radon>. [Consultado: 18-dic-2019].
- [5] D. Lide, “Table of the isotopes”, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Florida: CRC Press, 2020.
- [6] G. Espinosa, *Gas Radón En Cuevas. Su Origen, Medición, Distribución, Y Sus Posibles Riesgos Y/O Beneficios En Salud Pública*, 1^{er} ed. México: Instituto de Física, UNAM, 2016.
- [7] “Livechart - Table of Nuclides - Nuclear structure and decay data”, *IAEA*, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>. [Consultado: 18-dic-2019].

- [8] G. Espinosa y A. Carranza, *Radón intramuros y salud pública*, 1^{er} ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [9] “Where does radon come from?”, *US EPA*, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/radon/where-does-radon-come>. [Consultado: 18-dic-2019].
- [10] J. Ahmed, “Radon in the human environment: Assessing the picture”, *IAEA BULLETIN*, vol. 36, no. 2, pp. 32-35, 1994.
- [11] NCRP, “Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States”, *NCRP Report*, no. 160, 2009.
- [12] R. Cothorn y J. Smith, *Environmental Radon*, 1^{er} ed. New York, NY: Springer Science+Business Media, LLC, 1987.
- [13] L. Font, “Radon generation, entry and accumulation indoors”, Tesis de Doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Física, Barcelona, 1997.
- [14] W. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. New York NY: Springer-Verlag, 1987.
- [15] A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*, 6^a ed. New York, NY: Mc Graw Hill, 2003.
- [16] P. Tipler y R. Llewellyn, *Modern Physics*, 6^a ed. Nueva York: W.H. Freeman and Company, 2012.
- [17] B. Cohen, *Concepts of Nuclear Physics*, McGraw-Hill, 1971.
- [18] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4^a ed. EUA: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [19] S. Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection*, 1^{er} ed. Academic Press, 2007.
- [20] A. González, “Estudio y Caracterización de los Productos de la Reacción Nuclear (n, α) con Boro (^{10}B), Mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos”, Tesis de Licenciatura, Física, Facultad de Ciencias, UNAM, CDMX, 2018.

- [21] P. Airey, T. Hinton y J. Twining, “The Scientific Basis”, *Radioactivity in the Environment*, vol. 18, pp. 1-57. 1^{er} ed. Ed. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/B978-0-08-045016-2.00001-1
- [22] D. Vienneau, K. de Hoogh, D. Hauri, A. M. Vicedo-Cabrera, C. Schindler, A. Huss, et al. “Effects of Radon and UV Exposure on Skin Cancer Mortality in Switzerland”, *Environmental Health Perspectives*, vol. 125, no. 6, 067009, 2017. doi:10.1289/EHP825.
- [23] T. VoPham, N. DuPre, R. M. Tamimi, P. James, K. A. Bertrand, V. Viera, F. Laden, et al. “Environmental radon exposure and breast cancer risk in the Nurses’ Health Study II”, *Environmentla Health*, vol. 16, 97, 2017. doi:10.1186/s12940-017-0305-6
- [24] National Research Council, *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*, Washington, DC, The National Academies Press, 1999, doi: 10.17226/5499
- [25] “Health Risk of Radon | US EPA”, *US EPA*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>. [Consultado: 28-abr-2020].
- [26] *Effects of Ionizing Radiation*, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2006.
- [27] *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*, 1^{er} ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2015.
- [28] *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, 1^{er} ed. IAEA, 2014.
- [29] J-F. Lecomte, S. Solomon, J. Takala, T. Jung, P. Strand, C. Murith, S. Kiselev, W. Zhuo, F. Shannoun, A. Janssens, “ICRP publication 126”, *Radiological Protection against Radon Exposure*, Annals of the ICRP, vol. 43, no. 3, 2014.
- [30] “Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom”, *Official Journal of the European Union*, no. 59, (5-dic-

- 2013). [En línea]. Disponible: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>. [Consultado: 30-ene-2020].
- [31] A. Melissinos y J. Napolitano, *Experiments In Modern Physics*, 2^a ed. Academic Press, 2003.
- [32] J. Miles, “Methods of radon measurement and devices”, *Proceedings of the 4th European conference on protection against radon at home and at work. Conference programme and session presentations*. República Checa, p. 377, 2004.
- [33] R. Boylestad y L. Nashelsky, *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*, 10^a ed. México: Pearson Education, 2009.
- [34] A. Chambaudet, D. Klein y M. Voytchev, “Study of the response of silicon detectors for alpha particles”, *Radiation Measurements*, vol. 28, pp. 127-132, 1997.
- [35] M. Voytchev, D. Klein, A. Chambaudet y G. Georgiev, “The use of silicon photodiodes for radon and progeny”, *Health Physics*, vol. 80, no. 6, pp. 590-596, 2001.
- [36] J. Gutiérrez, M. García-Talavera, V. Peña, J. Nalda, M. Voytchev y R. López, “Radon emanation measurements using silicon photodiode detectors”, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 60, pp. 583-587, 2004.
- [37] M. Alenezy, “Radon Concentrations Measurement in Aljouf, Saudi Arabia Using Active Detecting Method”, *Natural Science*, vol. 6, pp. 886-896, 2014, doi: 10.4236/ns.2014.611086.
- [38] N. Ali, E. U. Khan, P. Akhter, F. Khan, A. Waheed, “Estimation of mean annual effective dose through radon concentration in the water and indoor air of Islamabad and Murree”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 141, no. 2, pp. 183–191, 2010, doi: 10.1093/rpd/ncq160.
- [39] H. Lucas, “Improved Low-Level Alpha-Scintillation Counter for Radon”, *The Review of Scientific Instruments*, vol. 28, no. 9, 1957. doi: 10.1063/1.1715975.

- [40] J. Thomas y P. LeClare, "A study of the two-filter method for radon-222", *Health Physics*, vol. 18, pp. 113-122, 1969.
- [41] S. Tokonami, T. Iimoto, T. Ichiji, K. Fujitaka y R. Kurosawa, "Continuous radon monitor using a two-filter method", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 63, no. 2, pp. 123-126, 1996.
- [42] D. Galeriu, A. Melintescu, A. Stochioiu, D. Nicolae y I. Balin, "Radon, as a tracer for mixing height dynamics - An overview and radon perspectives", *Romanian Reports in Physics*, vol. 63, no. 1, pp. 115-127, 2011.
- [43] G. Espinosa y R. Silva, "Gel detector for ^{222}Rn ", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 264, no. 2, pp. 333-336, 2004.
- [44] G. Espinosa, J. Golzarri, J. Rickards y R. Gammage, "Study of Gel Materials as Radioactive ^{222}Rn Gas Detectors", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 119, no. 1-4, pp. 425-429, 2006.
- [45] P. Kotrappa, J. Dempsey, R. Ramsey y L. Stieff, "A practical E-PERMTM (Electret passive environmental radon monitor) system for indoor ^{222}Rn measurement", *Health Physics*, vol. 58, no. 4, pp. 461-467, 1989.
- [46] J. Izewska y G. Rajan, *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Students*. Viena: E. B. Podgorsak, IAEA, 2005.
- [47] G. Espinosa, *Trazas Nucleares en Sólidos*, 1^{er} ed. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México, 1994.
- [48] *RAD7 Electronic Radon Detector User Manual*. DurrIDGE, EUA, 2019.
- [49] *User Manual RTM1688-2*. SARAD GmbH, Alemania, 2013.
- [50] *1027 Radon Monitor User's Guide*. Sun Nuclear Corp., EUA, 2009.
- [51] *1028/1029 Radon Monitor User's Guide*. Sun Nuclear Corp., EUA, 2010.
- [52] *Corentium Digital Radon Monitor User Manual*. Air Things, Noruega, 2015.

- [53] “Airthings Corentium Home | Radon detector”, *Airthings.com*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.airthings.com/home>. [Consultado: 20-Feb-2020].
- [54] “Radon 55 Detector - How We Make the Corentium Home”, *Airthings.com*, (13-jun-2016). [En línea]. Disponible: https://www.airthings.com/resources/radon-detector?fbclid=IwAR0Y4TherXQYjVU7ZVQ5ptz6IizlcZZ0ytVA_hr8I3mUvXWK26Dm5Z6_dis. [Consultado: 20-feb-2020].
- [55] *User Manual AlphaGuard types D50, D2000, DF2000*. Bertin Tech., Francia, 2019.
- [56] “Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes”, *radonstandards.us*, AARST Consortium on National Radon Standards/ANSI, 2019. [En línea]. Disponible: <https://standards.aarst.org/MAH-2019/index.html#zoom=z>. [Consultado: 10-mar-2020].
- [57] T. Tollefsen, G. Cinelli, P. Bossew, V. Gruber, M. De Cort. “From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 162, no. 1-2, pp. 129-134, 2014. doi: 10.1093/rpd/ncu244.
- [58] J. Elío, Q. Crowley, R. Scanlon, J. Hodgson, L. Zgaga, “Logistic regression model for detecting radon prone areas”, *Science of the Total Environment*, vol. 599-600, no. 1, pp. 1317-1329, 2017. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.071.
- [59] J. Elío, Q. Crowley, R. Scanlon, J. Hodgson, S. Long, “Estimation of residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung cancer incidence”, *Environment International*, vol. 114, pp. 69-76, 2018. doi: 10.1016/j.envint.2018.02.025.
- [60] J.S. Chiavacci, C.D. Shapiro, E.J. Pindilli, C.F. Casey, M.K. Rayens, A.T. Wiggins, W.M. Andrews y E.J. Hahn, “Economic valuation of health benefits from using geologic data to communicate radon risk potential”, *Environmental Health*, vol. 19, no. 36, 2020. doi: 10.1186/s12940-020-00589-8.

- [61] M. Neznal, M. Neznal, I. Barnet, “Practical usefulness of radon risk maps and detailed in-situ classification of radon risk”, *Nukleonika*, vol. 55, no. 4, pp. 471-475, 2010.
- [62] “EPA Map of Radon Zones”, *US EPA*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/radon/epa-map-radon-zones>. [Consultado: 13-may-2020].
- [63] “European Atlas of Natural Radiation”, *Remon.jrc.ec.europa.eu*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration>. [Consultado: 14-may-2020].
- [64] G. Espinosa, R.B. Gammage, “Indoor radon concentration survey in Mexico”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol.236, no.1-2, pp. 227-229, 1998. doi: 10.1007/BF02386347.
- [65] G. Espinosa, R.B Gammage, “A representative survey of indoor radon in the sixteen regions in Mexico City”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 103, no.1, pp. 73-76, 2003. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006119.
- [66] G. Espinosa, J.I Golzarri, A. Angeles, R.V. Griffith, “Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using Nuclear Track Methodology”, *Radiation Measurements*, vol. 44, no. 9-10, pp. 1051-1054, 2009. doi:10.1016/j.radmeas.2009.10.035.
- [67] “Radonmap”, *Radonmap.com*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://radonmap.com/>. [Consultado: 15-may-2020].