

segunda version

por Patrizia Pereyra

Fecha de entrega: 12-jul-2023 10:51a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2130147836

Nombre del archivo: versi_n_a_cargar_en_sistema_y_revisar_por_turnitin_12-07-23.pdf (11.35M)

Total de palabras: 64455

Total de caracteres: 320216

3
**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

1

ESCUELA DE POSGRADO



2

4
NUEVO ENFOQUE PARA ESTUDIAR LA RESPUESTA DEL DETECTOR LR-115 AL

3

²²²Rn, ²²⁰Rn Y PROGENIE. APLICACIÓN EN MEDICIONES DE RADÓN

4

EN INTERIORES DEL LIMA, PERÚ

5

3
Tesis para obtener el grado académico de Doctora en

6

Física que presenta:

Patrizia Edel Pereyra Anaya

7

Asesor:

Dr. Daniel Francisco Palacios Fernández

8

Lima, 2023

9
10
11
12

*A los que han dejado huellas en mi vida:
María Pía, José Patricio, Alan y
a los integrantes de
GITHUNU-PUCP*

13 Agradecimientos

14 Debo agradecer en primer lugar a Dios por darme la salud, energía y fortaleza para poder
15 llevar a cabo este trabajo en todos estos años.

16 A la Doctora María Elena López Herrera por ser mi modelo para seguir desde mis
17 primeros años de vida académica y haberme iniciado en esta técnica de Huellas Nucleares
18 que nos apasiona a ambos. Su apoyo y asesoría constante ha sido esencial para poder concebir
19 la idea del monitoreo de radón en la ciudad de Lima y motivarme a desarrollarla. Al Doctor
20 Laszlo Sajo-Bohus por sus continuas enseñanzas, motivaciones y el jovial entusiasmo que lo
21 caracteriza, por todas las enseñanzas brindadas, aportes a la parte experimental y sobre todo
22 por su infinita paciencia, dedicación y empuje a terminar esta tesis.

23 Al Doctor Daniel Francisco Palacios Fernández, por todo el apoyo brindado en el
24 desarrollo teórico y experimental de la tesis. Su asesoramiento ha sido esencial para poder
25 lograr las publicaciones realizadas con el debido rigor científico y que este trabajo tenga la
26 solidez científica lograda. El haberme compartido sus conocimientos y experiencia académica
27 ha sido determinante para concluir esta investigación.

28 Mi agradecimiento eterno a ellos tres, por todas sus enseñanzas.

29 A María Pía, por motivarme y ver en ella al futuro de la mujer científica en Perú, espero
30 haberla motivado para que logre sus objetivos. A José Patricio y a Alan por el apoyo y
31 paciencia mostrados. A Emérita y Felisa por su presencia y cariño. A mis amigas y amigos
32 por todos los momentos que me tuvieron paciencia y comprensión en mis ausencias.

33 Un lugar especial a los integrantes de GITHUNU-PUCP, en especial a los Doctores
34 Bertín Pérez Ancaya, Johnny Rojas Hanco y Rafael Liza Neciosup; al magister Cesar
35 Guevara Pillaca por su apoyo en la parte experimental y a todos los miembros del grupo de
36 investigación que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

37 Finalmente, a la comunidad universitaria PUCP, quienes participaron como voluntarios,
38 llevando a sus casas los monitores de radón. El presente trabajo ha sido redactado en
39 castellano con el propósito de maximizar su alcance y llegar de manera efectiva a las
40 autoridades y personas involucradas en los ámbitos de la salud pública y del medio ambiente
41 de nuestro país. Al utilizar nuestro idioma nativo, se busca facilitar la comprensión y
42 promover una comunicación fluida con aquellos responsables de tomar decisiones y establecer

43 políticas que impacten positivamente en nuestra sociedad. Asimismo, se pretende llegar a
44 la comunidad en general, ya que el castellano es el idioma predominante en nuestra nación.
45 Es fundamental que la información contenida en este trabajo sea ²¹⁷accesible para todos, con
46 el fin de fomentar una mayor conciencia y participación en temas relacionados con la salud
47 pública y el medio ambiente.

48 Resumen

49 Este trabajo se centra en el estudio de la radiactividad y, en particular, en la medición del
50 gas radón en interiores. El objetivo principal es presentar un método alternativo de medición
51 de radón utilizando detectores de huellas nucleares de estado sólido (SSNTDs) que permita
52 realizar un monitoreo a mediana o gran escala y estimar la equivalencia de las mediciones
53 realizadas con detectores desnudos y con una cámara de difusión. La radiactividad es una
54 parte inherente al entorno humano y se ha experimentado exposiciones a dosis superiores
55 a los valores actuales. Los radionucleidos, tanto de origen cósmico como terrestre, están
56 presentes en alimentos, agua, materiales de construcción y seres vivos. Sin embargo, debido
57 a los cambios rápidos y artificiales en el ambiente, la naturaleza no puede mitigarlos con la
58 misma rapidez. Las radiaciones ionizantes pueden tener efectos perjudiciales en los sistemas
59 biológicos y ecológicos, como la degeneración del tejido y el desarrollo de neoplasias. En
60 Perú, los estudios preliminares indican que la población recibe dosis efectiva, que de ahora
61 en adelante llamaré dosis, comparables a los valores promedios mundiales, siendo la dosis
62 debido al gas radón significativa en su aporte. Sin embargo, no existen valores propios
63 de intervención establecidos por las organizaciones oficiales encargadas en Perú, lo que
64 se está en la necesidad de realizar un estudio para determinar la concentración del gas
65 radón en el país para determinar valores locales reales. Se conocen ciertas localidades en
66 el mundo con altas concentraciones de radón y se plantea la posibilidad de que podrían
67 existir también zonas anómalas en Perú. En cuanto a la metodología, se utilizarán detectores
68 de huellas nucleares de nitrato de celulosa (LR-115) en modo desnudo y se propone un
69 enfoque novedoso para la calibración de estos detectores. También se describe la estructura
70 del trabajo, con capítulos dedicados a la radiactividad natural, los métodos de medición de
71 radón, el análisis del detector LR-115, la calibración de los detectores y los resultados del
72 monitoreo de radón en la ciudad de Lima. El trabajo concluye destacando la importancia de
73 establecer regulaciones y recomendaciones sobre la protección contra la radiación ionizante
74 del radón en viviendas y lugares de trabajo en Perú. Los resultados obtenidos se utilizarán
75 para establecer valores límites y de intervención de concentración de radón y proporcionarán
76 una base de datos para la creación de un mapa radiológico de Perú.

77 **Abstract**

78 This work focuses on the study of radioactivity, particularly on the measurement of indoor
79 radon gas. The main objective is to present an alternative method for radon measurement
80 using solid-state nuclear track detectors (SSNTDs), enabling medium or large-scale monitor-
81 ing and estimating the equivalency of measurements made with bare detectors and diffusion
82 chambers. Radioactivity is an inherent part of the human environment, and exposures to
83 higher doses have been experienced in the past to our days. Both cosmogenic and terrestrial
84 radionuclides are present in food, water, building materials, and living organisms. However,
85 due to rapid and artificial changes in the environment, nature cannot mitigate them at the
86 same pace. Ionizing radiations can have harmful effects on biological and ecological systems,
87 such as tissue degeneration and the development of neoplasms. Preliminary studies in Peru
88 indicate that the population receives doses comparable to the global average values, with
89 significant contributions from radon gas. However, there are no established intervention
90 values by the official organizations in Peru, highlighting the need for a study to determine
91 the concentration of radon gas in the country and establish accurate local values. Certain
92 locations in the world are known to have high radon concentrations, raising the possibility of
93 anomalous areas in Peru as well. Regarding the methodology, cellulose nitrate nuclear track
94 detectors (LR-115) will be used in bare mode, and a novel approach for their calibration is
95 proposed. The structure of the work is also described, with chapters dedicated to natural
96 radioactivity, radon measurement methods, LR-115 detector analysis, detector calibration,
97 and radon monitoring results in the city of Lima. The work concludes by emphasizing the
98 importance of establishing regulations and recommendations for protection against ionizing
99 radiation from radon in homes and workplaces in Peru. The obtained results will be used to
100 establish concentration limits and intervention values for radon, providing a database for the
101 creation of a radiological map of Peru.

102 **Tabla de contenido**

103	Lista de figuras	x
104	Lista de tablas	xiv
105	Introducción	1
106	1 El radón: fuentes y factores de variación en la concentración	6
107	1.1 Fondo radioactivo natural	6
108	1.1.1 Material radioactivo de origen natural: NORM	8
109	1.1.2 Materiales NORM tecnológicamente modificados: TENORM	9
110	1.1.3 NOReM	10
111	1.2 Consecuencias de la radioactividad natural en la salud humana	12
112	1.3 El radón: gas radioactivo natural como indicativo de factor de riesgo para la	
113	salud	13
114	1.4 Fuentes y causas de variación de radón en interiores	20
115	1.4.1 Partículas suspendidas en el aire y su impacto en la salud	22
116	1.4.2 Contribución del suelo al radón en interior de edificaciones	24
117	1.4.2.1 Emanación	27
118	1.4.2.2 Transporte	31
119	1.4.2.3 Exhalación	35
120	2 Métodos de medición de radón	37
121	2.1 Unidades de radiación	37
122	2.2 Unidades y términos específicos relacionados con la medición de radón	41
123	2.2.1 Concentración de actividad	41
124	2.2.2 Energía alfa potencial (PAE)	41
125	2.2.3 Concentración de energía alfa potencial (PAEC)	42
126	2.2.4 Working Level (WL)	42
127	2.2.5 Concentración en equilibrio equivalente de radón (EERC) y de torón	
128	(EETC).	43

129	2.2.6	Factor de equilibrio	43
130	2.2.7	Working Level Month (WLM)	44
131	2.3	Cálculo de dosis de inhalación	45
132	2.4	Métodos de medición de radón	47
133	2.4.1	Métodos de medición activos	49
134	2.4.2	Métodos de medición pasivos	50
135	2.4.3	Detectores de huellas nucleares	52
136	2.4.3.1	Cámaras de difusión	55
137	2.4.3.2	Detectores en modo desnudo	55
138	2.4.4	Calibración	56
139	3	Estudio de la respuesta de un detector LR-115 en modo desnudo y en cámara de difusión	58
140			
141	3.1	Uso de un detector LR-115 en modo desnudo colocado sobre una pared: estimación de lo que mide realmente	59
142			
143	3.2	Procesos de calibración y mediciones con detectores LR-115 en modo desnudo	61
144	3.2.1	Uso de detectores en modo desnudo y cámaras de difusión para medir la concentración de radón	65
145			
146	3.3	Simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalados de una pared y su progenie recién creada	67
147			
148	3.3.1	Simulación del radón y del torón exhalado por una superficie	71
149	3.3.2	Simulación por métodos MonteCarlo para las trayectorias entre colisiones que caracterizan el movimiento Browniano	73
150			
151	3.3.3	Seguimiento de las partículas alfa	74
152	3.4	Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada	74
153			
154	3.4.1	Simulación de la exhalación de torón de una pared	78
155	3.4.2	Simulación de la exhalación de radón de una pared	84
156	3.5	Respuesta del detector LR-115 en modo desnudo y en cámara de difusión mediante simulación	89
157			
158	4	Desarrollos numéricos y simulaciones en calibración de los detectores LR-115 en modo desnudo	91
159			
160	4.1	Estimación teórica de las sensibilidades parciales	92
161	4.2	Simulaciones aplicando el método Monte Carlo	94
162	4.2.1	Cálculos del programa de Monte Carlo	94
163	4.2.2	Cálculo de la sensibilidad parcial	97

164	4.3	Resultados de las simulaciones para el cálculo de sensibilidades parciales	99
165	4.3.1	Variaciones de las superficies efectivas, densidad de huellas y sensibilidades parciales con las distancias de la fuente al detector	100
166			
167	4.3.2	Dependencia de la energía de las partículas alfa emitidas por una fuente radioisotópica	102
168			
169	4.3.3	Dependencia con los radios de la fuente y el detector	104
170	4.3.4	Dependencia con la longitud del paso y comparación con las sensibilidades parciales reportadas por otros autores	105
171			
172	4.3.5	Influencia del espesor de la capa activa de las fuentes alfa en los cálculos de sensibilidad	108
173			
174	4.3.6	Influencia del torón y su progenie en las mediciones de radón	110
175	4.4	Propuesta final del método alternativo de calibración	113
176	5	Mediciones de radón intramuros (en interiores) en Lima	115
177	5.1	Descripción del área de monitoreo	118
178	5.2	Descripción del criterio empleado para realizar el monitoreo de radón en Lima	120
179	5.3	Detectores utilizados en el monitoreo	124
180	5.3.1	Detectores en modo desnudo	124
181	5.3.2	Detectores en cámara de difusión	127
182	5.3.3	Cálculo de la concentración de radón en los monitores utilizados y tratamiento de datos	128
183			
184	5.4	Resultados del monitoreo en la provincia de Lima	130
185	5.4.1	Resultados obtenidos de las mediciones con detectores desnudos	130
186	5.4.1.1	Mapa de la concentración de radón en Lima	136
187	5.4.1.2	Análisis de las concentraciones de radón obtenidas con otros parámetros locales.	140
188			
189	5.4.2	Resultados obtenidos de las mediciones con cámaras de difusión	142
190	5.4.3	Contraste de los resultados obtenidos utilizando detectores desnudos y cámaras de difusión.	146
191			
192		Conclusiones	148
193		Referencias	151
194		Anexo A Documentos entregados a los voluntarios participantes en el monitoreo de radón en Lima	168
195			
196		Anexo B Logros Académicos	171

197 **Lista de figuras**

198	1.1	45 Evolución temporal de la dosis anual efectiva en los Estados Unidos de	
199		77 Norteamérica	7
200	1.2	Evolución de las emisiones de CO ₂ producidas por el ser humano.	8
201	1.3	Área de influencia de riesgos ocasionados por erupciones del volcán Saban-	
202		caya (Arequipa).	12
203	1.4	Etiquetas de los productos en venta con radio y emanación del elemento radón. 14	
204	1.5	Chicas del radio en los talleres de pintura y a la derecha el reportaje sobre	
205		envenenamiento por ingerir el producto radiactivo durante actividades de	
206		trabajo.	15
207	1.6	Vías de ingreso del radón a las edificaciones.	21
208	1.7	Mecanismos relacionados con el transporte de radón a la superficie. El radón	
209		emana de los granos que conforman las rocas, piedras, luego se transporta a	
210		través de los espacios intersticiales y finalmente es exhalado hacia el aire en	
211		el medio ambiente.	26
212	1.8	Esquema de las etapas en el proceso de transporte de radón desde su pro-	
213		ducción debido al decaimiento del radio hasta que llega al interior de las	
214		viviendas.	26
215	1.9	Esquema de las trayectorias de retroceso para los átomos de radón que se	
216		encuentran al interior y entre los granos del suelo.	28
217	1.10	Comparación de los valores de emanación para porosidades de 0.4, 0.5 y 0.6	
218		en suelos secos.	30
219	1.11	Estimación de los valores de emanación para porosidades de 0.4, 0.5 y 0.6	
220		en suelos húmedos.	31
221	1.12	Valores de exhalación de radón en suelos secos considerando porosidades de	
222		0.4, 0.5 y 0.6.	35
223	3.1	Relación entre el factor de equilibrio esperado y el indirecto para el radón. .	64
224	3.2	Proceso de exhalación del radón y torón de una pared frente a un detector en	
225		modo desnudo.	68

226	3.3 Comportamiento del radón, torón y su progenie en el aire al interior de un	
227	recinto.	69
228	3.4 El efecto plate-out o deposición en las superficies, es seguido por el retroceso	
229	de las partículas alfa que pueden producir que la progenie de vida larga se	
230	incruste en la superficie. El rango de retroceso de los núcleos para el vidrio	
231	es de 50 nm aproximadamente.	69
232	3.5 Comportamiento de la progenie de radón cerca de una pared que exhala radón.	70
233	3.6 v del torón cerca de una pared que exhala torón.	70
234	3.7 Esquema del arreglo de un detector de LR-115 (en rojo) fijado a un soporte	
235	sobre la pared (en plomo).Las posiciones de las cuales el radón y el torón se	
236	exhalan son obtenidas del área en amarillo.	72
237	3.8 Comportamiento del movimiento de difusión para los átomos de torón exhal-	
238	ados de una pared, simulando caminos aleatorios para diversos valores de	
239	pasos.	75
240	3.9 Simulación de Monte Carlo para la difusión browniana del torón en el aire	
241	considerando tres tiempos de decaimiento aleatorio generados.	76
242	3.10 Sección transversal del volumen delimitado por la línea continua roja que	
243	intercepta la zona verde es llamado volumen efectivo o volumen activo.	
244	Solamente las partículas alfa que se originan de los puntos contenidos en la	
245	sección definida son consideradas para el cálculo de las sensibilidades parciales.	77
246	3.11 Proyecciones en el plano XZ de los decaimientos de los átomos de torón y su	
247	progenie exhalados desde una pared. Los volúmenes efectivos y el detector	
248	se muestran en color rojo. La línea azul (sobre el eje X) representa a los	
249	átomos depositados en la pared. El decaimiento de la progenie es menor	
250	cerca al detector LR-115.	79
251	3.12 Distribuciones de las posiciones de decaimiento como función de la distancia	
252	a la pared para el torón y su progenie.	80
253	3.13 Distribuciones del torón y del ^{216}Po donde se puede visualizar mejor el	
254	comportamiento.	82
255	3.14 (a) Distribución del ^{212}Po con respecto a la distancia a la pared, y (b) la misma	
256	distribución del ^{212}Po considerando un 20% de incertidumbre y distribución	
257	uniforme.	83

258	3.15	Proyecciones en el plano XZ de los decaimientos de los átomos de radón y su	
259		progenie exhalados desde una pared. Los volúmenes efectivos y el detector	
260		se muestran en color rojo. La línea azul (sobre el eje X) representa a los	
261		átomos depositados en la pared. El decaimiento de la progenie es menor	
262		cerca al detector LR-115.	85
263	3.16	Distribuciones de las posiciones de decaimiento como función de la distancia	
264		a la pared para radón y su progenie.	86
265	4.1	Sección longitudinal del volumen efectivo (en amarillo) para un detector LR-	
266		115 considerando un ángulo crítico constante. Las líneas azules representan	
267		superficies planas paralelas al detector que intersecan al volumen efectivo. .	93
268	4.2	Datos para los ángulos críticos $\theta_c = f(E)$ obtenidos para diferentes espesores	
269		de la capa residual de la capa activa del detector. Para cada espesor residual	
270		la ventana de energía está delimitada por E_{min} y E_{max} para $\theta_c = 90^\circ$	95
271	4.3	Formación de una superficie efectiva dada por la intersección de la fuente alfa	
272		plana con el volumen efectivo. Los círculos en gris, verde y rojo representan	
273		la fuente plana, la sección transversal del volumen efectivo y el detector	
274		LR-115, respectivamente.	96
275	4.4	Puntos de emisión obtenidos por simulación en las secciones transversales	
276		horizontales que pueden generar huellas visibles en un detector de LR-115.	
277		Las líneas verdes y moradas representan las secciones longitudinales de la	
278		fuerza plana y de sus superficies efectivas (formadas por la intersección de la	
279		fuerza plana con su volumen efectivo) respectivamente.	100
280	4.5	Energía máxima de partículas alfa (AE) y radio del círculo efectivo (ECR)	
281		en la fuente plana de ^{241}Am para diferentes distancias entre la Fuente y el	
282		detector.	101
283	4.6	Dependencia de la densidad de huellas y de la sensibilidad parcial de un	
284		detector desnudo de LR-115 con la distancia de la fuente al detector para el	
285		caso de $\theta_c = f(E)$ (TD1 y PS1, respectivamente) y para $\theta_c = \bar{\theta}_c = 52^\circ$ (TD2 y	
286		PS2, respectivamente).	102
287	4.7	Distribución de la energía de las partículas alfa que emergen de la fuente	
288		plana de ^{241}Am con un espesor de capa activa de $6\ \mu\text{m}$ y $10\ \mu\text{m}$	108
289	4.8	Secciones eficaces de los volúmenes efectivos para fuentes de ^{241}Am con	
290		diferentes capas activas: $0\ \mu\text{m}$ (A), $6\ \mu\text{m}$ (B) y $10\ \mu\text{m}$ (C). Las sensibilidades	
291		parciales calculadas por simulaciones de Monte Carlo $0.2169\ \text{cm}$, 0.2185	
292		cm y $0.2196\ \text{cm}$, respectivamente. La línea roja debajo de cada volumen	
293		efectivo, representa el detector de LR-115.	109

294	5.1	Resumen de monitoreos de radón a nivel mundial utilizando diferentes técnicas de medición.	117
295			
296	5.2	Mapa del área de estudio de la provincia de Lima.	120
297	5.3	Detector en modo abierto o desnudo de la firma Kodalpha.	124
298	5.4	Detectores en modo desnudo utilizado en el monitoreo de radón en Lima-Perú y etiqueta recordatoria.	125
299			
300	5.5	(a) Monitor G2 utilizado como cámara de difusión. (b) Partes del monitor y (c) sistema de rosca que permite discriminar el ingreso del radón al interior del monitor G2.	127
301			
302			
303	5.6	Distribución log-normal de la concentración de radón intramuros. Gráfico Q-Q de la transformada con la función logaritmo natural para la concentración de radón intramuros.	131
304			
305			
306	5.7	Valores promedios de concentración de radón usando detectores en modo desnudo para las cuatro zonas de estudio.	134
307			
308	5.8	Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de Lima utilizando detectores desnudos.	135
309			
310	5.9	Mapa de las concentraciones de radón en la provincia de Lima utilizando el método IDW.	138
311			
312	5.10	Mapa de las concentraciones de radón en la provincia de Lima utilizando el método Kriging.	139
313			
314	5.11	Valores promedios de concentración de radón usando cámaras de difusión para las cuatro zonas de estudio.	144
315			
316	5.12	Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de Lima utilizando monitores G2.	145
317			
318	5.13	Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de Lima utilizando monitores G2.	146
319			

320 **Lista de tablas**

321	1	Actividad de radionucleidos incorporados en el caso específico de un adulto	
322		de peso medio (75 kg) y valores estimados de dosis equivalente efectivo.	2
323	1.1	Radioisótopos del elemento radón que tienen una contribución efectiva al	
324		fondo natural. ⁶²	15
325	1.2	Características de la progenie del radón emisoras alfa.	16
326	1.3	Características de la progenie del torón emisoras alfa.	17
327	1.4	Valores reportados en la literatura de concentraciones de radón en diferentes	
328		países.	19
329	1.5	Valores y constantes utilizados para el cálculo de emanación de radón en	
330		suelos húmedos y secos.	29
331	1.6	Parámetros utilizados para determinar la longitud de difusión en diversos	
332		tipos de suelo.	34
333	2.1	Factores de calidad por tipo de radiación.	39
334	2.2	Factores de ponderación para diversos tejidos.	40
335	2.3	Factores de ponderación para ⁶⁴ diversos tejidos.	40
336	2.4	Valores para cálculo de PAE en la progenie de radón.	42
337	2.5	Concentración de radón y su progenie para F = 0.4.	44
338	2.6	Coeficientes de dosis efectiva (en Sv·Bq ⁻¹) para las progenies de radón y	
339		torón inhalados.	46
340	2.7	Dosis efectiva de las progenies de radón y torón	46
341	2.8	Métodos de medición de radón de acuerdo a su duración.	48
342	3.1	Parámetros utilizados en la simulación.	73
343	3.2	Relación rango-energía para la progenie del torón.	78
344	3.3	Volumen efectivo y parámetros del torón y su progenie utilizados en la	
345		simulación.	78
346	3.4	Parámetros para evaluar el rendimiento del código desarrollado para la exha-	
347		lación del torón desde la pared y su difusión en el aire.	84

348	3.5	Parámetros para evaluar el rendimiento del código desarrollado para determinar la exhalación del radón y su progenie desde una pared, y su difusión y decaimiento en el aire cercano a la pared.	87
349			
350			
351	3.6	Sensibilidades parciales (S_p) (en cm) y comparaciones con el valor medio experimental (0.231 cm).	88
352			
353	3.7	Sensibilidades parciales (S_p) (en cm) y comparaciones con el valor medio experimental (0.231 cm).	88
354			
355	4.1	Sensibilidades parciales de un detector LR-115 a tres fuentes isotópicas alfa, al radón, torón y su progenie.	103
356			
357	4.2	Respuesta del detector para las diferentes combinaciones de radios de la fuente y del detector (r_s y r_d , respectivamente). Las sensibilidades parciales son las medias de 5 corridas del programa, con sus desviaciones standard respectivas. En la última fila están las desviaciones porcentuales de cada sensibilidad con respecto al valor obtenido para $r_d = 1$ cm y $r_s = 3$ cm.	105
358			
359			
360			
361			
362	4.3	Respuesta del detector en dependencia de la longitud del paso para las distancia de la fuente al detector.	106
363			
364	4.4	Comparación de los promedios de las sensibilidades parciales obtenidos en este trabajo con los valores teóricos y experimentales reportados por otros autores.	107
365			
366			
367	5.1	Criterio para determinar el número mínimo de viviendas en cada grilla.	121
368	5.2	Monitores por grilla en cada distrito de monitoreo.	123
369	5.3	Concentraciones de radón por distrito de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.	132
370			
371	5.4	Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.	133
372			
373	5.5	Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.	140
374			
375	5.6	Estadística descriptiva de la relación de concentración de radón con otras variables.	141
376			
377	5.7	Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.	142
378			
379	5.8	Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en monitor G2.	143
380			

381 **Introducción**

382 La radiactividad siempre ha sido parte del entorno del ser humano, incluso habiendo estado
383 expuesto a dosis superiores a los valores actuales. Los radionucleidos, sean de origen
384 cosmogénico o terrestre, están presentes en nuestros alimentos, en el agua que bebemos,
385 en los materiales de construcción de nuestras viviendas y por supuesto en los seres vivos
386 [83]. Sin embargo, en los últimos años, debido a la rapidez a la que se realizan los cambios
387 en nuestro medio ambiente en forma artificial, la naturaleza por sí misma no es capaz de
388 mitigarlos a tal rapidez [12].

389 Las radiaciones ionizantes podrían inducir modificaciones en los sistemas biológicos
390 y ecológicos; dependiendo de la cantidad, tipo de radiación por unidad de masa o dosis
391 ($J \cdot kg^{-1}$). Existe la posibilidad de inducir modificaciones, en algunos casos irreversibles, por
392 ejemplo un daño al tejido degenerante en necrosis. En otros casos se relaciona a un nuevo
393 incremento de células sin un control fisiológico llamado neoplasias (cáncer).

394 Estudios preliminares indican que en Perú la población recibe una dosis comparable
395 con los valores promedios mundiales, es decir en un rango de valores entre 2.4 a 3 mSv·
396 a^{-1} [146]. Por lo tanto, a primera vista pareciera que los riesgos a la cual se expone la
397 población son despreciables. Sin embargo, debemos observar que una parte considerable
398 de la dosis por las radiaciones ionizante que se originan en nuestro medio, el 53%, se debe
399 al gas radón (^{222}Rn) principalmente y con menor intensidad a sus isótopos alfa emisores
400 ^{220}Rn (nombre histórico, torón) y ^{219}Rn (este último es casi despreciable, ya que pertenece
401 a la familia natural del neptunio, casi totalmente decaído). Se ha estimado en base a los
402 estudios realizados a nivel mundial que el promedio mundial de la concentración de radón en
403 la atmósfera (ambiente abierto) es de $40 Bq \cdot m^{-3}$ [158], mientras que en ambientes cerrados
404 (interiores de las edificaciones) se ha recomendado, a nivel internacional, valores límites
405 llamados niveles de intervención que oscilan entre 70 y $400 Bq \cdot m^{-3}$ dependiendo de la
406 legislación de cada nación.

407 Actualmente en Perú, las organizaciones oficiales de salud no han establecido ningún
408 protocolo de metodología en la determinación de la concentración del gas radón ambiental,
409 ni valores de intervención con valores de mediciones propios basados en mediciones locales,
410 uno de los objetivos de este trabajo es llenar este vacío con los resultados obtenidos.

411 En la literatura se han reportado anomalías naturales (potencial de radón) en donde las
 412 concentraciones han alcanzado valores significativamente elevados (hasta $700 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$
 413 [103, 142]).

414 A nivel mundial se reporta algunas localidades con un alto valor de concentración de
 415 radón natural y que son de interés para estudios específicos: Ramsar (Irán), Umhausen
 416 (Austria), Covasna (Rumanía), Plitvice (Croacia), Matraderecske (Hungria), Aguas Calientes
 417 (Brasil), Las Trincheras (Venezuela), estos son algunos de los asentamientos que se ven
 418 afectados por las consecuencias de la alta concentración de radón. El radón emana de los
 419 estratos del subsuelo rico en minerales como monacita, uraninita (pechblenda) y torita con
 420 un alto contenido de compuestos de uranio o torio.

421 Varios estudios demuestran que existe una acumulación de material radioactivo en el
 422 cuerpo humano (ver Tabla 1).

Tabla 1. Actividad de radionucleidos incorporados en el caso específico de un adulto de peso medio (75 kg) y valores estimados de dosis equivalente efectivo.

Elemento radioactivo	Actividad [Bq]	Dosis efectiva para todo el cuerpo [$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$]
^3H	25	1×10^{-5}
^7Be	25	3×10^{-3}
^{14}C	3800	12×10^{-3}
^{40}K	4500	180×10^{-3}
^{87}Rb	650	5×10^{-3}
^{239}U , ^{234}Th , $^{234}\text{Pa}^m$, ^{234}U	4	5×10^{-3}
^{230}Th	0.4	7×10^{-3}
^{226}Ra	1	7×10^{-3}
^{222}Rn y progenie	15	1.1
^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po	60	120×10^{-3}
^{232}Th	0.1	3×10^{-3}
^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra	1.5	13×10^{-3}
^{220}Rn y progenie	30	0.2

Recopilado de UNSCEAR 2000 [146], ICRP 137 [101]

423 Es de esperarse que una inspección ambiental de la presencia de radón en el Perú,
 424 revele zonas anómalas; es decir, niveles de radiación mayores que los valores promedios
 425 ambientales.

426 En consecuencia, es de suponer que exista también un riesgo adicional para la salud
427 poblacional. Por otra parte, la considerable actividad de la industria minera contribuye
428 de manera determinante a la alteración de la composición superficial que por modificar el
429 ambiente podría incrementar los niveles de radiactividad ambiental.

430 En base a lo mencionado anteriormente, se desprende la necesidad de realizar un estudio a
431 regiones con una alta actividad humana y con una densidad poblacional elevada. Dependiendo
432 de los valores de las concentraciones del gas radón, este afecta la salud de la población.

433 Los resultados formarán una base de datos para en un futuro establecer un primer mapa
434 radiológico del Perú e identificar zonas de mayor riesgo ambiental. En este sentido, se
435 propone el estudio en relación con la radioecología, radiobiología y la salud poblacional.

436 El radón es el componente mayoritario de la dosis a la que está expuesto el ser humano y
437 que se considera como la primera causa de neoplasia pulmonar en no fumadores [158]. El
438 efecto sobre la salud humana debido a una exposición prolongada al radón del aire y del agua
439 potable, aunque en bajas concentraciones, justifica su estudio [89].

440 Mediciones de concentraciones de radón en viviendas y lugares de actividad humana,
441 demuestran que los trabajadores y en general el público, podrían estar expuestos al riesgo de
442 desarrollar cáncer pulmonar o algún tipo de neoplasia respiratoria.

443 El radón al decaer genera otros elementos inestables, denominados progenie de vida corta
444 que, a diferencia del radón, son partículas sólidas cargadas que pueden adherirse a cualquier
445 superficie o particulado suspendido en el aire, y desintegrarse en ese estado. En consecuencia,
446 la progenie del radón es lo que representa el mayor peligro para la salud del ser humano, sin
447 embargo, el radón es un indicador de su presencia. El radón si bien es un emisor alfa, puede
448 generar un gran daño a nivel de tejido epitelial de los órganos de los sistemas respiratorio y
449 digestivo, alterando las células a nivel del ADN y generando cáncer.

450 En los últimos años, se han desarrollado diversas técnicas para medir la concentración
451 del gas radón. Los detectores de estado sólido de huellas nucleares (SSNTDs, por sus siglas
452 en inglés), los cuales son comúnmente usados como monitores de radón, son considerados
453 como una alternativa confiable, económica y fácil de utilizar.

454 Los detectores se colocan dentro de una cámara de difusión o utilizados sin protección
455 particular en modo abierto o desnudo (bare detectors). Estos son integradores de radiación
456 particularmente adecuados para ser empleados por periodos de medición medios (semanas) y
457 largos (meses), idóneos para monitoreos a gran escala [148]. En el caso de los detectores
458 descubiertos la incertidumbre puede ser importante debido a la determinación del factor
459 K, que depende del factor de equilibrio F entre el gas radón y su progenie. Generalmente
460 se asume que $F = 0.4$ [147], sin embargo, este factor puede variar de acuerdo con las

461 condiciones ambientales¹ por la medición en sí. Se planteará una alternativa a solucionar
462 este problema utilizando detectores de nitrato de celulosa (LR-115 tipo 2 no pelificables).

463 En el primer capítulo se expone acerca de la radioactividad natural, su origen y que
464 factores pueden llevar a disminuir o incrementar el riesgo para la población, centrándose
465 en el radón como principal contribuyente de contaminación radioactiva natural e indicando
466 como puede transportarse desde el suelo hasta el interior de las viviendas.

467 En el segundo capítulo se explica la terminología propia de las mediciones de radón y
468 se describen brevemente los métodos más utilizados, haciendo énfasis en los detectores de
469 huellas nucleares y en la descripción del detector que se utilizará en las mediciones.

470 En el tercer capítulo se analiza el detector LR-115 en modo desnudo colocado sobre la
471 pared, mediante simulaciones y validando con resultados experimentales. Se describe lo que
472 exactamente mide este detector y se mencionan las ventajas de colocar los monitores en la
473 forma indicada.

474 En el cuarto capítulo se presenta un nuevo enfoque para la calibración de estos detectores,
475 mediante una alternativa novedosa que permitirá validar a las mediciones de radón utilizando
476 detectores en modo abierto o desnudo como una alternativa interesante para realizar moni-
477 tores preliminares a mediana y gran escala. Este capítulo ya ha sido publicado en un artículo
478 científico [106].

479 En el quinto y penúltimo capítulo²³² se presentan los resultados del monitoreo de radón en la
480 ciudad de Lima utilizando los monitores descritos anteriormente. Se describe minuciosamente
481 el método empleado, las variables tomadas en cuenta, se reportan valores promedios, mapas
482 de radón presentando datos experimentales que pueden describir en una primera aproximación
483 a la²³¹ actual situación radiológica, la cual la población limeña está expuesta.

484 Finalmente, en el último capítulo se dan las recomendaciones y conclusiones de este
485 trabajo.

486 Existe la necesidad de establecer recomendaciones y propuestas de nuevas regulaciones
487 sobre protección contra la radiación ionizante debida al radón y su progenie, en las viviendas
488 y lugares de trabajo; un problema³²⁶ persistente y de interés prioritario para establecer criterios
489 de intervención y de remediación a nivel local.

490 Debido a la falta de conocimiento de los niveles de radioactividad en el Perú, no existe
491 una legislación propia al respecto. Con el objeto de llenar este vacío queremos aportar con
492 este estudio una propuesta sencilla, confiable y económica para desarrollar monitoreos de
493 exploración en ciudades o regiones habitadas. Se presenta como resultado un conjunto de
494 datos actuali³ dos del cual se podrá deducir recomendaciones sobre valores límites y de
495 intervención de concentración de radón en viviendas y ambientes de trabajo.

496

Objetivo general

497 **Objetivo general**
498 Presentar un método alternativo de medición de radón en interiores utilizando SSNTDs, que
499 permita estimar la equivalencia de las mediciones realizadas con detectores desnudos y con
500 una cámara de difusión, y que permita realizar un monitoreo a gran escala, independientemente
501 de la determinación del factor de equilibrio.

502

Objetivos específicos

503

- 504
505 • Desarrollar un nuevo enfoque para la medición de radón en interiores que permita
506 conocer detalladamente la respuesta del detector LR-115 en modo desnudo, para poder
507 discriminar la contribución de los isótopos del radón (^{222}Rn y ^{220}Rn) y su progenie.
- 508 • Realizar un monitoreo de radón en viviendas con diversas características en cuanto a
509 condiciones geológicas y ambientales en la provincia de Lima y elaborar el mapa de
510 radón en esta región geográfica.
- 511 • Realizar mediciones de radón en interiores utilizando el nuevo enfoque desarrollado
512 para determinar la concentración de radón y sus progenie en diferentes tipos de
513 viviendas y ambientes interiores; estimar la influencia de los materiales de construcción
514 de las viviendas, condiciones de ventilación, antigüedad, suelos sobre las que están
515 construidas y otros factores; y estudiar la probable correlación de estas variables con
516 los niveles de radón encontrados.
- 517 • Estudiar la respuesta de diversos SSNTDs en modos de cámaras de difusión y desnudos
518 mediante el método Monte Carlo y de forma experimental para la medición de radón y
519 progenie.

520 Capítulo 1

521 El radón: fuentes y factores de variación en la concentración

522 ¹¹⁴ El radón es un gas radioactivo natural que se produce a partir de la desintegración de las
523 familias primordiales del uranio, torio y actinio. Este, un gas noble incoloro, insípido e
524 inodoro, es transportado por difusión y conducción en el ambiente. Al ingresar a espacios
525 cerrados o de baja tasa de ventilación puede acumularse creando un ambiente inadecuado
526 para los seres vivos. El gas inhalado puede producir daño en el sistema respiratorio y
527 eventualmente incrementar el riesgo de cáncer pulmonar.

528 El radón (^{222}Rn), tiene una vida media de 3.8 días, puede viajar a través del suelo antes
529 de descomponerse. Como resultado, el suelo debajo de los edificios suele ser el origen
530 principal del radón interior, este es transportado por el aire contenido en el suelo e ingresa a
531 los edificios principalmente a través de la convección impulsada por la presión. Los niveles
532 de radón dentro de un edificio dependen de las condiciones geológicas locales, los detalles
533 específicos de la construcción del edificio, y los factores que influyen en la diferencia de
534 presión entre el interior y el exterior del edificio como las tasas de ventilación, los sistemas
535 de calefacción y las condiciones meteorológicas. Por otro lado, el torón (^{220}Rn), debido a su
536 vida media extremadamente corta de 56 segundos, tiene menos probabilidades que el radón
537 de escapar del punto de origen. Es por esa razón que los materiales de construcción son
538 considerados como la fuente más común de exposición al torón en interiores.

539 A continuación, se describe el origen, características generales y los riesgos relacionados
540 con la inhalación del radón.

541 1.1 Fondo radioactivo natural

542 Se conoce que la humanidad ha estado siempre expuesta a la radioactividad ambiental.
543 La población en el pasado posiblemente estuvo expuesta, en promedio a una dosis mayor.
544 Algunos factores que han intervenido en favor de esta observación es la modificación de

545 la superficie terráquea por la naturaleza, por ejemplo actividades sísmicas, disrupciones
546 volcánicas, deslaves e inundaciones.

547 Sin embargo, en los últimos siglos las actividades antropogénicas se han incrementado
548 considerablemente alterando nuestro hábitat y consecuentemente el fondo natural.

549 El radón siempre ha tenido la principal contribución en la dosis efectiva colectiva que
550 recibe el ser humano. Reportes de la UNSCEAR lo demuestran [146]. Por otro lado, debe
551 hacerse notar que en algunos países como en EE. UU., el porcentaje relacionado con la
552 contribución de radón y su progenie ha disminuido gradualmente, debido al incremento de
553 exposiciones con fines médicos y los esfuerzos en la realización de mediciones y mitigación
554 de radón en esa nación, mas no en la dosis efectiva que hoy en día representa un incremento
555 de casi 60% (de 3.63 a 6.11 mSv). Estos datos se pueden apreciar en la Figura 1.1.

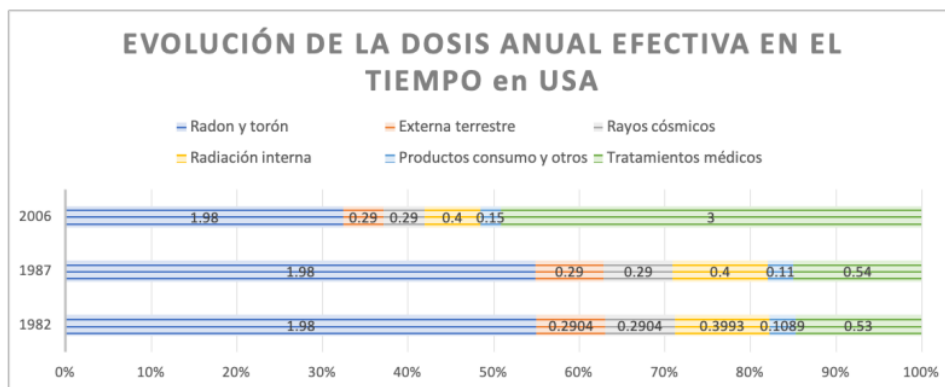


Figura 1.1. Evolución temporal de la dosis anual efectiva en los Estados Unidos de Norteamérica. Recopilado de UNSCEAR [146] y NCRP [131].

556 A nivel mundial, las exposiciones con fines médicos se han incrementado, al igual que
557 los niveles de concentración de radón en poco más del 6% en las últimas dos décadas
558 [146, 110, 48].

559 Se justifica entonces seguir midiendo este gas por su relación con la salud de la población,
560 dado que es uno de los dos factores que contribuyen en forma prioritaria al incremento de la
561 dosis efectiva que recibe un ser humano.

562 La intervención humana en los últimos años ha generado cambios ambientales signi-
563 ficativos, lo que ha llevado a un aumento en los niveles de radón en el medio ambiente.
564 Este incremento puede ser atribuido a las emisiones de CO₂, que actúan como un medio de
565 transporte para el radón. Es importante considerar estos factores adicionales al abordar el
566 problema de la concentración de radón en el ambiente. Un informe del IPCC del 2014 [48]

destaca la necesidad de tomar medidas para abordar el cambio climático y sus impactos en la calidad del aire.

Es así como las emisiones de CO₂ han favorecido al incremento de la contribución de radón en la dosis efectiva [31, 30]. Entre 1959 y 2019 (los últimos 60 años) las emisiones antropogénicas globales pasaron de 8.9 a 36.8 GtCO₂·a⁻¹, mientras que del 1909 al 1959 pasaron de 4.5 a 8.9 GtCO₂·a⁻¹. Esta evolución se muestra en la Figura 1.2.

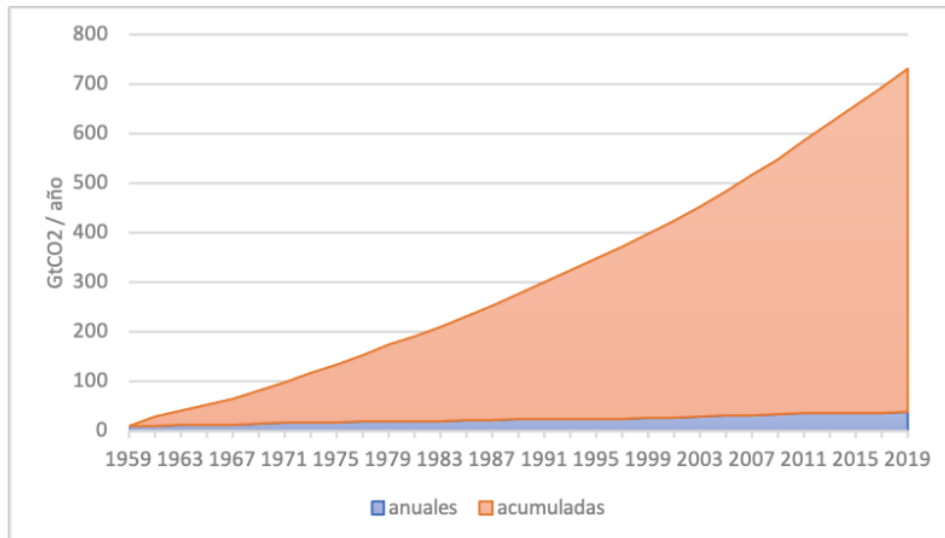


Figura 1.2. Evolución de las emisiones de CO₂ producidas por el ser humano. Recopilado de Global Carbon Project (<https://www.epdata.es>, accedido el 28 de Mayo de 2023).

Es fundamental medir los niveles de radón en el medio ambiente debido a la relación directa que existe entre su concentración y las emisiones de CO₂. El aumento de este gas radiactivo en la atmósfera es una consecuencia del calentamiento global y la acidificación de los océanos, lo que genera preocupaciones sobre la salud pública. Por lo tanto, es necesario tomar medidas para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la exposición al radón en interiores y exteriores. La medición del radón es clave para determinar los niveles de exposición y establecer políticas de prevención y mitigación de los riesgos asociados con su presencia en el medio ambiente.

1.1.1 Material radioactivo de origen natural: NORM

NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) son los materiales radiactivos que se encuentran de forma natural en la tierra, el agua y la atmósfera. Estos materiales son

584 producidos por la descomposición de elementos radiactivos, como el uranio y el torio, que
585 se encuentran en el suelo y las rocas. Los NORM pueden incluir sustancias como el radón,
586 el radio y el polonio, que pueden ser liberados al medio ambiente por la actividad humana,
587 como la minería y el procesamiento de minerales. Debido a su presencia en la naturaleza, la
588 exposición a los NORM es inevitable, y la mayoría de las personas están expuestas a ellos
589 en niveles bajos. Sin embargo, la exposición a niveles altos de NORM puede tener efectos
590 negativos en la salud, por lo que es importante controlar y monitorear su presencia en el
591 medio ambiente. El término NORM fue utilizado por primera vez en “Naturally Occurring
592 Radioactive Materials (NORM) in Australia - Identification of the Radioactive Hazard and
593 Assessment of the Associated Risks” [118].

594 Es importante destacar que cualquier mineral o materia prima no manufacturada con-
595 tiene una cierta cantidad de material radioactivo (NORM). En la mayoría de los casos, las
596 actividades humanas que implican el uso de materiales NORM no representan un riesgo
597 significativo para la salud. Sin embargo, ciertas actividades industriales pueden generar
598 productos de desecho que contienen una acumulación relevante de NORM, como es el caso
599 de los lodos rojos de la industria del aluminio. Se ha observado que estos residuos pueden
600 tener concentraciones significativamente altas de NORM, lo que los convierte en un riesgo
601 para la salud y el medio ambiente si no son regulados y controlados adecuadamente. Los
602 materiales que contienen uranio, radio, torio, potasio y sus descendientes, como el radón y
603 torón, no se ven afectados por actividades humanas y deben ser controlados para minimizar
604 la exposición a estos materiales radiactivos.

605 Algunos ejemplos de actividades en donde pueden darse NORM son la extracción de
606 minerales, extracción de petróleo y gas, plantas de tratamiento de agua que contienen alta con-
607 centración de radón, entre otras. Es por eso de suma importancia estudiar el comportamiento
608 de materiales NORM en nuestro país que tiene una alta producción minera y agrícola.

609 1.1.2 Materiales NORM tecnológicamente modificados: TENORM

610 Cuando los materiales NORM son procesados para extraer algunos elementos, los residuos
611 resultantes se enriquecen con materiales radiactivos y se les conoce como materiales re-
612 forzados tecnológicamente, o TENORM. Estos materiales presentan un aumento relativo en
613 las concentraciones de radionucleidos naturales, en comparación con la radiación de fondo,
614 debido al proceso tecnológico al que han sido sometidos. El enriquecimiento tecnológico
615 genera materiales con concentraciones de material radiactivo que pueden representar un
616 riesgo para la salud y el medio ambiente si se exponen sin control a individuos o poblaciones,
617 causando contaminación ambiental, incremento de movilidad de gases, incorporación a otros
618 materiales, reciclaje inapropiado, entre otros. Por lo tanto, es fundamental controlar y regular

619 el manejo de estos materiales para minimizar su impacto en la salud y el medio ambiente
620 [11].

621 La actividad industrial relacionada con el procesamiento de minerales industriales pesa-
622 dos produce residuos que contienen tanto químicos tóxicos como radiotóxicos. Un ejemplo de
623 ello es el procesamiento de la bauxita, que genera alrededor de 1 a 2.5 toneladas de lodo rojo
624 por cada tonelada de alúmina producida. La disposición de este subproducto de la digestión de
625 minerales de bauxita con soda cáustica se realiza mediante el método de lagunaje, que actual-
626 mente es el único método utilizado por la industria del aluminio. A pesar de que se ha definido
627 al lodo rojo como "desecho TENORM" y de que el método de almacenamiento es considerado
628 el más dañino para el medio ambiente, ya que los líquidos alcalinos contaminan los cursos de
629 agua locales, varias industrias en todo el mundo continúan utilizándolo ([https://www.epa.gov/
630 radiation/technologically-enhanced-naturally-occurring-radioactive-materials-tenorm](https://www.epa.gov/radiation/technologically-enhanced-naturally-occurring-radioactive-materials-tenorm)).

631 La acumulación de residuos radiotóxicos en grandes cantidades puede representar un
632 peligro significativo para la salud y el medio ambiente. Por esta razón, es fundamental que se
633 regulen y controlen las actividades que generan estos residuos para minimizar su impacto.
634 Además, es importante fomentar el desarrollo de alternativas más seguras y sostenibles para
635 el manejo de estos residuos, que permitan el procesamiento de minerales sin comprometer la
636 salud humana ni la calidad del medio ambiente.

637 En el pasado, se han planteado preocupaciones ambientales similares en relación el
638 procesamiento industrial de rocas de fosfato (27% de P_2O_5) se extrae y viene transportado
639 por carretera al complejo industrial utilizado en la producción de ácido fosfórico [117].

640 La producción y uso de fertilizantes es una actividad que genera importantes cantidades
641 de residuos radiactivos, conocidos como NORM, y que pueden ser transferidos al medio
642 ambiente y a los productos agroindustriales. La presencia de radionucleidos en la superficie
643 del suelo y su capacidad para ser absorbidos por las plantas agrícolas puede resultar en
644 la acumulación de materiales radiactivos en alimentos de consumo humano. En Perú, la
645 exposición a materiales radiactivos se produce a través del consumo de productos lácteos,
646 cereales, atún, frutas, vegetales, carnes, entre otros. Además, la minería informal y la
647 industria del gas natural son fuentes significativas de NORM y deben ser controladas y
648 monitoreadas para minimizar los riesgos asociados con la exposición a materiales radiactivos.
649 Es necesario desarrollar una legislación adecuada para regular estas actividades industriales
650 y proteger la salud pública.

651 1.1.3 NOReM

652 El concepto de NOReM se presenta en este trabajo como una variante del NORM (Naturally
653 Occuring Radioactive Materials, por sus siglas en inglés) . El término NOReM se define

654 como Naturally Occurring Radioactivity Environmental Material. Se considera al material
655 natural que ha sido modificado por los eventos naturales que ocurren durante la vida de una
656 persona. Ejemplo de estos fenómenos incluyen al Fenómeno del Niño Costero 2017 en la
657 costa occidental del Pacífico, las inundaciones, erupciones volcánicas (volcán Ubinas en el
658 2023) y los movimientos sísmicos.

659 Cuando ocurren eventos naturales como avalanchas, terremotos y erupciones volcánicas,
660 pueden también darse modificaciones en el entorno geológico. Estos cambios pueden afectar
661 la distribución y la concentración de los radionucleidos naturales (^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra y ^{40}K)
662 en el suelo. Estos eventos naturales se vienen incrementando en frecuencia y magnitud debido
663 al cambio climático, por lo que es primordial seguir estudiando, midiendo y recopilando
664 datos con respecto a las consecuencias radiológicas de estos eventos.

- 665 • Deslizamientos: Los eventos naturales pueden causar el desplazamiento de grandes
666 volúmenes de material, incluyendo suelo y rocas que contienen radionucleidos. Esto
667 puede generar una redistribución de NOReM en las áreas circundantes.
- 668 • Afloramiento de nuevas capas de suelo: avalanchas, terremotos y erupciones volcánicas
669 pueden exponer nuevas capas de suelo y rocas que anteriormente estaban enterradas.
670 Estas capas pueden contener concentraciones más altas de radionucleidos, lo que
671 podría incrementar el nivel de NOReM en el suelo.
- 672 • Liberación de gases y piroclastos. En las erupciones volcánicas, se pueden liberar gases
673 y piroclastos, que son fragmentos sólidos que se expulsan durante la erupción. Pueden
674 variar en tamaño y composición y pueden ir desde cenizas volcánicas (particulado fino
675 de cenizas volcánicas), lapilli (particulado mediano) y fragmentos grandes y esféricos.
676 Una vez que el particulado es expulsado al medio ambiente, se deposita en áreas
677 cercanas al volcán.

678 En particular, se menciona que las repetidas erupciones del volcán Sabancaya, en Are-
679 quipa, que ha estado activo desde 2016, han aumentado la cantidad de elementos radioactivos
680 naturales debido a la caída de cenizas y material transportado. Esto ha afectado tanto a las
681 poblaciones cercanas como al ecosistema aledaño, la extensión involucrada se muestra en la
682 Figura 1.3.

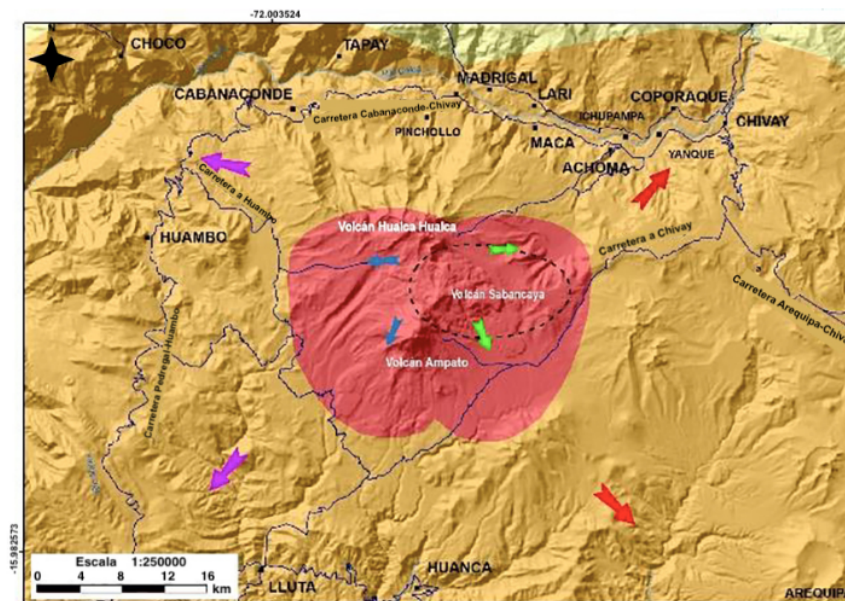


Figura 1.3. Área de influencia de riesgos ocasionados por erupciones del volcán Sabancaya (Arequipa) [71].

683 Este trabajo plantea la importancia de considerar los fenómenos naturales al estudiar los
 684 NORM, que pueden alterar la cantidad y distribución de los elementos radioactivos y su
 685 impacto en la salud humana y el medio ambiente. Por tanto, se propone una investigación
 686 más profunda sobre los efectos de los eventos naturales en los NOReM.

687 Se reporta que las últimas erupciones de los volcanes Sabancaya y Ubinas han generado
 688 flujos acumulativos de CO_2 de $30 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Lo que representa el 60% de las emisiones totales
 689 de este gas en la zona sur del país [85].

690 1.2 Consecuencias de la radioactividad natural en la salud humana

691 Paracelso en el 2008 [154] es el primero en reconocer una enfermedad laboral y señala la mala
 692 metallorum como una dolencia degenerativa en mineros, mientras que su contemporáneo
 693 Giorgious Agricola, médico y estudioso de la mineralogía, indica la importancia de una
 694 buena ventilación en las minas para aminorar la incidencia de esta enfermedad. Herting y
 695 Hesse en 1879 [42] realizan un estudio con minería en Alemania y relacionan por primera
 696 vez este problema con el cáncer pulmonar.

697 Estudar los efectos en la salud de la población debido al cambio climático sólo puede
698 hacerse de forma aproximada. No obstante, en una evaluación llevada a cabo por la OMS
699 que tiene en cuenta sólo algunas de las posibles repercusiones sanitarias, y que asume
700 un crecimiento económico y progresos sanitarios continuados, se concluye que el cambio
701 climático causará anualmente unas 250 000 defunciones adicionales entre 2030 y 2050 [159].

702 Actualmente ya existen consecuencias de lo mencionado anteriormente: material ra-
703 dioactivo transportado por las partículas sólidas en aire junto al gas radioactivo natural,
704 lo que se conoce como progenie adherida genera problemas en la salud de la población.
705 La presencia de PM_{2.5} (es decir partículas sólidas o líquidas presentes en el aire con un
706 diámetro no mayor a 2.5 µm) incrementa el problema debido a su alta movilidad en el aire,
707 facilidad de penetración en el sistema respiratorio y el hecho que la progenie del radón se
708 adhiere fácilmente a este tipo de particulado [157]. Los valores de PM_{2.5} en Lima y Callao
709 superan en todas las estaciones de medición, los valores límites establecidos por la OMS (10
710 µg·m⁻³), si bien muestran una tendencia creciente a partir del 2006, debido a diversas
711 normas regulatorias establecidas, como el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta
712 Nacionales para contaminantes del Aire DS 009-2003-SA y DS 012-2005-SA (diagnóstico
713 calidad del aire - Informe nacional de la calidad del aire MINAM), esta tendencia se revierte
714 ligeramente a partir del 2010 [151].

715 **1.3 El radón: gas radioactivo natural como indicativo de factor de riesgo** 716 **para la salud**

717 La historia de la ciencia tiene varios ejemplos de cómo una misma idea puede ser descubierta
718 por varias personas al mismo tiempo. En el caso del descubrimiento del elemento radón,
719 aunque históricamente se ha asignado el crédito a Friedrich Ernst Dorn en 1898, fue en
720 realidad el Premio Nobel Ernest Rutherford quién realizó los experimentos para caracterizarlo
721 como un nuevo átomo. Rutherford ubicó al elemento radón en la tabla de Dimitri Mendeleev
722 y posteriormente en la Tabla de los Radioisótopos de Carlo Fea, publicada en 1932 en
723 Bologna, Italia.

724 La principal aplicación del elemento radón se remonta a los experimentos de Enrico
725 Fermi en 1932, en los que utilizó una fuente de Radón-Berilio (Rn-Be) para estudiar los
726 neutrones. Sin embargo, pocos años después del descubrimiento de Becquerel, este elemento
727 fue utilizado en una gran cantidad de aplicaciones para mejorar la salud, la belleza y otros
728 aspectos.

729 Una gran cantidad de productos de belleza, remedios, jarras de agua, alimentos, productos
730 de limpieza, curiosidades técnicas y muchos otros productos que contenían sales de radio

1.3 El radón: gas radioactivo natural como indicativo de **factor de riesgo para la salud** 14

731 con radón incorporado fueron comercializados por esa época. En la Figura 1.4 se presentan
732 algunos productos que estuvieron en el comercio hasta los años sesenta.



Figura 1.4. Etiquetas de los productos en venta con radio y emanación del elemento radón. Recopilado de [Images of Radium products](#).

733 Hacemos notar que los efectos bio-negativos de las radiaciones ionizantes se conocían
734 prácticamente desde las primeras décadas de su descubrimiento. En 1921 Margaret Uhlrig
735 estudió diferentes casos sugiriendo que la emanación de radio era la causa probable de los
736 cánceres de pulmón. Para el año 1939 se tenía suficientes datos para correlacionar el cáncer
737 con las actividades de minería; se debe a Peller la descripción de los efectos de neoplasia
738 en los mineros de Schneeberg y Joachimsthal. Los casos más conocidos son relacionados
739 al consumo excesivo de agua con radio que ocasiona cáncer en el aparato digestivo y a los
740 relojes con las manecillas y los números pintados con sales de radio. Reportamos en la
741 Figura 1.5 unas fotos de la época para ilustrar la situación de la época.



Figura 1.5. Chicas del radio en los talleres de pintura y a la derecha el reportaje sobre envenenamiento por ingerir el producto radiactivo durante actividades de trabajo. Recopilado de <https://www.nzherald.co.nz/lifestyle/unbelievable-true-story-of-the-radium-girls/IJAPT6KAUH55WNE5OMXVHGEXII/>, accedido el 28 de Mayo de 2023.

De los 37 radioisótopos del elemento radón, solo 5 de ellos: ^{217}Rn , ^{218}Rn , ^{219}Rn , ^{220}Rn y ^{222}Rn ocurren en cantidades detectables y de forma natural y solo los 3 últimos representan una contribución efectiva para el fondo natural, debido a su abundancia y tiempo de vida media. Las características de estos radioisótopos se muestran en la Tabla 1.1 mostrada a continuación.

Tabla 1.1. Radioisótopos del elemento radón que tienen una contribución efectiva al fondo natural.

Isótopo	Nombre común	Vida media	Energía alfa [MeV]	Serie radiactiva	Precursor directo	Progenie próxima
^{219}Rn	actinón	3.96 s	6.82	^{235}U	^{223}Ra	^{215}Po
^{220}Rn	torón	55.6 s	6.40	^{232}Th	^{224}Ra	^{216}Po
^{222}Rn	radón	3.82 días	5.49	^{238}U	^{226}Ra	^{218}Po

Todos los isótopos del elemento radón son radiactivos, siendo el más importante el gas radón, de la cadena de desintegración ^{238}U . El radón decae a partir de los átomos de radio (^{226}Ra) que tiene una vida media muy larga (1620 años). Los productos de desintegración del gas radón o hijas, llamada también progenie, se encuentran en estado sólido y representan el mayor riesgo radiológico. Podemos dividir a la progenie del radón en dos grupos: la progenie de vida corta constituida por ^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Pb y ^{214}Bi (los dos últimos emisores beta) y

753 la progenie de vida larga formada por los emisores beta ^{210}Pb , ^{210}Bi y el emisor alfa ^{210}Po .
 754 Algunas características relevantes de la progenie del radón se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Características de la progenie del radón emisoras alfa.

Radioisótopo	Tiempo de vida media	Energía [MeV]
^{218}Po	3.094 minutos	6
^{214}Po	164.3 μs	7.69
^{210}Po	138.37 días	5.3
^{206}Po	estable	

755 El gas radón proviene de la corteza terrestre cuando el **radio presente en las rocas y**
 756 **suelo** se desintegra. Dependiendo de la cantidad de radio que pueda tener el suelo y las
 757 rocas, así como otras características edafológicas como humedad, composición, porosidad,
 758 permeabilidad, entre otros, la cantidad de gas radón que llega a escapar al medio ambiente
 759 puede variar. **El proceso de transporte del gas radón** proveniente del suelo hacia el medio
 760 ambiente será explicado más adelante.

761 Reportes, diversos indican que el valor medio de radón que atraviesa la interface suelo-
 762 aire hacia el exterior es alrededor de $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [61]. Cuando este gas noble ingresa a
 763 ambientes cerrados, dependiendo de diversos aspectos como las características del material
 764 de construcción, la geología del suelo, el agua, la ventilación, recubrimiento de las paredes y
 765 otros los niveles, puede alcanzar valores incluso en el orden de $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$, siendo el límite
 766 máximo recomendado por IAEA de $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [160]. Factores meteorológicos también
 767 influyen en la concentración de radón al interior de los hogares. Es muy conocido el caso
 768 del ingeniero Stanley Watras que en 1984 trabajaba en la construcción de una planta nuclear
 769 en Pensilvania (EEUU). Cuando pasaba por los controles de radiación en la planta estos
 770 marcaban un alto nivel de radioactividad, luego de descartar una contaminación al interior de
 771 la planta, verificaron que en su casa los niveles sobrepasaban el nivel máximo considerado
 772 seguro para un ser humano, es decir $700 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ([https://www.georgia.brickkicker.com/
 773 the-story-of-how-radon-was-discovered-in-homes/](https://www.georgia.brickkicker.com/the-story-of-how-radon-was-discovered-in-homes/), accedido el 28 de Mayo de 2023), debido
 774 a que los materiales con los que había sido construida tenían un alto contenido de uranio y
 775 radio. Luego de un tratamiento adecuado de mitigación pudo regresar con su familia a la
 776 casa, pero se evidenció la importancia de realizar mediciones en los lugares y los centros de
 777 trabajo [61, 116, 43].

778 En radioprotección la relación entre la progenie de vida corta y gas radón se conoce como
 779 el factor de equilibrio y generalmente se asume el valor de 0.4. Este parámetro es importante
 780 en dosimetría, se determina experimentalmente y se explicará en detalle más adelante. En

1.3 El radón: gas radioactivo natural como indicativo de factor de riesgo para la salud 17

particular, mencionamos la progenie con relación directa de importancia para la salud: ^{218}Po , ^{214}Po y ^{214}Bi (emisor beta) por ser las que mayor dosis de radiación transfieren a los tejidos pulmonares. Generalmente se unen en forma de óxidos a los aerosoles en el ambiente y al ser inhalados liberan un daño radiológicamente significativo al epitelio respiratorio. Es por este hecho que el radón es considerado como carcinógeno humano tipo I por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), Por lo expuesto la calidad del aire (particulado) y el riesgo de inhalación de radón y su progenie están fuertemente relacionados [158, 47].

El segundo radioisótopo del radón en importancia radiológica es el torón, proveniente de la serie del ^{232}Th , que se da en menor proporción que el radón, pero que su progenie puede en ciertos casos contribuir en forma importante a la concentración de radón encontrada, sobre todo si el área es de un alto nivel de radiación de fondo natural [60]. Los niveles de radón decaen rápidamente con la distancia a la pared (principal fuente de este radioisótopo) debido a su corto tiempo de vida media. La progenie del torón, al igual que la del radón se presenta en forma sólida y puede adherirse a los aerosoles y puede estar distribuida en forma homogénea en toda la habitación [95]. En la Tabla 1.3 se muestran algunas características de la progenie emisora alfa del torón.

Tabla 1.3. Características de la progenie del torón emisoras alfa.

Radioisótopo	Tiempo de vida media	Energía [MeV]
^{216}Po	0.145 s	6.78
^{212}Po	310 ns	8.78
^{212}Bi	60.55 minutos	6.05
^{208}Po	estable	

Si bien en los primeros años del siglo pasado, solo se asoció el radón como factor de riesgo a la población minera, esta situación ha cambiado sustancialmente. La inhalación de radón y su progenie adherida al particulado representa un riesgo no solo para el personal involucrado en las actividades mineras e industrias extractivas, sino también para la población en general. En condiciones normales, la dosis media que recibe una persona anualmente por la inhalación del radón o sus productos es 1.5 mSv [160].

Trabajos de investigación establecen una estrecha relación entre la concentración de radón inhalada y el cáncer pulmonar. Este riesgo se incrementa en fumadores activos (hasta en un factor de 10) y en los fumadores pasivos. Asimismo, el riesgo de contraer cáncer pulmonar se incrementa linealmente con una exposición de radón por un largo período, principalmente luego de los $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [158]. Si bien la probabilidad de asociar el cáncer pulmonar con la

809 inhalación de radón es estocástica, es importante conocer los niveles de radón locales para
810 que, de ser necesario, sea mitigado apropiadamente con medidas que se pueden implementar
811 fácilmente, ¹⁰⁹en favor de la salud de la población.

812 La progenie radiactiva queda adherida en los pulmones. A medida que continúan acu-
813 mulándose en el interior de los pulmones, las partículas alfa alteran por ionización la
814 estructura molecular de los tejidos pulmonares, consecuentemente los daños inducen cáncer
815 [144].

816 Instituciones como WHO e IAEA [158, 160] recomiendan enfáticamente que las en-
817 tidades estatales correspondientes en cada país realicen estudios determinando los nive-
818 les de radón para poder establecer sus límites propios, de acuerdo con sus mediciones
819 locales. Cabe resaltar que se han realizado mapas de radón por diversas agencias y en-
820 tidades, una de ellas el Institute of Population Health (Canadá) recopila en su sitio web
821 (<https://fixradon.com/about-radon/maps/world-average-radon-levels/>, accedido el 28 de
822 Mayo de 2023.) los valores reportados por diversos trabajos de investigación; tomando
823 en el caso ²²⁰del Perú, también se reportaron mapas de radón con pocas mediciones en el
824 2002 [4]. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) publicó ²⁰⁶un
825 mapa muy detallado de los niveles de radón en los Estados Unidos en su página web (<https://www.epa.gov/radon/epa-map-radon-zones-and-supplemental-information#radonmap>, ac-
826 cedido el 28 de Mayo de 2023) y en Europa [54]. Mediciones similares se han llevado a cabo
827 en menor o mayor escala en otras regiones con diversas metodologías. A nivel regional son
828 pocos los estudios ²⁰⁵se reportan en México [28], y un proyecto en Brasil [136]. Algunos
829 valores reportados se muestran en la Tabla 1.4:
830

Tabla 1.4. Valores reportados en la literatura de concentraciones de radón en diferentes países.

País	Media geométrica de la concentración [Bq·m ⁻³]
Argentina [4]	42±2
Alemania [158]	49±2
Australia [158]	11±2
Bélgica [158]	48±2
Brazil [4]	81.95 y 79.92
China [135]	34.4
Camerun [129]	101±21
Canadá [158]	140±2
Corea [158]	53±2
Ecuador [4]	94.30
Eslovaquia [99]	41±2
España [158]	90±3
Estados Unidos [158]	46±3
Finlandia [158]	120±2
Francia [158]	89±2
Grecia [158]	55±2
Hungria [158]	82±2
India [22]	42±2
Irlanda [158]	89±2
Italia [158]	70±2
Japón [158]	16±2
México [158]	140
México [4]	83.25, 88.00 y 30.62
Nueva Zelanda [158]	22
Perú [4]	32.29
Polonia [158]	49±2
Portugal [158]	62±2
Reuno Unido [158]	20±3
República Checa [158]	140±2
Rumania [158]	42±2
Serbia [158]	104±2
Suecia [158]	108
Venezuela [4]	52.50

831 Es importante destacar que el verdadero riesgo radiológico asociado con el radón se
832 encuentra en su progenie y en el torón. Sin embargo, medir la progenie requiere de sistemas
833 y dispositivos mucho más complejos. Por lo tanto, generalmente se mide únicamente la
834 cantidad de radón y torón presentes, y posteriormente se determina la contribución de la
835 progenie de vida corta.

836 Es necesario mencionar que la variabilidad en los resultados reportados puede ser bastante
837 significativa. Además, se debe enfatizar la importancia de realizar mediciones locales
838 utilizando un método accesible y confiable para obtener resultados más precisos y exactos.
839 De esta manera, se pueden tomar las medidas necesarias para reducir el riesgo radiológico
840 asociado con el radón y su progenie.

841 1.4 Fuentes y causas de variación de radón en interiores

842 Por su naturaleza gaseosa, el radón se difunde de los estratos geológicos hacia las zonas
843 de menor concentración descrito por la ecuación de transporte; emerge del suelo, hasta
844 combinarse con el aire que se respira.

845 La densidad del gas radón es mayor a la del aire, es por eso que generalmente se monitorea
846 los ambientes en primera planta, ya que son los que podrían presentar la mayor concentración
847 de este gas.

848 La cantidad de radón presente en una vivienda depende de muchos factores, entre ellos la
849 composición del suelo, las características del suelo (permeabilidad, porosidad), los materiales
850 de construcción de la vivienda, el recubrimiento de las paredes y del piso, el nivel de tránsito
851 en las vías aledañas, las características del agua suministrada a la vivienda.

852 Por otro lado, el riesgo relacionado con problemas oncológicos depende de otros factores
853 de los habitantes de cada vivienda: la ventilación, el tiempo de permanencia en la vivienda,
854 si hay fumadores, la calidad de aire en cuanto al particulado presente, etc., los cuales serán
855 comentados más adelante.

856 Aunque el radón del suelo es la fuente principal de radón en las viviendas, a veces el
857 se puede difundir también a través del agua de pozo o vertiente (cañerías y/o desagües).
858 Por otra parte, en algunas viviendas, los materiales de construcción también pueden exhalar
859 radón y torón.

860 La concentración de radón en un edificio es generalmente el reflejo del contenido de
861 uranio y radio del suelo sobre el que se levanta, pero también de las propiedades fisicoquímicas
862 del terreno: su porosidad o su composición. También influyen mucho los materiales
863 usados en la construcción, sobre todo en la cimentación, así como la presencia de vías de
864 salida del gas tales como grietas en el suelo o las paredes. Evidentemente, la acumulación

del gas dependerá en gran manera de la existencia o no de una adecuada ventilación. Todo lo indicado se puede apreciar mejor observando la Figura 1.6.

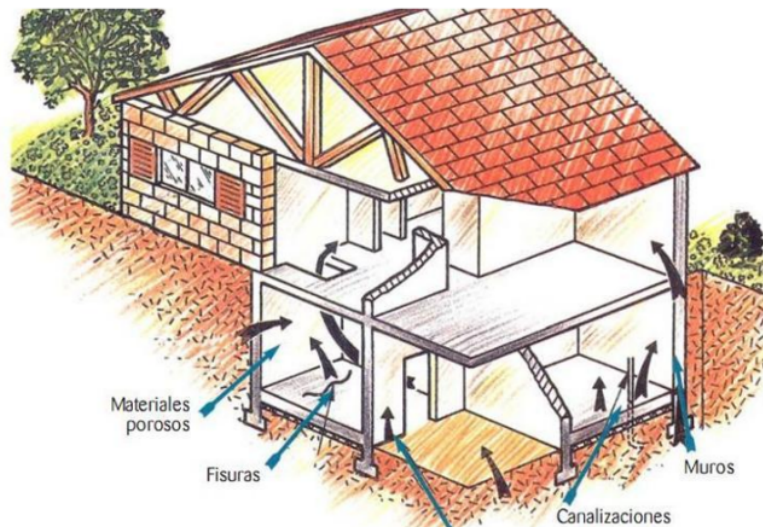


Figura 1.6. Vías de ingreso del radón a las edificaciones [116].

La calidad del aire de interiores se puede definir como la naturaleza del aire en cuanto afecta a la salud y bienestar de los ocupantes de un edificio o vivienda. La cantidad de tiempo efectivo en el interior es algo por lo que hay que preocuparse dada la circunstancia de que los estudios dirigidos por las Agencias Internacionales de Protección del Medioambiente muestran que los niveles de contaminación intramuros pueden llegar a ser de 10 a 100 veces más elevados que las concentraciones exteriores [158].

En los años 2020 al 2022, por causa de la pandemia COVID, los seres humanos pasamos un mayor tiempo en nuestras casas, realizando pocas actividades al aire libre, si bien no se ha realizado un estudio local, se podría estimar la contribución del tiempo adicional a nuestra inhalación de radón.

El aire dentro de estos edificios es re-circulado y por consiguiente los contaminantes adentro de los edificios se acumulan gradualmente si no son adecuadamente filtrados.

En resumen, el radón puede penetrar en una vivienda a través de:

- Grietas y otros agujeros en los cimientos
- Grietas en los pisos sólidos y en las paredes
- Junturas de la construcción

- 883 • Espacios en pisos suspendidos
- 884 • Espacios alrededor de las cañerías
- 885 • Cavidades en el interior de las paredes
- 886 • Suministros de agua
- 887 • Condiciones de ventilación: difusión en aire, corrientes, temperatura.

888 Cuando en una edificación un alto número de sus moradores presentan efectos agudos
889 de salud y/o bienestar como: alergias dermatológicas, irritación de ojos, nariz o garganta,
890 tos seca, problemas respiratorios, dificultad para concentrarse, etc., asociados a una calidad
891 deficiente de aire en su interior, se dice que los habitantes presentan los “Síntomas del
892 Edificio Enfermo”⁸

893 No se conoce las concentraciones de radón y/o progenie promedio ambiental en las
894 principales ciudades del Perú, por lo que éste estudio podría develar factores importantes
895 a tener en consideración. A partir de las mediciones realizadas se establecerá el mapa de
896 radón en la región de estudio y finalmente se establecerán los valores promedio locales y se
897 emitirán las recomendaciones.

898 1.4.1 Partículas suspendidas en el aire y su impacto en la salud³³

899 La contaminación de partículas o PM, es una mezcla compleja de partículas extremadamente
900 pequeñas y gotas de líquido. La contaminación por partículas se compone de un número
901 de componentes, incluyendo ácidos (tales como nitratos y sulfatos), productos químicos
902 orgánicos, metales, y partículas de tierra o polvo. Cuando las partículas en suspensión
903 aparecen junto a otros contaminantes del aire, se acumulan los efectos individuales de cada
904 contaminante a las cuales hay que asociar también los metales radioactivos (progenie del
905 radón)⁴⁷ que se adhieren al polvo con frecuencia, dependiendo de las condiciones ambientales.

906 El tamaño de las partículas está directamente relacionado con el potencial de causar
907 problemas de salud, principalmente las de 10 μm de diámetro porque son las que pasan
908 generalmente a través de la garganta y la nariz, ingresando en los alveolos de los pulmones.
909 Las partículas PM_{10} , también conocido como particulado grueso (material particulado menor
910 a 10 μm de diámetro) provienen principalmente de obras de construcción, influencia de los
911 vientos. Las $\text{PM}_{2.5}$, conocidas como particulado fino (menor a 2.5 μm de diámetro)⁴⁷ provienen
912 de las fuentes de combustión [161] una vez retenidas por inhalación, estas partículas pueden
913 afectar al corazón y los pulmones y causar efectos graves para la salud. La progenie del radón
914 se adhiere a este particulado y es este el mayor peligro a considerar para la salud humana.

915 Debe considerarse además la humedad relativa en Lima que contribuye a incrementar la
916 cantidad de radón y progenie inhalado.

917 Según la OMS ²⁶² niveles recomendados para una adecuada calidad de aire a nivel
918 mundial son de $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ diario para ³¹⁴ $\text{PM}_{2.5}$ y de $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ diario para PM_{10} . Con-
919 siderando los reportes de IQ Air de 2022 (<https://www.iqair.com/es/world-air-quality-ranking>,
920 ²⁴⁹ accedido el 28 de Mayo de 2023), se encuentra que en ciertos distritos del cono este de
921 Lima (San Juan de ¹⁶⁶ Lurigancho, Vitarte), las medias diarias superan 7 veces los valores
922 recomendados por la guía de calidad de aire para $\text{PM}_{2.5}$ y el promedio en Lima es 4.9 veces
923 este valor. Al tener el aire que se respira en Lima un alto particulado, la probabilidad que la
924 progenie de radón se deposite ⁷¹ ingrese al interior de los seres vivos se incrementa, por lo
925 que ²¹⁵ muy importante poder conocer los niveles de concentración de radón en Lima.

926 La concentración de partículas suspendidas totales (PST) y ³⁵⁵ partículas fracción respirable
927 (PM_{10}) varía entre $4.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y $335.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ⁷⁴ mientras que la norma de calidad del aire
928 establece un valor límite menor de $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ([https://sinia.minam.gob.pe/documentos/](https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao)
929 ⁵⁰ [diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao](https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao), accedido el 28 de Mayo de 2023).

930 Las estimaciones de la EPA indican el radón como causante de 15 000 muertes por cáncer
931 de pulmón al año. Si bien hay quienes disienten sobre la cantidad de casos fatales, hay
932 acuerdo acerca de ⁶ que la exposición al radón es la segunda causa de cáncer de pulmón. El
933 uranio y el torio ⁶ extendido en la corteza terrestre con una concentración media en el suelo de
934 $25 \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. La concentración media de gas radón en la atmósfera de la superficie terrestre
935 es de $10 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, con unos valores que oscilan entre 0.1 y $30 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [146].

936 El nivel de concentración de Rn en la superficie está determinado por la habilidad de
937 exhalación del suelo, la cual se ⁶ caracteriza por el parámetro E del suelo. Este potencial
938 depende de varios factores, como la concentración local de radio y la ⁶ presión atmosférica,
939 entre otros. Dado que la semivida del radón como se reportó anteriormente es de 3.823 días,
940 la mayor parte de la dosis no es causada por el gas, sino por su “progenie”. El radón se
941 encuentra en materiales existentes y se transporta de la tierra hacia la superficie en diferentes
942 direcciones. Debido a sus propiedades (gas que se difunde en un medio gaseoso), el ²²²Rn
943 tiende a dispersarse ⁶ fácilmente en el ambiente exterior, pero tiende a acumularse en áreas con
944 poca ventilación, sobre todo en sótanos y edificios, y en especial en espacios más pequeños
945 en los que su eliminación es difícil sin una ventilación adecuada.

946 En algunas regiones se estima que las concentraciones de radón en interiores puedan
947 alcanzar ocho veces las concentraciones en el exterior. Así pues, la exposición al radón y
948 su progenie para la mayor parte de la población tiene lugar principalmente en el interior
949 de los edificios. La media de las concentraciones de radón depende, básicamente, de las
950 características geológicas del terreno, de los materiales de construcción utilizados y de las

951 características de ventilación del edificio. Se considera que la media mundial de radón al
952 interior de edificaciones es de $39 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [158], sin embargo debido al incremento de
953 NORM, se debería considerar que este valor debe haber aumentado.

954 La fuente principal de radón en interiores (al menos 80%) proviene de las emanaciones
955 de suelos y las formaciones de roca cerca de la superficie del suelo. Por ejemplo, Palacios
956 et al. reportaron en el 2004 [97] que en suelos con alta permeabilidad cerca de la cuenca
957 del Orinoco, las emanaciones de gas radón natural tenían una concentración cercana a los
958 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. El 20% restante proviene principalmente de los materiales de construcción
959 y edificaciones hechas por el ser humano. La variación de concentración es el parámetro
960 de mayor importancia considerando las condiciones termodinámicas del ambiente. La
961 posibilidad de determinar o de caracterizar el ambiente en base a los resultados, permitiría
962 que se pueda establecer posibles acciones de remediación en el caso de que los niveles de
963 material radiactivo suspendidos en el aire en áreas de actividad humanas superen los valores
964 recomendados por las normas nacionales [79, 109].

965 1.4.2 Contribución del suelo al radón en interior de edificaciones

966 El ^{226}Ra y el ^{224}Ra , provenientes de las cadenas del ^{238}U y ^{232}Th , respectivamente, se
967 encuentran presentes en los granos de toda la corteza terrestre, en mayor o menor grado de
968 acuerdo con la composición geológica de cada suelo. Los átomos de gas radón atrapados
969 en el interior de cada uno de los granos del suelo, tienen poca probabilidad de alcanzar la
970 superficie de cada grano e incorporarse al aire o espacios intersticiales, debido a los bajos
971 coeficientes de difusión en el grano. Solo los que se encuentran cercanos a la superficie
972 de cada grano tienen probabilidad de salir a los poros del suelo. Sin embargo, sí logra
973 escapar del grano dado que el gas radón tiene una vida media relativamente larga (cercana
974 a los 4 días), la probabilidad que logre llegar a la superficie del suelo es mayor que la del
975 torón (cercana a un minuto). Estos átomos son los que contribuirán efectivamente a la
976 cantidad de radón presente en el aire que respiramos, alcanzando la superficie por medio de
977 diferentes mecanismos de transporte (difusión y advección). El proceso de escape del grano
978 (emanación) está favorecido por el retroceso que experimenta el radio al decaer (con una
979 energía de aproximadamente 84 keV) emitiendo una partícula alfa hacia el interior del grano.

980 Se describe brevemente los mecanismos relacionados a la fenomenología de producción
981 de radón: emanación, transporte (difusión y advección) y exhalación.

- 982 a. **Emanación:** cuando un átomo de radio decae, el producto (radón) escapa al espacio in-
983 tersticial entre los granos, dependiendo del coeficiente de emanación (E, adimensional)
984 que considera principalmente el tamaño del grano del suelo, humedad y mineralogía.

985 b. **Transporte:** el flujo por difusión y advección hacen que los átomos de radón viajen
986 hacia la superficie. La difusión se produce debido a la diferencia en la concentración
987 de radón (considerando que la concentración de radón en la superficie es nula). La
988 advección está relacionada con el flujo de aire, sobre todo en medios porosos. El
989 coeficiente de difusión de radón será determinante en este cálculo.

990 c. **Exhalación:** los átomos de gas radón que lograron transportarse hasta la superficie y
991 luego ser exhalados a la atmósfera determinan el flujo de exhalación ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

992 Para determinar la movilidad y la liberación del gas radón al medio ambiente, es necesario
993 determinar los coeficientes de emanación y difusión, así como la concentración inicial
994 de radio del suelo. Además, se debe tener en cuenta tres factores importantes como los
995 siguientes:

996 i. **El potencial geogénico del radón en el suelo**, que está relacionado con la cantidad de
997 radón presente en el suelo a 1 m de profundidad, en el que intervendrán la temperatura
998 del suelo, distribución del tamaño de grano, concentración de los átomos de radio y
999 humedad del suelo.

1000 ii. **La capacidad migratoria del radón**, relacionada con el transporte de radón a través
1001 del suelo, dependerá de la distribución del tamaño de grano, de la humedad, la porosi-
1002 dad, permeabilidad del suelo.

1003 iii. **El ingreso del radón a edificaciones**, relacionado con variaciones en la presión,
1004 vientos, humedad del ambiente, temperatura y otros factores ambientales.

1005 Se podría esquematizar el proceso en las Figuras 1.7 y 1.8.

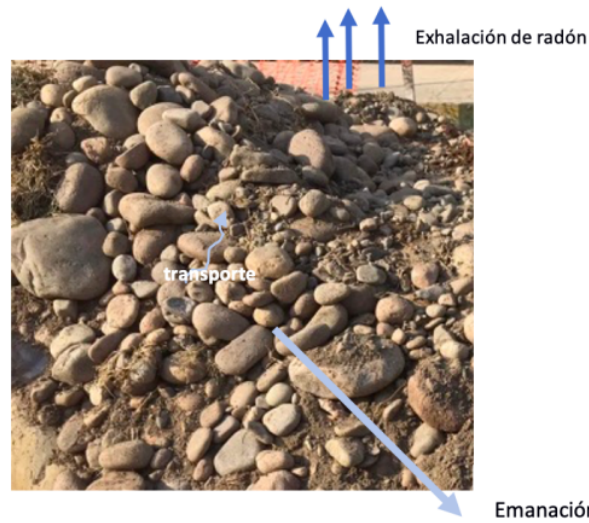
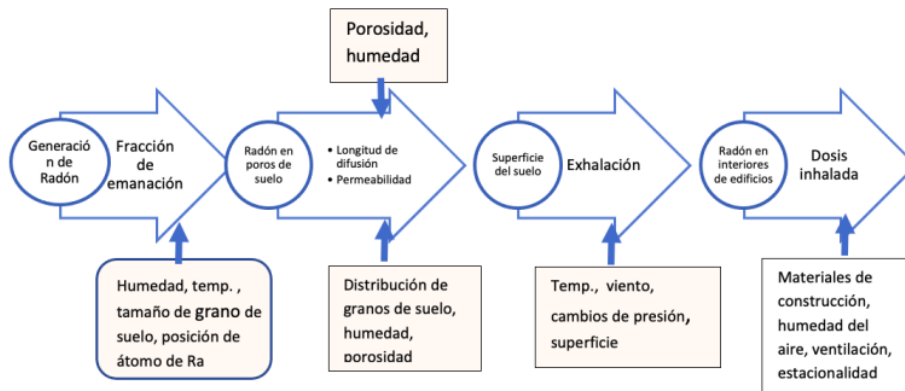


Figura 1.7. Mecanismos relacionados con el transporte de radón a la superficie. El radón emana de los granos que conforman las rocas, piedras, luego se transporta a través de los espacios intersticiales y finalmente es exhalado hacia el aire en el medio ambiente (Foto original del autor).



100
Figura 1.8. Esquema de las etapas en el proceso de transporte de radón desde su producción debido al decaimiento del radio hasta que llega al interior de las viviendas.

1006 La humedad es uno de los factor de mayor importancia en la determinación del transporte
1007 del radón desde su fuente de emanación hasta la superficie del suelo. La Ley de Darcy:

$$q = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (1.1)$$

1008 donde q es la tasa de flujo instantáneo, κ es la permeabilidad, μ es la viscosidad dinámica
1009 del fluido ∇ es el gradiente de presión. Describe el flujo de fluidos a través de medios porosos,
1010 como el suelo, y se relaciona con el gradiente de presión y la permeabilidad del suelo.

1011 En el caso del transporte del radón, éste se mueve a través de los poros del suelo y su
1012 movimiento puede ser afectado por la permeabilidad del suelo, la cual se rige por la Ley de
1013 Darcy. La humedad del suelo también influye en la permeabilidad del suelo, lo que puede
1014 tener un efecto en el transporte del radón. Podemos decir entonces que la Ley de Darcy es
1015 relevante para comprender cómo se mueve el radón a través del suelo y cómo factores como
1016 la humedad pueden influir en este proceso.

1017 En general puede decirse que los suelos están compuestos por dos fracciones: sólida
1018 y fluido. La primera está compuesta por los granos de mineral y material orgánico. La
1019 segunda por líquidos (agua) y gas (aire). La fracción volumétrica del agua es el contenido de
1020 humedad.

1021 Podemos clasificar a los suelos en arenosos, limosos o arcillosos. Los dos primeros
1022 se forman por procesos mecánicos, a diferencia de los arcillosos que se forman mediante
1023 procesos químicos, con propiedades diferentes a los dos primeros. La porosidad en suelos
1024 arcillosos (0.6) es mayor que en suelos arenosos (0.4). En general el valor promedio de la
1025 porosidad del suelo es 0.5 [65].

1026 1.4.2.1 Emanación

1027 Solo una fracción del radón generado en el suelo por el decaimiento del radio escapa a la
1028 parte no sólida del suelo (poros y líquidos). A esta fracción se le conoce como coeficiente de
1029 emanación y depende de las características del suelo.

1030 Si el decaimiento se produce al interior del grano, es muy probable que el radón quede
1031 atrapado en su interior y no logre alcanzar los espacios intersticiales entre los granos, a
1032 menos que no intervengan mecanismos que puedan liberar los gases atrapados (movimientos
1033 sísmicos, otras actividades telúricas o antropogénicas). Pero si el decaimiento se produce
1034 cerca a los bordes del grano, la probabilidad de escape será mayor.

1035 Debido a la conservación de la cantidad de movimiento lineal, cuando el radio emite una
1036 partícula alfa y decae en radón, éste posee una energía cinética de retroceso (86 keV) para el
1037 radón y 103 keV para el torón [9]. Sin embargo, es necesario conocer en qué posición del
1038 grano se produce la desintegración, considerando además las características geoquímicas del
1039 material. En la Figura 1.9. se muestran dos granos esféricos que están en contacto en el punto

- 1040 B. La línea punteada muestra hasta donde pueden llegar los átomos de radón por retroceso.
 1041 Los átomos de radio (puntos sólidos) decaen emitiendo una partícula alfa y un átomo de
 1042 radón (círculo sin relleno). El coeficiente de emanación debe considerarse (Figura 1.9):
- 1043 i. **Retroceso directo**, si el decaimiento se produjo lo suficientemente cerca del borde del
 1044 grano para que el átomo de radón escape a la fracción no sólida del suelo (como en el
 1045 punto C).
 - 1046 ii. **Retroceso indirecto**, el átomo de radón sale de un grano, pero ingresa a otro grano
 1047 (como en B y D).
 - 1048 iii. **Difusión**, si el átomo de radón es producido en el interior del grano, termina su
 1049 recorrido por retroceso al interior de este, pero podría llegar al poro por difusión
 1050 molecular (como en A).

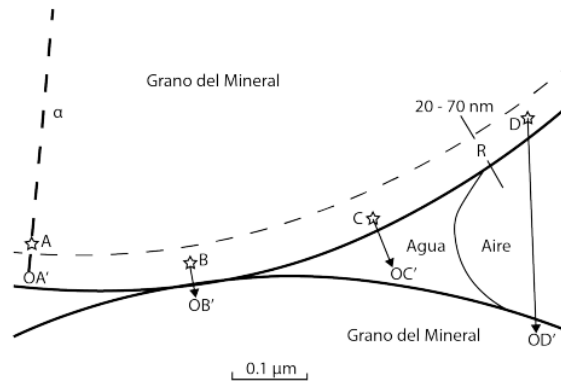


Figura 1.9. Esquema de las trayectorias de retroceso para los átomos de radón que se encuentran al interior y entre los granos del suelo. Imagen recopilada de [76].

1051 Varios estudios [9] y otros, han realizado cálculos sobre la probabilidad de escape del
 1052 radón en las proximidades de la superficie de un grano esférico, estimando que alrededor del
 1053 24% puede escapar. Además, se ha estimado que la contribución de la difusión molecular es
 1054 insignificante, según el estudio de Willey y Tanner [156]. Por lo tanto, la determinación de
 1055 la cantidad de radón liberado por el suelo es un proceso complejo que requiere considerar
 1056 numerosas variables.

1057 El cálculo de la emanación de radón involucra al coeficiente de emanación (f , adimensional) que toma en cuenta principalmente el tamaño del grano del suelo, humedad y
 1058 mineralogía. Este coeficiente puede tomar valores entre 0 (no escapa radón) y 1 (todo el radón sale del grano). UNSCEAR indica el valor representativo de 0.2 [146].
 1059
 1060

1061 La porosidad del suelo se refiere a la relación volumétrica entre el material geológico
 1062 y los gases (que ocupan el espacio intersticial). La permeabilidad del gas se relaciona a la
 1063 capacidad para que este gas (aire y radón) lo atravesase sin alterar su estructura interna. Por
 1064 otro lado, la densidad efectiva depende del grano, humedad, impedancia al transporte del gas
 1065 y la distancia (tortuosidad) que debe de recorrer el gas para llegar a la superficie. La humedad
 1066 del suelo es otro factor relevante, ya que en ambientes húmedos se aumenta la probabilidad
 1067 de que los átomos de radón escapen a través de los poros. Esto se debe a que la humedad
 1068 puede ocupar parte del espacio poroso disponible dentro del material, lo cual potencialmente
 1069 reduce las vías de escape del radón. Como consecuencia, la probabilidad de escape del radón
 1070 a través de los poros puede disminuir.

1071 La expresión utilizada para determinar la emanación de un suelo caracterizado por
 1072 una densidad aparente (masa de suelo seco o fracción sólida entre el volumen total), es el
 1073 siguiente:

$$E = C_{ra} \lambda_{rn} f \rho \left(\frac{D_e}{\lambda_{rn} \varepsilon} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

1074 donde E es la emanación ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$), C_{ra} es la concentración de radio en el suelo
 1075 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), λ_{rn} es la constante de desintegración del radón (s^{-1}), f es el coeficiente adimen-
 1076 sional de emanación, ρ es la densidad aparente del suelo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), D_e es el coeficiente de
 1077 difusión efectiva y ε es la porosidad adimensional del suelo.

1078 Utilizando los valores descritos en la Tabla 1.5 se estiman los valores para la emanación
 1079 de radón para suelos secos y húmedos para diferentes porosidades. En las Figuras 1.10 y
 1080 1.11 se presentan los valores estimados para la emanación en suelos secos y húmedos, para
 1081 diferentes porosidades. Se consideran 3 valores de concentración de Ra considerando un
 1082 valor bajo, el valor promedio mundial y un valor alto [146].

Tabla 1.5. Valores y constantes utilizados para el cálculo de emanación de radón en suelos húmedos y secos.

Parámetro	Valor
Constante de desintegración del radón λ_{rn}	$2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
Coficiente de emanación (f)	0.2 [164]
Coficiente de difusión efectiva (D_e)	$5.91391 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [164]
Densidad de suelo seco	$1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [130]
Densidad de suelo húmedo	$2.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [130]

1083 Para ilustrar mejor la relación entre la emanación del radón con la porosidad y el contenido
 1084 de radio para diferentes niveles de humedad, se presentan en las Figuras 1.10 y 1.11 los
 1085 resultados de los cálculos del coeficiente de emanación utilizando la Ecuación 1.2 y los
 1086 valores de la Tabla 1.5.

1087 En la Figura 1.10 se muestra la emanación de radón en suelos secos. Puede observarse
 1088 que para bajas concentraciones de radio (naranja) la emanación es menor, al contrario del
 1089 caso de altas concentraciones (en verde). Es posible visualizar también que la emanación es
 1090 menor a medida que la porosidad se incrementa.

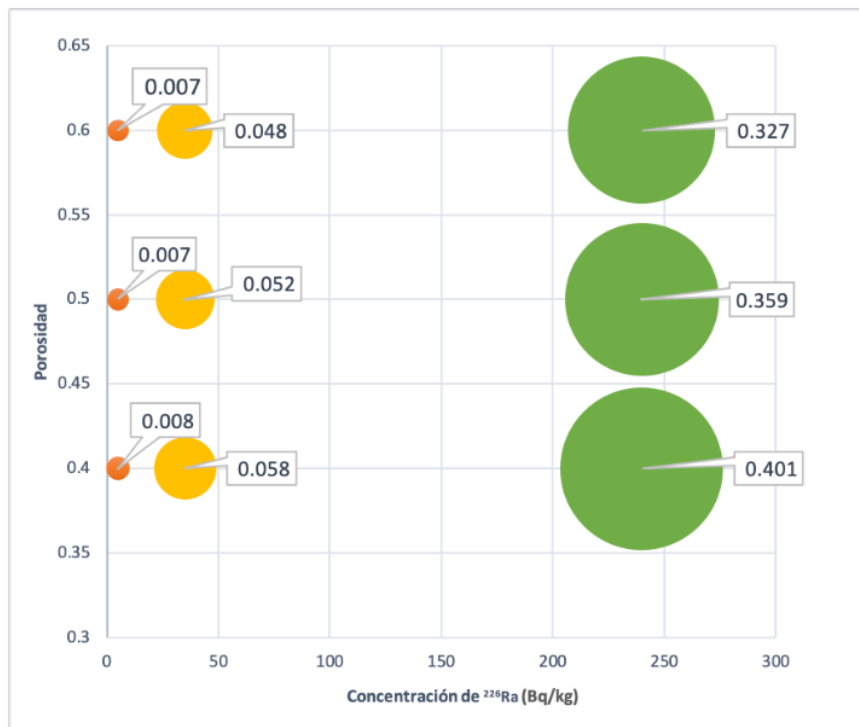


Figura 1.10. Estimación de los valores de emanación (indicados en las etiquetas de datos de la gráfica) para porosidades de 0.4, 0.5 y 0.6 en suelos secos.

1091 En la Figura 1.11 se evidencia que la relación de la emanación con la porosidad y la
 1092 concentración de radio es similar en suelos secos y húmedos, evidenciando un incremento de
 1093 éste valor cuando el suelo es húmedo.

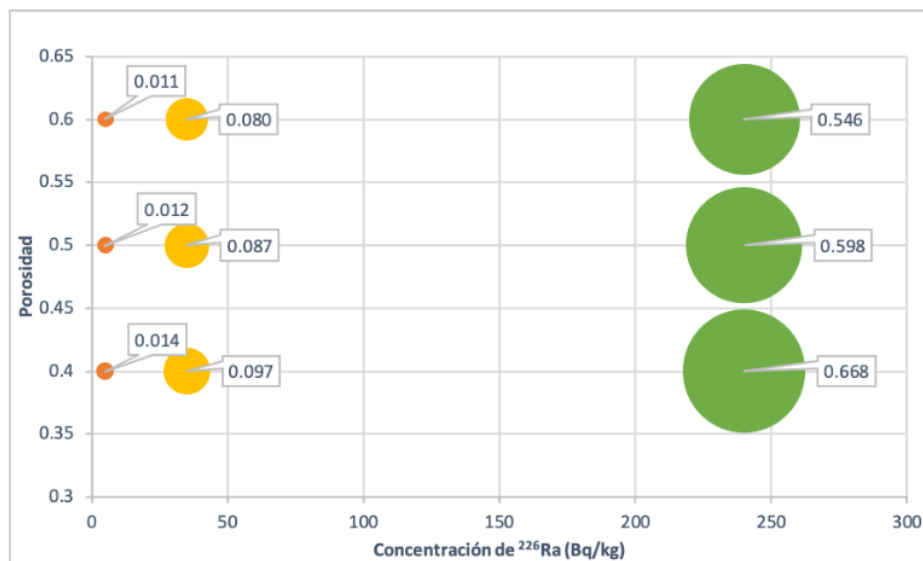


Figura 1.11. Estimación de los valores de emanación (indicados en las etiquetas de datos de la gráfica) para porosidades de 0.4, 0.5 y 0.6 en suelos húmedos.

1094 Comportamiento similar se observa con el torón, a partir de la concentración del ^{224}Ra
1095 [130].

1096 1.4.2.2 Transporte

1097 El transporte de radón en el subsuelo se lleva a cabo principalmente mediante tres procesos
1098 principales: difusión, advección y gradientes de presión. Los gradientes de presión pueden
1099 ser causados por diversos factores, como diferencias de temperatura, cambios en la presión
1100 barométrica y contenido de humedad del suelo. Estas diferencias de presión impulsan el
1101 movimiento del gas radón desde zonas de mayor presión hacia zonas de menor presión. La
1102 advección ocurre cuando existe un movimiento del gas radón por gradientes de presión,
1103 mientras que la difusión es el proceso por el cual las partículas se mueven desde áreas de alta
1104 concentración a áreas de baja concentración, hasta que se alcanza el equilibrio. En el caso
1105 del transporte del radón, la difusión es el proceso de mayor importancia, y es el responsable
1106 de que el gas radón se transporte desde el subsuelo hasta la superficie.

1107 La difusión del radón se puede estudiar utilizando la primera ley de Fick, que describe la
1108 relación entre el gradiente de concentración de radón y el flujo, a partir del coeficiente de
1109 difusión. En general, el flujo de radón irá siempre de regiones de alta concentración hacia
1110 regiones de menor concentración, hasta alcanzar el equilibrio. Por lo tanto, el transporte

1111 del radón desde el subsuelo hasta la superficie está influenciado por una serie ²⁸¹ de factores,
 1112 como la porosidad del suelo, la permeabilidad del gas, la humedad del suelo y otros factores
 1113 ambientales. El conocimiento de estos factores es fundamental para entender el transporte
 1114 del radón y poder desarrollar estrategias efectivas para su control y mitigación.

1115 El flujo de radón ¹⁷ ir⁸ siempre de regiones de alta concentración hacia regiones de menor
 1116 concentración. Según la ley de Fick, el flujo se puede expresar de la siguiente manera:

$$J_{rn} = C_{rn}V - D_a \nabla C_{rn} \quad (1.3)$$

1117 donde ¹⁰ J_m es el flujo de la ⁴² conce⁴² acción de actividad de radón ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$), C_{rn} es la
 1118 concentración de actividad de radón ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), V es la velocidad del flujo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D_a es el
 1119 coeficiente de difusión en aire ($1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y finalmente ∇C_{rn} es el gradiente espacial
 1120 de la ⁸ concentración de actividad de radón. Si se asume el medio estacionario, la expresión
 1121 anterior se reduce a:

$$J_m = -D_a \nabla_{rn} \quad (1.4)$$

1122 Cabe señalar que el signo menos es debido a que el radón fluye de mayor a menor
 1123 concentración (hacia la superficie). Se considera además que el medio (suelo) es poroso, por
 1124 esa razón debe considerarse lo siguiente:

- 1125 i. El área a través del cual el radón se difunde es reducida (los poros).
- 1126 ii. La longitud media recorrida por el radón para llegar de un punto hacia otro no es
 1127 lineal, se debe de considerar un parámetro conocido como tortuosidad que considera el
 1128 camino que podría seguir el átomo de radón y depende del tamaño de grano de suelo,
 1129 y de la humedad principalmente.

1130 Estos factores toman en cuenta el coeficiente de difusión ¹ efectiva D_e . Hay muchos
 1131 modelos que intentan relacionar el coeficiente de difusión en aire y el coeficiente de difusión
 1132 efectiva, se puede utilizar la ecuación de Rogers y Nielson para relacionar ambos coeficientes:

$$D_e = \varepsilon \tau D_o \quad (1.5)$$

1133 donde se tienen en cuenta la porosidad del suelo (²⁴⁶ ε) la tortuosidad (τ), ambos adimen-
 1134 sionales. Con esta consideración, podemos reescribir la ley de Fick:

$$J_m^D = -D_e \nabla C_{rn} \quad (1.6)$$

1135 donde J_m^D es el flujo de la concentración de actividad de radón en un medio poroso en
1136 estado estacionario ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$). Es importante también introducir los conceptos de tiempo
1137 de relajación y longitud de difusión [53].

$$t_{relaj} = \frac{1}{D(l^{-2} + \pi^2 d^{-2})} \quad (1.7)$$

1138 donde d es el espesor del suelo (m); l es la longitud de difusión, que es la distancia que
1139 viajan los átomos en un período igual a su vida media (m); D es el coeficiente de difusión
1140 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y t_{relaj} representa el tiempo necesario para que el radón se estabilice después de
1141 una perturbación, el cual dependerá de la longitud de difusión, que a su vez depende del
1142 material que atravesará. Si $d \gg l$, podemos considerar que $t_{relaj} \approx l^2/D$.

1143 Por ejemplo para un valor de difusión de $D = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, considerando que el
1144 coeficiente de decaimiento del gas radón es $2.08 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, su longitud de difusión ($\sqrt{\frac{D}{\lambda}}$)
1145 sería aproximadamente 1 m.

1146 Se pueden realizar algunos cálculos estimando la longitud de difusión según el tipo de
1147 suelo. Los parámetros considerados para los diferentes tipos de suelo se muestran en la
1148 Tabla 1.6.

195 **la 1.6. Parámetros utilizados para determinar la longitud de difusión en diversos**
 tipos de suelo.

Tipo de suelo	Coefficiente de difusión efectiva [m ² ·s ⁻¹][90]	Características	Longitud de difusión [m]	t _{relaj} [s]	Alcance [m]
235 Mezcla de arena, limo y arcilla	2.70 × 10 ⁻⁶	Contenido de humedad 1.5% de peso seco	1.14	4.81 × 10 ⁵	1.61
Mezcla de arena, limo y arcilla	2.50 × 10 ⁻⁷	Contenido de humedad 10.5% de peso seco	0.35	4.81 × 10 ⁵	0.49
Mezcla de arena, limo y arcilla	6.00 × 10 ⁻⁸	Contenido de humedad 17.3% de peso seco	0.17	4.81 × 10 ⁵	0.24
Lodo	5.70 × 10 ⁻¹⁰	37% de humedad	0.02	4.81 × 10 ⁵	0.02
Suelo arcilloso	2.50 × 10 ⁻⁶	Porosidad 0.4	1.10	4.81 × 10 ⁵	1.55

1149 Cabe señalar que la mayoría de los suelos de Lima Metropolitana, es decir el área de
 1150 monitoreo (centro y norte) son arcillosos, al sur de la ciudad se tienen suelos relativamente
 1151 pantanosos (napa freática cercana a la superficie).

1152 El transporte de radón desde el suelo a la superficie se debe entonces principalmente a la
 1153 difusión molecular [146]. La importancia de medir o registrar el transporte de radón radica
 1154 en sus aplicaciones. Hay radón en el agua de los océanos (en muy pequeñas cantidades)
 1155 que sin embargo pueden utilizarse como trazadores de masas de aire continentales. Altas
 1156 concentraciones de radón en una superficie puede ser un indicativo de yacimientos de uranio.
 1157 Algo de mucho interés en nuestro país es utilizar el radón como precursor de eventos sísmicos,
 1158 muchos estudios a nivel mundial registran anomalías en la concentración de radón previo
 1159 a un movimiento sísmico, así como para el estudio de fallas geológicas y otros eventos
 1160 geodinámicos [152].

1161 **1.4.2.3 Exhalación**

1162 Una vez que el radón logra llegar a la superficie, luego de experimentar los procesos de pro-
 1163 ducción, emanación, transporte difusivo, es finalmente exhalado hacia el aire que respiramos
 1164 y a nuestras edificaciones. La tasa de exhalación cuantifica este proceso que se define como
 1165 la cantidad de radón exhalada en una superficie por unidad de tiempo ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) [49].

1166 Para estimar esta cantidad se utiliza la expresión [146]:

$$E_{\text{exhal}} = \lambda_{rn} C_{ra} f \rho (1 - \varepsilon) L \quad (1.8)$$

1167 donde E_{exhal} es la tasa de exhalación, λ_{rn} es la constante de desintegración del radón (s^{-1}),
 1168 C_{ra} es la concentración de radio en el suelo ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), f es el coeficiente de la emanación
 1169 (adimensional), ρ es la densidad aparente el suelo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ε es la porosidad del suelo
 1170 (adimensional) y L es la longitud efectiva (m).

1171 Se puede hacer una estimación de la cantidad de radón exhalado en suelo seco, con
 1172 diferentes concentraciones de radio y diferentes niveles de porosidad, como se muestra en la
 1173 Figura 1.12. Se debe indicar que la UNSCEAR [147] estima un valor promedio de tasa de
 1174 exhalación entre 0.05 y $0.4 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ calculado con valores representativos promedios a
 1175 nivel mundial.

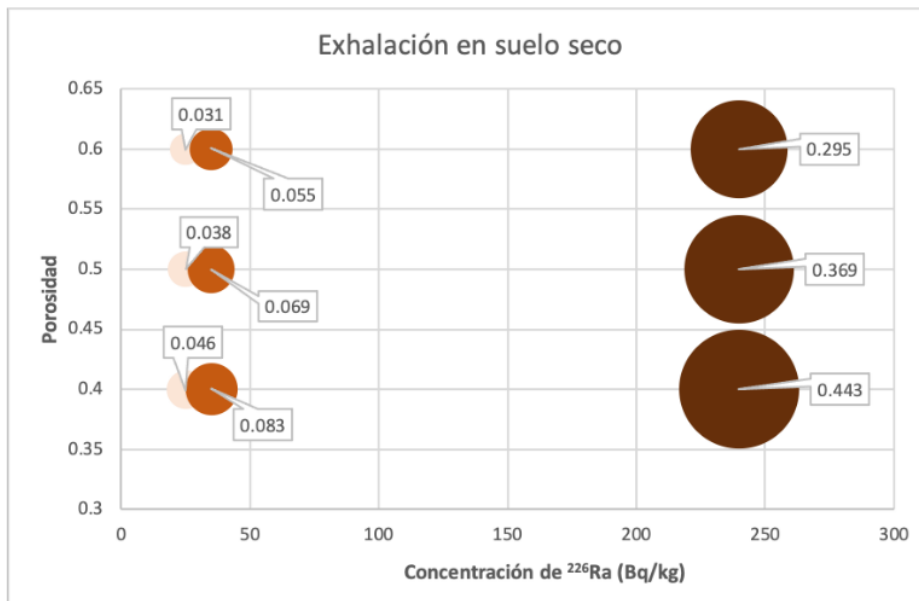


Figura 1.12. Valores de exhalación de radón (indicados en las etiquetas de datos de la gráfica) en suelos secos considerando porosidades de 0.4, 0.5 y 0.6.

1176 Sin embargo, debe de también tomarse en cuenta otros factores que afectan la migración
1177 de radón en el aire, antes que sea inhalado por los seres vivos. Estos factores son los
1178 siguientes: las diferencias de presiones, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad
1179 del suelo.

1180 En el caso de la humedad del suelo se debe considerar que la tasa de difusión en aire
1181 es mayor que en agua, sin embargo, en un suelo húmedo la cantidad de radón que escape
1182 será menor que en suelo seco, por lo que menos radón podría ser exhalado en un suelo con
1183 alto contenido de humedad. Lo mismo sucedería con suelos cubiertos con nieve. Debido a
1184 lo anterior, se debe tomar en cuenta que no es recomendable medir radón en exteriores en
1185 época de lluvias.

1186 Las variaciones de presión son otro factor que interviene en la exhalación de radón a la
1187 atmósfera. Si la presión sufre un incremento, el radón en el aire podría penetrar en el suelo,
1188 disminuyendo la exhalación; el efecto contrario se da con la disminución de presión, pues el
1189 gas fluiría hacia la superficie. Se estima que una variación del 1% de la presión atmosférica
1190 puede provocar hasta un 60% en la cantidad de radón exhalado a la superficie [162]. Si la
1191 velocidad del viento es superior a los $11.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ también habrá un incremento en la cantidad
1192 de radón exhalado [163]. La tasa de exhalación varía también de día y de noche, debido a
1193 variaciones de presión y de temperatura cada 24 horas. Estos cambios se evidencian en las
1194 primeras horas de la mañana y a media tarde cuando el aire cercano a la superficie presenta
1195 un comportamiento menos laminar, por el contrario, en la noche, con menos turbulencia, la
1196 tasa de exhalación disminuye. Estos valores pueden variar dependiendo de las condiciones
1197 ambientales y de ventilación entre un 10 a 30% [121].

1198 Cuando el gas radón ya ha sido exhalado puede ingresar a una edificación por un
1199 movimiento de flujos convectivos y por difusión a través de grietas y los cimientos de
1200 la casa, otra fuente muy importante son los mismos materiales de construcción, que pueden
1201 contener TENORM y en algunos casos generan una cantidad mayor de radón que el exhalado
1202 directamente del suelo. Es por esto, la importancia de identificar la causa de un alto valor de
1203 concentración en una edificación.

1204 Capítulo 2

1205 Métodos de medición de radón

1206 Históricamente definiciones y unidades en radioprotección han sido establecidos por organis-
1207 mos internacionales, sin embargo en los ambientes científicos se siguen empleando unidades
1208 que no han sido modificados en décadas. Es importante conocer las equivalencias y relaciones
1209 entre ambos sistemas de unidades, pues en la literatura a menudo se hace referencia y se
1210 reportan utilizando ambos sistemas.

1211 Además, las mediciones de radón y torón implican el uso de ciertos términos especializa-
1212 dos, por lo que se presentará un breve glosario de estos factores y cantidades.

1213 A continuación, se presentan algunas definiciones y equivalencias de las unidades de
1214 radioprotección en general:

1215 2.1 Unidades de radiación

- 1216 • **Actividad:** se define como el número de decaimientos por segundo o el número de
1217 núcleos de átomos inestables en una determinada muestra que decaen en un segundo.
1218 Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el Becquerel que se define como 1
1219 desintegración en un segundo. Históricamente la unidad de actividad era el Curie (Ci).
- 1220 • **Exposición:** se define como la carga total de todos los iones producidos en un deter-
1221 minado volumen de aire.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.1)$$

1222 Esta magnitud se refiere únicamente a fotones (radiación gamma o rayos X) en el aire, no
1223 como efecto biológico directo al ser humano. En el SI (Sistema Internacional) se cuantifica
1224 en $C \cdot kg^{-1}$, la unidad tradicional era el Roentgen (R). La $\frac{dX}{dt}$ se refiere a la
1225 exposición por unidad de tiempo. Se mide en $C \cdot kg^{-1} s^{-1}$.

- 1226 • **Kerma:** (Kinetic Energy Released per unit Mass) utilizada para un campo de partículas
1227 no ionizantes (fotones y neutrones), se define como la suma de las energías cinéticas

1228 iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, transferidas por la radiación no
1229 ionizante por unidad de masa.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.2)$$

1230 En el sistema internacional se mide en Gray (Gy). Un Gray se define como $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, la
1231 unidad tradicional es el Rad y, además, el Kerma está relacionada con la energía transferida a
1232 la materia. Asimismo, se define la tasa de Kerma como la variación de Kerma en el tiempo
1233 ($\frac{dK}{dt}$) y se registra en $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$.

1234 • **Dosis absorbida:** esta relacionada con la energía depositada en la materia. Se define
1235 como la energía de la radiación ionizante que se deposita en una cierta unidad de masa.
1236 Se hace notar que la dosis absorbida se define para cualquier tipo de radiación y que
1237 depende del material en el que se deposita la energía. Si bien tiene las mismas unidades
1238 que Kerma, solo considera la energía que permanece en la masa.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.3)$$

1239 La dosis absorbida se mide al igual que el Kerma en $\text{Gy} \cdot \text{s}$. Esta magnitud es relevante en
1240 radioprotección pues considera la energía depositada por cualquier tipo de radiación y toma
1241 cuenta el material en que la energía es depositada. Como en casos anteriores se define
1242 la tasa de dosis absorbida como la variación de ésta por unidad de tiempo ($\frac{dD}{dt}$)t medida en
1243 $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$.

1244 • **Equivalente de dosis [51]:** el efecto que podría tener una dosis absorbida en un
1245 tejido proveniente de partículas alfa no es equivalente si se considera proveniente de
1246 neutrones. En ambos casos la dosis absorbida puede ser la misma, pero las partículas
1247 alfa pueden producir un daño mayor a nivel de un tejido, por ejemplo. Es necesario
1248 entonces definir un factor de ponderación para cada tipo de radiación, w_R (radiation
1249 weighting factor) dados por la ICRP. La dosis equivalente se define entonces como la
1250 dosis absorbida multiplicada por este factor.

$$H = w_R D \quad (2.4)$$

1251 El equivalente de dosis se mide en Sievert en el SI y en unidades tradicionales se expresa
1252 en REM (Roentgen Equivalent Man). En la Tabla 2.1 se muestran los valores de w_R para
1253 algunos tipos de radiación

Tabla 2.1. Factores de calidad por tipo de radiación [115].

Tipo de radiación	W_R
Rayos X, fotones, electrones, muones	1
Protones y piones cargados	2
Neutrones térmicos*	3
Neutrones rápidos*	10
Partículas alfa, fragmentos de fisión y iones pesados	20

*En el caso de los neutrones se debe utilizar una función especial de acuerdo a la energía, se colocan valores referenciales.

- **Dosis efectiva:** no todos los tejidos del cuerpo humano presentan la misma sensibilidad ante la radiación. Los tejidos que presentan células activas por mitosis son más sensitivos que los que no tienen esa cualidad. En el caso de la inhalación de radón y su progenie, esta actúa principalmente sobre el sistema respiratorio, mientras que la inhalación de ^{131}I actúa sobre la tiroides. Se establece entonces un factor de ponderación para los tejidos en función a su radiosensibilidad w_T [44]. Se define la dosis efectiva como la suma de la dosis equivalente para cada tejido del cuerpo multiplicado por este factor. Se puede expresar la dosis efectiva como:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T w_R D_{T,R} \quad (2.5)$$

donde H_T es la dosis equivalente para cada tejido u órgano, teniendo en cuenta que estos factores de ponderación deben de sumar 1. Esto considera todos los órganos y tejidos humanos sensibles a la inducción de efectos estocásticos. En la Tabla 2.2 se presentan estos factores

26

Tabla 2.2. Factores de ponderación para diversos tejidos [115].

Tejido	W_T	ΣW_T
Medula ósea, colon, pulmones, estómago, mama, otros tejidos*	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Hígado, vejiga, esófago, tiroides	0.04	0.16
Huesos, cerebro, glándulas salivales, piel	0.01	0.04
Total		1

*Otros tejidos: región extratorácica, corazón, riñones, músculos, glándulas suprarrenales, vesícula biliar, músculos, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, útero, cérvix, bazo.

1266 La dosis efectiva se expresa en también en Sieverts en el SI. Cabe señalar que los estudios
1267 epidemiológicos concernientes a la exposición al radón, ya sea ocupacional o en viviendas,
1268 no utilizan el concepto de dosis efectiva, ya que se cuantifica la exposición. En la Tabla 2.3
1269 se resume la relación entre las unidades del SI, y las tradicionales.

26

Tabla 2.3. Factores de ponderación para diversos tejidos [115].

Magnitud	Unidades del SI	Abreviatura	Unidad tradicional y equivalencia
Actividad	Becquerel	Bq	$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
Exposición	Coulomb/kilogramo	$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$	$1 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} = 3.87 \times 10^3 \text{ R}$
Kerma	Gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Dosis absorbida	Gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Dosis equivalente	Sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Dosis efectiva	Sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

Elaboración propia

1270 2.2 Unidades y términos específicos relacionados con la medición de radón

1271 Medir la contribución del radón en función de la dosis recibida por los pulmones puede
1272 resultar complejo. La contribución principal a la dosis en los pulmones está dada por la
1273 progenie de vida corta del radón que se deposita en el aparato respiratorio [50] e involucra
1274 muchos parámetros como la actividad, distribución de la progenie, forma de respiración,
1275 etc. Un cálculo estándar considera valores típicos para esos parámetros, y las mediciones
1276 deben relacionar la dosis recibida en los pulmones por unidad de concentración en aire [119].
1277 Sin embargo, en la práctica es muy difícil medir la exposición debida a la progenie de vida
1278 corta; pero, la medición del radón es relativamente sencilla. ¿Cómo relacionar entonces estas
1279 contribuciones? Para esto, será necesario presentar algunos conceptos para cuantificar de la
1280 mejor manera la dosis relacionada con la inhalación de este gas, como los siguientes:

1281 2.2.1 Concentración de actividad

1282 Representa el número de decaimientos que ocurren en un determinado volumen. En el SI
1283 la unidad es el $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, sin embargo, en el sistema tradicional se utiliza aun Ci/l. Podemos
1284 decir entonces que al medir $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, se producirán 100 decaimientos de núcleos de
1285 radón en 1 segundo por cada metro cúbico.

1286 2.2.2 Energía alfa potencial (PAE)

1287 PAE (Potential Alpha Energy, por sus siglas en inglés) de un átomo en la cadena del radón (o
1288 de torón) es la suma de las energías alfa emitidas durante el decaimiento hasta llegar al ^{210}Pb
1289 estable. Se cuantifica en Joules (J) o MeV. Para determinar la PAE por unidad de actividad
1290 de un determinado radionúclido se considera su constante de desintegración o su vida media:

$$\frac{PAE}{\lambda} = \frac{PAE \tau}{\ln 2} \quad (2.6)$$

1291 En la Tabla 2.4 se muestran valores PAE para la progenie del radón.

Tabla 2.4. Valores para cálculo de PAE en la progenie de radón [123].

Radioisótopo	Vida media	PAE progenie del radón			
		147 Por átomo		Por unidad de actividad	
		MeV	10 ⁻¹² J	MeV·Bq ⁻¹	10 ⁻¹² J·Bq ⁻¹
144 ²¹⁸ Po	3.05 min	13.69	2.19	3 615	5.79
²¹⁴ Pb	26.8 min	7.69	1.23	17 840	28.6
²¹⁴ Bi	319.9 min	7.69	1.23	13 250	21.2
²¹⁴ Po	164 μs	7.69	1.23	2 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁶
Total en equilibrio (por Bq de radón)				34 710	55.6

1292 2.2.3 Concentración de energía alfa potencial (PAEC)

1293 PAEC (Potential Alpha Energy Concentration, por sus siglas en inglés) se define como la
 1294 concentración de la progenie de vida corta del radón o del torón en aire, en términos de la
 1295 energía emitida hasta su decaimiento final, ²¹⁰Pb para el radón o al ²⁰⁸Pb para el torón. Esta
 1296 definición se usa para cualquier mezcla o combinación de la progenie en un determinado
 1297 volumen de aire y se expresa en J·m⁻³ [61].

$$PAEC = \sum_i C_i \frac{PAE_i}{\lambda_i} = 3615 \cdot ^{218}Po + 17840 \cdot ^{214}Pb + 13250 \cdot ^{214}Bi \quad (2.7)$$

1298 donde C_i es la concentración de cada progenie del radón y λ_i es la constante de desinte-
 1299 gración de cada producto.

1300 2.2.4 Working Level (WL)

1301 Si bien podemos expresar el PAEC en J·m⁻³, la unidad tradicional en protección radiológica
 1302 es denominada Working Level (WL). Un WL se define como la concentración de cualquier
 1303 combinación de la progenie de vida corta del radón o torón, que podría producir potencial-
 1304 mente 130 000 MeV de energía cinética proveniente de partículas alfa por litro de aire [61].
 1305 Por ejemplo, para el radón se tiene que 1 WL es igual a 3 700 Bq·m⁻³, que a su vez es igual
 1306 a 2.08×10^{-5} J·m⁻³; y para el torón se tiene que 1 WL es igual a 275 Bq·m⁻³, que a su vez
 1307 es igual a 1.54×10^{-6} J·m⁻³. Además, si la concentración de la progenie está en equilibrio
 1308 con la concentración de radón, estarán relacionadas por un factor de 5.56×10^{-9} J·m⁻³. Pero
 1309 en la práctica, la progenie rara vez está en equilibrio con el radón, por lo que este factor

1310 estaría sobre estimando el PAEC; por esto, es necesario definir un factor que represente la
1311 situación real.

1312 2.2.5 Concentración en equilibrio equivalente de radón (EERC) y de torón (EETC).

1313 EERC o EETC indica una concentración de equilibrio entre el radón o torón y su progenie,
1314 sin embargo este equilibrio es poco usual, ya que la progenie usualmente se deposita en las
1315 paredes y superficies o disminuye por ventilación. La concentración de la progenie será
1316 entonces generalmente menor que la de su predecesor (radón o torón). Una alternativa para
1317 describir la situación real y determinar el factor de equilibrio F es utilizando la concen-
1318 tración de equilibrio equivalente. La concentración de equilibrio equivalente de una mezcla
1319 cualquiera de aire es la concentración colectiva de las progenes de vida corta en aire. Puede
1320 afirmarse entonces que:

$$\begin{aligned} EERC &= 0.105(^{218}\text{Po}) + 0.516(^{214}\text{Pb}) + 0.379(^{214}\text{Bi}) \\ EETC &= 0.91(^{212}\text{Pb}) + 0.09(^{212}\text{Bi}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

1321 En otras palabras, la EERC o la EETC es la concentración de radón o torón en equilibrio
1322 con su progenie que darían la misma PAEC que la muestra en no equilibrio real. Ambas se
1323 relacionan entonces por un factor, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} EERC(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) &= \text{PAEC}_{rm}(\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 1.79 \times 10^8 \\ EETC(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) &= \text{PAEC}_{th}(\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 1.32 \times 10^7 \end{aligned} \quad (2.9)$$

1324 2.2.6 Factor de equilibrio

1325 El factor de equilibrio F es un número que indica el grado de desequilibrio entre las concen-
1326 traciones de radón y su progenie [61]. Si F = 1, indica que el radón y su progenie tienen la
1327 misma concentración. Se utiliza la siguiente expresión para su cálculo:

$$\begin{aligned} F_{rm} &= \frac{EERC}{C_{rm}} \\ F_{th} &= \frac{EETC}{C_{th}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

1328 Puede afirmarse que para una concentración de radón de $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ en cualquier mezcla
1329 con su progenie, el valor PAEC es $5.56 \times 10^{-9} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot F_{rm}$. En forma similar para el torón
1330 en las mismas condiciones PAEC es $7.56 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot F_{th}$.

1331 En condiciones normales para viviendas y edificios, la ICRP [61] como se mencionó
1332 sugiere un valor de F = 0.4 para radón en ambientes con ventilación natural. Mientras menos

1333 ventilado sea el ambiente la concentración de la progenie se incrementará. Para el valor del
 1334 factor de equilibrio sugerido de 0.4 se muestran las concentraciones de radón y su progenie
 1335 de vida corta en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Concentración de radón y su progenie para F = 0.4.

Radionúclido	Concentración [Bq·m ⁻³]
Radón	1
²¹⁸ Po	0.7
²¹⁴ Pb	0.4
²¹⁴ Bi	0.3

Elaboración propia

1336 Es necesario también citar la definición de fracción libre o no depositada (unattached
 1337 fraction) f_p que se define como la fracción de PAEC de la progenie de vida corta que
 1338 no está adherida a las partículas suspendidas ambientales. Depende principalmente de
 1339 la concentración de aerosoles ambientales (Z). En 2001, Porsterdorfer [113] evaluó la
 1340 fracción no adherida, midiendo la fracción de la progenie de radón y torón, llegando a las
 1341 expresiones semiempíricas para la progenie del radón $f_p = \frac{414}{Z(cm^{-3})}$ y para la progenie del
 1342 torón $f_p = \frac{150}{Z(cm^{-3})}$.

1343 El factor de equilibrio y la fracción libre tienen una correlación negativa, debido a que
 1344 si la fracción libre es pequeña, más progenie de radón permanecerá en el aire, ya que las
 1345 tasa de deposición de los nucleídos que se adhieren a aerosoles serán significativamente
 1346 menores al de los nucleídos libres [112]. Esto es relevante en el trabajo, pues significa que
 1347 para mediciones en interiores, la concentración de radón es un mejor índice de dosis que
 1348 la cantidad de actividad específica de la progenie, bajo diversas condiciones de particulado
 1349 [39].

1350 Por otro lado, la progenie adherida a los aerosoles pueden distribuirse de acuerdo a su
 1351 tamaño según su nucleación (diámetro de actividad termodinámica media AMTD entre 10 y
 1352 100 nm), acumulación (AMTD entre 100 y 450 nm) y grosor (AMTD mayor a 1 mm) [55].

1353 2.2.7 Working Level Month (WLM)

1354 Dado que la PAEC puede variar en el tiempo, es necesario tener en cuenta también este
 1355 factor. Al multiplicar la PAEC por el tiempo de ocupación u ocupancia (en horas) se
 1356 determina la exposición (en J·m⁻³·h). Esta se calcula normalmente para un tiempo de 1
 1357 año, considerándose una ocupancia de 2 000 horas al año (alrededor de 8 horas diarias para
 1358 centros de trabajo). El Work Level Month (WLM) determina la exposición a 1WL en un

1359 mes (170 horas ocupacionales). Es así como 1 WLM equivale aproximadamente a $6.37 \times$
1360 $10^5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ de EEC de radón y a $4.68 \times 10^5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ de EEC de torón. En el SI, puede
1361 decirse que $1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ equivale aproximadamente a $1.8 \times 10^8 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ de EEC de radón y
1362 a $1.32 \times 10^7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ de EEC de torón.

1363 En el caso del radón, si la exposición se expresa em términos de su concentración, se
1364 debe incluir al factor de equilibrio [101], así 1 WLM sería igual a $\frac{6.37 \times 10^7}{F} \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$.

1365 La UNSCEAR en 1988 [145], señala que para un $F = 0.4$ y una ocupancia de 7 000
1366 horas por año, se puede considerar que una concentración de radón anual promedio de 300
1367 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ conlleva a una exposición anual de $1.56 \times 10^2 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ (4.4×10^{-3} WLM ó 0.32
1368 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}$).

1369 2.3 Cálculo de dosis de inhalación

1370 La dosis por inhalación a los pulmones surge principalmente debido a la inhalación de la
1371 progenie del radón y las partículas alfa emitidas durante su decaimiento y la de su progenie
1372 de vida corta [101].

1373 El cálculo de la dosis por inhalación de radón se realiza en base a la medición de la
1374 concentración de radón en el aire y aplicando modelos matemáticos que involucran el tiempo
1375 de exposición, el factor de equilibrio, características de la vivienda (tipo de suelo, materiales
1376 de construcción, ventilación), la presencia de aerosoles, la tasa de respiración de la persona,
1377 edad, altura y otros factores, por lo que puede resultar complejo. Luego se utiliza un factor
1378 para determinar la dosis efectiva, que involucra el tipo de órgano o tejido, ya que éstos pueden
1379 tener diferentes grados de sensibilidad a las radiaciones recibidas.

1380 Los primeros cálculos publicados fueron por Evans y Goodman en 1940 [32], donde
1381 basados en los estudios a un grupo de trabajadores de una mina de uranio en Schneeberg en
1382 Alemania, recomendaban el límite de $370 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (10 pCi/l).

1383 Es importante también señalar que dado los numerosos factores involucrados, la ICRP
1384 [101] indica que la dosis efectiva por WLM, debido a la inhalación de la progenie de vida
1385 corta del radón se obtiene tomando en cuenta los valores de las incorporaciones (ingestas) de
1386 las progenies de radón I_i (en Bq) para un individuo expuesto a 1 WLM, dado por la expresión:

$$I_i = C_i B t \quad (2.11)$$

1387 donde C_i es la concentración de la progenie i que corresponde a una mezcla de radón de
1388 1 WL, B ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) es la tasa promedio de respiración del individuo y t (horas) es el período
1389 de exposición, que generalmente se asume en 170 horas. Para el cálculo de la dosis efectiva

1390 por WLM, se combina estas incorporaciones I_i con los ¹ coeficientes de dosis efectiva (Sv/Bq)
1391 para la progenie de radón, mediante la expresión:

$$E(\text{Sv/WLM}) = \sum_j f_{p,j} \sum_1^3 I_{i,j} e_{j,i} \quad (2.12)$$

1392 donde el subíndice j corresponde al modo de la distribución de aerosol (definidos anteri-
1393 ormente): $j = 1$ modo libre (u), $j = 2$ modo nucleación (n) y $j = 3$ modo acumulación (a);
1394 el valor $f_{p,j}$ es la fracción de PAEC ³²⁰ asociada con el modo j ; el subíndice i corresponde a la
1395 progenie inhalada, para el caso del radón: $i = 1$ ^{218}Po , $i = 2$ ^{214}Pb y $i = 3$ ^{214}Bi ; y $e_{j,i}$ es el
1396 coeficiente ³²¹ de dosis efectiva (Sv·Bq⁻¹) para la progenie inhalada con una distribución de
1397 tamaño j , como se muestra en la Tabla 2.6.

¹ **Tabla 2.6. Coeficientes de dosis efectiva (en Sv·Bq⁻¹) para las progenies de radón y torón inhalados [123].**

		⁶² Coeficiente de dosis efectiva [Sv·Bq ⁻¹]					
		Progenie de radón			Progenie de torón		
Condición	Modo (i)	^{218}Po	^{214}Pb	^{214}Bi	^{212}Pb	^{212}Bi	
de exposición	Todas	u	1.1×10^{-8}	6.1×10^{-8}		4.9×10^{-7}	
	Interiores	n	3.8×10^{-9}	1.8×10^{-8}	1.5×10^{-8}	1.7×10^{-7}	3.3×10^{-8}
		a	1.3×10^{-9}	6.7×10^{-9}	5.9×10^{-9}	6.5×10^{-8}	1.3×10^{-8}

1398 Considerando solo a las progenies de radón y torón, la dosis efectiva por exposición
1399 a PAE en función de la fracción no adherida o libre, se da en la Tabla 2.7 para el caso de
1400 ambientes de trabajo en interiores. Se considera al individuo con una tasa promedio de
1401 respiración de $1.2 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$.

Tabla 2.7. Dosis efectiva de las progenies de radón y torón.

	Dosis efectiva por exposición	
	$\text{mSv} \cdot \text{WLM}^{-1}$	$\text{mSv} \cdot \text{mJ}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$
Progenie de radón	$86f_p + 14(1-f_p)$	$24f_p + 3.9(1-f_p)$
Progenie de torón	$30f_p + 5.1(1-f_p)$	$8.5f_p + 1.4(1-f_p)$

1402 Revisando la literatura se puede indicar a modo de referencia que, para las viviendas, el
1403 coeficiente de dosis se estimó igual a $13 \text{ mSv} \cdot \text{WLM}^{-1}$ [72].

1404 2.4 Métodos de medición de radón

1405 Dado que el radón es el mayor contribuyente en la radiación natural a la que una población se
1406 ve expuesta, la mayoría de los dispositivos están diseñados para medir radón en viviendas
1407 o en lugares de trabajo. Aunque inicialmente se consideraba solo a las actividades mineras
1408 como riesgo significativo a la inhalación de radón, en la actualidad las mediciones no se
1409 limitan solo a esa actividad sino también donde el contenido de radio en el suelo pueda
1410 significar un riesgo a las personas. El riesgo de contraer cáncer pulmonar por radón está
1411 relacionado con su exposición a largo plazo en un recinto cerrado poco ventilado, por eso las
1412 mediciones deben estimar un valor integrado, ya que los niveles de radón pueden variar en
1413 horas, días o meses.

1414 De acuerdo con el propósito de las mediciones que se consideren realizar, existen muchas
1415 formas de medición, directas o indirectas, que cuantifican al radón, a su progenie o a ambos.
1416 En algunos casos se requiere medir al radón como trazador geológico, en este caso se puede
1417 estimar la concentración de radón ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) o inferirla a través de la concentración de radio
1418 en el suelo ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$). Si las mediciones están orientadas con fines de protección radiológica,
1419 estos resultados se pueden dar en función de la tasa de dosis efectiva ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}$) o en
1420 Sieverts. El radón se detecta en forma indirecta, midiendo las contribución de las partículas
1421 alfa emitidas por el radón y su progenie.

1422 Podemos clasificar a los métodos de mediciones de radón de dos formas: por su duración
1423 y por las características de la medición. Para el primer caso, la Tabla 2.8 puede resumir los
1424 métodos de la siguiente manera:

Tabla 2.8. Métodos de medición de radón de acuerdo a su duración.

Medición	Duración	Características	Ejemplo de equipo de medición
Puntual	< 60 min	Medición puntual en un lugar y tiempo. Se utiliza cuando se requiere intervenir en un lugar donde la concentración puede ser alta o es desconocida. No es válido para mediciones con fines de monitoreo de radón.	<ul style="list-style-type: none"> • Detector de centelleo • Espectrómetro gamma
Continua	horas	Variación de la concentración durante el muestreo en un punto dado. Se emplea para estudiar si la concentración de radón cambia en un periodo corto de tiempo. No es válido para mediciones con fines de monitoreo de radón.	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de ionización • Carbón activado
Integración corta	días	Valores promedios de la concentración en un punto durante el muestreo. Puede dar un valor de la concentración de radón como una primera aproximación.	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrómetro gamma • SSNTDs • Electret
Integración larga	semanas o meses	Estimación de la media anual de la concentración en un punto durante el muestreo. Se utiliza para monitoreos de concentración de radón con fines de protección radiológica.	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrómetro gamma • SSNTDs • Electret

Elaboración propia

1425 De acuerdo con las características de la medición, podemos diferenciar dos grandes
1426 grupos: métodos de medición activos y métodos de medición pasivos.

1427 2.4.1 Métodos de medición activos

1428 **1** Los métodos de medición activos requieren el uso de dispositivos electrónicos o alguna
1429 fuente de alimentación de energía para recopilar los datos en forma continua o periódica.
1430 Se utilizan generalmente para mediciones cortas y dan resultados prácticamente en tiempo
1431 real. Generalmente por algún mecanismo extraen una muestra de aire y determinan la
1432 concentración de radón (generalmente por ionización alfa). Estos métodos si bien son
1433 precisos, pueden requerir equipamiento de alto costo, requieren equipamiento y no se podrían
1434 emplear para realizar un monitoreo en casas a gran escala.

1435 Algunos ejemplos de monitores que utilizan métodos activos son:

1436 • Celdas de Lucas (Hevesy-Levi)

1437 Las celdas de centelleo conocidas generalmente como Celdas de Lucas [69] fueron
1438 desarrolladas en 1940 por los físicos húngaros George de Hevesy y su colega Hilde
1439 Levi, pioneros en el desarrollo y su aplicación, por lo que en realidad deberían recibir
1440 el nombre de celdas Hevesy-Levi. En este método, un contenedor de metal de un
1441 volumen apropiado, es sellado herméticamente y llenado con el aire de interés a medir.
1442 Las paredes internas están recubiertas con sulfuro de zinc activado con plata $ZnS(Ag)$,
1443 que es un material centelleador en el que impactan las partículas alfa emitiendo luz
1444 que debe ser captada por un tubo fotomultiplicador, el cual se acopla en su base
1445 transparente. Una vez que la celda esté llena, se producirá la progenie del radón a
1446 partir del radón presente en la misma. Después de aproximadamente tres horas, la
1447 progenie de vida corta alcanzará un estado de equilibrio secular con el radón original
1448 en la celda. Entonces se emitirán tres partículas alfa (radón, ^{218}Po y ^{214}Po) dentro del
1449 volumen de la celda por cada decaimiento de radón. Para hacer un instrumento de
1450 muestreo continuo, se puede bombear aire continuamente a través de la cámara o que
1451 se difunda a través de una barrera hermética a la luz.

1452 • Cámaras de ionización

1453 **114** En una cámara de ionización, se crea un campo eléctrico entre dos o más electrodos.
1454 El aire filtrado se introduce en la cámara y se difunde naturalmente o se bombea para
1455 llenarla. Dentro de la cámara se mide la corriente generada por la ionización del gas,
1456 esta se debe al decaimiento del radón y su progenie. La cantidad total de ionización en
1457 la cámara se puede medir, o se pueden contar los pulsos individuales generados por las

1458 partículas alfa. Esta última técnica tiene la ventaja de poder distinguir entre los pulsos
1459 causados por la progenie y el radón en sí. En los últimos años, las cámaras de ionización
1460 comerciales se han vuelto ampliamente adoptadas como patrones secundarios en los
1461 laboratorios de calibración de radón. En nuestro laboratorio de huellas nucleares
1462 GITHUNU-PUCP (<https://investigacion.pucp.edu.pe/grupos/githunu/>), utilizamos el
1463 equipo ALPHAGUARD como nuestro estándar secundario en la cámara de calibración.

1464 • **Detector de barrera superficial**

1465 El detector de barrera superficial se basa en la detección de partículas alfa emitidas
1466 por el radón y su progenie con una película sensible. Esta es generalmente una hoja
1467 delgada de material plástico o de policarbonato que se coloca en el detector. Las
1468 partículas alfa depositan energía en la película, creando rastros visibles o grabados en
1469 la superficie, estos rastros se pueden contar y analizar posteriormente para determinar
1470 la concentración de radón.

1471 • **Recolección electrostática de progenie**

1472 Algunos monitores utilizan esta técnica de recolección electrostática de la progenie,
1473 que consiste en atraer y recolectar a las partículas alfa mediante un campo eléctrico.
1474 Estos monitores tienen una cámara, donde se difunde o bombea aire y utilizan un
1475 detector de estado sólido para medir las energías de las partículas alfa. El detector
1476 se lleva a un alto voltaje para recolectar la progenie del radón desde que se forman y
1477 una parte de estas partículas ingresarán al detector de estado sólido. Generalmente
1478 se utiliza un desecante (drierita) para eliminar el vapor de agua que puede afectar la
1479 recolección de la progenie. En el laboratorio de huellas nucleares de GITHUNU –
1480 PUCP el equipo RAD7 funciona en esta modalidad.

1481 **2.4.2 Métodos de medición pasivos**

1482 Los métodos pasivos utilizan un monitor integrador en cuanto acumula trazas en un tiempo
1483 determinado (integra cuentas o información), independiente de los cambios estacionales,
1484 condiciones ambientales y/o propias de cada lugar de monitoreo. Una gran ventaja es que los
1485 monitores pasivos no requieren de energía externa, se basan en la difusión natural del radón,
1486 que puede o no tener una membrana o mecanismo para acumular al radón o discriminarlo del
1487 torón. El tiempo de exposición de estos monitores suele ser de semanas a meses, dependiendo
1488 del lugar de medición, siendo su principal objetivo determinar la exposición promedio a largo
1489 plazo. La ventaja indiscutible de estos monitores es su facilidad de uso y bajo costo, lo que
1490 los hace una alternativa ideal para realizar monitoreos de vigilancia radiológica a mediana y

1491 a gran escala. Además, con los datos obtenidos, también existe la posibilidad de elaborar
1492 mapas de radón.

1493 Algunas técnicas pasivas se describen a continuación:

1494 • **Detectores de carbón activado**

1495 El carbón activado tiene afinidad por muchos gases, incluyendo el radón. El radón
1496 absorbido en el carbón se desintegrará y la progenie se conservará, lo que permitirá
1497 medir el radón adsorbido mediante espectrometría gamma o también mediante un
1498 equipo de centelleo líquido y un líquido centelleador. Los monitores contienen una
1499 cierta cantidad de carbón activado granulado, el cual se calienta previamente para
1500 eliminar la humedad. Para realizar mediciones, se destapa y se pone en contacto con
1501 el medio ambiente, al terminar el tiempo de exposición, que suele ser corto (días), se
1502 tapa nuevamente y se evalúa en el laboratorio.

1503 • **Electrets**

1504 Los electrets son una especie de cámara de ionización y tienen una carga superficial
1505 permanente que genera un potencial superficial del orden de los kV. Los desarrollados
1506 comercialmente (RAD ELEC) consisten en un disco de teflón con una carga eléctrica
1507 que se coloca en la base de una cámara de plástico conductor. Los iones producidos
1508 por el radón al interior de la cámara descargan al electret, por lo que se debe “leer” la
1509 carga antes y después de la exposición. De acuerdo al espesor del electret pueden ser
1510 usados para tiempos largos o cortos y en ciertos casos deben de hacerse correcciones
1511 por la humedad o variaciones en la presión atmosférica. De acuerdo a la forma de la
1512 cámara y tamaño del electret pueden ser utilizados para mediciones en interiores o en
1513 exteriores, incluyendo la discriminación de torón.

1514 • **TLD**

1515 Algunos materiales tienen la propiedad de almacenar energía, la que posteriormente
1516 puede ser liberada en forma de luz cuando éste se somete a un proceso de elevación
1517 de temperatura. Cristales termoluminiscentes pueden ser sensibles a la radiación alfa,
1518 beta o gamma. En el caso de la detección de partículas alfa, el monitor consta de
1519 dos cristales TLD, uno de los cuales se cubre con un filtro de aluminio, que excluirá
1520 la detección de alfas. El otro cristal se mantiene descubierto y captará alfas, betas y
1521 gammas. Al leer ambos detectores se obtendrá la contribución gamma por diferencia.

1522 • **Detectores de huellas nucleares de estado sólido**

1523 Son los detectores de uso más generalizado en monitoreos a mediana y gran escala
1524 por su facilidad de uso y bajo costo. Son poco sensibles a pequeñas variaciones de
1525 temperatura, presión y humedad, además su uso y colocación no requiere mayor entre-
1526 namiento y su evaluación en el laboratorio puede realizarse en cualquier laboratorio
1527 que cuente con un instrumental básico. Este ha sido el método empleado en este trabajo
1528 por lo que la siguiente sección estará dedicada a este tipo de detectores.

1529 2.4.3 Detectores de huellas nucleares

1530 Los detectores de huellas nucleares son la mejor alternativa para medir radón en interiores,
1531 debido a la facilidad de su uso y su simplicidad. Resulta fascinante pensar que una partícula
1532 cargada (que puede ser una partícula alfa o un ion) pueda dañar la trayectoria a su paso
1533 cuando ingresa a un material dieléctrico. En el momento en que la partícula penetra en este
1534 material detector, generará una gran ionización primaria en todo el camino a su paso, lo
1535 que llamamos huella latente. Cada huella latente indica que una partícula alfa incidió en
1536 el detector dejando su huella. Estas huellas son muy pequeñas y pueden observarse solo a
1537 través de un microscopio electrónico.

1538 Sin embargo, si el material sufre un ataque químico (etching) con una sustancia corrosiva,
1539 estas huellas (huellas grabadas) y pueden ser visibles en un microscopio óptico o utilizar
1540 un sistema de conteo automatizado. Es importante señalar que las huellas se generan en
1541 cualquier material dieléctrico (no en los materiales conductores pues se recombinarían y no
1542 se formaría una alteración de la estructura molecular en forma permanente), pero es común
1543 emplear polímeros (como nitratos de celulosa o policarbonatos) como material detector. En
1544 este trabajo solo se presenta a los polímeros como detectores. No hay un único modelo teórico
1545 que explique el proceso de formación de las huellas. Los modelos de Fleischer reportados en
1546 el 1975, Durrani and Bull en 1979 y Espinosa en 1994 [34, 21, 27] explican la formación de
1547 las huellas para diversos materiales. En el trabajo publicado por Martín-Landrove [73], se
1548 plantea el modelo de formación de las huellas a partir de los principios físicos. Todos estos
1549 modelos se describieron en trabajos anteriores [104]. Es importante destacar que el hecho
1550 que solo las partículas alfa o iones puedan registrar sus huellas, hacen de estos detectores
1551 una buena opción para medir radiación en campos donde se encuentren presentes otros tipos
1552 de radiación (beta o gamma), que puedan ser discriminados. Hay dos polímeros que son
1553 usados ampliamente como detectores de huellas nucleares y que son los más utilizados para
1554 registrar específicamente las huellas producidas por las partículas alfas que provienen del
1555 radón, torón y su progenie: el nitrato de celulosa, conocido comercialmente como LR-115 y
1556 un policarbonato, cuyo nombre comercial es el CR-39TM.

1557 El LR-115 es un detector que originalmente fue producido por la Kodak-pathe (Francia).
1558 De los diferentes formatos de presentación de este detector, utilizamos el LR-115 Tipo 2 no
1559 pelicular (5 http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf, accedido el 31 de
1560 Mayo de 2023), debido a que sus características son las más apropiadas para los monitoresos (8
1561 de radón y las condiciones de procesamiento de nuestro laboratorio. Sobre una base de 100
1562 μm de poliéster se deposita una capa de 12 μm de nitrato de celulosa de color rojo oscuro,
1563 éste es el material sensible (115 a la radiación y por lo tanto la exposición debe darse por ese lado.
1564 Solo las huellas que estén en el rango de energías entre 0.3 MeV y 4 a 6 MeV podrán registrar
1565 una huella en el detector, esta característica permite discriminar partículas con energías fuera
1566 de este rango. Se recomienda almacenar los detectores de LR-115 en lugares secos y a
1567 temperatura de 4-10 °C.

1568 El CR-39TM (Columbia Resin N° 39) es producido por diversos fabricantes, principal-
1569 mente la TASL de Reino Unido. El CR-39TM (allyl diglycol carbonato), C₁₂H₁₈O₇ es
1570 transparente y rígido, con buena estabilidad térmica hasta los 100 °C en donde puede sufrir el
1571 desvanecimiento (annealing) de las huellas que ha registrado. Los detectores (chips) pueden
1572 ser codificados para su fácil identificación y se pueden almacenar en refrigeradoras, además
1573 estos pueden registrar partículas alfas y protones con energías entre el valor de umbral 0.3 y
1574 0.5 MeV respectivamente hasta valores superiores a los 20 MeV, por lo que puede decirse
1575 que prácticamente registran cualquier partícula alfa que los impacte [122].

1576 Los monitoresos de radón que utilizan dosímetros de trazas nucleares de estado sólido
1577 (SSNTDs) proporcionan resultados representativos debido a su capacidad para realizar
1578 mediciones integradas en períodos que suelen (10 abarcar desde semanas hasta 12 meses. Estas
1579 mediciones brindan valores representativos de la concentración de radón en un recinto. Los
1580 SSNTDs pueden utilizarse tanto en modo pasivo como activo (por ejemplo haciendo circular
1581 un flujo continuo de aire mediante alimentación externa), aunque suelen utilizarse en modo
1582 pasivo (simplemente por difusión).

1583 La variante activa consta de una bomba de muestreo (1 de aire y un conjunto de detectores
1584 de partículas alfa (ATD, por sus siglas en inglés) [149]. La función de la bomba de muestreo
1585 de aire es hacer circular un flujo de aire seco (generalmente utilizando sílica gel como
1586 desecante) continuo y uniforme a través de un filtro donde se acumula la progenie del radón.
1587 Frente a la superficie del filtro donde se encuentra la progenie del radón, se encuentra un
1588 cilindro con orificios cilíndricos colimadores. (3 Las partículas alfa emitidas por la progenie
1589 del radón en el filtro pasan a través de tres orificios de colimación y atraviesan diferentes
1590 capas de película absorbentes de energía antes de incidir en el SSNTD (LR-115 o CR-39TM).
1591 El análisis del número de trazas alfa en cada uno de los tres sectores del detector permite
1592 determinar la cantidad de partículas alfa derivadas del ²¹⁸Po y del ²¹⁴Po, así como calcular el

1593 factor de equilibrio para la progenie de radón. Realizando un muestreo de polvo, será posible
1594 medir la progenie de radón. En este caso, los problemas relacionados con la absorción de
1595 partículas alfa por el papel de filtro pueden minimizarse al utilizar papeles de filtro de tejido
1596 cerrado (por ejemplo, los papeles de filtro Whatman con un alto contenido de celulosa)
1597 que permitan que el polvo se acumule en la parte superior del filtro. Para disminuir la
1598 autoabsorción de partículas alfa en la capa de polvo, es importante minimizar la presencia de
1599 aerosoles. Además, se deben evitar los papeles de filtro propensos a generar una fuerte carga
1600 electrostática, ya que esto puede resultar en la expulsión del polvo de la superficie del filtro o
1601 en la atracción de polvo adicional de cantidad desconocida. Un aspecto importante a tener
1602 en cuenta, si se aplica la colección o precipitación electrostática, es que los aerosoles que
1603 contienen radionúclidos pueden adquirir carga electrostática de forma espontánea, lo que
1604 afecta su comportamiento microfísico en la atmósfera. Debido a esto, el aerosol radiactivo
1605 puede presentar un comportamiento claramente distinto en comparación con el aerosol no
1606 radiactivo y neutro [64, 100]. Debido a la desintegración de los radionúclidos, se produce la
1607 carga de aerosoles radiactivos, que pueden ser emisores. En caso de emisión alfa, se expulsa
1608 del aerosol una partícula alfa de carga +2 dejando una carga residual -2. Generalmente, los
1609 aerosoles radiactivos que experimentan desintegración alfa se cargan positivamente debido a
1610 que las partículas alfa pueden causar ionización significativa dentro de los aerosoles, lo que
1611 conduce a la emisión de electrones secundarios. Así, en este método de detectar y medir las
1612 progenies se deben conocer y manejar diferentes aspectos como mecanismos de transporte de
1613 aerosoles en el aire, transporte de radón/torón en ese medio y particularidades de su progenie,
1614 y no menos importante, los factores que influyen en ellos.

1615 En ambos casos, modos activos y pasivos, estos detectores de huellas nucleares siguen un
1616 proceso que se puede describir en tres etapas:

- 1617 i. **Exposición:** el detector es expuesto a la radiación ionizante ya sea en condiciones
1618 controladas (calibración) o naturales (monitoreo). En este momento se forma la
1619 huella latente, que aún no es posible de visualizarla. Si no hay cambios grandes
1620 de temperatura, esta huella puede permanecer mucho tiempo, sin que el material se
1621 recomponga.
- 1622 ii. **Grabado químico (también conocido como etching) de los detectores:** mediante
1623 una solución corrosiva (generalmente hidróxido de sodio o hidróxido de potasio), a
1624 condiciones determinadas de normalidad de la solución, temperatura y tiempo, se
1625 somete al detector a un baño a temperatura estable. Esto permite que la huella latente
1626 se convierta en una huella grabada, y visible con métodos convencionales de lectura.

1627 iii. **Lectura y evaluación:** luego del grabado químico, el detector con las huellas grabadas
1628 es sometido al análisis mediante un microscopio óptico o un sistema automatizado de
1629 lectura. En el laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP se cuenta con el Politrack
1630 de la empresa mi.am (<https://miam.it>), el cual puede leer fácilmente 80 detectores en
1631 un tiempo corto, lo que facilita el trabajo y elimina las incertidumbres que pueden
1632 darse en un conteo manual.

1633 Los SSNTDs se utilizan en los modos cámara de difusión y desnudo o abierto, como se
1634 explica a continuación:

1635 2.4.3.1 Cámaras de difusión

1636 El detector se coloca al interior de un contenedor que permite que el radón se difunda hacia
1637 su interior. En este caso, los detectores solo registrarán las partículas alfa de los átomos
1638 de radón que ingresen a la cámara de difusión y las partículas alfa de la progenie de los
1639 átomos de radón que decayeron en su interior. En este caso el detector brindará un resultado
1640 relacionado con la concentración de gas radón promedio real durante el tiempo de exposición.
1641 En la mayoría de los casos, estas cámaras tienen filtros o algún sistema mecánico que harán
1642 que la contribución del torón será nula, ya que el torón no podrá ingresar a la cámara debido
1643 a su corta vida media.

1644 Las cámaras de difusión que utilizan SSNTDs son el procedimiento más utilizado a
1645 nivel mundial para medir la concentración de radón integrada en el tiempo. Existen diversos
1646 dispositivos comerciales (DPR, Radout®, etc.) que brindan ese servicio de medición de
1647 radón en interiores. También se pueden utilizar dispositivos propios de geometría y material
1648 conocidos, este es el caso de los dispositivos G2 y G3 utilizados en el laboratorio de Huellas
1649 Nucleares. En el primer caso utilizan detectores LR-115 y en el segundo CR-39TM en su
1650 interior.

1651 2.4.3.2 Detectores en modo desnudo

1652 Conocido también como modo abierto, el detector es simplemente expuesto al medio ambi-
1653 ente, por lo que podría registrar a las partículas alfa emitidas por radón, torón y su progenie.
1654 El factor de equilibrio F es fundamental, pues indicará la relación entre el radón y su progenie
1655 [77] y dependerá del material detector empleado. En el caso del LR-115, una ventaja es que
1656 su sensibilidad está en función del factor de equilibrio F, el cual se encuentra entre la de un
1657 detector real y un detector con EER real, acercándose así a lo que el detector está expuesto
1658 en el ambiente real.

1659 Debido a que los detectores en modo desnudo de CR-39TM tienen una respuesta que
1660 tiene una alta dependencia del F, no se recomienda utilizar este material detector en modo
1661 abierto. Por otro lado, ante una prolongada exposición del detector a condiciones ambientales
1662 extremas, en ambos casos, pero más en el del LR-115 pueden disminuir sensibilidad o perder
1663 información por un daño del material (hongos, alto índice de UV, etc.).

1664 Una ventaja adicional en el caso de los detectores abiertos es que solo se activan o
1665 "miden" cuando están expuestos. Por esto se puede evitar la exposición colocando al detector
1666 desnudo en un sobre o en una bolsa a prueba de radón (radon proof) hasta que se llegue al
1667 lugar de medición.

1668 Por todas estas razones, el método de medición seleccionado para las mediciones del
1669 monitoreo de radón en la ciudad de Lima fueron los detectores desnudos de LR-115.

1670 2.4.4 Calibración

1671 Lo que podemos obtener en forma directa al evaluar un detector de huellas es la densidad
1672 de trazas (huellas/mm²). Es fundamental poder estimar a partir de ese valor la exposición
1673 en Bq·m⁻³·h⁻¹ al que fue realmente expuesto ese material, conociendo además en la forma
1674 más veraz posible que midió realmente este detector.

1675 Si bien el principio de operación de un SSNTDs puede parecer bastante sencillo, no está
1676 exento de errores. Por esto, se realizan intercomparaciones a nivel internacional en el que los
1677 diversos monitores son expuestos en condiciones controladas a concentraciones conocidas,
1678 para garantizar un buen desempeño de los diversos tipos de detectores. Sin embargo, en los
1679 últimos años estas intercomparaciones excluyen a los detectores desnudos y para el caso de
1680 los SSNTDs se limitan a las cámaras de difusión.

1681 Obtener un factor de calibración puede resultar extremadamente complejo, pues hay
1682 muchos factores involucrados. Podría pensarse que una primera opción es exponer a los
1683 detectores a diferentes concentraciones en una cámara de calibración, pero es allí donde
1684 podemos empezar a preguntarnos: ¿son las condiciones de esta cámara de calibración las
1685 mismas que en el lugar de medición?, ¿cómo afectan estos cambios en los resultados? En
1686 realidad, este factor solo puede estimar un valor con mucha incertidumbre, ya que el factor
1687 de equilibrio F afecta los resultados.

1688 Entre los principales factores a tener en cuenta en este proceso de calibración, se puede
1689 mencionar que es primordial tener procesos estandarizados en cada una de las partes. Por
1690 ejemplo, los detectores ya tienen un "fondo" o una densidad de huellas original (ρ_{fondo}), que
1691 debe ser considerada en el cálculo final. Esto puede variar en cada lote de fabricación, por lo
1692 que se deben realizar pruebas periódicas al respecto. Otro factor importante es el proceso
1693 de grabado, que debe realizarse siempre de la misma forma, siguiendo rigurosamente los

1694 parámetros establecidos. Una variación en la temperatura o en el tiempo predeterminado
1695 puede ocasionar una disminución o un aumento en el número de huellas, lo que alteraría el
1696 resultado. Finalmente, el método de medición o lectura de los detectores depende de si el
1697 grabado se realizó en las condiciones establecidas. Es conveniente utilizar métodos de lectura
1698 automatizados para evitar errores por subjetividad, efectos de iluminación, etc. Además, se
1699 recomienda repetir el proceso de lectura para disminuir la incertidumbre en las medidas.

1700 En general, este factor de calibración (FC) se puede obtener experimentalmente al exponer
1701 los detectores a diferente niveles de exposición (concentración promedio durante un cierto
1702 período de tiempo, C_{rt}) y luego contar la densidad de huellas (ρ) en cada caso. Al graficar
1703 niveles de exposición vs. densidad de huellas, se obtendrá una tendencia lineal, la cual la
1704 pendiente representa el factor de calibración. La ecuación definida para este factor se muestra
1705 a continuación:

$$FC = \frac{\rho - \rho_{fondo}}{C_{rt}} \quad (2.13)$$

1706 Las densidades se expresan en huellas·cm⁻² y la concentración en Bq·m⁻³. Sin embargo,
1707 se debería tener un factor de calibración para cada uno de la progenie del radón y del torón, lo
1708 cual requeriría de una instrumentación de la cual no se dispone. En el laboratorio de Huellas
1709 Nucleares de la PUCP se cuenta con una cámara de calibración y se han realizado las pruebas
1710 necesarias [124].

1711 **Capítulo 3**

1712 **Estudio de la respuesta de un detector LR-115 en modo desnudo**¹ 1713 **y en cámara de difusión**

1714 Los detectores pasivos mencionados anteriormente (SSNTDs) son utilizados generalmente
1715 para mediciones pasivas integradas que pueden ser en interiores, exteriores, suelo, agua, entre
1716 otras. Las mediciones son establecidas por un tiempo relativamente largo, que puede ser
1717 entre 8 a 10 semanas, que considera las variaciones en la concentración diarias durante ese
1718 periodo.

1719 Para realizar monitoreos de radón a gran escala, se suelen utilizar cámaras de difusión
1720 [96]. Aunque históricamente se emplearon los detectores LR-115 en modo desnudo para
1721 este propósito, su uso en la actualidad no está tan extendido debido a que podría registrar
1722 también las huellas producidas por las partículas alfa emitidas por el torón y la progenie
1723 de ambos radioisótopos [128]. Es importante tener en cuenta que mientras los detectores
1724 en modo desnudo están expuestos directamente al medio ambiente, los que se encuentran
1725 dentro de una cámara de difusión solo registrarán el radón y la progenie que se genere desde
1726 el interior. La respuesta entre ambos modos de uso puede diferir debido a diversos factores:

- 1727 • En el modo desnudo, el detector está expuesto de forma continua a la radiación alfa
1728 natural ambiental presente en su entorno, mientras que en una cámara de difusión,
1729 este efectos pueden estudiarse mejor con condiciones controladas como humedad,
1730 temperatura, entre otros, así como discriminar la contribución del torón, ya que permite
1731 obtener mediciones más exactas.
- 1732 • La respuesta específica del detector LR-115 en modo desnudo es diferente, ya que está
1733 expuesto a partículas alfa con la energía suficiente para registrar su huella, independi-
1734 entemente de su origen. En cambio, en una cámara de difusión, se puede diseñar el
1735 monitor para filtrar el registro de partículas alfa provenientes de ciertos radionúclidos.

- 1736 • En el modo desnudo, el detector tiene una mayor probabilidad de registrar partículas
1737 alfa presentes en el ambiente, a diferencia de la cámara de difusión, donde debido a las
1738 condiciones de la cámara, no se capturarán todas las partículas generadas.
- 1739 • Las condiciones ambientales tienen una mayor influencia en el modo desnudo, como
1740 los cambios de temperatura, la ventilación y la cantidad de partículas en suspensión,
1741 parámetros que pueden minimizarse utilizando una cámara de difusión.

1742 Si bien los detectores SSNTD en cámaras de difusión pueden proporcionar resultados
1743 más precisos, el uso de un detector LR-115 en modo desnudo puede permitir una evaluación
1744 general inicial de la situación, como una exploración de bajo costo y sin utilizar demasiados
1745 recursos logísticos, que servirá como base para mediciones más precisas en los lugares que
1746 arrojaron valores altos de concentración, requiriendo un mayor estudio y análisis por seguridad
1747 radiológica. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la calibración experimental
1748 de estos detectores es compleja, por lo que primero se investigará la verdadera respuesta de
1749 estos detectores en función del método de colocación utilizado.

1750 En este caso, las mediciones se realizaron con detectores desnudos sobre un soporte
1751 y colocados directamente sobre la pared. Para poder estudiar la respuesta del detector
1752 LR-115 expuesto de esta manera, se han utilizado técnicas de Monte Carlo para simular
1753 la difusión en el aire del radón/torón exhalado desde una pared [137, 139], la formación y
1754 descomposición de diferentes productos de decaimiento radiactivos durante el transporte,
1755 sus distribuciones depositadas y en el aire, y así estimar la respuesta de un detector LR-115
1756 colocado en la pared. Se han determinado las distribuciones espaciales de las desintegraciones
1757 de radionúclidos, y las sensibilidades totales y parciales del detector al radón/torón y su
1758 progenie. Los resultados de las simulaciones se validaron numéricamente y algunos de ellos
1759 se probaron experimentalmente en una cámara de radón.

1760 **3.1 Uso de un detector LR-115 en modo desnudo colocado sobre una** 1761 **pared: estimación de lo que mide realmente**

1762 Los dispositivos utilizados para calcular la dosis de inhalación debida al radón y torón en
1763 interiores incluyen combinaciones de detectores desnudos y cámaras dobles de difusión
1764 (twin chambers) con filtros o membranas que permiten discriminar el radón y su progenie
1765 según sus energías [132, 7]. Para monitoreos a gran escala, la forma habitual de evaluar el
1766 riesgo radiológico en interiores consiste en medir únicamente el radón, sin tener en cuenta la
1767 contribución del torón y su descendencia. Se infiere un factor de equilibrio típico, se calculan
1768 las dosis y/o se establecen niveles de referencia para tomar medidas correctivas.

1769 Históricamente, los detectores desnudos de huellas nucleares, como el LR-115, se utiliza-
1770 ban con frecuencia en este tipo de estudios y aún se usan en la actualidad, aunque en menor
1771 medida. El detector en modo desnudo se coloca en la superficie externa de una cámara de
1772 difusión o en soportes plásticos ON-OFF comercializados por la firma Kodalpha. En estos
1773 casos, el dispositivo se coloca en el interior de la habitación, a una distancia mínima de 10
1774 cm de cualquier pared, techo o suelo. La principal desventaja de esta configuración es que
1775 estos monitores podrían perderse, ser movidos o sufrir alteraciones durante la limpieza, por
1776 ejemplo, si se abren o si se modifican las condiciones circundantes.

1777 Es importante tener en cuenta que un detector desnudo registra todas las partículas alfa
1778 emitidas por el radón, torón y su progenie presentes en el volumen efectivo (volumen frente al
1779 detector en el que existe una probabilidad no nula de detección de partículas alfa) del detector,
1780 a diferencia de las cámaras de difusión, que solo registran las partículas alfa emitidas dentro
1781 de la cámara y que cumplen con las condiciones de registro en cuanto a la ventana de energía
1782 apropiada y ángulo crítico. Las partículas alfa provenientes del radón, torón o su progenie
1783 con energías superiores al rango de energías detectables por el LR-115 no se registrarán. Sin
1784 embargo, debido al efecto de plate-out de la progenie del radón/torón en la superficie del
1785 detector, su concentración promedio en los volúmenes efectivos correspondientes puede ser
1786 menor que en las regiones más alejadas del detector. Esto podría plantear problemas tanto
1787 para la calibración del detector como para su uso en mediciones de la concentración total de
1788 emisores alfa en el aire, ya que los resultados de las mediciones podrían no ser representativos
1789 del espacio ocupado por las personas. La progenie, ya sea del radón o del torón, se depositan
1790 en las superficies de las paredes (que las exhalan), en aerosoles o partículas suspendidas,
1791 o en cualquier otra superficie presente en la habitación, como muebles u objetos [29]. Por
1792 lo tanto, se puede afirmar que sus concentraciones en el aire no están en equilibrio con las
1793 concentraciones de radón y torón.

1794 Tanto en términos generales, se asume lo siguiente:

- 1795 a. La concentración de torón disminuye de manera exponencial a medida que aumenta
1796 la distancia a la pared desde la cual se exhala siguiendo la ley de atenuación de
1797 Lambert-Beer [52].
- 1798 b. La concentración de radón se mantiene prácticamente constante con respecto a la
1799 distancia a la pared.
- 1800 c. A menor distancia de la pared, las concentraciones de las progenies de radón y torón
1801 también disminuyen [14].

1802 Por lo tanto, se puede afirmar que un detector en modo desnudo colocado sobre la pared
1803 registrará principalmente partículas alfa provenientes de los átomos de de radón, por un
1804 intervalo de tiempo después de la cual la concentración se modifica según la ley de Fick.

1805 Sin embargo, las concentraciones de núcleos radiactivos en sus respectivos volúmenes
1806 efectivos no necesariamente se verían significativamente afectadas por las variaciones espa-
1807 ciales menc³⁴adas anteriormente. En este caso, el detector en modo desnudo actuaría como
1808 un monitor **de las concentraciones de radón en el aire**, midiendo las emisiones alfa totales.
1809 Esto es válido tanto si la pared emite radón y/o torón como si no lo hace. Es importante
1810 destacar que colocar el detector LR-115 en modo desnudo sobre una pared es una buena
1811 opción para una larga duración, ya que se reduce la probabilidad de pérdida o manipulación
1812 debido a acciones involuntarias de los habitantes de la casa.

1813 La idea principal de este capítulo es determinar la influencia sobre los resultados cuando
1814 no se utiliza una cámara de difusión y así determinar la bondad del sistema de detección
1815 utilizando ⁸detectores desnudos con aislamiento parcial. Para ello, se ha desarrollado un
1816 programa **basado en métodos de Monte Carlo** que simula **el transporte** difusivo **de** los átomos
1817 de radón y torón que son exhalados por una pared, así como el de su progenie, teniendo en
1818 cuenta sus decaimientos durante el movimiento. Se determinaron las distribuciones espaciales
1819 de los decaimientos para cada producto de decaimiento (tanto en estados depositados en el
1820 aire como en las superficies) y la respuesta del detector en términos de las sensibilidades
1821 parciales de cada progenie. Los resulta¹dos obtenidos permiten evaluar la influencia del efecto
1822 de deposición en las concentraciones **de los diferentes productos de decaimiento** cerca de la
1823 **superficie del detector**, especialmente en sus volúmenes efectivos.

1824 Entonces, podemos plantearnos la siguiente pregunta: ¿Qué es lo que mide realmente un
1825 detector desnudo de LR-115 colocado sobre la pared en un ambiente con poca ventilación,
1826 como una habitación cerrada? La respuesta en este caso menos complejo sería la siguiente:
1827 el detector mide las concentraciones **de radón en el aire ambiente** a través **de la detección de**
1828 las **partículas alfa** emitidas por el radón presente en el entorno.

1829 **3.2 Procesos de calibración y mediciones con detectores LR-115 en modo** 1830 **desnudo**

1831 El radón y su progenie, cuando se inhalan, administran una dosis significativa de radiación
1832 alfa al tejido bronquial que se ha implicado en el cáncer radiogénico del pulmón.

1833 Para un detector en modo desnudo (D) expuesto al radón y su progenie, las trazas se
1834 forman a partir de la mezcla no equilibrada de los tres productos de decaimiento emisoras de
1835 partículas alfa durante la exposición.

1836 Considerando que C_i ($i = 0, 1, 3$ para radón y su progenie) es la concentración ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
 1837 del producto de decaimiento i y $\rho_{D,i}$ es la densidad de trazas atribuible al producto de de-
 1838 caimiento i para un tiempo de exposición t_D . El factor de calibración del detector descubierto
 1839 ($k_{D,i}$) para cada una de los radioisótopos alfa emisores se puede definir a través de la siguiente
 1840 relación:

$$k_{D,i} = \frac{\rho_{D,i}}{C_i t_D} \quad (3.1)$$

1841 En un detector LR-115 descubierto la sensibilidad parcial de detección es la misma
 1842 para todos los emisores alfa independientemente de su distribución espacial, por lo tanto se
 1843 cumple la igualdad, $k_{D,1} = k_{D,2} = k_{D,3} = k_D$. Este hecho fue demostrado para el caso del
 1844 torón exhalado desde una pared y registrado por un detector LR-115 colocado sobre la pared
 1845 con la superficie sensible dirigida hacia el aire. El número de desintegraciones de los átomos
 1846 exhalados disminuye bruscamente con la distancia a la pared debido a la corta vida media del
 1847 torón, en particular si los átomos están uniformemente distribuidos su sensibilidad parcial es
 1848 la misma.

1849 En consecuencia, si la densidad de trazas total observada (incluyendo todas las productos
 1850 de decaimiento radiactivas) es $\rho_D = \sum \rho_{D,i}$, entonces:

$$k_D = \frac{\rho_D}{\sum C_i t_D} \quad (3.2)$$

1851 donde $\sum C_i = C_0 + C_1 + C_3 = C_0 \left(1 + \frac{C_1}{C_0} + \frac{C_3}{C_0}\right)$ y C_0 , C_1 y C_3 son las concentraciones de
 1852 radón, ^{218}Po y ^{214}Po , respectivamente.

1853 El término factor de equilibrio indirecto fue utilizado por primera vez por Nikezic en el
 1854 2004 [92], con el objetivo de establecer una relación entre la concentración de una progenie
 1855 radiactiva específica y la concentración de radón en un entorno determinado. Debido a
 1856 las diferentes vidas medias de la progenie, las tasas de deposición y otras condiciones
 1857 ambientales, se producen desequilibrios temporales entre las concentraciones de radón y
 1858 su progenie. El factor de equilibrio indirecto (proxy) es una muy buena aproximación para
 1859 representar lo que realmente sucede en cuanto al equilibrio de la cadena de desintegración,
 1860 debido a la relación que se tiene entre las concentraciones de radón y su progenie en un
 1861 determinado ambiente, que es un factor crucial para evaluar el riesgo radiológico en un recinto
 1862 determinado. Dado que este factor de equilibrio indirecto es afectado por las condiciones
 1863 ambientales y del lugar de monitoreo, es utilizado como una medida indirecta del equilibrio
 1864 de la progenie de radón.

1865 A diferencia del factor de equilibrio que indica la relación ideal entre las concentraciones
 1866 de radón y su progenie cuando alcanzan el equilibrio, el factor de equilibrio indirecto puede

1867 estimar el factor de equilibrio esperado. El equilibrio total no se alcanza siempre, puede
 1868 medirse indirectamente el equilibrio de la progenie del radón utilizando una relación entre la
 1869 concentración y una progenie específica representativa del equilibrio general. El equilibrio
 1870 proxi está definido como:

$$F_P = \frac{C_1}{C_0} + \frac{C_3}{C_0} \quad (3.3)$$

1871 Usando este factor, la densidad de trazas se puede expresar como:

$$\rho_D = \frac{\dot{\rho}_D}{t_D} = k_D C_0 (1 + F_P) \quad (3.4)$$

1872 A partir de las tasas de densidades de trazas en los detectores expuestos en modo
 1873 descubierto ($\dot{\rho}_D$) y en la cámara de difusión (ρ_{CD}) y las sensibilidades totales para el detector
 1874 en la cámara de difusión (k_{CD}) y parcial para el detector descubierto (k_D), se puede estimar
 1875 el factor de equilibrio indirecto como:

$$F_P = \frac{k_{CD} \dot{\rho}_D}{k_D \rho_{CD}} - 1 \quad (3.5)$$

1876 La concentración de radón también se puede estimar a partir de la lectura del detector
 1877 expuesto en modo desnudo:

$$C_0 = \frac{\dot{\rho}_D}{FC} \quad (3.6)$$

1878 donde el factor de calibración se calcula como:

$$FC = k_D (1 + F_P) \quad (3.7)$$

1879 Es decir, el coeficiente de calibración no solo depende de la concentración de radón sino
 1880 las fracciones de actividad de la progenie en el aire, ^{218}Po y ^{214}Bi (^{214}Po), de las como
 1881 la relación entre las concentraciones de productos de decaimiento individuales C_i ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
 1882 y la del radón C_0 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).

1883 Teóricamente, el factor de equilibrio indirecto está comprendido entre 0 y 2, de manera
 1884 que la tasa neta de densidad de trazas (sin considerar el fondo) registrada en un detector
 1885 desnudo debería estar comprendida en el intervalo $[C_0 k_D, 3C_0 k_D]$ si solo contribuyen a la
 1886 densidad de trazas el radón y su progenie en estado aéreo. C_0 puede obtenerse a partir de
 1887 mediciones separadas (por ejemplo, por medio de una cámara de difusión), mientras que k_D se
 1888 puede estimar por simulaciones de Monte Carlo, con un sencillo procedimiento experimental
 1889 (descrito más adelante) basado en la exposición de láminas pequeñas de detectores LR-115
 1890 colocadas a diferentes distancias de una fuente plana de ^{241}Am de área mayor que el área

1891 del detector ($A_f > 5A_d$), o a partir de una calibración experimental en una cámara de radón
 1892 donde son conocidas las concentraciones de radón y su progenie.

1893 Asumiendo la dependencia entre F_p y el factor de equilibrio F [15, 166], para el valor
 1894 típico de F en interiores que podemos considerar de 0.4 [147], y considerando la incertidum-
 1895 bre asociada, los valores de F_p estarían comprendidos entre 1 y 1.6 (Figura 3.1), e igual
 1896 a 1.091 según el mejor ajuste polinómico de tercer orden $F = -0.02453 + 0.20522F_p +$
 1897 $0.17528F_p^2 - 0.00621F_p^3$ [166]. De esa manera, los valores de tasa de densidad de trazas
 1898 comprendidas en el intervalo $[2C_0k_D, 2.6C_0k_D]$ corresponden a $F = 0.4$.

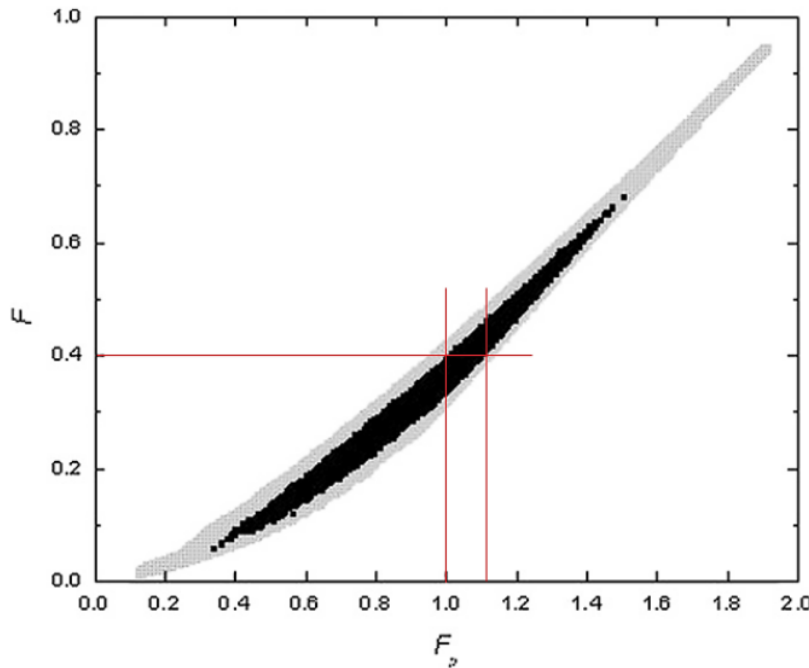


Figura 3.1. Relación entre el factor de equilibrio esperado y el indirecto para el radón [167].

1899 Si $\rho_D > 3C_0k_D$, entonces el torón y su progenie contribuyen significativamente a la tasa
 1900 de densidad de trazas, lo que implicaría que para estimar la dosis de inhalación se debería
 1901 incluir también a la progenie del torón. El hecho que $\rho_D \leq 3C_0k_D$ no necesariamente implica
 1902 ausencia de torón y su progenie, pero como primera aproximación se puede considerar su
 1903 aporte a la tasa de densidad de trazas poco significativo.

1904 Dado que en la estimación de la dosis de inhalación ese podría despreciar la contribución
 1905 del torón y su progenie en muchas viviendas, es posible realizar una medición utilizando
 1906 únicamente un detector de radón contenido dentro de una cámara de difusión y detectores

1907 LR-115 en modo desnudo para medir el alfa total en el aire, colocados en una pared interna de
1908 la vivienda donde se minimicen elementos perturbadores como corrientes de aire, esquinas,
1909 objetos o superficies cercanas. Es decir, se busca que las condiciones se aproximen lo más
1910 posible a las de una vivienda cerrada. Esta aproximación podría considerarse como un
1911 monitoreo preliminar a gran o mediana escala, con la ventaja de requerir menos recursos y
1912 tiempo.

1913 3.2.1 Uso de detectores en modo desnudo y cámaras de difusión para medir la con- 1914 centración de radón

1915 El uso de varios dispositivos pasivos para medir simultáneamente radón, torón y su progenie
1916 adherida y no adherida, como cámaras dobles (twin chambers), y sensores de medición
1917 directa de las progenies del radón y torón (DRPS/DTPS) con y sin malla metálica (para
1918 discriminar las fracciones adherida y no adherida de las progenies), se emplearían solamente
1919 en aquellas viviendas cuyos resultados preliminares lo ameritan.

1920 En definitiva, la respuesta del detector descubierto depende tanto de la concentración de
1921 radón como del factor de equilibrio. En estudios sobre estimaciones del factor de equilibrio
1922 F en cámara de radón, se demostró que su valor depende de las características de la cámara,
1923 como la geometría, contenido de aerosoles, condiciones ambientales, y de la ubicación del
1924 detector al interior de la cámara durante el tiempo de exposición. El factor de calibración
1925 determinado sería válido solamente para las condiciones particulares de exposición del
1926 detector, las cuales en general van a diferir de las condiciones reales (monitoreo en viviendas),
1927 donde puede haber partículas de polvo suspendidas y depositadas sobre el detector, vapor
1928 de agua condensada en la superficie del detector, y otros factores adicionales. Además, la
1929 relación entre las concentraciones de la progenie y la concentración de radón cambia con
1930 las condiciones meteorológicas y otras condiciones ambientales como tasa de ventilación.
1931 De esa manera, incluso si la calibración se ha realizado en una atmósfera con un factor de
1932 equilibrio conocido, los resultados obtenidos pueden ser incorrectos, ya que no se puede
1933 garantizar el mismo factor de equilibrio durante las irradiaciones reales. Otro problema en
1934 las mediciones de radón con detectores desnudos es la presencia del torón y su progenie en el
1935 aire. Aunque la concentración del torón es generalmente pequeña, en algunas circunstancias
1936 puede ser incluso mayor que la del radón.

1937 Idealmente, para la calibración de detectores LR-115 en modo desnudo se debe usar
1938 una cámara de radón que posea un generador de aerosoles. Así, al reducir la deposición
1939 de la progenie del radón en las paredes de la cámara se obtendrán valores altos de F; y al
1940 remover del aire los aerosoles y progenie del radón y el uso de un precipitador electrostático

1941 se obtendrán valores bajos de F. De esta manera, pueden monitorearse las concentraciones de
1942 radón y de su progenie durante la exposición de los detectores.

1943 Es necesario tener muy bien definido las condiciones bajo las cuales se realizan las
1944 mediciones con énfasis en la técnica y metodología a seguir, por ejemplo en la determinación
1945 de la dosis, o simplemente de la presencia de un alfa emisor en particular, qué es lo que se
1946 quiere medir y cuál es el propósito de las mediciones realizadas.

1947 En la literatura especializada es recurrente la referencia sobre la relación entre la inciden-
1948 cia del cáncer pulmonar y el radón. Al parecer, hay consenso en que para estimar las dosis lo
1949 que se debe medir es la concentración de radón y el factor de equilibrio. Aunque la dosis
1950 a los pulmones derivada de la exposición al radón se debe principalmente a la progenie en
1951 lugar del radón, muchos investigadores consideran que la concentración de radón está más
1952 relacionada con la dosis, que la concentración de su progenie. Para estos investigadores es
1953 apropiado medir las concentraciones de radón para evaluar el riesgo de cáncer pulmonar. Por
1954 lo tanto, si el objetivo es evaluar el riesgo, sería adecuado medir la concentración de radón a
1955 largo plazo y su variación temporal.

1956 Si bien la mayoría de monitoreos de radón realizados en diferentes partes del mundo
1957 usan cámaras de difusión (dispositivos cerrados) que pueden incluso discriminar el radón
1958 del torón (utilizando filtros o membranas semipermeables), se considera que la información
1959 brindada por los detectores desnudos, a pesar de las complicaciones que podrían presentar en
1960 su calibración, brinda una primera información muy importante que puede servir de base a
1961 monitoreos más completos.

1962 En los métodos de calibración de las cámaras de difusión también hay factores que
1963 influyen. Para esta configuración los factores de calibración dependen de las dimensiones
1964 de la cámara, tipo de detector, posición y orientación del detector, condiciones de revelado,
1965 alcance efectivo de las partículas alfa, respuesta angular y discriminación de energía de
1966 las partículas alfa, método de lectura de trazas, etc. Aunque todos estos parámetros se
1967 mantengan idénticos en las cámaras de calibración y las de medición, las diferencias en
1968 los parámetros ambientales como temperatura, presión, humedad relativa (que afectan la
1969 densidad del aire/alcance de partículas alfa), así como la distribución de campos eléctricos
1970 locales dentro y fuera de la cámara, pueden alterar significativamente los coeficientes de
1971 calibración determinados en condiciones controladas en una cámara de radón/torón. Las
1972 causas concretas son varias: cambia la fracción de átomos de ^{218}Po que se desintegran en el
1973 volumen de la cámara, cambian las propiedades filtrantes de las membranas semipermeables,
1974 etc.

1975 Independientemente del modo en que se utilicen los detectores (descubierto o encerrado),
1976 cuando se calibran los diferentes dispositivos se debe tener en cuenta que la respuesta del

1977 detector puede ser diferente para diferentes lotes de fabricación. Hay que añadir a las fuentes
1978 de errores la existencia de procesos incontrolables como el revelado y la subjetividad en el
1979 procedimiento de conteo de trazas.

1980 Las condiciones de revelado determinan el espesor residual del detector, el cual depende
1981 fuertemente de la sensibilidad del LR-115. Se ha demostrado que detectores de un mismo
1982 lote revelados simultáneamente presentan diferentes espesores residuales. En consecuencia,
1983 se debe determinar este parámetro del detector para realizar las correcciones pertinentes.
1984 La mayoría de los métodos empleados para determinar el espesor residual requieren de
1985 mediciones independientes. Más adelante, describiremos un nuevo procedimiento desar-
1986 rollado en el marco de esta tesis, donde se relaciona el espesor residual del detector con
1987 parámetros geométricos de las trazas reveladas. Así pues, no se necesita de mediciones
1988 separadas, ya que a partir del análisis y conteo de trazas registradas se puede estimar ese
1989 espesor. La estandarización plena del método de trazas nucleares aplicado en mediciones de
1990 radón todavía se puede mejorar y se requieren más estudios al respecto.

1991 Aparentemente, la medición con un detector desnudo ofrece información sobre la con-
1992 centración de la progenie del radón en estado aéreo, ¹⁰ cual es importante para el cálculo
1993 de la dosis de inhalación. La dosis de inhalación está directamente relacionada con la
1994 concentración de la progenie en estado aéreo, principalmente la fracción no adherida a
1995 aerosoles o las adheridas a partículas suspendidas muy pequeñas (diámetros menores que
1996 $2.5 \mu\text{m}$ o fracción $\text{PM}_{0.25}$). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la colocación del
1997 detector en el sitio de medición afecta la distribución de los átomos debido al efecto plate-out.
1998 Posiblemente hay mayor perturbación de la distribución espacial de la progenie cuando el
1999 detector se coloca directamente sobre una pared en comparación con uno que esté colgado
2000 desde el techo, sin base, ya que en el primer caso hay mayor superficie disponible para el
2001 plate-out de la progenie. Una confirmación de esta hipótesis es posible con la realización de
2002 nuevos estudios teóricos y/o experimentales

2003 3.3 Simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y 2004 torón exhalados de una pared y su progenie recién creada

2005 A fin de estudiar el proceso de detección para poder estimar la respuesta de un detector
2006 desnudo colocado sobre una construcción de superficie continua, para delimitar un espacio,
2007 como una habitación por ejemplo, se realizó una simulación utilizando métodos Monte Carlo
2008 considerando lo siguiente:

- 2009 • Exhalación del radón y torón de una superficie continua.

- 2010 • Se asume que el transporte del gas en el aire se caracteriza por una difusión browniana
- 2011 influenciada por el decaimiento de los gases radioactivos y sus progenies de vida corta.
- 2012 • Distribuciones en el aire.
- 2013 • Deposición de la progenie aérea sobre una superficie continua.
- 2014 • Las sensibilidades parciales y totales del detector LR-115 con respecto a los diferentes
- 2015 radionúclidos en el aire.

2016 Los materiales de construcción son una fuente potencial de exhalación de radón y torón en
 2017 el interior de los edificios. Algunos materiales empleados en la construcción de muros como
 2018 el hormigón y los ladrillos contienen pequeñas cantidades de ^{226}Ra y ^{224}Ra (los precursores
 2019 del radón y torón, respectivamente). En torón se ha encontrado presente en minas de yeso
 2020 (enriquecidas de ^{224}Ra) por lo que es importante conocer el aporte que pueden realizar al ser
 2021 utilizados como materia prima de los materiales de construcción.

2022 La contribución de los materiales de construcción a los niveles de radón y torón en
 2023 un edificio suele ser mucho menor en comparación con la entrada de estos gases desde
 2024 el suelo. El transporte del gas radón en el aire sigue un proceso de difusión browniana,
 2025 donde las partículas de radón y sus productos de decaimiento se dispersan y distribuyen de
 2026 manera aleatoria debido a la agitación térmica y las colisiones con las moléculas de aire. El
 2027 decaimiento de los productos de decaimiento también afecta el transporte y la distribución
 2028 de estas partículas radiactivas.

2029 En la Figura 3.2 se muestra un esquema de la pared que exhala radón, torón y un detector
 2030 LR-115 colocado sobre la pared. La cara activa del detector está expuesta al medio ambiente.

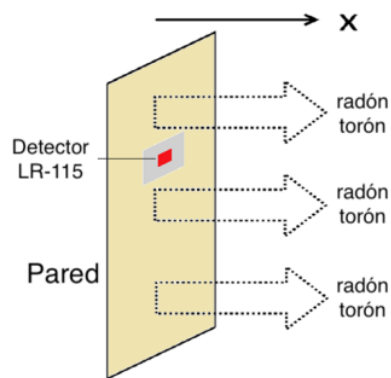
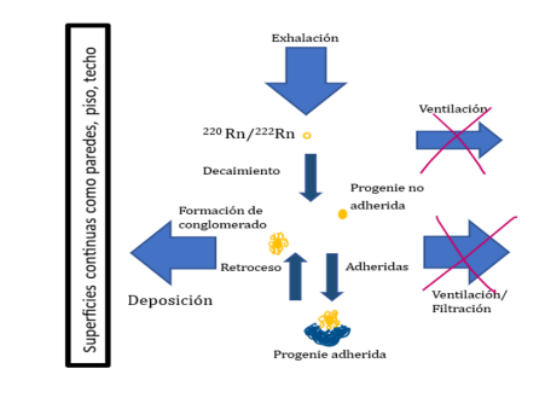


Figura 3.2. Proceso de exhalación del radón y torón de una pared frente a un detector en modo desnudo.

2031 La Figura 3.3 muestra el comportamiento del radón, torón y su progenie en el aire en el
 2032 interior de una habitación. Luego del decaimiento del radón y del torón, la mayoría de la
 2033 progenie se cargan positivamente y por la influencia de las fuerzas electrostáticas de Coulomb,
 2034 capturan moléculas de agua, formando clusters o grupos. El movimiento rápido que tienen
 2035 en el aire hace que algunos se adhieran a los aerosoles ambientales, en las superficies de
 2036 objetos, en la pared, el techo o el piso. Podemos indicar entonces que la progenie se pueden
 2037 clasificar en dos grupos: fracciones adheridas y fracciones no adheridas. La progenie en el
 2038 aire debido a su gran velocidad de difusión se deposita en cualquier superficie disponible.
 2039 Incluso la progenie adherida al particulado podría depositarse también en las superficies
 2040 como se muestra en la Figura 3.4. Antes que los átomos de ^{216}Po sean capturados por los
 2041 aerosoles ambientales, se descomponen en átomos de ^{212}Pb .



3 Figura 3.3. Comportamiento del radón, torón y su progenie en el aire al interior de un recinto.

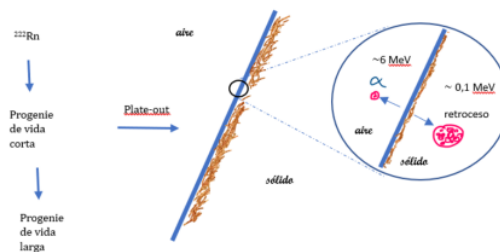


Figura 3.4. El efecto plate-out o deposición en las superficies, es seguido por el retroceso de las partículas alfa que pueden producir que la progenie de vida larga se incruste en la superficie. El rango de retroceso de los núcleos para el vidrio es de 50 nm aproximadamente.

2042 En la Figura 3.5 se muestra el mecanismo de deposición y de desprendimiento de la
 2043 progenie del radón cerca a una pared que exhala radón. La fracción aérea está en el recuadro
 2044 izquierdo y la fracción depositada en el recuadro derecho. El proceso de desprendimiento
 2045 del ^{214}Pb de la superficie después de la desintegración alfa del ^{218}Po depositado ocurre con
 2046 una probabilidad aproximada del 50%.

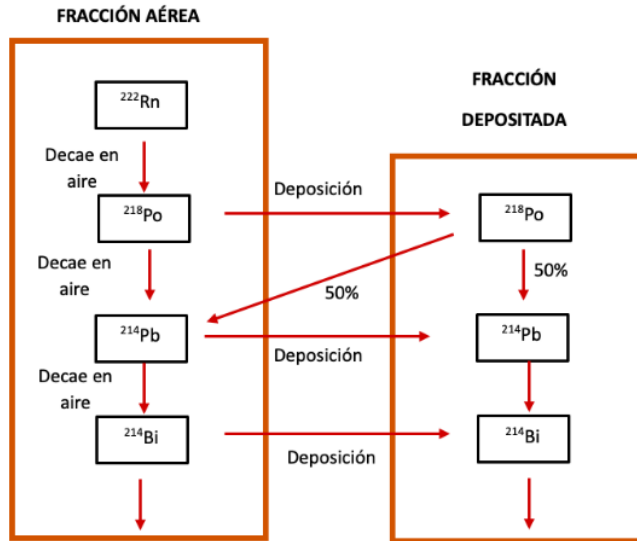


Figura 3.5. Comportamiento de la progenie de radón cerca de una pared que exhala radón.

2047 De manera similar se muestra el esquema de torón en la Figura 3.6. Estos procesos serán
 2048 utilizados en las simulaciones.

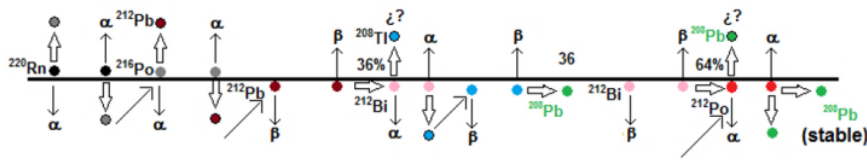


Figura 3.6. Esquema de la generación de la progenie del torón cerca de una pared que exhala torón.

2049 Se realizó la simulación para la difusión de las partículas teniendo en cuenta mecanismos
 2050 de producción y deposición como se muestra en las Figuras 3.5 y 3.6. Cabe señalar que
 2051 no se han tomado en cuenta los efectos de la pintura o recubrimientos. Para predecir el

2052 transporte de radón o torón y su progenie, así como su descomposición y eventual registro
 2053 de las partículas alfa emitidas, se desarrolló un procedimiento experimental para seguir la
 2054 difusión browniana de átomos radiactivos inicialmente en la superficie de la pared (solo
 2055 radón y torón). El procedimiento permite el registro de las partículas alfa emitidas, teniendo
 2056 en cuenta:

- 2057 a. La ubicación de cada átomo en función del tiempo,
- 2058 b. el momento en que se ha desintegrado cualquier átomo,
- 2059 c. la posición de desintegración
- 2060 d. y el seguimiento de la partícula alfa emitida y su evaluación de su posible registro por
 2061 el detector LR-115.

2062 Se utiliza un código de métodos Monte Carlo basado en la ecuación estocástica de tipo
 2063 Langevin (LE) para generar distribuciones de trayectorias brownianas de átomos de radón y
 2064 torón exhalados desde la pared hacia el aire circundante. Se consideró la descomposición
 2065 del radón y su progenie durante su movimiento browniano. La ecuación de movimiento
 2066 browniano unidimensional de una partícula en descomposición en ausencia fuerza externa se
 2067 puede expresar como [138]:

$$x(t + \Delta t) = [x(t) + N_j(0, 1)\sqrt{2D\Delta t}]\epsilon_j \quad (3.8)$$

2068 Aunque la distancia que viaja en el j^{avo} intervalo de tiempo (Δt), dependa del coeficiente
 2069 de difusión D y de la distribución unitaria normalizada $N_j(0,1)$, que determina la dirección
 2070 y el alcance del desplazamiento en el periodo de tiempo $[t, t+dt]$, la probabilidad que este
 2071 desplazamiento se produzca está controlada por la variable aleatoria de Bernoulli ϵ_j , que
 2072 determinará si la partícula sobrevive o no en un intervalo de tiempo Δt .

2073 3.3.1 Simulación del radón y del torón exhalado por una superficie

2074 En la Figura 3.7 se presenta un esquema del arreglo utilizado para la simulación, donde l y a
 2075 corresponden al largo y ancho del soporte del detector, r_d es el radio del detector y r_c es el
 2076 radio de la superficie circular de donde se muestrean las posiciones de los átomos de radón o
 2077 torón que son exhalados.

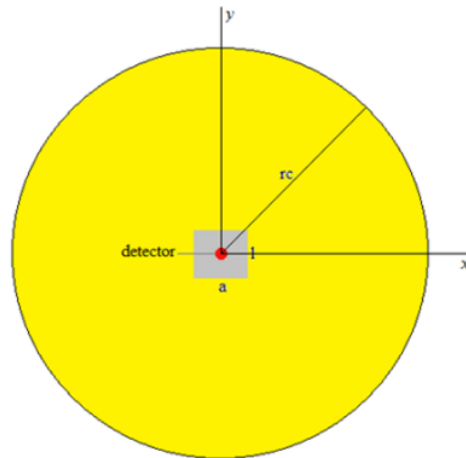


Figura 3.7. Esquema del arreglo de un detector de LR-115 (en rojo) fijado a un soporte sobre la pared (en plomo). Las posiciones de las cuales el radón y el torón se exhalan son obtenidas del área en amarillo.

2078 Un átomo de radón o torón es generado aleatoriamente en cualquier posición perteneciente
 2079 al disco amarillo (superficie a la que denominaremos “superficie de exhalación”), en la
 2080 posición $(x_0, y_0, 0)$, que será considerado el punto de inicio en la Ecuación 3.8 para la
 2081 difusión del átomo exhalado.

2082 Para determinar las coordenadas aleatorias del radio y del punto de exhalación se consid-
 2083 era:

$$\begin{aligned} r &= r_c \sqrt{\xi_1} \\ x_0 &= r_i \cos(2\pi\xi_2) \\ y_0 &= r_i \sin(2\pi\xi_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

2084 donde ξ_i son los números aleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1.

2085

2086 La simulación se realiza mediante un programa que tiene los siguientes datos de entrada:

2087 1. Parámetros geométricos del sistema de medición (en cm):

2088 (a) Dimensiones del soporte del detector: largo y ancho (l, a)

2089 (b) Radio del detector (r_d)

2090 (c) Radio del círculo de la superficie que exhala (r_c) desde la cual se consideran las
 2091 posiciones de emisión de los átomos de radón o torón.

2092 2. Parámetros para el registro de partículas alfa

2093 (a) Ángulo crítico promedio (θ_c)

2094 (b) Energía mínima (E_{min})

2095 (c) Energía máxima (E_{max})

2096 3. Coeficiente de difusión D ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

2097 **1** En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros utilizados en simulación.

Tabla 3.1. Parámetros utilizados en la simulación.

l, a [cm]	r_d [cm]	r_c [cm]	θ_c [°]	E_{min} [MeV]	E_{max} [MeV]	D [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
2, 2	1	5	53	1.4	4.3	0.054

2098 **3.3.2 Simulación por métodos MonteCarlo para las trayectorias entre colisiones que**
2099 **caracterizan el movimiento Browniano**

2100 El procedimiento se inicia al seleccionar un paso de tiempo Δt , que debe ser mucho menor
2101 que la vida media del radionúclido en estudio. A continuación, la transformación de Box-
2102 Muller se emplea para obtener números aleatorios gaussianos de varianza igual a 1 y media
2103 igual a 0:

$$N_j(0, 1) = \sqrt{-2 \ln \xi_3} \cos(2\pi \xi_4) \quad (3.10)$$

2104 Para un valor inicial dado $x(0)$, una secuencia de puntos $x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x(n\Delta t)$
2105 se genera mediante el uso iterativo de la Ecuación 3.8 hasta que el tiempo transcurrido
2106 sea $t_e = n\Delta t \geq t_{rlt}$, donde n es el número de pasos, t_{rlt} es el tiempo aleatorio de vida
2107 $[-\tau \ln(1 - \xi_5)]$, y τ es el tiempo de vida media ($1/\lambda$). Si se considera una difusión isotrópica
2108 y movimiento browniano no correlacionado a lo largo de los ejes x, y, z , las coordenadas
2109 y y z del último punto se pueden determinar en forma similar a la coordenada x , usando la
2110 Ecuación 3.8.

2111 Si $z \geq 0$ en el punto final de un átomo, se considera que ese átomo se desintegró en el
2112 aire. Las coordenadas de ese punto representan el punto de partida de la emisión isotrópica
2113 de la partícula alfa emitida y, a su vez, el punto de partida de su descendiente cercano. En al
2114 caso contrario que $z < 0$, el átomo alcanza a la pared en las coordenadas (x_d, y_d, z_d) . Para un

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 74

2115 átomo de radón o torón, el tiempo en el que se traslada de la posición (x_0, y_0, z_0) a (x_d, y_d, z_d)
2116 se determina y el tiempo transcurrido es corregido.

2117 Si los átomos de radón y torón no se depositan en la pared, el punto (x_d, y_d, z_d) es la
2118 posición inicial para su movimiento de difusión en aire, repitiéndose los pasos de tiempo
2119 hasta la desintegración del átomo.

2120 Si el átomo es una progenie del radón o del torón y $z < 0$ en el punto final, este átomo
2121 se depositará en la pared en el punto (x_d, y_d, z_d) , decae allí y la simulación continua con la
2122 siguiente progenie en la cadena.

2123 **3.3.3 Seguimiento de las partículas alfa**

2124 Si el lugar desde donde la emisión de la partícula alfa ocurrió no cumple con las restricciones
2125 de energía y de ángulo crítico, es decir, no pertenece al volumen efectivo, entonces se genera
2126 una nueva posición para la exhalación desde la pared de radón o torón y se repite el proceso.
2127 En caso contrario, la probabilidad de registro se evalúa y se determina la sensibilidad parcial,
2128 de acuerdo a [124, 140].

1
2129 **3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento**
2130 **del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada**

2131 Seleccionar de forma adecuada el Δt puede ser un problema al plantear una simulación de
2132 difusión browniana para partículas radiactivas; ya que debe ser lo suficientemente pequeño
2133 para tener una buena precisión y lo mayor posible para reducir el tiempo de máquina. Es
2134 esa razón que se eligió τ/N para cada radionucleido. La influencia del valor de N en
2135 la distribución espacial de las desintegraciones del torón se muestra en la Figura 3.8. Se
2136 observa entonces que para $\Delta t = \tau/10000$ se obtuvieron los mejores resultados.

2137 La Figura 3.9 muestra una caminata aleatoria browniana simulada, obtenida mediante la
2138 solución iterativa de la Ecuación 3.8 para la coordenada z .

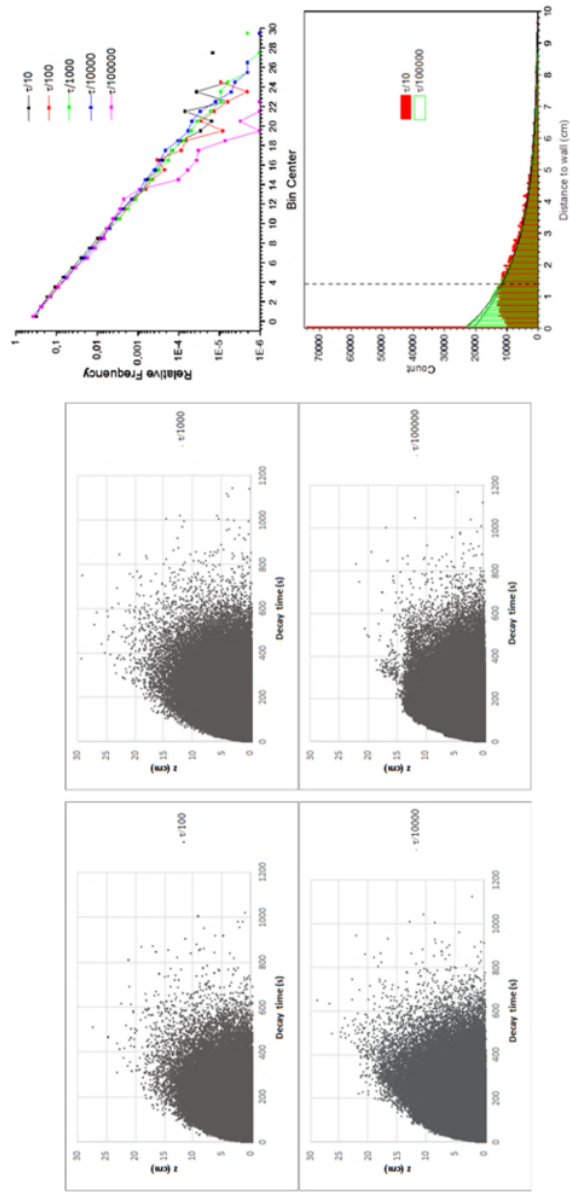


Figura 3.8. Comportamiento del movimiento de difusión para los átomos de torón exhalados de una pared, simulando caminos aleatorios para diversos valores de pasos.

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 76

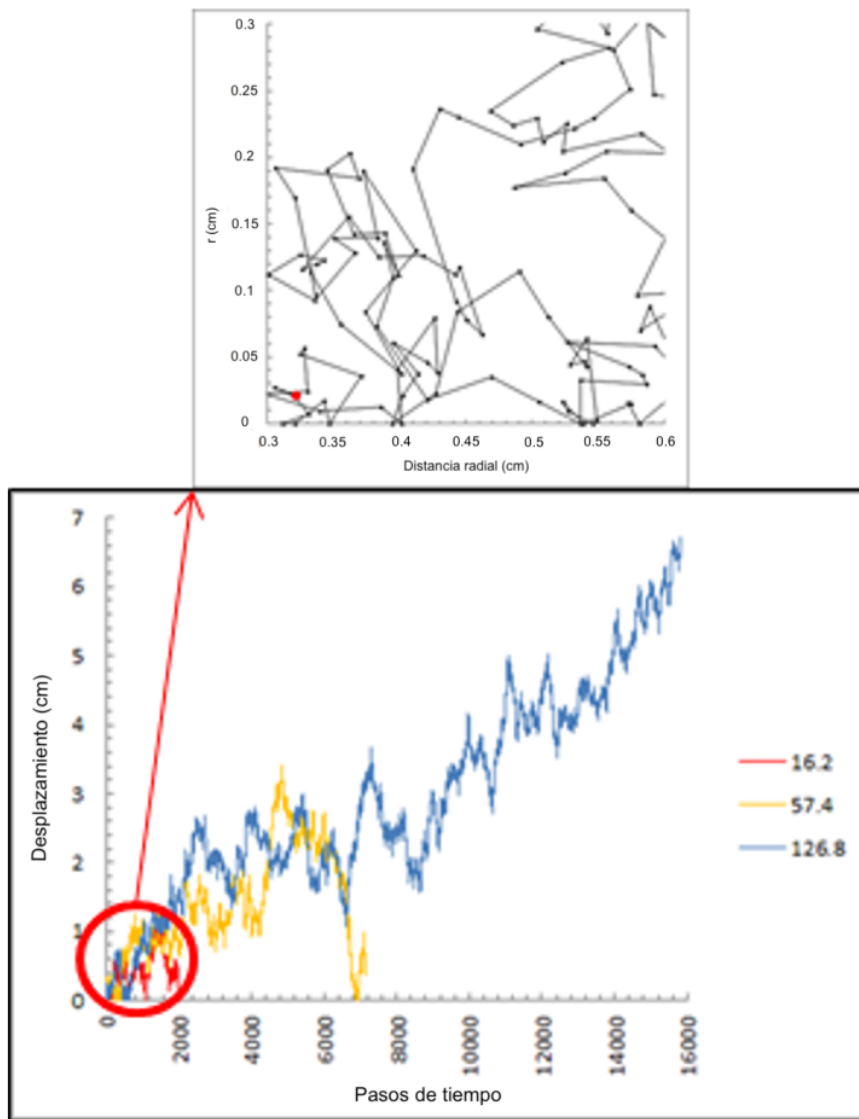


Figura 3.9. Simulación de Monte Carlo para la difusión browniana del torón en el aire considerando tres tiempos de decaimiento aleatorio generados.

2139 La figura corresponde a la simulación con 16 mil pasos, donde cada paso tiene una
2140 duración de $\Delta t = \tau / 10000$ s, de un átomo de torón para tres tiempos de vida aleatorios, según
2141 $-\tau \ln(1 - \xi_5)$. Los parámetros que caracterizan al radón son los siguientes:

3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 77

- 2142 • $D \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) = 0.054$
- 2143 • $\lambda \text{ (s}^{-1}) = 1.25 \times 10^{-2}$
- 2144 • $\tau \text{ (s)} = 80.21$
- 2145 • $\zeta = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \text{ (cm)} = 2.08$
- 2146 • $\sim 20T_{1/2} = 138629$

2147 Donde $\sim 20T_{1/2}$ es el número de pasos aproximado para que se desintegre. Como el
2148 radón tiene probabilidad de desintegración mucho más pequeña ($\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), y en
2149 consecuencia mucho mayor vida media ($\tau = 476781.9 \text{ s}$), en promedio puede llegar mucho
2150 más lejos ($\zeta = 160.5 \text{ cm}$) y aunque su paso temporal (48 s) es mucho mayor que el del torón,
2151 el número máximo aproximado de pasos temporales para que decaiga sería el mismo, al igual
2152 que para los demás productos de decaimiento.

2153 La intercepción del desplazamiento (ordenada de la Figura 3.9) con el "paso o intervalo
2154 de tiempo" (abscisa de la Figura 3.9) significa que una colisión del torón con la pared, puede
2155 ocurrir múltiples veces (parte superior de la Figura 3.9). Debido a la rugosidad natural de la
2156 pared, la simulación de colisión no considera la igualdad entre el ángulo de incidencia y el
2157 ángulo de rebote, dando así un enfoque más realista.

2158 En la Figura 3.10 se muestra la sección transversal del cilindro que contiene el volumen
2159 efectivo, donde se evalúa la probabilidad del registro de partículas alfa.

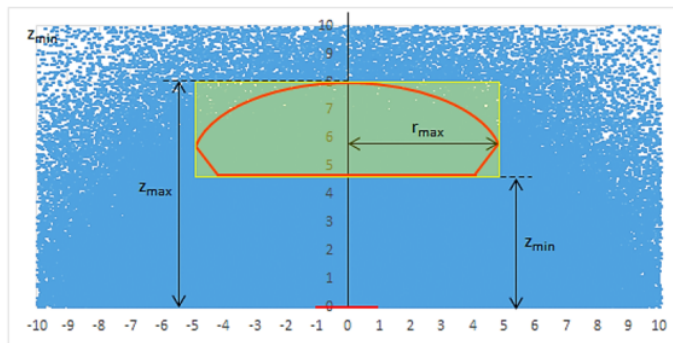


Figura 3.10. Sección transversal del volumen delimitado por la línea continua roja que intercepta la zona verde es llamado volumen efectivo o volumen activo. Solamente las partículas alfa que se originan de los puntos contenidos en la sección definida son consideradas para el cálculo de las sensibilidades parciales.

3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 78

Los valores para z_{max} , z_{min} y r_{max} se obtuvieron utilizando la relación de rango-energía obtenida del SRIM 2013 [168], considerando la ventana de energía y las restricciones angulares como el ángulo crítico promedio, así como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Relación rango-energía para la progenie del torón.

Progenie del torón	E [MeV]	Rango en el aire* [μm]	Rango en el aluminio* [μm]
^{216}Po	0.116	82	0.042
^{212}Pb	0.128	89	0.045
^{208}Pb	0.169	107	0.054
^{208}Tl	0.117	83	0.042

*SRIM/TRIM 2013

3.4.1 Simulación de la exhalación de torón de una pared

La tasa de exhalación (en átomos $\cdot \text{s}^{-1}$) se define como el número de átomos de torón que salen de una pared en el tiempo máximo en el que un átomo decae, que es aproximadamente $20T_{1/2}$: 441.44 s. La tasa de exhalación equivalente, si se considera que 1 átomo $\cdot \text{s}^{-1}$ es $7.6 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{h}^{-1}$, es de $3.35 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ y la tasa de exhalación por unidad de área es de $450.08 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Esta tasa de exhalación es aproximadamente mil veces la tasa de exhalación de los materiales de construcción comunes [2]. El volumen efectivo y los parámetros utilizados para el cálculo del torón y su progenie se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Volumen efectivo y parámetros del torón y su progenie utilizados en la simulación.

Nucleido	$V_{cil} [\text{cm}^3]$	$z_{max} [\text{cm}]$	$z_{min} [\text{cm}]$	$r_{max} [\text{cm}]$
Radón	107.27	4.36	1.77	3.63
^{216}Po	137.70	5.00	2.28	4.01
^{212}Bi	96.75	4.12	1.57	3.48
^{212}Po	353.28	8.00	4.67	5.81

Las proyecciones en el plano XY de las desintegraciones de los átomos de torón exhalados de la pared y los de su progenie se muestran en la Figura 3.11. Se observa que los átomos de torón solo alcanzan de 15 cm a 20 cm desde el punto en que son exhalados de la pared. La cantidad de desintegraciones es mucho mayor en los volúmenes efectivos del torón y el ^{216}Po que en los volúmenes efectivos de ^{212}Bi y el ^{212}Po . Esto se debe a la vida media relativamente

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 79

2176 larga del ^{212}Pb , predecesor de ambos, que puede viajar y alcanzar una distancia máxima de 3
2177 a 4 m de la pared. Aparentemente, las distribuciones espaciales de las desintegraciones del
2178 torón y su progenie son uniformes en sus volúmenes efectivos.

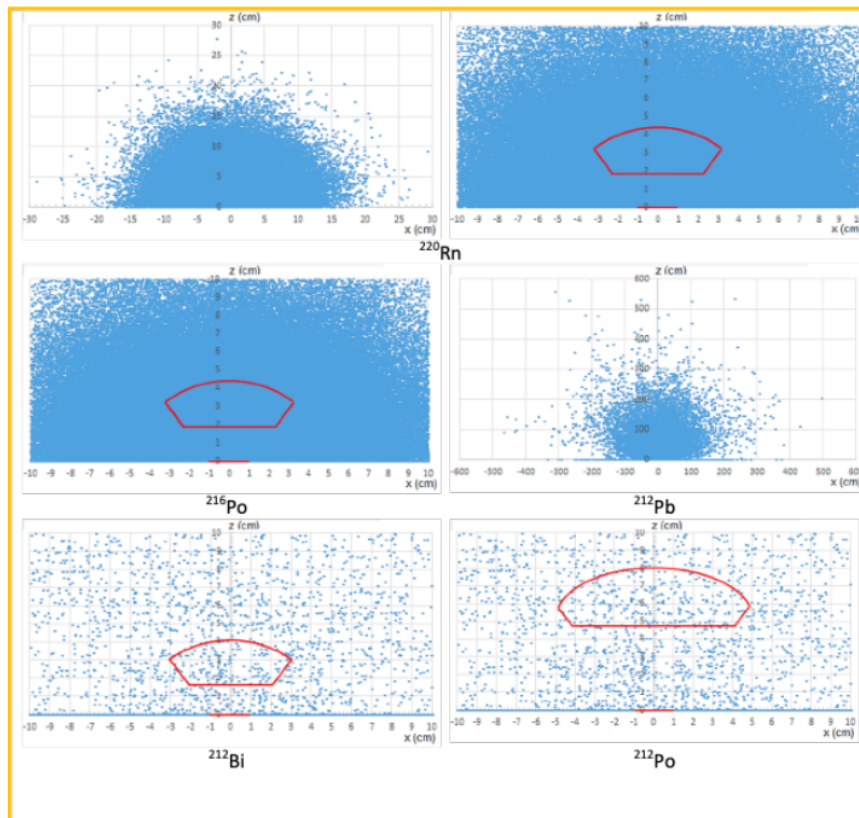


Figura 3.11. Proyecciones en el plano XZ de los decaimientos de los átomos de torón y su progenie exhalados desde una pared. Los volúmenes efectivos y el detector se muestran en color rojo. La línea azul (sobre el eje X) representa a los átomos depositados en la pared. El decaimiento de la progenie es menor cerca al detector LR-115.

43
2179 En la Figura 3.12 se muestran las distribuciones de los puntos de decaimiento para el
2180 torón y su progenie, en función de la distancia a la pared. Las flechas rojas indican las
2181 distancias mínima y máxima del volumen efectivo al detector LR-115. Estos resultados
2182 muestran que las concentraciones de torón y el ^{216}Po disminuyen al incrementar la distancia a
2183 la pared y, además, las distribuciones de las posiciones de descomposición en sus respectivos
2184 volúmenes efectivos no son uniformes. También se dan los porcentajes de átomos decaídos

1
 3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 80

2185 entre las distancias mínima y máxima en el aire a partir de las cuales el LR-115 puede
 2186 detectar partículas 269 lfa (área bajo la curva). El tamaño de los detectores no se consideró
 2187 en los cálculos. Los resultados indican que la mayoría de los átomos de torón y ^{216}Po se
 2188 desintegran más cerca del detector, mientras que en los volúmenes efectivos del ^{212}Bi y ^{212}Po
 2189 solo se desintegra una fracción muy pequeña de átomos.

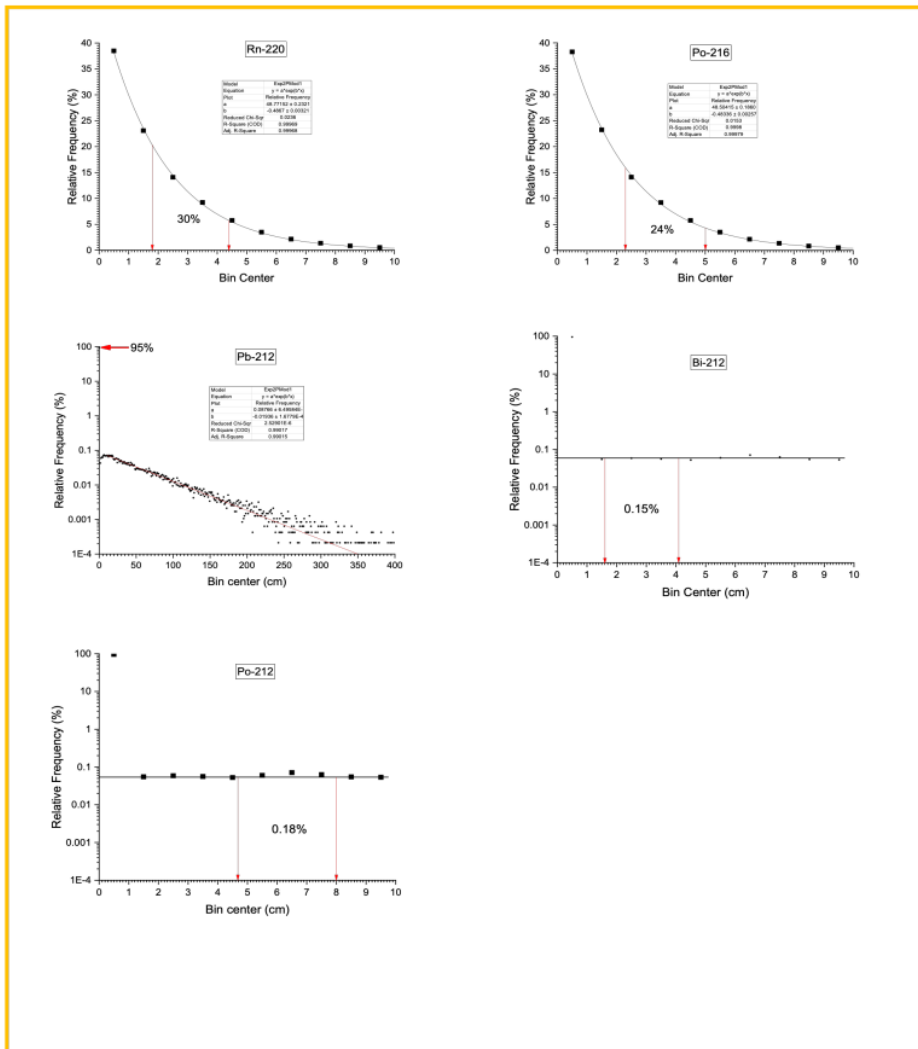


Figura 3.12. Distribuciones de las posiciones de decaimiento como función de la distancia a la pared para el torón y su progenie.

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 81

2190 La exhalación y la difusión del torón se puede aproximar a un proceso unidimensional.
2191 Cuando la tasa de exhalación del torón desde la pared se considera como la concentración
2192 de torón en interiores $C_{th}(x)$ [$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$] a una distancia x de la pared, se puede emplear la
2193 siguiente ecuación [124, 140]:

$$C_{th}(x) = \frac{E_{th}}{\sqrt{D\lambda_{th}}} \exp^{-\sqrt{\lambda_{th}/D} x} \quad (3.11)$$

2194 donde E_{th} es la tasa de exhalación superficial del torón desde la pared en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,
2195 λ_{th} es la constante de decaimiento del torón (s^{-1}) y D es el coeficiente de difusión para el
2196 torón ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Si las concentraciones de torón se miden en dos lugares diferentes, se puede
2197 estimar la tasa de exhalación del torón. Dado que la vida media del ^{216}Po es mucho más corta
2198 que la del torón, hay un equilibrio radiactivo entre estos dos isótopos, y se puede afirmar
2199 entonces que el ^{216}Po decae muy cerca de donde decae el torón. Además, debido a la vida
2200 media relativamente larga del ^{212}Pb (10.64 horas) la mayor parte de sus productos siguientes,
2201 aproximadamente el 95% (^{212}Bi y ^{212}Po), se depositan en la pared de exhalación antes de
2202 desmenuzarse en el aire.

2203 En la Figura 3.13 se muestran las distribuciones del torón y del ^{216}Po donde se puede
2204 visualizar mejor el comportamiento. En la Figura 3.13.a se muestra la distribución del
2205 torón con el bin mínimo (0.05 cm), demostrando que para los gases no actúa el efecto
2206 plate-out (funcionamiento correcto del programa, ya que los resultados reflejan la física
2207 involucrada), los decaimientos siguen una distribución exponencial desde la misma superficie
2208 que exhala. En la Figura 3.13.b se puede observar la evidencia del efecto plate-out que
2209 provoca disminución de su concentración en distancias menores a la pared. Al parecer sigue
2210 una distribución exponencial (línea negra), aunque para distancias menores a 2 cm la curva
2211 de ajuste no describe adecuadamente el comportamiento de los datos. La concentración
2212 de ^{216}Po crece rápidamente hasta alcanzar un máximo en aproximadamente 3 mm y luego
2213 disminuye de acuerdo a la longitud de difusión de su progenitor.

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 82

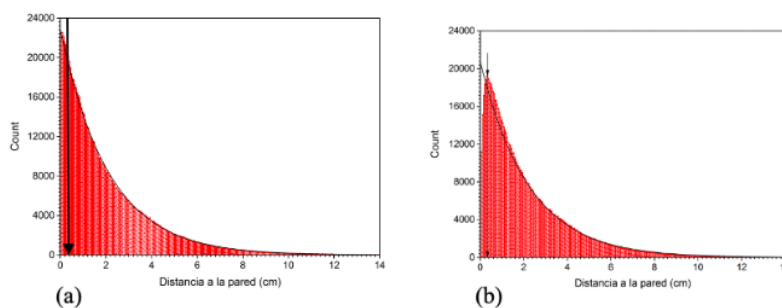


Figura 3.13. Distribuciones del torón y del ^{216}Po donde se puede visualizar mejor el comportamiento. Ambas realizadas con el bin mínimo (0.05 cm). (a) representa al torón (b) corresponde al ^{216}Po . Las flechas indican la posición donde ocurrió el máximo de desintegraciones. La línea negra continua representa la función exponencial ajustada a todos los datos

2214 Considerando una habitación de dimensiones $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ y que sus paredes, el piso y
2215 el techo tienen aproximadamente 28 misma tasa de exhalación de torón, la distribución del
2216 ^{212}Pb en relación con la distancia de la pared se muestra en la Figura 3.14,a. Se asume un
2217 20% de incertidumbre en cada resultado y si se aplica la distribución uniforme, se pueden
2218 generar distribuciones de ^{212}Pb como se muestran en la Figura 3.14,b. Es decir, los átomos
2219 de ^{212}Pb pueden distribuirse uniformemente a distancias no muy cercanas de las paredes.
2220 Dado que la vida media de ^{212}Pb es mucho más larga que la de su progenie, también se
2221 pueden distribuir uniformemente en la habitación.

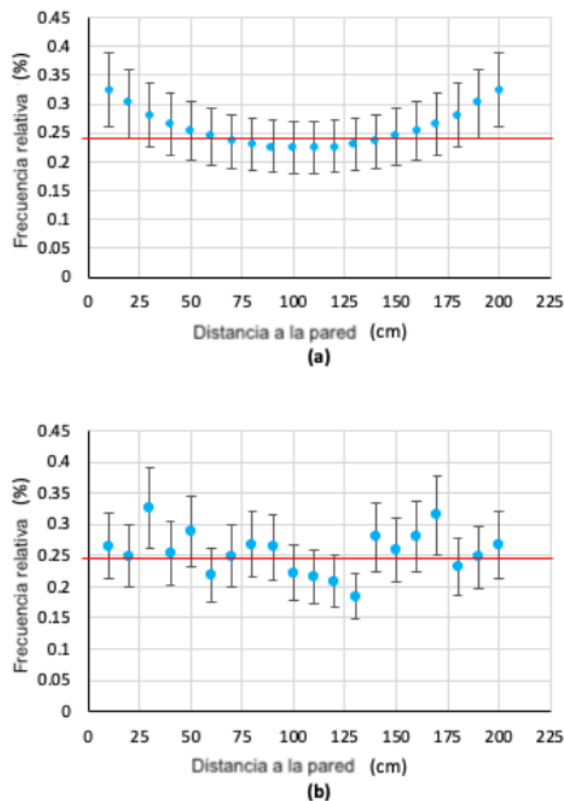


Figura 3.14. (a) Distribución del ^{212}Po con respecto a la distancia a la pared, y (b) la misma distribución del ^{212}Po considerando un 20% de incertidumbre y distribución uniforme.

6
2222 Para explicar mejor el rendimiento del código desarrollado, la Tabla 3.4. muestra los
2223 valores máximo, mínimo y promedio de las vidas medias generadas por el código, en
2224 comparación con los valores promedios y teóricos ($1/\lambda$). También se muestran los valores
2225 máximos y mínimos de la coordenada en z (distancia de la pared) y de la longitud de difusión
2226 del experimento simulado (la inversa de b en la ecuación de ajuste exponencial para los datos
2227 de frecuencia relativa de decaimiento en función con la distancia a la pared) y su comparación
2228 con la longitud de difusión teórica ($\zeta = \sqrt{\frac{D}{\lambda}}$). Se obtuvo una buena concordancia entre los
2229 resultados simulados y teóricos en ambos casos, lo que favorece la validación del código
2230 desarrollado.

Tabla 3.4. Parámetros para evaluar el rendimiento del código desarrollado para la exhalación del torón desde la pared y su difusión en el aire.

	Tiempo de decaimiento [min]	Decaimiento en z [cm]
Mínimo	1.29×10^{-4}	0
Máximo	1 070.01	27.92
Promedio	1.3366	2.0547
Valor teórico	1.3369	2.0812
Error (%)	0.03	1.29

2231 De la simulación de 472 339 átomos de torón exhalados de una superficie seleccionada en
 2232 la pared, 47 662 decayeron en el cilindro que contenía el volumen efectivo (aproximadamente
 2233 10%). Si se considera el tiempo en que ocurrieron estos decaimientos y el volumen del
 2234 cilindro, se obtiene una concentración promedio de $415.2 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Este valor es muy alto y
 2235 representa aproximadamente la concentración promedio de torón en su volumen efectivo, es
 2236 decir la concentración medida por el detector LR-115 desnudo. Con esta cantidad de torón
 2237 exhalado, las concentraciones medias en sus correspondientes volúmenes efectivos serían:

- 2238 • Para el ^{216}Po , $297.3 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.
- 2239 • Para el ^{212}Bi , $1.1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (donde sólo el 36% de los átomos se desintegran por emisión
 2240 alfa).
- 2241 • Para el ^{212}Po $0.7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (donde solo el 64% de los átomos se desintegran por emisión
 2242 alfa).

2243 Asumiendo que los materiales de construcción comunes exhalan mil veces menos torón
 2244 que el utilizado en las simulaciones, de los resultados anteriores se podrían inferir con-
 2245 centraciones para el torón y el ^{216}Po en sus volúmenes efectivos en valores cercanos a los
 2246 $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ y $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente, y las correspondientes a ^{212}Bi y ^{212}Po serían
 2247 despreciables.

2248 3.4.2 Simulación de la exhalación de radón de una pared

2249 Para esta simulación se tomó en consideración que el detector tenía forma circular de 1 cm
 2250 de radio, colocado sobre una placa soporte de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ y el círculo que rodea al soporte de
 2251 radio 5 cm.

1
3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 85

2252 En este caso, como se evidencia en la Figura 3.15, al contrario del caso de la progenie
2253 del torón, la mayoría de la progenie inmediata decae en el aire. Los átomos de radón pueden
2254 decaer incluso a distancias superiores a los 15 m de la pared debido a su mayor vida media y
2255 por lo tanto así lo hará también su progenie.

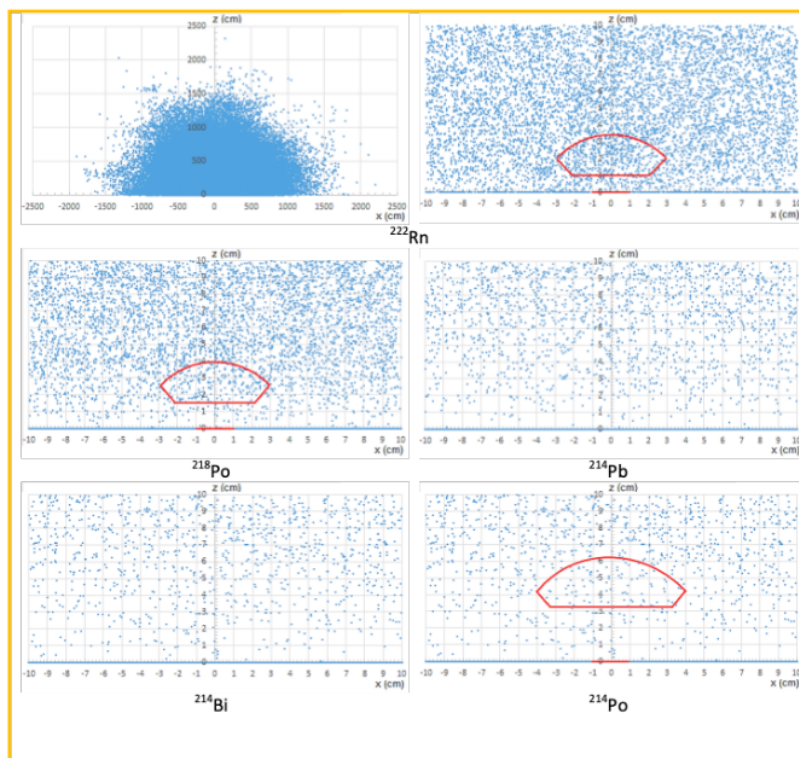


Figura 3.15. Proyecciones en el plano XZ de los decaimientos de los átomos de radón y su progenie exhalados desde una pared. Los volúmenes efectivos y el detector se muestran en color rojo. La línea azul (sobre el eje X) representa a los átomos depositados en la pared. El decaimiento de la progenie es menor cerca al detector LR-115.

2256 La distribución de las posiciones de decaimiento en función a la distancia de la pared para
2257 el radón y su progenie se muestran en la Figura 3.16. Las flechas en rojo indican las distancias
2258 mínimas y máximas del volumen efectivo al detector LR-115. Los resultados muestran que la
2259 concentración de radón disminuye al aumentar la distancia a la pared, pero la distribución de
2260 las posiciones de decaimiento en su volumen efectivo es uniforme. Se observan porcentajes
2261 menores de átomos de ^{218}Po y ^{214}Po que ya han decaído en comparación con los átomos de
2262 radón en las regiones de sus respectivos volúmenes efectivos. Los resultados también indican

1
 3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 86

2263 que las concentraciones de átomos de ^{218}Po y ^{214}Po disminuyen a medida que se acercan a
 2264 la pared, lo que puede explicarse por el efecto plate-out, que conduce a las distribuciones no
 2265 uniformes o desiguales de las desintegraciones en sus respectivos volúmenes efectivos.

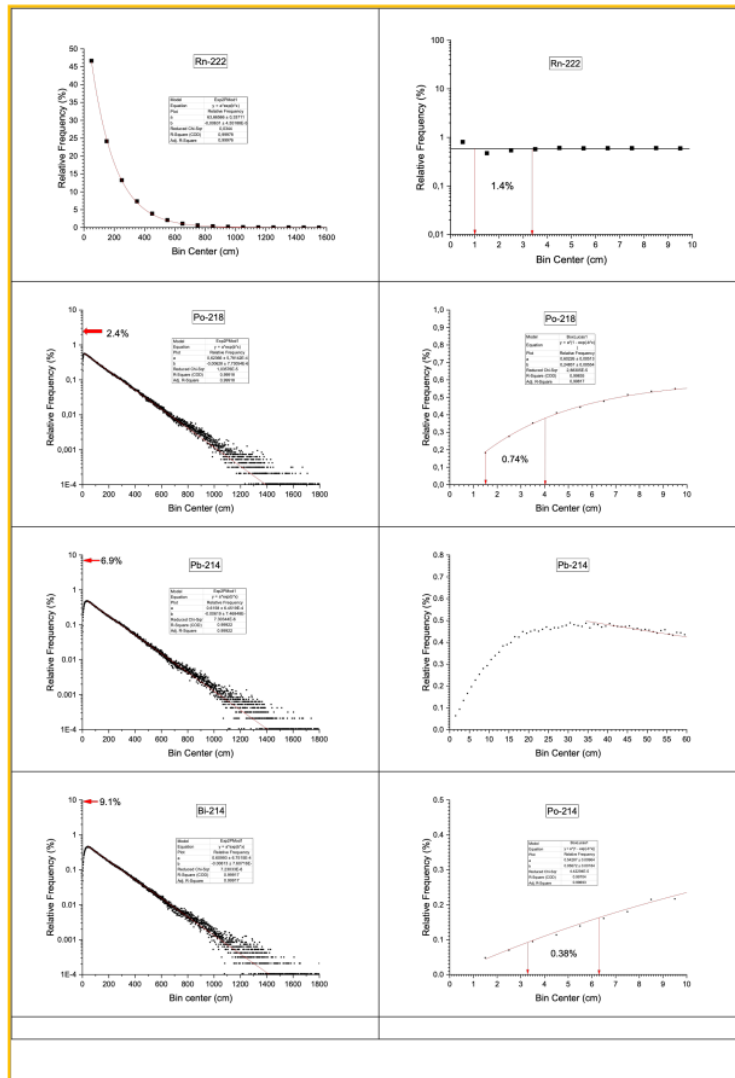


Figura 3.16. Distribuciones de las posiciones de decaimiento como función de la distancia a la pared para radón y su progenie.

3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 87

Tanto para el caso del radón y su progenie, así como para el torón y su progenie, la eficacia del código fue evaluada comparando parámetros teóricos con los obtenidos en el experimento de simulación (Tabla 3.5), siendo esta comparación bastante satisfactoria.

Tabla 3.5. Parámetros para evaluar el rendimiento del código desarrollado para determinar la exhalación del radón, y su progenie desde una pared y su difusión y decaimiento en el aire cercano a la pared.

	Radón	^{218}Po	^{214}Po
Tiempo promedio experimental de decaimiento [días]	5.51	4.28	28.12
Tiempo promedio teórico de decaimiento [días]	5.52	4.47	28.71
Error [%]	0.09	4.31	2.04
Longitud de difusión experimental [cm]	158.48	159.24	162.80
Longitud de difusión teórica [cm]	160.42	160.42	160.42
Error [%]	1.21	0.74	1.46
V_{cyl} [cm ³]	70.13	92.41	214.26
Decaimientos en el volume del cilindro	82.00	41.00	12.00
Actividad [Bq]	1.7×10^{-4}	8.4×10^{-5}	2.4×10^{-5}
Concentración [Bq·m ⁻³]	2.38	0.90	0.11

La concentración de radón obtenida en su volumen efectivo fue muy baja ya que la tasa de exhalación simulada ($0.15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) fue más de mil veces menor que la de los materiales de construcción comunes. Por ejemplo, se han reportado tasas de exhalación de radón de paredes de concreto en el rango de $1500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ a $3000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$.

Los resultados de las sensibilidades parciales se muestran en la Tabla 3.6. Las comparaciones con el valor medio experimental tienen una buena correspondencia, lo que valida el código desarrollado. Otra consecuencia importante de estos resultados es la independencia

3.4 Resultados de la simulación del proceso de difusión y de decaimiento del radón y torón exhalado de una pared y su progenie recién creada 88

de la sensibilidad parcial con respecto a la distribución espacial de las emisiones alfa dentro de los volúmenes efectivos.

Tabla 3.6. Sensibilidades parciales (S_p) (en cm) y comparaciones con el valor medio experimental (0.231 cm).

	Torón	^{216}Po	^{212}Bi	^{212}Po	Radón	^{218}Po	^{214}Po	Promedio	Error [%]
Calculado	0.229	0.224	0.232	0.222	0.228	0.23	0.234	0.228	0.004
Dif [%]	0.87	3.03	0.43	3.90	1.30	0.43	1.30	1.11	

Dado de las sensibilidades parciales de los detectores desnudos LR-115 para el radón y su progenie son iguales. La densidad total de las huellas ρ (en huellas/cm²) está dado por $\rho = S_p(C_0 + C_1 + C_3)t$, donde C_0 , C_1 , y C_3 son las concentraciones de radón, ^{218}Po , y ^{214}Po en aire, respectivamente, y t es el tiempo de exposición.

Se define el factor de equilibrio indirecto F_p [92, 167] como:

$$F_p = f_1 + f_3 = \frac{C_1}{C_0} + \frac{C_3}{C_0} = \frac{\rho}{S_p C_0 t} - 1 \quad (3.12)$$

Si se conoce el F_p , se podrá determinar la concentración de radón con la expresión:

$$C_0 = \frac{\rho}{S_p(1 + F_p)t} = \frac{\rho}{Kt} \quad (3.13)$$

donde K es el coeficiente de calibración para el detector desnudo LR-115:

$$K = S_p(1 + F_p) \quad (3.14)$$

De las Tablas 3.5, 3.6 y la Ecuación 3.14, el factor de equilibrio indirecto el coeficiente de calibración para el detector LR-115 en modo desnudo se puede calcular como se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Sensibilidades parciales (S_p) (en cm) y comparaciones con el valor medio experimental (0.231 cm).

$\frac{C_1}{C_0}$	$\frac{C_3}{C_0}$	F_p	f_e	S_p [cm]	K^*
0.38	0.05	0.43	~0.1	0.33	1.18

*[huellas·cm⁻²/kBq·m⁻³]

Se puede observar claramente como el coeficiente de calibración calculado es cercano al obtenido experimentalmente en la cámara de calibración de radón de nuestro laboratorio de

1
2290 Huellas Nucleares en la PUCP. El valor pequeño del factor de equilibrio para el radón cerca
2291 a la pared, se corresponde con los citados por otros autores.

4
2292 **3.5 Respuesta del detector LR-115 en modo desnudo y en cámara de**
2293 **difusión mediante simulación**

2294 El torón presenta una disminución exponencial en su concentración al alejarse de la superficie
2295 de exhalación (pared), que es prácticamente cero a unos 10 cm de la pared. Sin embargo,
2296 debe considerarse que puede contribuir significativamente a la densidad de huellas si la pared
2297 es rica en torio y los soportes de los detectores tienen dimensiones similares a estos (es decir,
2298 soportes pequeños). Este efecto ya puede considerarse despreciable si la distancia entre
2299 los bordes del detector y el soporte es mayor a los 10 cm. En el caso del ^{216}Po , tiene un
2300 comportamiento similar al torón, debido a su corta vida media. Para el resto de la progenie del
2301 torón, su comportamiento es similar al del ^{212}Pb de larga vida media, de modo que alrededor
2302 del 95% de sus desintegraciones tienen lugar a estar depositadas en la pared, mientras que
2303 cerca de la pared (en sus volúmenes efectivos) se produce una distribución aproximadamente
2304 uniforme de algunas desintegraciones, lo cual contribuye mínimamente a la densidad de
2305 huellas. Cabe destacar que el ^{212}Pb y su progenie pueden alcanzar de 3 a 4 m de la pared.
2306 Estos resultados indican un factor de equilibrio del torón bastante bajo cerca de la pared.

2307 En el estado estacionario, es decir, sin considerar el factor de ventilación, y considerando
2308 una pequeña superficie de exhalación en la pared (de $5 \times 5 \text{ cm}^2$), se puede decir que generará
2309 una distribución uniforme en un volumen equivalente a una habitación de $10 \times 10 \text{ m}^2$ y
2310 también en su volumen efectivo. Debido al efecto plate-out, muchos átomos de ^{218}Po se
2311 depositan en la superficie que exhala y disminuyen la concentración cerca de la pared,
2312 especialmente en el volumen efectivo. Las concentraciones del ^{214}Pb y del ^{214}Bi son aún
2313 menores cerca de la pared, lo que hace que los decaimientos en el volumen efectivo para el
2314 ^{214}Po sean mínimos.

2315 La sensibilidad parcial del detector LR-115 no depende del emisor de partículas alfa
2316 ni de la distribución de decaimientos en los respectivos volúmenes efectivos, y su valor
2317 es similar al valor teórico y experimental reportado por otros autores. Se demostró una
2318 disminución exponencial de los decaimientos, con coeficiente similar a la longitud de
2319 difusión característica de cada radionúclido, cuando aumenta la distancia a la pared. Ambos
2320 resultados validan el código Monte Carlo desarrollado.

2321 Los resultados obtenidos pueden tener un mayor alcance, y reflejar con buena aproxima-
2322 ción lo que ocurre en ambientes típicos de interiores de viviendas, ya que según [36],

2323 tanto la ventilación como la distribución del tamaño de aerosoles tienen poca influencia en el
2324 alcance eficaz del efecto plate-out.

2325 Como los factores de equilibrio F del radón y torón son insignificantes muy cerca de la
2326 pared, prácticamente solo las alfas del radón y torón contribuirán a la densidad de trazas
2327 registradas en el detector LR-115 desnudo colocado sobre la pared. Es decir, la respuesta del
2328 detector no depende del factor de equilibrio en las expresiones:

$$k_{BR} = \frac{T}{tC_m(1 + 2F_m)} \quad (3.15)$$
$$k_{BT} = \frac{T}{tC_{th}(1 + 2F_{th})}$$

2329 Las sensibilidades parciales k_{BR} y k_{BT} son iguales e independientes de F, con valor
2330 experimental y teórico de $(0.02 \pm 8\%) \text{ huellas} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}$ [23], equivalente al valor
2331 medio encontrado en este trabajo (0.23 cm).

2332 Es muy importante resaltar que la sensibilidad parcial del detector LR-115 respecto a los
2333 emisores alfa presentes en el espacio es la misma, independientemente de su distribución
2334 espacial. Este hecho fue demostrado para el caso del torón exhalado de una pared y registrado
2335 por un detector LR-115 colocado sobre la pared con la parte activa dirigida hacia el aire
2336 ambiental. El número de desintegraciones de los átomos exhalados disminuye bruscamente
2337 con la distancia a la pared debido a la corta vida media del torón, en particular si los átomos
2338 están uniformemente distribuidos. Se encontró que la concentración de torón era alta cerca de
2339 la pared de la habitación y caía exponencialmente con la distancia a la pared. Es de esperar
2340 un comportamiento similar para el techo y el piso de la habitación. Las concentraciones de
2341 progenie de torón en interiores son uniformes con la distancia a la pared.

2342 La distribución espacial del torón es tan única que no se puede dar un solo valor de
2343 concentración de torón ni siquiera en una habitación. Por lo tanto, las concentraciones de
2344 torón no deben utilizarse con fines de protección radiológica, ya que su concentración varía
2345 mucho con el espacio. En cambio, la medición de la concentración de progenie de torón será
2346 más efectiva y útil, aunque la tasa de exhalación de torón en la superficie también podría
2347 usarse como un índice para la evaluación de la dosis de torón.

2348 Se puede considerar entonces que el detector LR-115 desnudo colocado sobre la pared
2349 estimaría aproximadamente la suma de la concentración de radón en el interior de una
2350 habitación y del torón que se exhala de la pared.

2351 **Capítulo 4**

2352 **Desarrollos numéricos y simulaciones en calibración de los** 2353 **detectores LR-115 en modo desnudo**

2354 El detector LR-115 se ha utilizado tradicionalmente para medir alfa total en el aire, la PAEC
2355 de la progenie del radón o la concentración de radón [66, 56], el factor de equilibrio proxy
2356 [166] y factor de equilibrio [1, 87], y para otras aplicaciones [82, 114]. Los resultados de
2357 intercomparaciones recientes de detectores pasivos de radón demostraron una exactitud y
2358 precisión satisfactorias del detector LR-115 desnudo en las mediciones [78].

2359 Sin embargo, el método convencional de calibración de los detectores de huellas puede
2360 presentar ciertas limitaciones. por esto, en este capítulo se propone una propuesta de un
2361 método de simulación sencillo para lograr este objetivo.

2362 Para poder determinar el factor de calibración en un detector de nitrato de celulosa
2363 LR-115 utilizado en modo desnudo es primordial conocer su sensibilidad parcial al radón o
2364 al torón, o cualquiera de sus descendientes en el aire.

2365 La determinación experimental de sensibilidades parciales K_i a isótopos de radón y
2366 su descendencia es compleja, debido a que no es posible separarlos física y generalmente
2367 no están en equilibrio. Determinar K_i requiere instrumentos e instalaciones costosas y
2368 sofisticadas. El método más común es exponer detectores LR-115 desnudos en una cámara
2369 especial a concentraciones de referencia bien conocidas de radón y su progenie. Además del
2370 factor de equilibrio, muchos otros parámetros se controlan durante el período de exposición
2371 y solo unos pocos laboratorios en todo el mundo tienen este tipo de cámara, por ejemplo, la
2372 cámara de exposición ambulatoria de la Agencia de Protección de la Salud (HPA), Chilton,
2373 Reino Unido [17]. En la mayoría de los laboratorios que miden radón, como el nuestro en la
2374 PUCP, esto no sería posible, esa es la razón por la cual se propone este método alternativo.

2375 Utilizando un detector LR-115 en modo desnudo, se registran las huellas de partículas
2376 alfa provenientes del radón, torón y su progenie, emisoras alfa en el aire, obteniéndose así
2377 sus concentraciones. Sus respuestas se expresan mediante las sensibilidades parciales K_i a
2378 cada una de estos productos de decaimiento (es decir, el número de huellas por unidad de

2379 área y tiempo de exposición, por unidad de concentración de actividad de ese producto de
 2380 decaimiento). Usando simulaciones de Monte Carlo, se demuestra que K_i ($m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot m^3$
 2381 o simplemente m) para radón, ^{218}Po y ^{214}Po es el mismo que para la capa eliminada de
 2382 menos de $\sim 7.5 \mu m$ [92, 167, 94]. La igualdad de sensibilidades parciales para todos los
 2383 productos de decaimiento se debe a que una partícula alfa solo es registrada si cumple con
 2384 las restricciones energéticas y angulares al incidir en el detector independientemente de su
 2385 energía de emisión [23].

2386 Conocidas las sensibilidades parciales K_i y el factor de equilibrio F_e , se puede determinar
 2387 el factor de calibración real de un detector desnudo LR-115 como $K_i(1+2F_e)$, de acuerdo con
 2388 Eappen y Mayya en 2004 [23]. También si se conoce K_i , la densidad de huellas registrada
 2389 en el LR-115 expuesto en modo desnudo y la concentración de radón determinada por algún
 2390 método pasivo, el factor de equilibrio proxy F_p puede calcularse [167, 166]. Dado que se
 2391 conoce la relación entre F_p y el factor de equilibrio F_e , es posible estimar este último factor
 2392 necesario para calcular la dosis de inhalación.

2393 Las huellas nucleares son una excelente alternativa para mediciones de concentración de
 2394 radón, dada su bajo costo y equipamiento de laboratorio de fácil acceso, por lo que considero
 2395 que es de suma importancia desarrollar un método sencillo, económico y rápido para la
 2396 estimación de las sensibilidades parciales, teniendo en cuenta que estas son iguales para
 2397 cualquier producto de decaimiento de su progenie. Mediante simulaciones se estimará las
 2398 sensibilidades parciales experimentalmente, exponiendo los detectores a una fuente alfa
 2399 plana a diferentes distancias,

2400 Se desarrolló un código de simulación Monte Carlo para evaluar la respuesta de los
 2401 detectores LR-115 colocados a diferentes distancias de una fuente plana de ^{241}Am . Se utilizó
 2402 el programa TRACK TEST [93] para realizar simulaciones de perfiles de huellas grabadas
 2403 con el fin de obtener la ventana de energía y la dependencia del ángulo crítico con la energía
 2404 de la partícula alfa. Las relaciones entre la energía residual y la distancia recorrida por las
 2405 partículas alfa en el aire se determinarán con la ayuda del programa SRIM-2013 [168].

2406 4.1 Estimación teórica de las sensibilidades parciales

2407 Una partícula alfa puede producir una huella grabada visible con un microscopio óptico, si
 2408 se emite desde el llamado volumen efectivo. El número total de huellas registradas en el
 2409 detector se puede calcular integrando las fluencias provenientes de los distintos puntos en el
 2410 volumen efectivo. Así, K_i se puede expresar de forma simplificada como [34]:

$$K_i = \frac{1}{4} \int_{\theta_c}^{\pi/2} \sin(2\theta) [R_{max}(\theta) - R_{min}(\theta)] d\theta \quad (4.1)$$

2411 donde θ es el ángulo de incidencia que va desde el ángulo crítico (θ_c) hasta la incidencia
 2412 normal ($\pi/2$); R_{min} y R_{max} son los límites superior e inferior para el registro de huellas,
 2413 determinados por E_{max} y E_{min} de la ventana de energía, respectivamente [23]. Aunque la
 2414 forma y ubicación de los volúmenes efectivos son diferentes para diferentes productos de
 2415 decaimiento, las huellas formadas dependerán solo de R_{min} y R_{max} (Ecuación 4.1) y no de
 2416 los rangos (o energías) de los productos de decaimiento. Esta es una de las principales
 2417 razones por las que la sensibilidad parcial no depende del producto de decaimiento. Como la
 2418 integración debe realizarse sobre todo el volumen efectivo, la ecuación anterior es equivalente
 2419 a la suma de las sensibilidades parciales obtenidas para cada sección transversal horizontal
 2420 del volumen efectivo, dividida por el número total de secciones en las que se cortó el volumen
 2421 efectivo, es decir, K_i es equivalente a la sensibilidad parcial promedio cuando se calcula
 2422 de esta manera. Esto se puede lograr midiendo las densidades de huellas inducidas por
 2423 superficies planas paralelas al detector que intersecan el volumen efectivo como se ilustra en
 2424 la Figura 4.1.

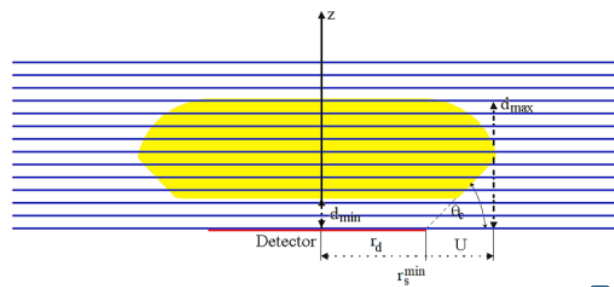


Figura 4.1. Sección longitudinal del volumen efectivo (en amarillo) para un detector LR-115 considerando un ángulo crítico constante. Las líneas azules representan superficies planas paralelas al detector que intersecan al volumen efectivo.

2425 En la Figura 4.1 se muestra la sección longitudinal del volumen efectivo y sus intersec-
 2426 ciones con varios planos horizontales. Experimentalmente, esto se puede lograr mediante la
 2427 exposición consecutiva de detectores LR-115 a diferentes distancias de una fuente alfa plana.

2428 Los requisitos que debe cumplir la fuente son las siguientes:

- 2429 1. La energía de emisión de partículas alfa debe ser mayor que E_{max} de la ventana de
 2430 energía.
- 2431 2. Su radio debe ser mayor que el radio del círculo más grande formado por la intersección
 2432 de los planos horizontales con el volumen efectivo (como se muestra en la Figura 4.1).
- 2433 3. Los emisores alfa deben distribuirse uniformemente en la superficie de la fuente.

2434 Dado que las partículas alfa emitidas por la fuente de ^{241}Am tienen prácticamente la
2435 misma energía que los núcleos de los átomos de radón (5.49 MeV), la superficie de la fuente
2436 interceptará el volumen efectivo de radón moviendo la fuente a diferentes distancias del
2437 detector. Como resultado, se crean superficies efectivas circulares en la fuente desde la cual
2438 las partículas alfa emitidas tienen una probabilidad distinta de cero de inducir huellas grabadas
2439 visibles en un microscopio óptico. Las superficies efectivas son las secciones transversales
2440 entre el volumen efectivo y la fuente plana a diferentes distancias fuente-detector.

2441 4.2 Simulaciones aplicando el método Monte Carlo

2442 Considerando un detector LR-115 en modo desnudo se calculó la sensibilidad parcial al
2443 radón, torón o a sus descendientes utilizando un programa propio desarrollado y que está
2444 basado en simulaciones de Monte Carlo. El programa hace las simulaciones de partículas
2445 alfa que son emitidas por una fuente plana de ^{241}Am y como es su registro por un detector.
2446 Para las simulaciones, se considera que los puntos de partida de las partículas alfa se toman
2447 aleatoriamente en círculos paralelos al plano del detector. Las distancias entre los círculos
2448 y el detector se varían con un pequeño paso. Sólo las partículas alfa emitidas dentro del
2449 volumen definido por la sección transversal horizontal del volumen efectivo son registradas
2450 por el detector.

2451 **Datos de ingreso que requiere el programa:**

- 2452 ²¹ 1. Energía de las partículas alfa emitidas por la fuente.
- 2453 2. Base de datos de ángulos críticos en función de la energía alfa (de la ventana de energía)
2454 para diferentes espesores residuales del detector.
- 2455 3. Espesor de la capa residual.
- 2456 4. Radios del detector (r_d) y de la fuente de ^{241}Am (r_s), y paso para las distancias
2457 fuente-detector (s).

2458 La disminución de la energía de las partículas alfa desde el punto de emisión hasta el
2459 detector, provocada por el aire, fue calculada previamente por el programa SRIM 2013, así
2460 como la dependencia energía-distancia.

2461 4.2.1 Cálculos del programa de Monte Carlo

2462 El programa realiza los siguientes procedimientos:

1. Determinación de la ventana de energía [E_{min} , E_{max}], y dependencia del ángulo crítico de la energía de la partícula alfa incidente [$\theta_c = f(E)$], para un espesor residual del detector dado. Esto se logró mediante interpolación lineal en la base de datos de parámetros de seguimiento obtenidos con el programa TRACK_TEST descrito en la referencia [93]. La base de datos se generó variando sistemáticamente la energía incidente de las partículas alfa de 0.8 a 4.8 MeV, con pasos de 0.2 MeV, y el ángulo de incidencia de 30° a 90°, con pasos de 5°, para tiempos de grabado de 105 a 125 minutos con pasos de 5 minutos. Solo se consideraron huellas simuladas que perforan la capa activa del detector LR-115. La tasa de grabado para el espesor del detector considerada (V_B) es de $3.27 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$, que corresponde a las condiciones estándar de grabado: solución acuosa de NaOH 2.5 N a 60 °C sin agitación [91].

Se utilizó la función V de Durrani-Green para el caso de los detectores de LR-115 [38]:

$$V = 1 + (a_1 e^{-a_2 R} + a_3 e^{-a_4 R})(1 - e^{-a_5 R}) \quad (4.2)$$

con constantes $a_1 = 14.50$, $a_2 = 0.50$, $a_3 = 2.9$, $a_4 = 0.066$ y $a_5 = 1$ [38, 62]. La Figura 4.2 muestra las ventanas de energía y la dependencia del ángulo crítico con las energías incidentes de partículas alfa para diferentes espesores residuales del detector.

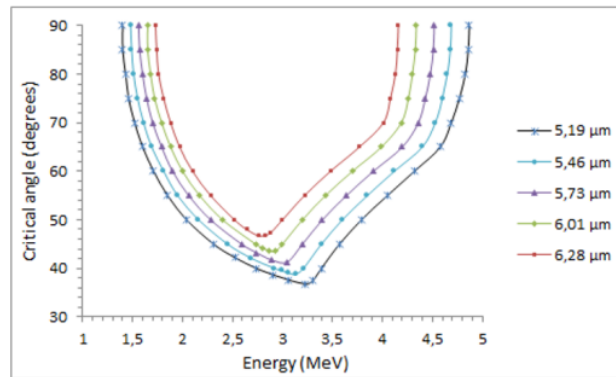


Figura 4.2. Datos para los ángulos críticos $\theta_c = f(E)$ obtenidos para diferentes espesores de la capa residual de la capa activa del detector. Para cada espesor residual la ventana de energía está delimitada por E_{min} y E_{max} para $\theta_c = 90^\circ$ [106].

2. Cálculo del rango de energías de partículas alfa emitidas por la Fuente (R_0) utilizando los datos del rango de energías en aire obtenidos por el programa SRIM 2013.

- 2481 3. Cálculo de la distancia mínima [$d_{min} = R_0 - R(E_{max})$] y la distancia máxima [$d_{max} =$
 2482 $R_0 - R(E_{min})$] que viajan las partículas alfa de forma que pueden ser registradas por el
 2483 detector al tener energías comprendidas en su ventana de energía.
- 2484 4. Muestreo aleatorio para N puntos de partida de partículas alfa sobre una superficie
 2485 circular de radio r_s situada a diferentes distancias del detector, que simula la emisión
 2486 de partículas alfa desde la fuente plana. Solo las partículas alfa emitidas desde las
 2487 áreas de esos círculos (en verde en la Figura 4.3), es decir, la sección transversal del
 2488 volumen efectivo, pueden registrarse en el detector.

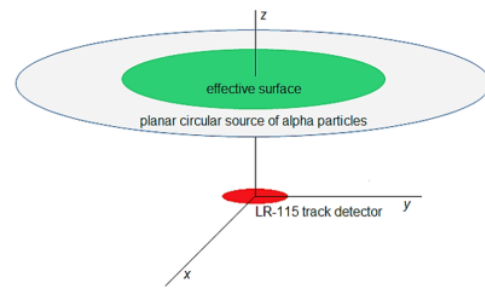


Figura 4.3. Formación de una superficie efectiva dada por la intersección de la fuente alfa plana con el volumen efectivo. Los círculos en gris, verde y rojo representan la fuente plana, la sección transversal del volumen efectivo y el detector LR-115, respectivamente.

- 2489 **4** 5. Muestreo aleatorio de la dirección en la que la partícula alfa es emitida.
- 2490 6. Cálculo de la probabilidad de intersección de la trayectoria de las partículas alfa con
 2491 la superficie del detector. Si la partícula alfa no impacta en el detector, se genera una
 2492 nueva partícula y se repite el procedimiento desde el paso 4.
- 2493 7. Determinación de la posibilidad que el detector registre a la partícula alfa que impacta
 2494 en su superficie. Se toma en cuenta las restricciones de energía y ángulos para la
 2495 partícula alfa incidente que es evaluada. En caso de “éxito” el contador de partículas
 2496 alfa detectadas (N_d) se incrementa en 1. En caso contrario, se genera una nueva
 2497 partícula y se repite el procedimiento desde el paso 4.

2498 Se repiten muchas veces los pasos 4 a 7 para minimizar la incertidumbre estadística.
 2499 Cuando el número de historias **227** en cada plano alcanza un número predeterminado, la simu-
 2500 lación concluye y se calcula la eficiencia de detección ϵ como el cociente entre el número
 2501 de partículas alfa detectadas (N_d) y el número de partículas alfa emitidas (N), es decir $\epsilon =$

2502 N_{d_i}/N . El número de huellas detectadas para cada distancia al plano del detector se cuenta y
2503 acumula en el contador c .

$$c = \sum_{i=1}^n N_{d_i} \quad (4.3)$$

2504 donde n es el número generado por las superficies planas generadas o las distancias
2505 entre d_{min} y d_{max} que condicionaron la formación de huellas visibles en los detectores. Esto
2506 depende de la longitud del paso.

2507 4.2.2 Cálculo de la sensibilidad parcial

2508 La eficiencia intrínseca o acumulada (ϵ_c) es el cociente entre el número de alfas registradas
2509 por el detector ($\sum_{i=1}^n N_{d_i}$) sobre el total de partículas alfas (nN) emitidas en el volumen de
2510 un cilindro de radio r_s y altura determinada por la diferencia entre las distancias máxima y
2511 mínima ($d_{max} - d_{min}$) de la fuente al detector que condicionan la formación de una huella
2512 visible en el detector.

$$\epsilon_c = \frac{\sum_{i=1}^n N_{d_i}}{nN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = \langle \epsilon \rangle \quad (4.4)$$

2513 Es decir, la eficiencia acumulada se puede determinar calculando el promedio de las
2514 eficiencias de detección obtenidas para las distintas distancias de la fuente al detector. Se
2515 pueden relacionar la concentración de cada producto de decaimiento (C), la densidad de
2516 huellas (ρ) el tiempo de exposición (t) y la sensibilidad parcial como:

$$K_i = \frac{\rho(\text{huellas} \cdot m^{-2})}{C(Bq \cdot m^{-3})t(s)} \quad (4.5)$$

2517 El número total de partículas emitidas por segundo en el volumen por encima del detector
2518 para el intervalo de distancias para las que las partículas alfa son detectadas, es decir (d_{max}
2519 - d_{min}), se puede expresar como $V \cdot C \cdot t$, considerando al volumen $V = \pi r_s^2 (d_{max} - d_{min})$.
2520 Multiplicando este factor por la eficiencia de detección acumulada nos dará el número de
2521 huellas registradas. Dividiendo ahora por el área del detector, podemos decir que la densidad
2522 de huellas será:

$$\rho(\text{huellas} \cdot m^{-2}) = \frac{CVt}{\pi r_d^2} \epsilon_c \quad (4.6)$$

2523 o trasponiendo los términos:

$$\frac{\rho(\text{huellas} \cdot \text{m}^{-2})}{C(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})t(\text{s})} = \frac{V}{\pi r_d^2} \varepsilon_c \quad (4.7)$$

2524 De las dos ecuaciones anteriores 4.5 y 4.7 se puede expresar la sensibilidad parcial
2525 simulada (en huellas·m⁻²/Bq·s·m⁻³ o simplemente en m):

$$K_i = \frac{V}{\pi r_d^2} \varepsilon_c = \varepsilon_c (d_{max} - d_{min}) \left(\frac{r_s}{r_d} \right)^2 \quad (4.8)$$

2526 Si todos los detectores tienen áreas iguales y son expuestos por el mismo periodo de
2527 tiempo, la eficiencia acumulada experimental se puede determinar multiplicando el área del
2528 detector por la suma de la densidad de huellas de cada detector, dividido por el número de
2529 partículas alfa emitidas por la fuente durante el tiempo total de medición.

$$\varepsilon_c = \frac{\pi r_d^2 \sum_{i=1}^n \rho_i}{nAt} = \frac{\pi r_d^2}{At} \langle \rho \rangle \quad (4.9)$$

2530 donde A es la tasa de emisión (es decir la actividad en Bq) de la fuente alfa plana y n
2531 es el número de alturas entre d_{min} and d_{max}. Se puede afirmar entonces que la eficiencia
2532 acumulada se calcula midiendo la densidad de huellas para cada distancia de la fuente al
2533 detector, promediando todas las distancias y en función del radio del detector y la actividad
2534 en la superficie de la fuente. La sensibilidad parcial será entonces:

$$K_i = \frac{\pi r_s^2 (d_{max} - d_{min})}{At} \langle \rho \rangle = \frac{\langle \rho \rangle}{A_v t} \quad (4.10)$$

2535 Donde A_v es la actividad volumétrica de la fuente que se puede expresar como:

$$A_v = \frac{A}{\pi r_s^2 (d_{max} - d_{min})} \quad (4.11)$$

2536 La Ecuación 4.10 es similar a la utilizada en la calibración de detectores en una cámara
2537 de radón. Se puede decir entonces que la sensibilidad parcial se determina midiendo la
2538 densidad promedio de huellas encontrada para cada una de las distancias fuente-detector y
2539 conociendo la actividad volumétrica de la fuente alfa. El intervalo utilizado para evaluar las
2540 distancias es el mismo que produce las huellas en el detector. Podemos decir entonces que,
2541 utilizando una fuente alfa plana de actividad conocida, (²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm, ²¹⁰Po, o cualquier
2542 otra con E > E_{max}), es posible determinar la sensibilidad parcial para un detector LR-115 en
2543 modo desnudo con respecto al radón, torón y sus progenies en el aire. Se debe recordar que
2544 el valor de sensibilidad parcial obtenido corresponde a una cierta ventana de energía y tienen
2545 dependencia con el ángulo crítico con la energía, y teniendo en cuenta que ambos parámetros
2546 dependen de las condiciones de grabado y del método de lectura de las huellas en el detector.

2547 El radio mínimo de la fuente alfa (r_s^{min}) puede ser considerado como el radio del círculo
2548 mayor posible que registra las huellas, y se puede aproximar como:

$$r_s^{min} = r_d + [R[E_0] - R[E(\theta_c^{min})]] \cos(\theta_c^{min}) \quad (4.12)$$

2549 Considerando además que el ángulo crítico es función de la energía alfa de la partícula
2550 incidente [$\theta_c=f(E)$], donde θ_c^{min} es el ángulo crítico menor que se puede considerar como:

$$r_s^{min} = r_d + d_{max} \cos(\bar{\theta}_c) \quad (4.13)$$

2551 Para un ángulo crítico igual al valor promedio de la función ($\bar{\theta}_c$), evaluado en la ventana
2552 de energía correspondiente al espesor residual del detector. Cuanto mayor sea la energía
2553 de las partículas emitidas por la fuente, mayor debe ser su radio para que la superficie que
2554 contiene los radios efectivos (secciones transversales horizontales de volúmenes efectivos)
2555 sea menor que el radio de la fuente. En resumen, el tamaño de la fuente a emplear dependerá
2556 de la energía de las partículas alfa emitidas, el tamaño del detector y las condiciones de
2557 grabado.

2558 4.3 Resultados de las simulaciones para el cálculo de sensibilidades par- 2559 ciales

2560 Para realizar las simulaciones se han utilizado los siguientes parámetros:

- 2561 • Fuente de ²⁴¹Am circular que emite partículas alfa con una energía de 5.49 MeV. La
2562 actividad nominal de la fuente de referencia RRS tipo 21A es 2 446 partículas alfa por
2563 segundo y con tiempos de exposición del detector de 30 minutos.
- 2564 • Espesor residual del detector de 5.46 μm para el que la ventana de energía determinada
2565 por interpolación está en el rango de 1.48 MeV a 4.69 MeV.
- 2566 • El radio del detector r_d es 0.5 cm y el radio de la fuente r_s es ligeramente mayor que el
2567 valor mínimo obtenido mediante la Ecuación 4.12.
- 2568 • Pasos de 0.1 cm para las distancias entre la fuente y el detector.
- 2569 • Datos del ángulo crítico en dependencia con la energía [$\theta_c = f(E)$] correspondientes al
2570 espesor residual asumido (Figura 4.2). En algunos cálculos se utiliza el ángulo crítico
2571 promedio.

2572 **4.3.1 Variaciones de las superficies efectivas, densidad de huellas y sensibilidades par-**
2573 **ciales con las distancias de la fuente al detector**

2574 En la Figura 4.4 se muestran los puntos de emisión obtenidos por simulación desde los cuales
2575 se pueden generar huellas visibles en el detector LR-115. Las líneas horizontales representan
2576 las secciones transversales de la fuente plana, a diferentes distancias en el plano vertical.
2577 Puede observarse que estos puntos desde donde se emiten las partículas alfa provenientes
2578 del ^{241}Am , forman un volumen efectivo, y la superficie mínima que la fuente debe de tener
2579 para que todo el volumen efectivo de las emisiones alfa pueda ser simulado. Resultados
2580 similares podrían obtenerse para otros emisores alfa, con energías mayores o menores que la
2581 del ^{241}Am , siempre y cuando éstas sean mayores a E_{max} .

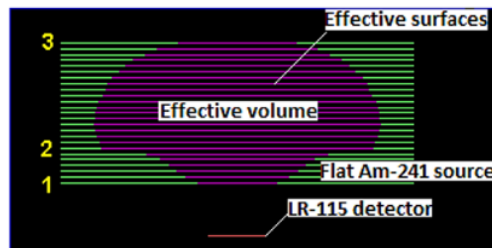


Figura 4.4. Puntos de emisión obtenidos por simulación en las secciones transversales horizontales que pueden generar huellas visibles en un detector de LR-115. Las líneas verdes y moradas representan las secciones longitudinales de la fuente plana y de sus superficies efectivas (formadas por la intersección de la fuente plana con su volumen efectivo) respectivamente [106].

2582 ²³ partir de la Figura 4.4, se observa que la superficie efectiva se incrementa cuando
2583 la distancia de la fuente al detector también aumenta desde la posición 1 a la posición 2
2584 mostradas en la Figura 4.4. Cuando se ubica en la posición 2, aumenta bruscamente y luego
2585 el incremento es menor hasta que alcanza su valor máximo. La superficie efectiva luego
2586 disminuye gradualmente hasta alcanzar la posición 3. Este comportamiento está relacionado
2587 con el radio del ²⁵⁷ cálculo efectivo que también varía a medida que se incrementa la distancia
2588 fuente-detector, como se evidencia en la Figura 4.5.

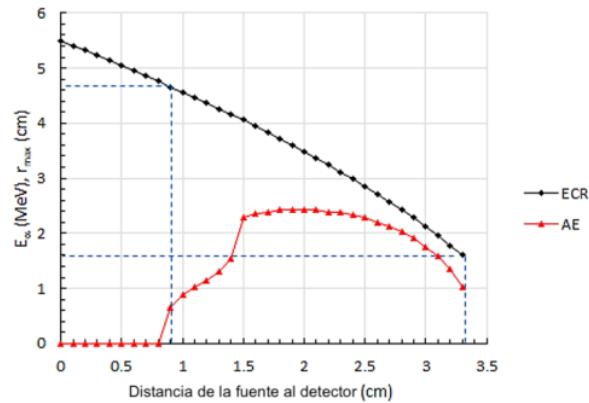


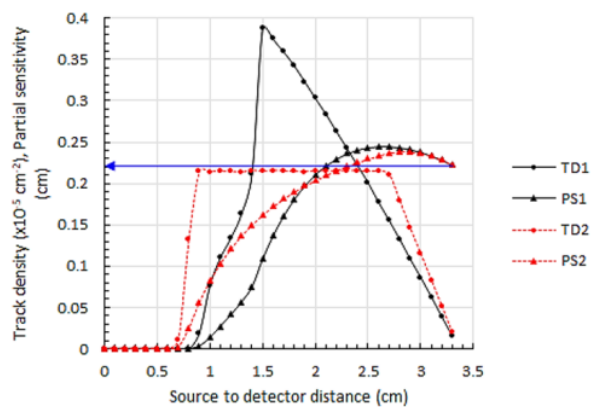
Figura 4.5. Energía máxima de partículas alfa (AE) y radio del círculo efectivo (ECR) en la fuente plana de ^{241}Am para diferentes distancias entre la Fuente y el detector [106].

2589 La Figura 4.5 también permite identificar a las energías alfa máximas en las que se
 2590 producen estos cambios significativos en la superficie efectiva, así como indican la ventana
 2591 de energía.

2592 La variación de la densidad de huellas y su sensibilidad parcial como función de la
 2593 distancia de la fuente al detector se muestra en la Figura 4.6. Se asumen dos casos para el
 2594 ángulo crítico: $\theta_c = f(E)$ (Figura 4.2) y $\theta_c = \bar{\theta}_c = 52^\circ$. El comportamiento de la densidad de
 2595 huellas es similar al de la superficie efectiva debido a la proporcionalidad entre ellas.

2596 El comportamiento de la densidad de huellas es similar al de la superficie efectiva debido
 2597 a la proporcionalidad entre ellas. La densidad de huellas es constante en una amplia gama
 2598 de valores de distancia fuente-detector cuando se utiliza el ángulo crítico promedio $\bar{\theta}_c$. En
 2599 el caso de asumir que el ángulo crítico como función de la energía $\theta_c = f(E)$, la densidad
 2600 de huellas se incrementa abruptamente hasta 1.5 cm aproximadamente, similar al radio
 2601 del círculo efectivo y luego disminuye rápidamente a diferencia de lo que sucede con el
 2602 radio efectivo de la superficie. El comportamiento de las curvas refleja las restricciones
 2603 debido a la energía y el ángulo crítico, que son variables dependientes en la función V que
 2604 caracteriza la formación de la huella grabada. Similar a la densidad de huellas, la sensibilidad
 2605 parcial (K_i) es igual a cero para distancias cortas y luego aumenta cuando se incrementa la
 2606 distancia al detector hasta que alcanza un valor máximo. Luego de ese valor, los valores de
 2607 las sensibilidades parciales K_i para los dos casos de θ_c se aproximan y luego se igualan en la
 2608 mayor distancia en la que la densidad de huellas es diferente del fondo (0.2225 ± 0.0007)
 2609 cm. La igualdad de sensibilidades parciales independientemente del modelo asumido para el

167
2610 ángulo crítico es sumamente importante desde un punto de vista práctico, ya que permite que
2611 los cálculos sean mucho más fáciles y rápidos asumiendo un ángulo crítico constante.



4
Figura 4.6. Dependencia de la densidad de huellas y de la sensibilidad parcial de un detector desnudo de LR-115 con la distancia de la fuente al detector para el caso de $\theta_c = f(E)$ (TD1 y PS1, respectivamente) y para $\theta_c = \bar{\theta}_c = 52^\circ$ (TD2 y PS2, respectivamente) [106].

10
2612 **4.3.2 Dependencia de la energía de las partículas alfa emitidas por una fuente radioisotópica**
2613

2614 Las sensibilidades parciales del detector LR-115 para las partículas provenientes de una
2615 fuente plana de ^{244}Cm (5.80 MeV), ^{210}Po (5.30 MeV) y ^{241}Am (5.49 MeV) y también para
2616 otras fuentes alfa que emiten partículas con energías similares al ^{213}Po (5.49 MeV), thorón
2617 (6.29 MeV) y su progenie ^{218}Po (6 MeV), ^{214}Po (7.69 MeV), ^{216}Po (6.78 MeV), ^{212}Bi
2618 (6.07), ^{212}Po (8.78 MeV)] se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Sensibilidades parciales de un detector LR-115 a tres fuentes isotópicas alfa, al radón, torón y su progenie.

Fuente	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm	²¹⁰ Po	Radón	²¹⁸ Po	²¹⁴ Po	torón	²¹⁶ Po	²¹² Bi	²¹² Po
r_s^{min} [cm]	2.35	2.63	2.18	2.35	2.81	4.59	3.10	3.59	2.88	5.92
r_s [cm]	2.5	2.7	2.3	2.5	2.9	4.7	3.2	3.7	3	6
K_i [cm]	0.2154	0.2154	0.2158	0.2154	0.2157	0.2172	0.2170	0.2182	0.2169	0.2183
PV [%]*	0	0	0.2	0	0.1	0.8	0.7	1.3	0.7	1.3

*Variación porcentual

2619 La última fila de la Tabla 4.1 muestra el porcentaje de la variación de los valores de las
 2620 sensibilidades parciales K_i usando la sensibilidad parcial del radón como referencia. Se
 2621 puede observar que los valores de las sensibilidades parciales son muy cercanos entre sí;
 2622 solo en los casos del ²¹⁶Po y del ²¹⁴Po este porcentaje de variación es máximo y llega a ser
 2623 del 1.3%. El hecho que las sensibilidades parciales sean semejantes, indica que el programa
 2624 desarrollado describe apropiadamente la naturaleza del proceso físico involucrado en la
 2625 respuesta del detector LR-115 expuesto en modo desnudo.

2626 En el caso de utilizar un detector LR-115 en una cámara de difusión, hay diferencias en
 2627 cuanto a las partículas que se registran en comparación con el modo desnudo. En el modo
 2628 desnudo, el detector registra partículas alfa emitidas por el radón, torón y su progenie que no
 2629 están en equilibrio desde sus respectivos volúmenes efectivos. Sin embargo, en la cámara de
 2630 difusión, solo entra el radón y el detector solo puede registrar partículas alfa provenientes del
 2631 radón que entra y su progenie en equilibrio, que está distribuida en todo el volumen de la
 2632 cámara y/o depositada en su superficie interna, así como en la superficie del detector.

2633 En una cámara de difusión cilíndrica con dimensiones mayores a los valores críticos (h_c y
 2634 R_c), las partículas alfa emitidas desde las paredes internas de la cámara no pueden alcanzar el
 2635 detector debido a que su recorrido en aire entre el punto de emisión y el detector es suficiente
 2636 para frenarlas [6]. En estos casos, las sensibilidades parciales para los detectores CR-39TM
 2637 permanecen constantes, pero son diferentes para cada emisor alfa.

2638 En el caso de las cámaras cilíndricas que utilizan detectores de LR-115, las sensibilidades
 2639 parciales son iguales para todos los productos de decaimiento. Los valores críticos para la
 2640 altura y radio (h_c y R_c) pueden estimarse considerando las restricciones de energía y ángulo
 2641 de incidencia para el registro de las partículas alfa. Para los emisores de partículas alfa con

energía E_0 , el valor crítico para el radio es equivalente al radio mínimo de la fuente plana alfa, que puede estimarse a partir de las Ecuaciones 4.11 y 4.12, y el valor crítico para la altura puede considerarse como la distancia máxima que la partícula puede viajar en aire y ser registrada por el detector.

En resumen, se puede afirmar que la sensibilidad parcial para un producto de decaimiento en aire de un detector LR-115 en modo de cámara de difusión es igual a la del modo desnudo si el volumen efectivo del producto de decaimiento no intercepta las superficies internas de la cámara de difusión. La Tabla 4.1 muestra los valores críticos de R_c para los isótopos del radón y sus progenies, lo que indica que un detector LR-115 de 0.5 cm de radio se comporta como si fuera un detector desnudo si en la cámara de difusión su radio es mayor a 6 cm y su altura es mayor a 8 cm. Este límite de 8 cm para la altura es un valor aproximado para d_{max} considerando las partículas alfa emitidas por el ^{212}Po , calculados por [82].

En conclusión, el uso de detectores LR-115 en cámaras de difusión presenta diferencias en cuanto a las partículas que se registran en comparación con el modo desnudo. Además, las sensibilidades parciales son iguales para todos los productos de decaimiento en cámaras cilíndricas que utilizan detectores de LR-115, siempre y cuando los valores críticos de altura y radio se tengan en consideración. Es importante considerar estos factores al utilizar detectores LR-115 en cámaras de difusión.

4.3.3 Dependencia con los radios de la fuente y el detector

La probable influencia de las dimensiones de los radios de la fuente y del detector en los valores simulados para las sensibilidades parciales y la mínima densidad de huellas en el detector se evalúa utilizando la fuente de ^{241}Am , debido a que la energía de las partículas alfa con las que emite el ^{222}Rn son similares y haciendo combinaciones para diferentes radios tanto de la fuente como del detector. Para el caso de detectores con radio 0.5 cm, 1 cm y 2 cm los radios de la fuente son 2.35 cm, 2.85 cm y 3.85 cm respectivamente (obtenidos a partir de la Ecuación 4.12). Los resultados se muestran en la Tabla 4.2 y se evidencia la poca influencia de las dimensiones de estos dos parámetros en los valores calculados para las sensibilidades parciales en un amplio rango de combinaciones.

Si las sensibilidades parciales se redondean a la segunda cifra decimal, todas coinciden con un mismo valor de 0.22 cm. La densidad máxima de trazas, que se induce a la mayor distancia entre la fuente y el detector, será menor cuanto mayor sea el área de la fuente, lo que era de esperarse. Sin embargo, esa densidad de trazas no depende del tamaño del detector para una fuente determinada. Los valores corresponden al promedio de cinco corridas del programa y σ es la desviación estándar para cada conjunto de mediciones. La comparación de las sensibilidades parciales con las obtenidas para $r_d = 1$ cm y $r_s = 3$ cm se presenta en la

2677 última fila de la Tabla 4.2. Para estos radios, el volumen muestreado (volumen de emisión
 2678 de partículas alfa) es muy cercano al volumen efectivo del detector; bajo estas condiciones,
 2679 la sensibilidad calculada estaría más cerca del valor real para el paso considerado. Los
 2680 resultados indican la independencia del valor de sensibilidad parcial con el tamaño de la
 2681 fuente y el detector, siempre y cuando se cumplan las condiciones mencionadas.

Tabla 4.2. Respuesta del detector para las diferentes combinaciones de radios de la fuente y del detector (r_s y r_d , respectivamente). Las sensibilidades parciales son las medias de 5 corridas del programa, con sus desviaciones standard respectivas. En la última fila están las desviaciones porcentuales de cada sensibilidad con respecto al valor obtenido para $r_d = 1\text{ cm}$ y $r_s = 3\text{ cm}$.

r_s [cm]	3			5			7		
r_d [cm]	0.5	1	2*	0.5	1	2	0.5	1	2
ρ_{min} [huellas cm^{-2}]	1 052	1 077	-	378	380	386	197	186	194
\bar{K}_i [cm]	0.2161	0.2155	-	0.2163	0.2162	0.2159	0.2202	0.2156	0.2158
σ [cm]	0.0002	<0.0001	-	0.0002	<0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Desviaciones (%)	0.30	0.00	-	0.38	0.34	0.17	2.16	0.05	0.17

*La fuente de radio menor es mayor en 3 cm que el radio del detector.

2682 4.3.4 Dependencia con la longitud del paso y comparación con las sensibilidades par- 2683 ciales reportadas por otros autores

2684 Los resultados obtenidos al variar la longitud de paso en las simulaciones se muestran en la
 2685 Tabla 4.3. El “tiempo total” se refiere al tiempo requerido para realizar todas las mediciones.
 2686 Los límites para el volumen efectivo en el eje Z se cubren prácticamente en el paso de
 2687 menor longitud (0.1 cm). La pequeña diferencia en la sensibilidad es probablemente debido
 2688 a que alguna fracción en el volumen efectivo puede perderse dependiendo del tamaño de
 2689 paso mostrado en la Figura 4.1. Utilizando de 5 a 9 detectores se puede lograr una buena
 2690 estimación para la sensibilidad K_B en el rango de distancias fuente-detector que producen
 2691 huellas visibles para longitudes de paso de 0.5 cm o 0.3 cm, respectivamente, lo que también
 2692 puede verse en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Respuesta del detector en dependencia de la longitud del paso para las distancia de la fuente al detector.

Paso [cm]	Tiempo total [h]	Nº de detectores	d_{min} [cm]	E_{max} [MeV]	d_{max} [cm]	E_{min} [MeV]	$r_d = 0.5,$ $r_s = 4$	$r_d = 1,$ $r_s = 4$	$r_d = 1,$ $r_s = 3$	K_B^*
							K_B [cm]	K_B [cm]	K_B [cm]	
0.05	25	50	0.9	4.66	3.35	1.5	0.22	0.22	0.22	0.019
0.1	12.5	25	0.9	4.66	3.3	1.59	0.22	0.22	0.22	0.019
0.2	6	12	1.0	4.56	3.2	1.77	0.20	0.20	0.20	0.017
0.3	4.5	9	0.9	4.66	3.3	1.59	0.21	0.21	0.21	0.018
0.5	2.5	5	1.0	4.56	3	2.1	0.20	0.20	0.20	0.017

* [huellas·cm⁻²·Bq⁻¹·d⁻¹·m³]

2693 En ese caso, el tiempo total de medición podría ser inferior a 5 horas. El porcentaje
2694 máximo de desviación de las sensibilidades parciales en relación con el valor de K_B calculado
2695 para el paso más pequeño es de aproximadamente el 10%. Dado que los valores de d_{min} y
2696 d_{max} no se ¹⁴¹ocen de antemano, los tiempos totales serán algo mayores que los tiempos
2697 ⁴estimados. Sin embargo, serán relativamente pequeños en comparación con los utilizados
2698 para la calibración de detectores en cámaras de radón. Obviamente, el tiempo de exposición
2699 de los detectores se puede reducir aún más si se utiliza una fuente con una actividad más alta.

2700 Si se aproximan las sensibilidades parciales expresadas (en cm) a décimas puede ob-
2701 servarse como estos valores convergen a 0.2 cm. En el caso de las sensibilidades parciales
2702 expresadas en huellas·m⁻²/Bq·d·m⁻³, estos valores se aproximan a 0.02. Se puede obser-
2703 var la similitud con los valores reportados por [63] en la cámara walk-in (HPA). El valor
2704 obtenido a partir de la simulación realizada también se puede comparar con el experimento
2705 realizado por [23] en el que se reporta un valor medio (teórico y experimental) de 0.23 cm
2706 (0.02 huellas·m⁻²/Bq·d·m⁻³). La ligera diferencia puede ser debido a las variaciones en las
2707 condiciones de grabado y método de lectura empleados en los diversos casos, que como se
2708 sabe son propios de acuerdo a la instrumentación de cada laboratorio.

2709 Cabe mencionar que los enfoques teóricos realizados por estos autores son diferentes
2710 a los utilizados en este estudio. En el caso de Planinic [111], donde se consideró para el
2711 criterio de visibilidad que no era necesario la perforación total del detector, así como tampoco
2712 se consideró una corrección de ángulos críticos ³ para ángulos de impacto pronunciados, se
2713 reportaron valores más altos de sensibilidad. En la Tabla 4.4 se muestra una comparación
2714 del valor de la sensibilidad parcial promedio obtenido en este trabajo con los reportados
2715 por otros autores. También se detalla la diferencia porcentual entre la sensibilidad parcial
2716 K_B calculada en esta simulación con respecto a la K_B reportada en trabajos similares, esta
2717 diferencia porcentual (Dif%) se calcula como

$$Dif(\%) = \frac{|(K_B^i - K_B^{TW})|}{(K_B^i)} \cdot 100 \quad (4.14)$$

2718 donde K_B^i y K_B^{TW} son las sensibilidades reportadas en otros estudios y en éste, respectiva-
2719 mente.

149 **Tabla 4.4. Comparación de los promedios de las sensibilidades parciales obtenidos en este trabajo con los valores teóricos y experimentales reportados por otros autores.**

Sensibilidad parcial [huellas $\text{m}^{-2}/\text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}$]	Modo	Observaciones	Dif%
$0.021 \pm 0.003[75]$	Experimental	Factores de equilibrio: radón [$\sim 0 - 0.8$], torón [$\sim 0 - 0.15$]	8.6
0.023[33]	Experimental	$\Delta E = [1.7, 4.1]$ MeV	16.5
0.022[33]	Teórico	$\bar{\theta}_c = 40^\circ$	12.7
0.02 [23]	Teórico	-	4.0
$0.0200 \pm 0.0017[23]$	Experimental	Para radón	4.0
$0.0196 \pm 0.0015[23]$	Experimental	Para torón	2.0
0.0203[63]	Experimental	Espesor residual de la capa activa de 5.46 μm	5.5
0.0249[167]	Teórico	Espesor residual de la capa activa de 5.46 μm	22.9
0.0197[124]	Teórico	$\Delta E = [1.48, 4.69]$ MeV $\bar{\theta}_c = 53^\circ$	2.5
$0.0192 \pm 0.0001[106]$	Teórico	Espesor residual de la capa activa de 5.46 μm	-

*Variación porcentual

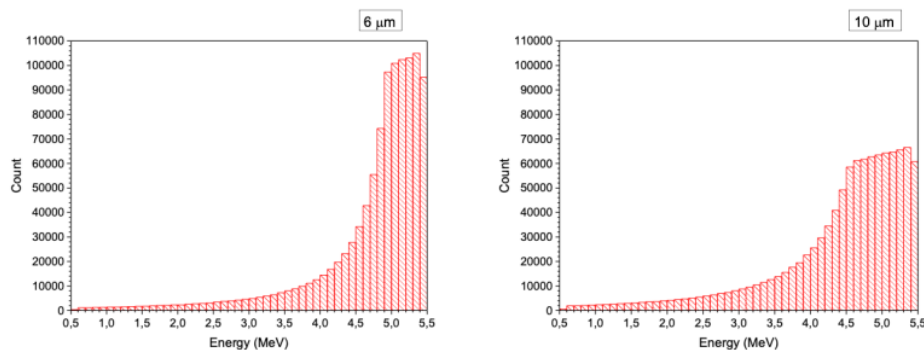
274

2720 En la mayoría de los casos, la diferencia es menor al 20%, considerando incluso ciertos
2721 casos en los que las condiciones de grabado, el modo de lectura, el modelo empleado de
2722 formación de la huella o los procedimientos experimentales son diferentes al empleado en
2723 este caso, lo que lleva a inferir que la propuesta además de ser eficaz tiene la ventaja adicional

de su simplicidad, facilidad de uso, rapidez y bajo costo. Recordando que la función V representa la relación entre la tasa de grabado de las huellas nucleares y la tasa de grabado en el material detector, cabe mencionarse que en el caso del trabajo de [167], donde se observa la mayor diferencia, ésta puede ser debida al uso de funciones V distintas.

4.3.5 Influencia del espesor de la capa activa de las fuentes alfa en los cálculos de sensibilidad

Los resultados previos podrían ser aplicables únicamente a fuentes ideales con espesor despreciable. Sin embargo, debido a que la respuesta del detector LR-115 depende principalmente de la diferencia entre las distancias máxima y mínima permitidas, es posible que la sensibilidad parcial no se vea afectada cuando se utilicen fuentes de espesor relativamente mayor. En el caso de fuentes planas construidas con láminas de aluminio anodizado, la actividad proviene de la superficie superior de una lámina de aluminio, lo que resulta en una fuente con una capa activa de alrededor de $5 \mu\text{m}$ de profundidad ($0.8 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$). Para considerar el espesor finito de la fuente alfa, se modificó ligeramente el programa desarrollado y se distribuyeron uniformemente los átomos de ^{241}Am en la fuente. La energía de las partículas alfa que emergen de la fuente se calculó a partir de la curva de energía-distancia obtenida por el software SRIM 2013 utilizando un material con densidad y composición similares a los de la fuente activa. A través de simulaciones basadas en el método Monte Carlo, se determinaron las distribuciones de energía de las partículas alfa que emergen de la superficie de la fuente de ^{241}Am . Se muestran los histogramas de frecuencia para dos espesores diferentes de la capa activa en la Figura 4.7, habiéndose utilizado el mismo número de historias generadas en ambos casos.



21

Figura 4.7. Distribución de la energía de las partículas alfa que emergen de la fuente plana de ^{241}Am con un espesor de capa activa de $6 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ [106].

2746 A medida que el espesor de la capa activa se incrementa, disminuye la cantidad de
2747 partículas alfa con energías superiores a E_{max} y aumenta el número de partículas con energías
2748 dentro de la ventana de energía. Como resultado, aumenta la probabilidad de detectar
2749 partículas alfa emitidas a una distancia menor entre la fuente y el detector, e incluso es
2750 posible registrar partículas a una distancia cero. La Figura 4.8 muestra la sección transversal
2751 de las intersecciones de superficies planas emisoras alfa con el volumen efectivo para una
2752 fuente ideal y para fuentes con diferentes espesores de capa activa. Los datos de entrada para
2753 las simulaciones fueron $r_d = 0.5$ cm, $r_s = 4$ cm, $s = 0.1$ cm, la ventana de energía fue [1.48,
2754 4.69] MeV y el ángulo crítico $\theta_c = f(E)$ obtenidos de la Figura 4.4.

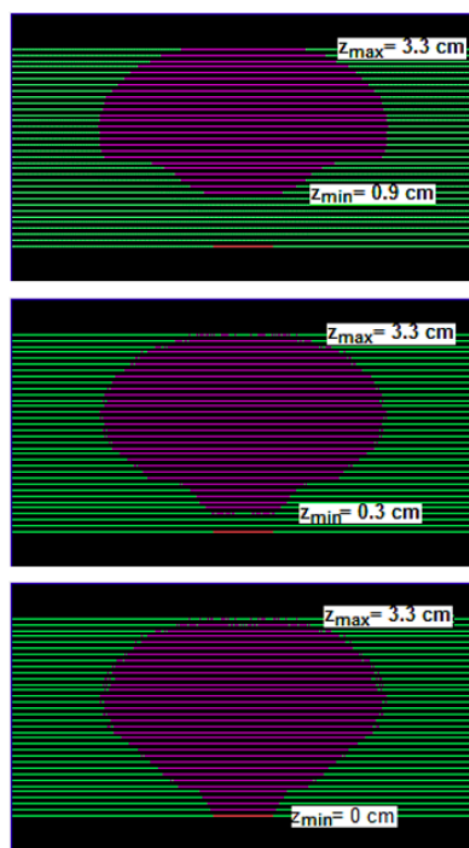


Figura 4.8. Sección eficaz de los volúmenes efectivos para fuentes de ^{241}Am con diferentes capas activas: $0 \mu\text{m}$ (A), $6 \mu\text{m}$ (B) y $10 \mu\text{m}$ (C). Las sensibilidades parciales calculadas por simulaciones de Monte Carlo 0.2169 cm, 0.2185 cm y 0.2196 cm, respectivamente. La línea roja debajo de cada volumen efectivo, representa el detector de LR-115 [106].

Se observa a partir de estos resultados de la simulación, que las sensibilidades parciales son prácticamente las mismas en todos los casos. Las diferencias porcentuales en cuanto a la sensibilidad en comparación con la fuente ideal son alrededor del 1%. No obstante, existen diferencias en cuanto a las formas, dimensiones y ubicaciones de los volúmenes efectivos. A medida que se aumenta el espesor de la capa activa, el volumen efectivo se hace más grande y se inducen huellas visibles en el detector a una distancia menor de la fuente. Por ejemplo, para generar huellas visibles en un detector LR-115 frente a una fuente plana ideal, la distancia entre la fuente y el detector no puede ser menor a 0.9 cm (considerando el tamaño de paso utilizado en las simulaciones). Sin embargo, para una fuente con una capa activa de $10 \mu\text{m}$ de espesor, las huellas visibles se producen a una distancia de 0 cm entre la fuente y el detector. A pesar de que hay un aumento ligeramente mayor en la sensibilidad parcial hasta una capa activa de $10 \mu\text{m}$ de espesor, se espera que disminuya para espesores mayores debido a la autoabsorción de partículas alfa. Por estas razones, es importante conocer la naturaleza del material activo para tener una idea de la distancia mínima entre la fuente y el detector a partir de la cual se empiezan a registrar las huellas.

4.3.6 Influencia del torón y su progenie en las mediciones de radón

Al utilizar el modo desnudo para mediciones de radón, el torón y su progenie emisora alfa pueden contribuir a la formación de huellas en el detector LR-115, lo que puede llevar a estimaciones inexactas de las concentraciones de radón. Por lo tanto, se requiere la realización de correcciones para tener en cuenta el número de huellas que interfieren en la medición.

La densidad de huellas que se registra en un detector expuesto en un ambiente que contiene radón, torón y sus progenies, ha sido formulado por [75, 119] en la siguiente expresión:

$$\rho_B^{ME} = K_{Bt}[C_{rn}(1 + F_P) + C_{th}(2 + f'_4)] \quad (4.15)$$

donde $F_P = \frac{C_{218Pb}}{C_{rn}} + \frac{C_{214Pb}}{C_{rn}}$ es el factor de equilibrio proxy y $f'_4 = \frac{C_{212Pb}}{C_{th}}$.

Si la concentración de torón y su progenie se puede despreciar, la densidad de huellas registradas en el detector en un mismo tiempo t , se deberá solamente a la contribución de radón y su progenie no equilibrada [165, 15, 166]:

$$\rho_B^{ME} = C_{rn}K_{Bt}(1 + F_P) = S_B^{rn}C_{rn}t \quad (4.16)$$

donde S_B^{rn} es el factor de calibración del detector desnudo que relaciona la tasa de densidad de huellas con la concentración de radón y puede determinarse en forma experimental en una cámara de radón en condiciones ambientales similares a las de la exposición del detector.

2785 Para rectificar la densidad de huellas registrada en un detector LR-115 sin tener en cuenta
2786 las contribuciones del torón y su progenie, una opción puede ser restar la Ecuación 4.16
2787 de la Ecuación 4.15 y utilizar la aproximación recomendada por [15] para la corrección en
2788 escenarios bajo condiciones normales.

$$\Delta\rho = \rho_B^{ME} - \rho_B^{rn} = 2C_{th}K_Bt \quad (4.17)$$

2789 La ecuación anterior indica que la presencia del torón influye en la densidad de huellas
2790 en el detector y es necesario realizar una corrección. La densidad de huellas correspondiente
2791 entonces solo al radón y su progenie, teniendo en cuenta esta corrección será:

$$\rho_B^{rn} = \rho_B^{ME} - 2C_{th}K_Bt \quad (4.18)$$

2792 Donde el valor de la sensibilidad K_B determinada es utilizada en el cálculo. Por lo tanto,
2793 puede decirse que a partir de Ecuación 4.16, la concentración de radón en un ambiente mixto
2794 se puede estimar de la siguiente manera:

$$C_m = \frac{\rho_B^{ME}}{S_B^{rn}t} - 2\frac{K_B}{S_B^{rn}}C_{th} \quad (4.19)$$

2795 En la expresión anterior, el primer término representa la concentración de radón sin
2796 corregir, que puede considerarse sobreestimada debido a la presencia de torón. Si se desprecia
2797 la concentración del torón, será posible entonces medir la concentración real de radón
2798 empleando ese término solamente. Por otro lado, los resultados presentados podrían ser
2799 aplicados a mediciones de torón, por ejemplo, utilizando una cámara de difusión donde pueda
2800 discriminarse el torón. Si se conoce la concentración de radón y utilizando la Ecuación 4.19
2801 puede escribirse entonces:

$$C_{th} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_B^{ME}}{S_B^{rn}t} - \frac{S_B^{rn}}{K_B}C_{rn} \right) \quad (4.20)$$

2802 Es importante señalar que tanto la Ecuación 4.19 como la Ecuación 4.20 podrían arrojar
2803 valores negativos debido a las incertidumbres obtenidas en las mediciones.

2804 En cuanto a los productos de desintegración del torón, aun considerando que la bifurcación
2805 del ^{212}Bi no es relevante para el cálculo de la sensibilidad parcial (ver Tabla 4.1), es
2806 necesario utilizar un factor de corrección para determinar el porcentaje de emisión alfa en
2807 el cálculo, por ejemplo, la contribución del ^{212}Bi o ^{212}Po en suspensión (en el aire) en la
2808 densidad de huellas.

2809 A pesar de que el significativo desequilibrio espacial entre el torón y sus productos de
2810 desintegración es un problema importante a considerar, el torón exhibe una distribución no

2811 homogénea debido a su corta vida media en contraste con sus productos de desintegración.
 2812 Según la Ecuación 4.15 la densidad de huellas generada por el torón y su progenie en
 2813 suspensión en el detector LR-115 desnudo puede expresarse como:

$$\rho_B^{th} = K_B C_{th} t (2 + f_4) \quad (4.21)$$

2814 Considerando que el ^{216}Po y el ^{212}Po tienen una vida media muy corta y se desintegran
 2815 prácticamente en el instante que se forman, puede decirse que el ^{216}Po estará en equilibrio
 2816 siempre con el torón y el ^{212}Po lo estará con el ^{212}Bi . Debe recordarse que el ^{212}Bi tiene
 2817 una bifurcación en su decaimiento, pues el 36% decae por emisión de partículas alfa de 6.05
 2818 MeV, mientras que 64% decae prácticamente instantáneamente debido a emisión beta de
 2819 ^{212}Po , que a su vez es un emisor de partículas alfa con energías de 8.78 MeV. Debido a estas
 2820 consideraciones, la ecuación anterior puede describirse de la siguiente manera:

$$\rho_B^{th} = K_B t (C_{th} + C_{216Po} + 0.36 C_{212Bi} + 0.64 C_{212Bi(212Po)}) \quad (4.22)$$

2821 En otras palabras, es posible afirmar que las contribuciones individuales para los produc-
 2822 tos ^{212}Bi y ^{212}Po aerotransportados en la densidad de huellas, deben de incluir los factores
 2823 de corrección de emisión alfa para cada uno de ellos:

$$\begin{aligned} \rho_B^{212Bi} &= 0.36 K_B C_{212Bi} t \\ \rho_B^{212Po} &= 0.64 K_B C_{212Po} t \end{aligned} \quad (4.23)$$

2824 Es necesario resaltar que la contribución del radón, torón y su progenie presentes en el
 2825 entorno cercano al detector no fue considerada en la simulación, debido a que por las energías
 2826 de sus partículas alfa emitidas no pueden registrar sus huellas. También se ha considerado la
 2827 probable reducción de estos productos debido al efecto plate-out. La justificación de esta
 2828 simplificación se basa en el hecho que los detectores están expuestos en un periodo corto
 2829 de tiempo y que en los laboratorios los valores de fondo (bajos niveles de radón/torón) son
 2830 bastante bajos. Al utilizar una fuente como la de ^{241}Am , considerada de alta actividad, puede
 2831 decirse que casi todas las huellas registradas en el detector provienen de las partículas alfa
 2832 emitidas por la fuente, justamente las que son requeridas para el cálculo de las sensibilidades
 2833 parciales.

2834 Puede afirmarse entonces que los resultados obtenidos representan con gran precisión la
 2835 sensibilidad del LR-115 a las partículas alfa. Las simulaciones fueron realizadas considerando
 2836 un gran número de historias (aproximadamente 5×10^6) y cada experimento se realizó un
 2837 mínimo de 3 veces, lo que puede evidenciarse en las desviaciones estándar porcentuales que
 2838 fueron menores al 1% en todos los casos.

2839 Es necesario señalar también que las formas, dimensiones y ubicaciones de los volúmenes
2840 efectivos son diferentes. Con el aumento del espesor de la capa activa, el volumen efectivo
2841 se vuelve más grande y se inducen huellas visibles en el detector a una distancia menor de la
2842 fuente. Por ejemplo, para inducir huellas visibles en un detector LR-115 frente a una fuente
2843 alfa planar ideal, la distancia entre ellas no puede ser inferior a 0.9 cm (para el paso utilizado
2844 en las simulaciones); las huellas visibles se inducen para una distancia de fuente a detector
2845 de 0 cm para una fuente de espesor activo de $10 \mu\text{m}$. Aunque hay un ligero aumento en la
2846 sensibilidad parcial hasta una capa activa de $10 \mu\text{m}$ de espesor, se espera que disminuya para
2847 espesores mayores debido a la autoabsorción de partículas alfa. Por las razones anteriores,
2848 para definir la distancia mínima entre la fuente y el detector, se deben conocer bien las
2849 características de la fuente si se va a calcular la sensibilidad parcial de un detector LR-115
2850 desnudo mediante el método desarrollado.

2851 4.4 Propuesta final del método alternativo de calibración

2852 Se desarrollaron las bases de un método y un programa de simulación para calcular la
2853 sensibilidad parcial de un detector LR-115 en modo desnudo que pueda registrar al radón,
2854 torón o cualquiera de sus progenies, para espesores residuales del detector en el rango de
2855 $5.19 \mu\text{m}$ a $6.28 \mu\text{m}$.

2856 Los resultados de la simulación demostraron que la sensibilidad parcial se puede estimar
2857 experimentalmente midiendo las densidades de huellas inducidas en detectores pequeños
2858 expuestos a diferentes distancias de una fuente alfa plana. Se demostró la igualdad de las
2859 sensibilidades parciales para fuentes alfa isotópicas con energías superiores a E_{max} de la
2860 ventana de energía, y para el radón, torón y sus progenies. El valor promedio de la sensibilidad
2861 parcial calculada es comparable con los obtenidos teórica y experimentalmente por otros
2862 autores. A partir de los resultados puede inferirse que los resultados no son válidos solamente
2863 para fuentes alfa electrodepositadas, sino que también se pueden utilizar otros tipos de
2864 fuentes planas comerciales, como aquellas encapsuladas con láminas metálicas muy delgadas
2865 o aquellas construidas a partir de láminas de aluminio anodizado. El método propuesto y
2866 evaluado mediante simulación experimental es más simple y rápido en comparación con
2867 el método que utiliza fuentes estándar de radón y sus progenies y una cámara grande con
2868 condiciones controladas.

2869 Cuando decimos que el método es más simple y rápido, nos referimos a que el proceso
2870 se puede realizar prácticamente en cualquier lugar con herramientas accesibles y en poco
2871 tiempo, dependiendo de la actividad de la fuente alfa. Esta propuesta es evidentemente mucho
2872 más sencilla y rápida, en comparación con el método que utiliza una cámara grande con

2873 condiciones controladas (walk-in chamber), es beneficioso para ahorrar tiempo y recursos.
2874 Además, este método proporciona resultados precisos y comparables con los obtenidos
2875 mediante métodos teóricos y experimentales.

2876 Es importante destacar que este método y programa de simulación permiten ⁴ calcular la
2877 sensibilidad parcial de un detector LR-115 desnudo ⁷² de manera más eficiente y precisa que los
2878 métodos convencionales. Por lo tanto, puede ser una herramienta útil en la caracterización
2879 de ¹ la respuesta del detector a diferentes fuentes alfa, lo que es importante para aplicaciones
2880 en la detección de partículas alfa en el medio ambiente. Además, el uso de fuentes planas
2881 comerciales más accesibles y económicas aumenta la aplicabilidad y la viabilidad del método
2882 propuesto.

2883 En resumen, el método y el programa de simulación desarrollados presentan una alterna-
2884 tiva interesante, sencilla y práctica para la medición de la sensibilidad parcial de detectores
2885 LR-115 desnudos a partículas alfa para laboratorios que no dispongan de equipos sofisticados
2886 o cámaras de calibración.

2887 Capítulo 5

2888 Mediciones de radón intramuros (en interiores) en Lima

2889 El radón y su progenie, cuando se inhalan, administran una dosis significativa de radiación
2890 alfa al tejido bronquial que se ha relacionado con el cáncer pulmonar de origen radiológico.
2891 Para estimar la dosis de inhalación en viviendas, generalmente la contribución del torón y
2892 su progenie se desprecia, únicamente la contribución del radón se mide con una cámara de
2893 difusión y el alfa total en el aire mediante detectores desnudos colocados sobre la pared, el
2894 cual es ⁴⁵ último método minimiza los efectos de ventilación, mobiliario y otras superficies.

2895 El gas radón (²²²Rn) y el torón (²²⁰Rn) decaen en su progenie de vida corta y crea
2896 un aerosol de partículas sólidas suspendidas, también ⁶ conocidas como SPM (Suspended
2897 Particulated Matter). Esta progenie de vida corta está presente en el aire interior y exterior de
2898 una vivienda como partículas sueltas o pueden adherirse a partículas existentes formando
2899 la llamada progenie adherida. La magnitud de la fracción libre depende principalmente
2900 de la concentración de partículas ambientales, que depende de las condiciones locales. La
2901 inhalación de la progenie libre y la adherida en el aire contribuyen predominante en la dosis
2902 a los pulmones. Debido a que el radón es un gas inerte, casi todo el radón que se inhala se
2903 exhala posteriormente; sin embargo, una gran proporción de la progenie del radón inhalado
2904 se deposita en las vías respiratorias de los pulmones. Debido a sus vidas medias cortas,
2905 la dosis llega a los tejidos pulmonares antes de que pueda tener lugar la depuración, ya
2906 sea por absorción en la sangre o por transporte de partículas al tracto gastrointestinal. Dos
2907 de estos productos de vida corta, el ²¹⁸Po y el ²¹⁴Po, emiten partículas alfa cuya energía
2908 depositada domina la dosis al pulmón. Como consecuencia, la dosis equivalente a los
2909 pulmones contribuye con más del 95% de la dosis efectiva después de la inhalación de la
2910 progenie del radón [61, 101]. Por lo general, la dosis efectiva de la inhalación de gas radón
2911 es inferior al 10% de la dosis de la progenie del radón inhalado [61, 101].

2912 Estudios epidemiológicos han demostrado que el riesgo de cáncer de pulmón aumenta al
2913 menos un 8% por cada incremento de 100 Bq·m⁻³ en la concentración de radón. El estudio
2914 europeo combinado en residencias ha mostrado un riesgo relativo adicional del 16% por cada

2915 incremento de 100 Bq m⁻³ [18]. Adicionalmente, se encontró evidencias de riesgo de cáncer
2916 de pulmón incluso en aquellos expuestos a concentraciones de actividad por debajo de 200
2917 Bq·m⁻³ [18]. En Europa, el radón es considerado la segunda causa principal de cáncer de
2918 pulmón después del tabaquismo. Aunque el radón tiene mayor probabilidad de causar cáncer
2919 de pulmón en personas que fuman o han fumado en el pasado, el radón es la principal causa
2920 de cáncer de pulmón en personas que nunca han fumado. La exposición al radón aumenta el
2921 riesgo de cáncer de pulmón.

2922 Siendo Lima una ciudad con una alta cantidad de particulado se puede concluir entonces
2923 que es importante la contribución de la progenie adherida que ingresa a nuestro organismo
2924 por inhalación. Considerando adicionalmente que el 13% de la población en el Perú es adicta
2925 al tabaquismo, porcentaje relativamente bajo con respecto al promedio mundial de 20.3%
2926 según WHO (<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/tobacco>,
2927 accedido el 3 de Junio de 2023), se puede decir entonces que el radón es una causa importante en la incidencia
2928 de cáncer pulmonar en nuestra población. El cáncer de pulmón es el sexto cáncer más común
2929 y la segunda causa de muerte por cáncer en el Perú. Según estadísticas de Globocan, en 2018
2930 se proyectaron 3 210 nuevos casos y 2 844 muertes, con tasas estandarizadas de incidencia y
2931 mortalidad de 9.5 y 8.9, respectivamente, con factor de mortalidad-incidencia de 0.93) [126].
2932 Es por esta razón que no solamente se justifica este trabajo sino constituye un importante y
2933 necesario aporte a la salud de los peruanos al mismo tiempo que se entregan los primeros
2934 valores medidos en nuestra ciudad.

2935 Los monitoreos de radón intramuros (término en español, acuñado por el Dr. Guillermo
2936 Espinosa de la UNAM [27]) pueden tener diversas orientaciones o fines, como por ejemplo,
2937 el de relacionar al radón con el riesgo al desarrollo de neoplasias [88], identificar áreas
2938 de mayor concentración para priorizar su mitigación y desarrollar políticas, y programas
2939 para reducir su concentración en el ambiente. El estudio de materiales de construcción y
2940 la exhalación de radón y torón, de acuerdo a su composición, también puede contribuir a
2941 disminuir las concentraciones de estos gases al interior de las viviendas. La relación entre la
2942 concentración de radón y diversos factores ambientales y geogénicos es bastante estrecha,
2943 por lo que todos estos parámetros deben de ser tomados en cuenta.

2944 Los monitoreos de radón utilizando detectores de huellas nucleares (SSNTDs) son de los
2945 más realizados a nivel mundial, debido a su facilidad de uso y bajo costo, como se evidencia
2946 en la Figura 5.1.

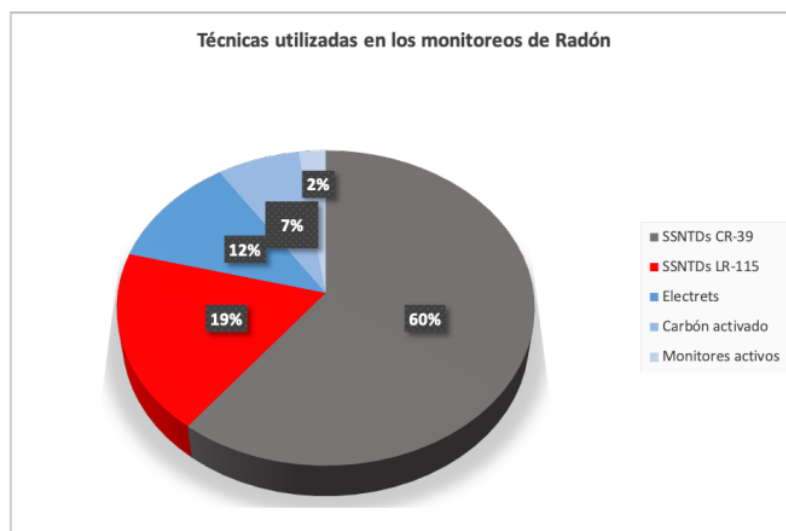


Figura 5.1. Resumen de monitoreos de radón a nivel mundial utilizando diferentes técnicas de medición [99].

2947 Sin embargo, se considera que el LR-115 tiene ventajas con respecto al CR-39TM por su
 2948 ventana de energía definida y ad-hoc para el registro de partículas alfa provenientes de radón,
 2949 torón y progenie. Otro punto importante es que el LR-115 no registra las alfas depositadas en
 2950 su superficie, despreciando el efecto plate-out [5], con lo que solo registrará la contribución
 2951 aérea de estos gases. Su bajo costo comparado y su facilidad de uso (manipulación, tiempo
 2952 menor de grabado químico), transporte y almacenamiento hacen que estos detectores sean
 2953 ideales para registrar las huellas de las partículas alfa emitidas por el radón. El grupo
 2954 GITHUNU – PUCP ya ha estudiado a este material y esta caracterizado [107].

2955 Muchos países han realizado estudios de monitoreo de radón utilizando detectores de
 2956 huellas nucleares (SSNTDs) identificando edificaciones en las llamadas “zonas de riesgo”
 2957 (prone area) [20, 155, 98]. Aunque el CR-39TM ha sido ampliamente utilizado en Europa
 2958 para este propósito [134, 127, 68, 67, 41] en monitoreos a gran escala respaldados por el
 2959 gobierno y las instituciones estatales, en nuestro caso, optamos por utilizar el detector LR-115
 2960 tipo 2 no pelicular. Este detector es fabricado bajo licencia de Kodak Pathé (Francia) por la
 2961 empresa DOSIRAD (Francia) debido a su bajo costo, facilidad de uso y nuestra experiencia
 2962 previa. El detector LR-115 se ha utilizado en modo desnudo, abierto o descubierto y al
 2963 interior de una cámara de difusión o modo cerrado. El uso de estos detectores LR-115 ya sea
 2964 en modo desnudo [120, 141, 153] o en cámara de difusión [158, 99] ha sido ampliamente
 2965 probado en diversos países en desarrollo. En los capítulos anteriores se ha tratado sobre

2966 que es lo realmente mide el detector en modo desnudo y su calibración. En el caso de los
2967 detectores en cámara de difusión su calibración ya ha sido también estudiada [124]. Los
2968 detectores desnudos registran las concentraciones de radón, torón y sus progenies en el aire
2969 [75]. Esto complica su calibración pues deben de tenerse en cuenta factores atmosféricos
2970 [95], el hecho que el torón presente y su progenie no estén en equilibrio, por lo que se puede
2971 afirmar que este factor de calibración depende fuertemente del factor de equilibrio y se
2972 considera entre 0.2 y 0.7 [146].

2973 Comparando ambos modos de exposición puede decirse que si bien los monitores en
2974 cámaras de difusión son menos sensibles a las variaciones de condiciones ambientales [108],
2975 son menos propensos a dañarse por factores ambientales y su calibración puede ser más
2976 sencilla, en el caso de los detectores en modo desnudo, su costo es menor y al ser colocados
2977 fijos a la pared, la posibilidad que se pierdan o cambien de ubicación durante el periodo de
2978 medición es mucho menor que con las cámaras de difusión. Recordemos, también, que los
2979 detectores al interior de las cámaras de difusión solo registrarán al radón y a su progenie que
2980 se produzca al interior de la cámara, considerando el uso de una barrera semipermeable.

2981 5.1 Descripción del área de monitoreo

2982 Las mediciones de radón se realiza³²³ en la provincia²⁹⁴ de Lima, capital del Perú, localizada
2983 en la costa central de Sudamérica. La ciudad de Lima⁵³, está rodeada por el océano Pacífico
2984 y hacia el este por la cordillera andina central. Los ríos Chillón, Rímac y Lurín recorren
2985 la ciudad y desembocan en el océano Pacífico y juegan un importante rol en la erosión y
2986 transporte de material no conglomerado. La geología del lugar ya ha sido estudiada en un
2987 trabajo previo [152].

2988 Lima está dividida políticamente en 43 distritos, que ha sido dividida³⁴⁸ en 4 conos o
2989 regiones para este estudio, de acuerdo con la clasificación realizada por la municipalidad
2990 provincial de Lima [70]. Se divide a los distritos de Lima de la siguiente manera:

- 2991 • Cono Lima Norte¹⁰⁴
- 2992 • Cono Lima Sur
- 2993 • Como Lima Este
- 2994 • Lima Centro

2995 La población de la provincia de Lima¹ es superior a los 10 millones de habitantes y tiene
2996 una superficie de aproximadamente 2 678.28 km². En esta extensa área podemos encontrar

2997 una variedad de diversas características presentadas en cada región como se detallará a
2998 continuación:

- 2999 • **Lima centro:** localizada a orillas del Pacífico y rodeada por los otros conos, comprende
3000 16 distritos con una superficie de 147.73 km² y una población superior a los 2 millones
3001 de habitantes [45], siendo la zona donde se concentra la mayor población en la ciudad.
3002 Su suelo es principalmente formado por depósitos aluviales arrastrados por el río Rímac.
3003 El Rímac es importante para Lima, pues la napa freática se encuentra bastante profunda
3004 y los depósitos orgánicos incrementan su compactación. Presenta afloramientos rocosos
3005 cubiertos por material limoso y arcilloso y en algunos lugares el acarreo de grava
3006 influye en la compactación del suelo. La grava se mezcla con arena fina, limo y arcillas
3007 haciendo que los suelos se vuelvan más compactos [46].
- 3008 • **Cono Este:** localizada al este de Lima centro, no tiene acceso al mar y colinda con la
3009 cordillera de los Andes. Este cono comprende 8 distritos que ocupan un área de 814.25
3010 km² con una población cercana a los 3 millones de habitantes. En algunos distritos,
3011 como San Juan de Lurigancho se encuentran depósitos coluviales debido al efecto de
3012 la gravedad. El crecimiento urbano acelerado ha generado también la presencia de
3013 material de relleno proveniente de otras zonas [46]. Existe también material gravoso
3014 de mayor tamaño (canto rodado) que forma parte de los depósitos aluviales.
- 3015 • **Cono Norte:** ubicada al norte de Lima centro colindante con la provincia Constitu-
3016 cional del Callao, comprende 8 distritos y ocupa una superficie de 857.26 km². El
3017 Cono Norte tiene una población cercana a los 3 millones de habitantes y su suelo
3018 esta mayormente compuesto por estratos de materiales granulares finos y arcillosos
3019 recientes. El río Chillón es el principal que cruza esta zona y es el responsable del
3020 transporte de material aluvial.
- 3021 • **Cono Sur:** localizada al sur de Lima Centro, a orillas del Océanos Pacífico, está
3022 compuesto por 13 distritos que ocupan una superficie de 845.92 km² y es habitada
3023 por cerca de 3 millones de habitantes. Es una zona predominantemente desértica,
3024 presenta depósitos eólicos [74] provocados por los fuertes vientos sureños y depósitos
3025 marinos, que incrementan la porosidad del suelo. Este cono comprende a los llamados
3026 distritos balnearios de Lima, con población estacional (verano) y por ende con una
3027 baja densidad poblacional.

3028 ¹ El área de estudio se muestra en la Figura 5.2. Una de las características especiales del
3029 clima de Lima es su alta humedad relativa, que puede alcanzar el 99% en invierno y alta

3030 nubosidad, sin embargo tradicionalmente tiene un bajo índice de precipitaciones (promedio
3031 anual de 7 mm). Sus temperaturas oscilan entre 12 °C y 30 °C [133].



Figura 5.2. Mapa del área de estudio de la provincia de Lima [105].

3032 5.2 Descripción del criterio empleado para realizar el monitoreo de radón 3033 en Lima

3034 Dado que este monitoreo está orientado a una exploración preliminar relacionada a la salud
3035 poblacional, se eligió el criterio prioritario de densidad demográfica. Este criterio ha sido
3036 utilizado en programas de monitoreo similares en otros países [16, 26, 86, 13]. Se dividió
3037 la superficie de cada distrito mediante una grilla de 5 km², estableciéndose un mínimo de
3038 detectores al interior de esta grilla de acuerdo a la densidad poblacional de cada distrito
3039 estudiado. El muestreo se realiza en forma aleatoria al interior de cada grilla, lo que garantiza
3040 una muestra representativa [86]. El número de edificaciones por distrito en cada cuadrícula
3041 se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Criterio para determinar el número mínimo de viviendas en cada grilla.

Clasificación del distrito	Densidad poblacional [habitantes·km ⁻²]	Número mínimo de lugares de muestreo de grilla
A	Menos de 2 500	0
B	Menos de 5 000	1
C	Menos de 10 000	2
D	Menos de 20 000	4
E	Más de 20 000	6

3042 Este es el primer monitoreo realizado a mediana escala en nuestro país y es de carácter
3043 exploratorio. Muchos países como el Reino Unido llevan años construyendo el mapa de
3044 radón, es por esta razón que considero que se ha dado un gran primer paso para conseguir lo
3045 mismo para nuestro país. Es necesario indicar que este monitoreo, a diferencia de la mayoría
3046 que es realizado por un ente gubernamental, fue ejecutado por los integrantes del grupo
3047 de investigación GITHUNU-PUCP, los voluntarios fueron mayoritariamente miembros de
3048 la comunidad PUCP, compuesto por docentes, alumnos y personal administrativo, quienes
3049 accedieron a llevar los detectores a sus hogares voluntariamente. Primero se dieron campañas
3050 informativas por diversos medios presenciales (ferias, explicaciones en aula, charlas) y
3051 en forma digital (página web del grupo de investigación, videos de difusión (<https://www.youtube.com/watch?v=xz1rrdAF2as>,
3052 accedido el 3 de Junio de 2023), entrevistas en la radio
3053 y boletines de la PUCP) a modo de concientizar a la comunidad y motivarlos a participar.
3054 Posteriormente, el IPEN y otras instituciones educativas se unieron con voluntarios y se
3055 obtuvo más lugares de medición. Es importante mencionar que para poder garantizar la
3056 representatividad de la muestra se estableció un mínimo número de detectores por distrito.
3057 En algunos distritos con baja densidad poblacional no se había considerado la medición, pero
3058 si un voluntario aparecía perteneciente a esos distritos, igual se le brindaba los detectores,
3059 a fin de tener mayor data estadística. Los voluntarios eran invitados a llenar un formulario
3060 (virtual o impreso) donde colocaban los datos y características del lugar de monitoreo. Una
3061 vez que los voluntarios llenaban el formato, se les entregaban dos detectores (en algunos
3062 casos solo desnudos y en otros desnudos y en cámara de difusión). Esto debido a que se
3063 contaban con menor cantidad de cámaras de difusión y solo se entregaban en los casos que
3064 se requerían para tener una mejor representatividad. El tiempo de medición seleccionado
3065 para los detectores se estableció en mediciones previas a fin de tener la certeza que el número
3066 de trazas obtenidas sería lo suficiente para no tener mayores errores de interpretación al

3067 considerar el fondo de los detectores. Luego de 10 semanas aproximadamente, los monitores
3068 eran devueltos al laboratorio donde eran sometidos al proceso de grabado químico y su
3069 posterior lectura o evaluación.

3070 Para calcular el número mínimo de detectores por distrito se efectúa el cálculo con-
3071 siderando la superficie efectiva de cada distrito, es decir el área habitada (sin considerar
3072 zonas industriales, montañas, pantanos, grandes extensiones forestales, etc.). Este cálculo
3073 se muestra en la Tabla 5.2 para cada distrito separado de acuerdo al cono o zona a la que
3074 pertenecen. Para el cálculo de la densidad poblacional se consideró el censo del 2017 [45].

Tabla 5.2. Monitores por grilla en cada distrito de monitoreo.

Cono o zona	Distrito	Clasificación del distrito	Número mínimo de muestras por grilla	Número de grillas en área habitada	Número mínimo de detectores por distrito	Número final de detectores en distrito
Lima Centro	Barranco	C	2	1	2	3
	Breña	E	6	1	6	16
	Cercado de Lima	D	4	4	16	31
	Jesús María	D	4	1	4	13
	La Victoria	E	6	2	12	9
	Lince	D	4	1	4	7
	Magdalena del Mar	D	4	1	4	7
	Miraflores	D	4	2	8	10
	Pueblo Libre	E	6	1	6	50
	Rimac	D	4	2	8	5
	San Borja	D	4	2	8	11
	San Isidro	C	2	2	4	10
	San Luis	D	4	1	4	12
	San Miguel	D	4	2	8	35
	Surco	D	4	7	28	22
Surquillo	E	6	1	6	6	
Lima Este	Ate	C	2	7	14	26
	53 Leguilla	A	0	1	0	0
	Chaclacayo	A	0	1	0	2
	El Agustino	D	4	1	4	1
	La Molina	B	1	5	5	11
	Lurigancho	A	0	1	0	0
	San Juan de Lurigancho	C	2	18	36	29
Santa Anita	E	6	12	72	7	
5 Lima Norte	Ancon	A	0	1	0	0
	Carabayllo	A	0	1	0	0
	Comas	D	4	10	40	42
	Independencia	D	4	3	12	10
	Los Olivos	D	4	4	16	51
	Puente Piedra	B	1	14	14	13
	San Martín de Porres	A	4	7	28	28
	5 Santa Rosa	D	0	1	0	0
Lima Sur	Chorrillos	C	2	9	18	4
	Lurin	A	0	1	0	2
	Pachacamac	A	0	1	0	1
	Pucusana	A	0	1	0	0
	Punta Hermosa	A	0	1	0	0
	Punta Negra	A	0	1	0	0
	San Bartolo	A	0	1	0	0
	San Juan de Miraflores	D	4	8	32	9
	Santa María del Mar	A	0	1	0	0
	Villa María del Triunfo	C	2	14	28	5
	Villa El Salvador	D	4	7	28	9

*Censo Nacional, 2017 [45].

3075 Cabe señalar que las mediciones se llevaron a cabo entre los años 2017 a 2019. Dada la
3076 cercanía geográfica se tienen datos también de la Provincia Constitucional del Callao que han
3077 sido procesados, pero no incluidos en este trabajo. Con posterioridad a 2018 se realizaron
3078 también monitoreos exploratorios y en menor escala en las ciudades de Lambayeque [37],
3079 en Huancayo [19]. En el caso de las ciudades de Cuzco, Arequipa y Puno, fueron parte
3080 del proyecto PER9024 desarrollado por la IAEA – IPEN – PUCP y otras instituciones
3081 con medidores comerciales DPR2. Se colocaron también nuestros detectores y se espera
3082 completar la data para ir formando el mapa de radón nacional.

3083 5.3 Detectores utilizados en el monitoreo

3084 El monitoreo fue realizado con detectores LR-115 tipo 2 no pelificable, colocados en modo
3085 desnudo y algunos en cámaras de difusión (monitores G2). Se realizaron mediciones en
3086 508 viviendas con detectores desnudos. En el 27.5% (140) de estas viviendas se colocaron
3087 adicionalmente monitores G2. A continuación, se detalla cada uno de estos modos de
3088 medición:

3089 5.3.1 Detectores en modo desnudo

3090 Este es el modo en que prioritariamente se utilizaron a los detectores para hacer las mediciones
3091 integradas. Para este monitoreo exploratorio era necesario un método fácil de usar y de bajo
3092 costo. Se observó algunas opciones comerciales que se fijaban en un soporte plástico y se
3093 dejaban sobre un mueble a una altura determinada, como se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Detector en modo abierto o desnudo de la firma Kodalpha [102].

3094 Este monitor de tipo ON-OFF tenía la desventaja de que podía moverse, cambiarse de
3095 lugar o incluso perderse durante el periodo de medición. Sin embargo, en nuestro caso
3096 cada detector LR-115 era cortado en cuadrados de 15 mm de lado y se fijaban a una mica
3097 plástica donde se había impreso su codificación (zona y distrito), la mica plástica era también
3098 cuadrada y de 50 mm de lado. El conjunto se colocaba al interior de un sobre de papel, a su
3099 vez, dos de estos sobres pequeños, instrucciones y una etiqueta recordatoria se colocaban
3100 dentro de un sobre más grande. En otras palabras, cada persona recibía dos monitores (como
3101 se muestra en la Figura 5.4), indicando que los monitores se coloquen en la misma habitación
3102 y en condiciones similares pegados a la pared a una altura de aproximadamente 150 cm (a la
3103 altura de los ojos de la persona).



Figura 5.4. Detectores en modo desnudo utilizado en el monitoreo de radón en Lima-Perú y etiqueta recordatoria.

3104 De esta forma las posibilidades de pérdida o de cambio de ubicación durante las 8 a 12
3105 semanas de medición se reducían, ya que luego de ese tiempo regresaba por lo menos uno de
3106 los detectores al laboratorio para su análisis. Esta información se encontraba también impresa
3107 en una infografía que se le brindaba a cada voluntario junto con el sobre con detectores, a fin
3108 de minimizar en lo posible el error a la hora de colocación (Anexo A). Los voluntarios también
3109 registraban el día de inicio y de fin del monitoreo en el sobre que era entregado junto con
3110 los detectores. Estas mediciones se realizaron en distintas épocas o estaciones del año para
3111 obtener en algunos casos varias mediciones para una casa. Todas estas se promediaban para
3112 obtener un valor único para cada ubicación. Esta metodología ya la habíamos realizado en
3113 un plan piloto llevado a cabo previamente [4] que había determinado que las concentraciones
3114 de radón en interiores eran bajas. Los resultados ⁶⁹tenidos en ese monitoreo exploratorio
3115 indicaban que el contenido de ²³²Th era bajo en los materiales de construcción utilizados
3116 generalmente en las viviendas de las edificaciones en Lima (generalmente ladrillo y cemento),
3117 por lo que se puede inferir que el contenido de torón exhalado era también bajo. Es bien
3118 sabido que, si las paredes de las viviendas están recubiertas con pintura, esto ¹⁶⁷suficiente
3119 para reducir la exhalación del torón. Además, la concentración de este gas disminuye de

3120 manera exponencial a medida que nos alejamos de la pared, siendo mínima su contribución
 3121 a distancias mayores a 10 cm de esta [80]. Como resultado, se observa una disminución
 3122 en la concentración de torón en el volumen cercano a la pared, llegando a representar solo
 3123 alrededor del 25-30% de su valor original. Además, dado que la mayoría de los átomos de
 3124 torón exhalados se desintegran cerca a la pared, se espera que la mayoría de su progenie se
 3125 deposite en la misma antes de desintegrarse en el aire, excepto el ^{216}Po .

3126 Mishra et al. [81] confirman experimentalmente que cerca a la pared el torón tiene
 3127 un valor de factor de equilibrio bastante pequeño, por lo que se puede considerar, una
 3128 contribución despreciable de su progenie a la densidad de huellas registrada en el detector.
 3129 Con esto se puede concluir que en el caso de un detector desnudo colocado sobre la pared,
 3130 las huellas registradas se deben prioritariamente al radón y su progenie no equilibrada. Solo
 3131 en los casos en que el material de construcción de la pared tenga un alto contenido de torón y
 3132 que la pared no se encuentre pintada o la capa de pintura este deteriorada, se puede considerar
 3133 que el torón puede contribuir efectivamente a la concentración, considerando además que
 3134 su progenie, el ^{216}Po , se descompone casi al mismo tiempo y lugar que su predecesor,
 3135 duplicando entonces su contribución.

3136 Por el contrario, si se considera que la contribución del torón es baja, para determinar el
 3137 factor de calibración del detector desnudo de LR-115 (K_B), se debe considerar la sensibilidad
 3138 parcial de cada una de las especies (κ_B) y el factor de equilibrio (F_{rn}) para el radón, lo que se
 3139 puede expresar como [23]:

$$K_B = \kappa_B [1 + 2F_{rn}] \quad (5.1)$$

3140 Si se considera una sensibilidad parcial de $0.02 \text{ huellas} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^3$ [24] y un
 3141 factor de equilibrio indicado por UNSCEAR en el rango de 0.2 a 0.7 [147], se obtiene un valor
 3142 promedio para el factor de calibración igual a $(0.038 \pm 0.005) \text{ huellas} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^3$, el
 3143 cual se puede obtener para un factor de equilibrio de 0.45. El valor del factor de calibración
 3144 concuerda con los valores obtenidos de forma experimental en el laboratorio de calibraciones
 3145 de GITHUNU–PUCP, considerando las incertidumbres.

3146 Para determinar el nivel de fondo, se utilizó el procedimiento seguido por Belgaid [8]. Se
 3147 consideraron detectores de fondo que no fueron expuestos a medio ambiente y luego se les
 3148 sometió al proceso de tratamiento químico y lectura. El límite inferior de detección (LLD) se
 3149 obtuvo en función al área de conteo (S) mediante la siguiente relación [8]:

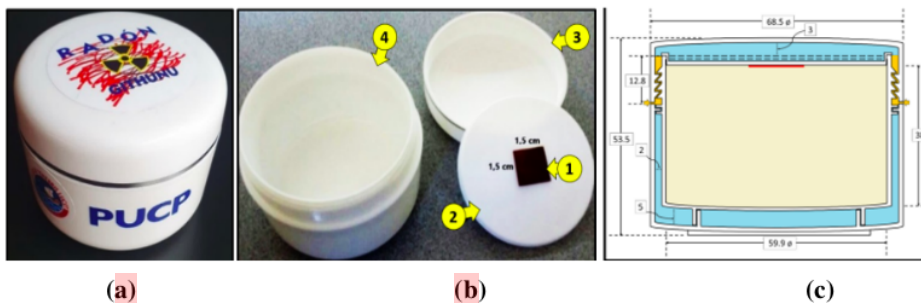
$$LLD = 4.66 \frac{\sqrt{\rho S}}{FS} \quad (5.2)$$

3150 donde ρ es la densidad de huellas de fondo y F es el factor de sensibilidad. Para un área
 3151 de conteo promedio de 106.1 mm^2 y una densidad de huellas de fondo de $7.47 \text{ huellas cm}^{-2}$
 3152 se obtuvo que el límite inferior de detección para los detectores desnudos es de $15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

3153 Al terminar el periodo de monitoreo, los detectores regresaban al laboratorio y eran
 3154 sometidos a un proceso de grabado químico (etching) utilizando el procedimiento estándar
 3155 establecido en el laboratorio y adaptado de [10]: utilizando una solución de hidróxido
 3156 de sodio (NaOH) 2.5N durante 90 minutos a una temperatura estable de $(60 \pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$ en
 3157 un baño termostatzado con agitador magnético. Posteriormente los detectores fueron
 3158 leídos utilizando el sistema de lectura automatizada POLITRACK ([https://miam.it/prodotti/
 3159 politrack/](https://miam.it/prodotti/politrack/), accedido el 5 de Junio de 2023).

3160 5.3.2 Detectores en cámara de difusión

3161 El uso de las cámaras de difusión fue posterior a las primeras mediciones con detectores
 3162 desnudos. En este caso se utilizó el monitor G2 [40]. En los lugares donde se utilizaron las
 3163 cámaras G2 eran colocadas en el mismo recinto que los detectores desnudos. Los monitores
 3164 G2, también de diseño propio del grupo de investigación, son envases cilíndricos hechos
 3165 de plástico polipropileno blanco de doble pared, la que brindará un efecto térmico al aire
 3166 interior del monitor, preservándolo de cambios de temperatura y humedad ambiental. Sus
 3167 dimensiones externas son 50 mm de altura y 60mm de diámetro y tiene un volumen interno
 3168 de 100 ml. Un detector de LR-115 cuadrado de 15 mm de lado es colocado en su interior y
 3169 adherido a su base de modo que el detector queda fijo durante toda la medición. El monitor y
 3170 sus componentes se muestran en la Figura 5.5.



3171 **Figura 5.5.** (a) Monitor G2 utilizado como cámara de difusión. (b) Partes del monitor y (c)
 3172 sistema de rosca que permite discriminar el ingreso del radón al interior del monitor G2.

3171 El monitor G2 tiene una tapa con rosca que permite el ingreso tanto de los gases radón y
 3172 torón, mediante difusión (Figura 5.5, c). Sin embargo, debido a su corta vida media del torón,

3173 que es de 55.6 s, se puede considerar que prácticamente todo lo que ingresa no logra avanzar
3174 por todo el camino y finalmente solo ingresa al volumen efectivo interior el gas radón. Se ha
3175 determinado experimentalmente el factor de transmisión y esta hipótesis está confirmada,
3176 por lo que puede afirmarse que el monitor G2 solo registra huellas provenientes del radón y
3177 su progenie producida por el radón que ingresó.

3178 Rojas et al. [124] determinaron el factor de calibración de este monitor experimentalmente
3179 y que se ha utilizado para determinar estos resultados. El factor de calibración reportado es
3180 de (0.0238 ± 0.0007) huellas·m⁻²/Bq·d·m⁻³. El límite inferior de detección fue calculado
3181 según el procedimiento de Belgaid y se determinó en 20 Bq·m⁻³ [8]. El tiempo de exposición
3182 de los monitores G2 fue también de 10 a 12 semanas. Después de finalizar el periodo de
3183 monitoreo, los detectores eran llevados de vuelta al laboratorio y se sometían a un proceso
3184 de grabado químico utilizando el método estándar establecido en dicho laboratorio. Este
3185 proceso consistía en sumergir los detectores en una solución de hidróxido de sodio (NaOH)
3186 con una concentración de 2.5N durante 90 minutos. La temperatura se mantenía constante a
3187 (60 ± 0.1) °C en un baño termostático equipado con un agitador magnético. Después de
3188 este procedimiento, los detectores fueron leídos utilizando el sistema de lectura automatizada
3189 POLITRACK (<https://miam.it/prodotti/politrack/>, accedido el 5 de Junio de 2023).

3190 5.3.3 Cálculo de la concentración de radón en los monitores utilizados y tratamiento 3191 de datos

3192 Para estimar las concentraciones de radón, se encuentra la densidad de huellas inducidas en
3193 detectores grabados, las cuales se cuentan en diferentes campos de visión de un microscopio
3194 óptico o sistema automatizado. La precisión de estas estimaciones se ve afectada por la
3195 distribución de las huellas en el detector, mientras que la exactitud está relacionada con la
3196 proporcionalidad entre la densidad de huellas calculada y la fluencia de partículas alfa que in-
3197 ciden en el detector. Esta última depende estrechamente de las concentraciones de los átomos
3198 emisores de partículas alfa presentes en el entorno del detector. La concentración medida
3199 puede resultar en huellas con diferentes características y distribución no uniforme, lo cual
3200 afecta tanto la precisión como la exactitud, especialmente debido al efecto de solapamiento
3201 de las huellas.

3202 Para determinar los valores absolutos de concentraciones de radón, es necesario conocer
3203 los coeficientes de calibración que relacionan las densidades de huellas inducidas en los
3204 detectores con las concentraciones de radón. Esto se logra mediante la calibración experimen-
3205 tal de los detectores en ambientes con concentraciones conocidas de radón en condiciones
3206 controladas (cámaras de calibración), o mediante el uso de modelos teóricos basados en
3207 aproximaciones analíticas o simulaciones utilizando técnicas de Monte Carlo. Sin embargo,

ninguno de estos procedimientos puede reproducir las condiciones reales y complejas durante el largo periodo de exposición de los detectores a las partículas alfa del radón y su progenie, que es algo único en cada caso, así como las condiciones específicas de revelado y análisis de las huellas.

Es importante tener en cuenta que la sensibilidad del detector al radón depende de varios factores, incluyendo las condiciones de revelado y los procedimientos de lectura, la geometría de la cámara y el detector, así como los parámetros ambientales como la temperatura, presión, humedad relativa y la distribución de campos eléctricos locales dentro y fuera de la cámara.

Usando los detectores LR-115 para el monitoreo de radón, el número de huellas reveladas es crucial. Por lo tanto, la consistencia en la eficiencia de detección del detector es un factor clave para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos en estas aplicaciones. La eficiencia de detección de las huellas está fuertemente relacionada con el ángulo crítico. Si el ángulo crítico determinado experimentalmente no varía significativamente de un detector a otro, esto podría ser una forma de evaluar la confiabilidad de los resultados.

La distribución de las huellas y sus ángulos de incidencia en el detector, en caso de emplear una cámara de difusión depende de la geometría de dicha cámara y la posición relativa del detector dentro de ella.

Algunos detectores comerciales, como el DPR de Algade, utilizan membranas semipermeables que afectan la penetración del radón y torón en el interior de la cámara de difusión, y esto depende de la humedad y temperatura externa. La eficiencia de la membrana para detener el torón está influenciada por estos parámetros ambientales. Además, se ha demostrado que las diferencias de humedad durante la exposición afectan los resultados de las densidades de trazas [124]. La respuesta del detector disminuye a medida que aumenta la humedad, posiblemente debido a la condensación de la humedad sobre el detector en forma de gotas. Esto evita que las partículas alfa lleguen al detector o reduce su energía. También es posible que la humedad se condense en la membrana semipermeable, lo que disminuye la difusión del radón a través de ella y, por lo tanto, reduce la concentración de radón medida. La presencia de vapores de agua y partículas suspendidas en el interior de la cámara de difusión afecta la fracción de la progenie del radón que se desintegra dentro del volumen de la cámara antes de depositarse en sus paredes, así como la distribución espacial de los volúmenes y superficies efectivas. Esto es relevante porque se realizaron mediciones con el detector comercial DPR de Algade y los resultados obtenidos, en el 94% de los casos, estuvieron por debajo del límite de detección, lo cual puede explicarse por los factores mencionados anteriormente, considerando que Lima es una ciudad con un alto valor de humedad relativa y propenso a generar condensación.

3243 Cuando se calibra un detector de trazas nucleares, se deben tener en cuenta múltiples
3244 condiciones, como el estado previo del detector antes de la exposición, las condiciones
3245 ambientales durante la exposición (meteorología, contenido de oxígeno, vapor de agua,
3246 partículas suspendidas, etc.), las condiciones posteriores a la exposición, el proceso de
3247 revelado y el análisis de trazas. Es difícil estandarizar y tener en cuenta todas las variables
3248 involucradas en estos procesos. A pesar de las precauciones y los métodos definidos,
3249 estandarizar la técnica de detección de trazas aún no se ha logrado y existen dificultades. Se
3250 han reportado diferentes valores de parámetros de trazas para los mismos tipos de detectores
3251 bajo las mismas condiciones de exposición y revelado.

3252 En este monitoreo, la concentración de radón fue determinada en forma general con la
3253 expresión:

$$C_{i,rn} = (\rho_{total} - \rho_{fondo}) / (K_i \cdot t) \quad (5.3)$$

3254 donde $C_{i,rn}$ es la concentración en $Bq \cdot m^{-3}$. El subíndice i puede indicar B(bare) o G2.
3255 La densidad de huellas total es ρ_{total} y la densidad de fondo de huellas es ρ_{fondo} . K_i son los
3256 factores de calibración para ambos modos ($i = B, G2$) y t es el tiempo de exposición.

3257 5.4 Resultados del monitoreo en la provincia de Lima

3258 A continuación, se presentarán los resultados de las mediciones correspondientes al monitoreo
3259 de radón en la ciudad de Lima realizado entre los años 2016 a 2019 utilizando detectores
3260 LR-115 en los modos desnudo y en cámara de difusión. Estos resultados constituyen un
3261 primer valor referencial que permitirá identificar algunas zonas en las que se debe intensificar
3262 las mediciones. Los resultados se presentarán también en forma gráfica mediante el primer
3263 mapa de radón para la provincia de Lima.

3264 5.4.1 Resultados obtenidos de las mediciones con detectores desnudos

3265 Los resultados obtenidos muestran que cumplen con una distribución logarítmica normal,
3266 que es la que generalmente se usa en estos casos [143]. Esta distribución es asimétrica con
3267 una cola extendida en el extremo derecho, la que facilita la identificación de zonas de riesgo
3268 o propensas a una mayor concentración de radón. Para evaluar que los datos sigan una
3269 distribución normal se aplicó la prueba de Anderson-Darling que arrojó el valor p superior a
3270 0.05 con un nivel de confianza del 95%, indicando la tendencia normal de los datos. Se realizó
3271 también el análisis de varianza (ANOVA) para realizar comparaciones entre los distritos,
3272 zonas y otras variables consideradas en los puntos de medición. En la Figura 5.6(izquierda)

3273 se muestran la distribución total de la concentración de radón en interiores con una curva
3274 correspondiente a una distribución log-normal. En la Figura 5.6(derecha) se muestra la
3275 gráfica Q-Q donde se representa la concentración de radón transformada con la función
3276 logarítmica natural y que sigue la tendencia esperada.

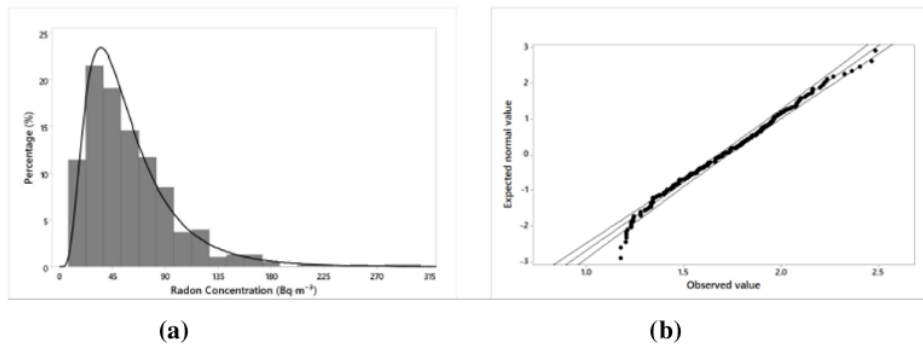


Figura 5.6. (a) Distribución log-normal de la concentración de radón intramuros. (b) Gráfico Q-Q de la transformada con la función logaritmo natural para la concentración de radón intramuros [105].

3277 Se presentan los resultados de los principales parámetros estadísticos por distritos y por
3278 zonas en la Tabla 5.3.

8

Tabla 5.3. Concentraciones de radón por distrito de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.

Código	Distrito	Min [Bq·m ⁻³]	Max [Bq·m ⁻³]	Mediana [Bq·m ⁻³]	Media aritmética [Bq·m ⁻³]	Media geométrica [Bq·m ⁻³]
C1	Barranco [B]*	40	79	63	61±7	58±1
C2	Breña [E]*	16	137	33	48±9	37±2
C3	Jesús María [C]*	22	255	65	79±2	63±2
C4	La Victoria [D]*	16	119	60	61±2	49±2
C5	Lima [C]*	29	165	91	90±7	81±2
C6	Lince [D]*	22	145	84	76±2	65±2
C7	Magdalena [D]*	22	143	92	77±2	58±2
C8	Miraflores [C]*	34	306	50	118±4	80±2
C9	Pueblo Libre [D]*	22	125	65	64±4	58±2
C10	Rímac [D]*	21	134	76	72±1	61±2
C11	San Borja [B]*	16	212	54	64±2	50±2
C12	San Isidro [C]*	22	108	46	57±1	50±2
C13	San Luis [D]*	18	232	90	92±3	67±2
C14	San Miguel [C]*	16	91	46	49±4	45±2
C15	Surco [B]*	17	170	65	73±1	58±2
C16	Surquillo [E]*	38	85	55	58±1	56±1
E1	Ate [C]*	17	106	37	44±6	37±2
E2	Chaclacayo [A]*	40	68	43	50±9	49±1
E3	El Agustino [D]*	17	228	39	81±5	49±3
E4	La Molina [B]*	16	173	46	57±2	42±2
E5	San Juan de Lurigancho [C]*	20	79	42	43±5	39±1
E7	Santa Anita [E]*	26	88	28	39±7	35±2
N1	Comas [D]*	18	122	42	46±4	42±2
N2	Independencia [D]*	27	103	48	56±8	51±2
N3	Los Olivos [E]*	17	166	59	71±1	57±2
N4	Puente Piedra [B]*	24	123	44	56±9	49±2
N5	San Martín de Porres [D]*	16	106	44	52±5	44±2
N6	Carabayllo [A]*	19	80	38	43±6	40±1
S1	Cajalillos [C]*	19	82	50	49±1	42±2
S2	San Juan de Miraflores [D]*	15	133	30	47±1	35±2
S3	Villa el Salvador [D]*	21	63	40	42±6	39±1
S4	Villa María del Triunfo [C]*	17	95	42	48±1	40±2

*Clasificación en base a la Tabla 5.1.

Si ahora se agrupan los datos y se obtienen estos parámetros estadísticos por zonas o conos, los resultados se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.

Zona o Cono	Puntos de muestreo	Densidad demográfica [hab·km ⁻²]	Min [Bq·m ⁻³]	Max [Bq·m ⁻³]	Mediana [Bq·m ⁻³]	Media aritmética [Bq·m ⁻³]	Media geométrica [Bq·m ⁻³]
Centro	235	14 588	16	306	63	69 ±3	57±2
Este	58	13 226	16	228	39	47±5	39±2
Norte	110	11 278	16	166	45	53±3	45±2
Sur	34	4 188	15	133	37	45 ±5	37±2

Asumiendo como hipótesis nula que no existe diferencias significativas entre las medias de la concentración de radón entre las 4 zonas. El valor obtenido F (F-value) es igual a 8.57659 lo que indica que las concentraciones de radón en estas 4 zonas son diferentes. Adicionalmente se tiene el valor p (p-value) que dio por resultado 0.00002, valor lo suficientemente pequeño que indica que estas diferencias son altamente improbables bajo la hipótesis nula, por lo que se puede afirmar que existen diferencias significativas entre las medias de los grupos estudiados.

La Figura 5.7 muestra los valores promedios de concentración de radón para las cuatro zonas de estudio. Puede observarse además que Lima Este, Lima Norte y Lima Sur son estadísticamente similares (F = 1.05041 y p = 0.35172).

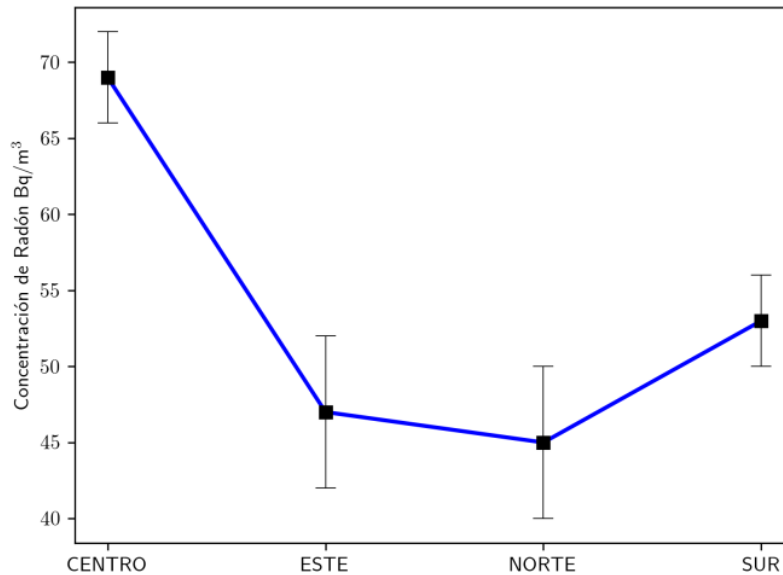


Figura 5.7. Valores promedios de concentración de radón usando detectores en modo desnudo para las cuatro zonas de estudio.

El promedio mundial de la concentración de radón intramuros es de $39 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, sin embargo la Organización Mundial de la Salud [158] proporciona un nivel de referencia recomendado de $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a no ser excedido para no representar un riesgo para la salud de los pobladores. Con respecto a los datos del monitoreo de radón utilizando detectores en modo desnudo se determinó la media para la provincia de Lima en $(49 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. El 13.4% de las mediciones estuvieron por debajo del límite de detección. En la Figura 5.8 se muestran las distribuciones de las concentraciones de radón por cada zona.

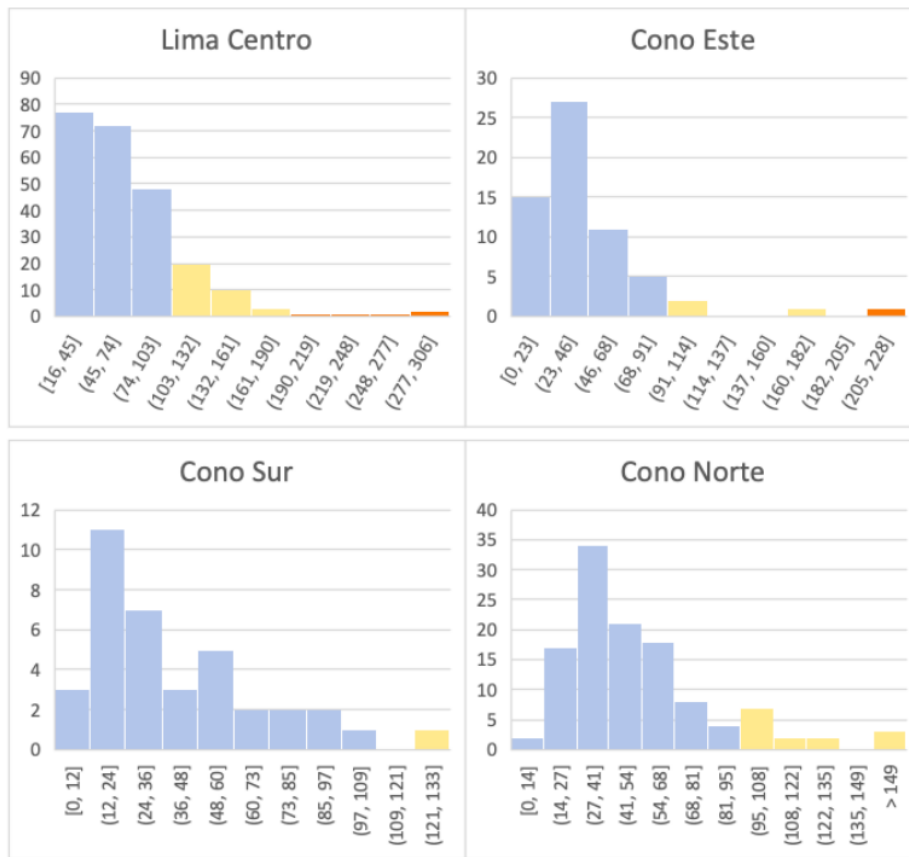


Figura 5.8. Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de Lima utilizando detectores desnudos.

De lo anterior se puede concluir que en Lima Centro, el 82.9% de las viviendas está por debajo de los $100 Bq \cdot m^{-3}$, del restante solo el 2.1% se encuentra con concentraciones promedio mayores a los $200 Bq \cdot m^{-3}$. En el cono este, el 94.8% de las viviendas está por debajo de los $100 Bq \cdot m^{-3}$ y solo el 1.7% presenta concentraciones de radón mayores a $200 Bq \cdot m^{-3}$. En el cono sur el 94.3% de las viviendas tuvieron concentraciones menores a $100 Bq \cdot m^{-3}$, no encontrándose casos donde la concentración de radón supere los $200 Bq \cdot m^{-3}$. Finalmente en el cono norte, el 89.6% de las viviendas se encontraron con concentraciones por debajo de los $100 Bq \cdot m^{-3}$ y ninguna por encima de los $200 Bq \cdot m^{-3}$. En general, menos del 5% de las viviendas monitoreadas presentaron valores por encima de los $200 Bq \cdot m^{-3}$, el cual es el nivel recomendado por [158] para no tener un riesgo significativo oncológico.

3308 Cabe señalar aquí que el Reglamento de Seguridad Radiológica (D.S. Nro. 009-97-EM),
3309 Anexo IV, radón en viviendas y puestos de trabajo, adoptados por la Oficina Técnica de la
3310 Autoridad Nacional (OTAN), dice textualmente:

3311 1. El nivel de actuación para la exposición crónica de radón en viviendas es una concen-
3312 tración media anual de 200 a 600 Bq·m⁻³ de radón en el aire.

3313 2. El nivel de actuación para una acción reparadora en la exposición crónica a radón en
3314 puestos de trabajo es una concentración media anual de 1 000 Bq·m⁻³ de radón aire.

3315 Por lo que es necesario que se tomen las medidas necesarias para seguir con este tipo de
3316 estudios.

3317 De las 4 zonas de estudio, Lima Centro tiene los mayores niveles medios encontrados.
3318 La explicación a este resultado requerirá de mayor estudio, pero la hipótesis de que las carac-
3319 terísticas geológicas de esta zona puedan influir, considerando que el suelo es básicamente
3320 proveniente de depósitos aluviales y al tener mayor densidad demográfica hay también mayor
3321 cantidad de materiales de construcción y remoción de material geológico, puede ser una
3322 primera explicación de estos resultados, basados en el trabajo de Vilcapoma [152]. Cabe
3323 señalar también que los distritos con medias geométricas mayores fueron Lima Centro y
3324 Miraflores, perteneciendo ambos a la parte más antigua de Lima, por lo que podría asociarse
3325 estos valores altos con el tipo de materiales de construcción y características de las viviendas
3326 en esas zonas tradicionales.

3327 En términos de dosis, de acuerdo a ICRP 126 [61], se puede estimar considerando un
3328 factor de equilibrio de 0.4, la población de la provincia de Lima está en promedio expuesta
3329 a una dosis de 2.646 mSv·a⁻¹ debido a la concentración de radón, lo que equivale a 0.22
3330 WLM.

3331 5.4.1.1 Mapa de la concentración de radón en Lima

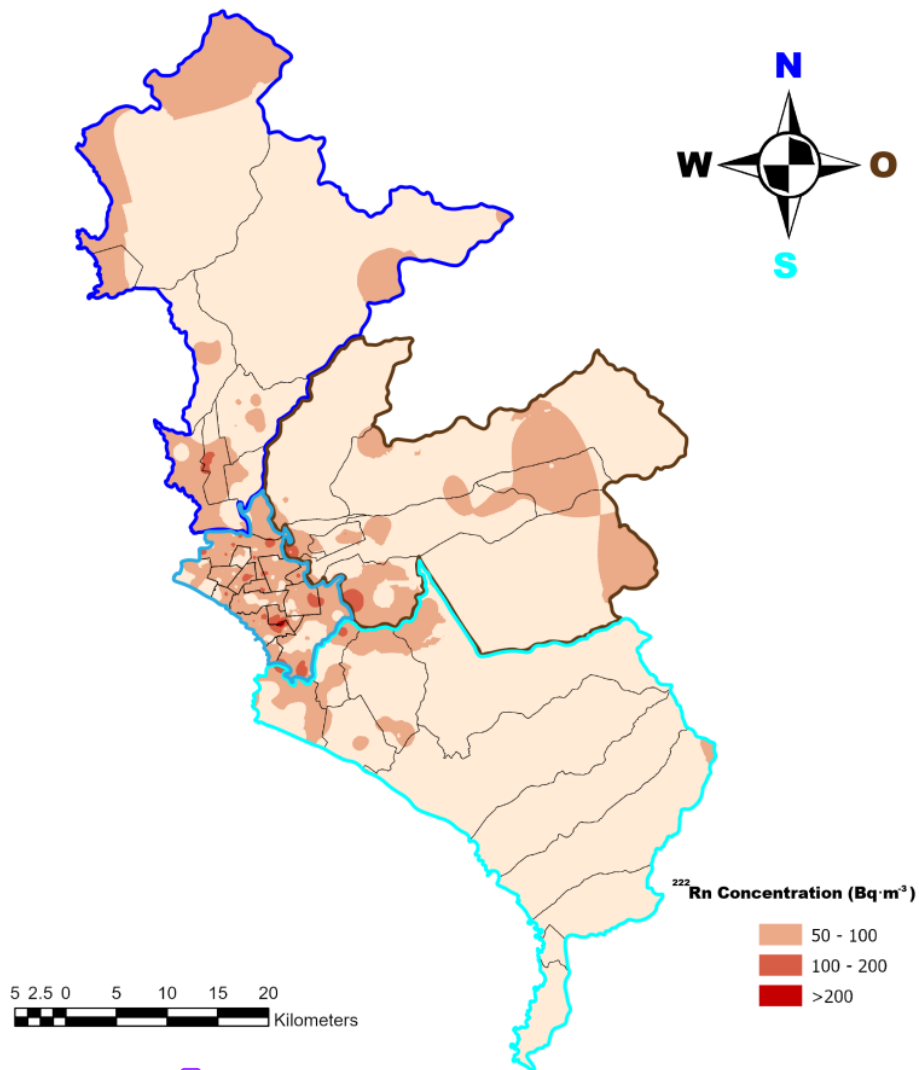
3332 Con los datos obtenidos se elaboró el mapa de radón de Lima, utilizando dos técnicas: el
3333 modelo de interpolación ponderado por distancia inversa o Inverse Distance Weighting (IDW)
3334 y el Kriging.

3335 El método IDW se puede utilizar cuando se necesita estimar valores que no se tienen
3336 disponibles en ubicaciones cercanas a los datos. Para esto se asigna se pondera considerado
3337 la distancia entre el punto donde se tienen datos y la ubicación donde se desea estimar el
3338 valor desconocido, es decir el peso asignado a los puntos cercanos es mayor que el de los
3339 puntos lejanos [25]. Existen diversos programas que pueden desarrollar estos algoritmos.

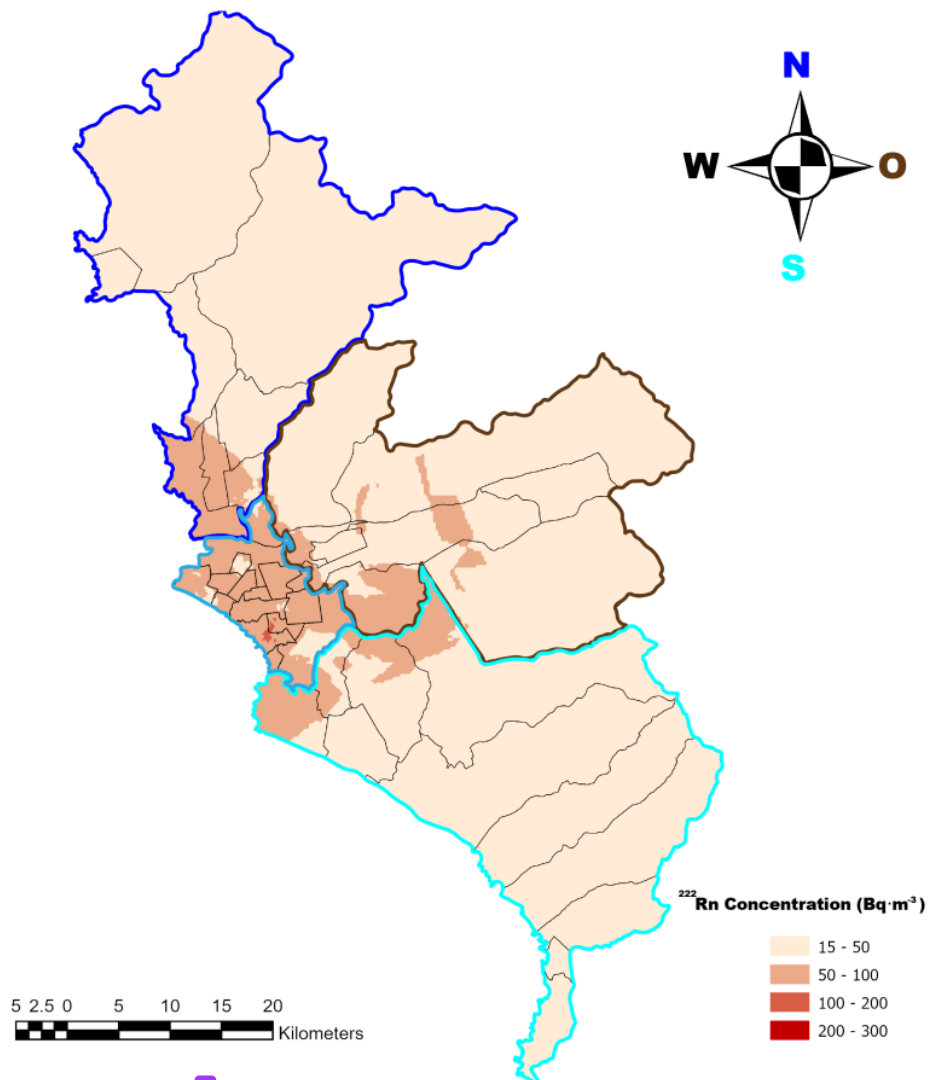
3340 El método Kriging también estima valores desconocidos en lugares donde no se dispone
3341 la data. A diferencia del método IDW, el Kriging no solo considera la distancia entre los
3342 puntos de datos, sino también la estructura de correlación espacial subyacente entre ellos.
3343 Se basa en el análisis geoestadístico considerando la variabilidad espacial de los datos y
3344 ayudándose de modelos matemáticos determinar el mejor ajuste. En el método Kriging se
3345 realiza un primer análisis de datos, evaluando la existencia de patrones especiales, valores
3346 atípicos y correlación espacial. Luego se ajusta a un variograma (instrumento utilizado en
3347 la geoestadística para determinar la distribución espacial de los datos y como cambian en
3348 función de su distancia) para ver su dependencia espacial y finalmente se infiere o predice
3349 el valor desconocido con una combinación lineal ponderada de los valores de los valores
3350 conocidos y su ubicación, este método se ha empleado en trabajos similares en monitoreos
3351 similares [35].

3352 En ambos casos se utilizó el software ArcGISPro 2022. Mediante esta representación
3353 gráfica de los niveles será posible reconocer áreas con niveles altos de concentraciones
3354 de radón en la ciudad, e implementar de ser necesario medidas de mitigación a fin de
3355 disminuirlos. Los mapas se muestran en la Figuras 5.9 y 5.10 por ambas técnicas. Los
3356 rangos de concentración de radón necesarios para obtener el mapa varían en función de las
3357 normativas y recomendaciones de cada país o autoridad de salud pública. En este estudio, se
3358 utilizaron los siguientes rangos [58, 125, 57, 59]:

- 3359 • **Bajo:** menos de $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- 3360 • **Moderado:** entre 50 y $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- 3361 • **Alto:** entre 100 y $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- 3362 • **Muy alto:** superior a $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$



3
Figura 5.9. Mapa de las concentraciones de radón en la provincia de Lima utilizando el método IDW [105].



3
Figura 5.10. Mapa de las concentraciones de radón en la provincia de Lima utilizando el método Kriging [105].

3363 1 Al costado derecho de cada mapa, la leyenda muestra los códigos de color y los niveles
3364 de radón correspondientes en Bq·m⁻³, y los valores medios de concentración de radón. Se
3365 evidencia que Lima Sur y la zona de Lima Centro, representan las zonas con niveles inferiores
3366 a 100 Bq·m⁻³ y más altos de radón, respectivamente. Es importante destacar que, aunque

los resultados del mapa confirman la tendencia del análisis estadístico de los datos, permiten una visualización espacial de los niveles de radón en cada zona.

Los resultados de la validación cruzada de los modelos IDW y Kriging indican que ninguno de los modelos se ajustó bien a los datos de concentración residencial de radón, como se muestra en la Tabla 5.5. Ambos modelos presentaron valores negativos de R^2 , lo que indica una explicación deficiente de la variabilidad en los datos. Además, los valores MAE, RMSE y RMS indican que ambos modelos tienen un alto error en la predicción de la concentración de radón. Una posible explicación de estos resultados es que la densidad de las mediciones no fue uniforme en toda el área de estudio, lo que puede haber afectado la precisión de los modelos. Se tienen áreas, sobre todo en Lima Sur con muy pocas mediciones, por lo que los modelos tienen dificultades para predecir o ajustar los valores en esas zonas. Se espera que monitoreos similares puedan ir mejorando la estadística de estos resultados.

Tabla 5.5. Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.

Método	MAE*	RMS*	RMSE*	R^2
IDW	36.358	4.971	49.546	-0.637
Kriging	32.451	41.474	43.856	-0.240

*

Cabe señalar que estos resultados son preliminares y se requieren más mediciones para evaluar completamente la precisión de los modelos IDW y Kriging. Además, otros factores, como la geología y las características del suelo, también pueden afectar la concentración de radón y deben tenerse en cuenta en el modelado. Por lo tanto, se recomienda continuar tomando mediciones y mejorando los modelos para proporcionar un mapa más preciso de la concentración de radón en el área de estudio. De hecho, es necesario resaltar que este mapa de radón intramuros de la provincia de Lima no es un mapa definitivo, países como el Reino Unido (<https://www.ukradon.org/information/ukmaps>, accedido el 5 de Junio de 2023) empezaron hace años y siguen mejorando el mapa de radón, por lo que es necesario continuar con las mediciones.

5.4.1.2 Análisis de las concentraciones de radón obtenidas con otros parámetros locales.

Se tiene la información de parte de los voluntarios que participaron en el monitoreo de algunas otras características propias del lugar de medición. Algunas de ellas son la edad de la construcción, el nivel de tránsito vehicular, los materiales de construcción, el tipo de

3394 pintura y el tiempo en que se pintó, el tipo de piso, nivel de ventilación de la habitación,
 3395 entre otros. Estos resultados solo se han analizado para las mediciones realizadas con los
 3396 detectores desnudos y se muestran en la Tabla 5.6 los resultados estadísticos descriptivos
 3397 elementales para todas las mediciones en las cuatro zonas de Lima estudiadas.

15
Tabla 5.6. Estadística descriptiva de la relación de concentración de radón con otras variables.

Parámetro		% ocurrencia	160 Min [Bq·m ⁻³]	Max [Bq·m ⁻³]	Mediana [Bq·m ⁻³]	Media aritmética [Bq·m ⁻³]	Media geométrica [Bq·m ⁻³]
Edad de la construcción	Menor a 20 años	54.9	15	255	50	59 ± 3	50 ± 2
	Entre 20 y 39 años	22	15	166	50	57 ± 4	48 ± 2
	Mayor a 40 años	23.1	16	306	64	75 ± 7	59 ± 2
Nivel de tránsito vehicular	Bajo	61.7	15	306	50	62 ± 3	51 ± 2
	Medio	31.9	16	232	50	59 ± 3	50 ± 2
	Alto	6.4	24	145	55	60 ± 6	54 ± 2
Material de construcción	Ladrillo	88.9	15	306	50	61 ± 2	51 ± 2
	Adobe	2.7	16	145	37	56 ± 15	43 ± 2
	Otros	8.4	17	232	55	65 ± 8	54 ± 2
Antigüedad de la pintura	Mayor a 5 años	39.6	15	212	53	63 ± 4	52 ± 2
	Menor a 5 años	60.4	16	255	49	57 ± 3	49 ± 2
Tipo de piso	Cemento	26.3	15	292	46	60 ± 4	49 ± 2
	Madera	17.2	16	306	50	63 ± 6	51 ± 2
	Mayólica	38.8	16	255	54	61 ± 3	51 ± 2
	Tapizón	3.1	16	125	64	63 ± 10	53 ± 2
	otros	14.6	18	186	55	60 ± 5	51 ± 2

*

3398 Los resultados descriptivos básicos de la Tabla 5.6, también, sugieren que diferentes
 3399 variables se pueden relacionar a mayores niveles de radón en viviendas. Por ejemplo, las
 3400 viviendas de más de 40 años tenían la mayor concentración de GM de radón, lo que puede
 3401 deberse al hecho de que es más probable que las viviendas más antiguas tengan grietas y
 3402 otras aberturas que pueden permitir la entrada de radón. De manera similar, las viviendas
 3403 ubicadas cerca de las carreteras pueden tener niveles más altos de radón debido al alto tráfico

vehicular que produce vibraciones que conducen a mayores exhalaciones de radón del suelo [84]. En el grupo de materiales de construcción, encontramos que las viviendas con otros materiales tenían una concentración de radón ligeramente superior. Sugiere que, para la pintura mural, las viviendas con pintura mural más antigua tenían concentraciones más altas de radón. Este hallazgo está relacionado con el hecho de que la pintura más antigua puede haberse desgastado o dañado con el tiempo, por lo que ya no proporciona una barrera para evitar la exhalación de radón de las paredes. Finalmente, el tapiz tuvo concentraciones más altas, debido a que tiene más porosidad en comparación con materiales más densos como el cemento, sin que se tenga una diferencia substancial entre los diferentes tipos de piso.

En este caso también se realizó un análisis de varian⁷⁷ (ANOVA) a fin de comparar los resultados considerando los diferentes parámetros, a fin de determinar si existen diferencias significativas entre estos. Los resultados se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en modo desnudo.

Parámetro	Valor F	Valor p
Edad de la construcción	4.58541	0.01082
Nivel de tránsito vehicular	0.25429	60.77559
Material de construcción de las paredes	0.20569	0.81417
Antigüedad de la pintura de las paredes	2.03990	0.154371
Material de recubrimiento del piso	0.07429	0.98995

Los análisis ANOVA muestran que solo la variable edad de construcción mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de radón. Esto podría indicar que las grietas, fisuras y otras aberturas que pueden permitir la entrada de radón debido a la edad de la construcción son factores estadísticamente significativos, ya que en estudios previos también se ha observado una correlación entre la concentración de radón en interiores y la presencia de grietas [150].

5.4.2 Resultados obtenidos de las mediciones con cámaras de difusión

Para el caso de las mediciones de radón intramuros utilizando monitores G2, éstas se incorporaron luego de más de 12 meses de haber estado midiendo solo con detectores en

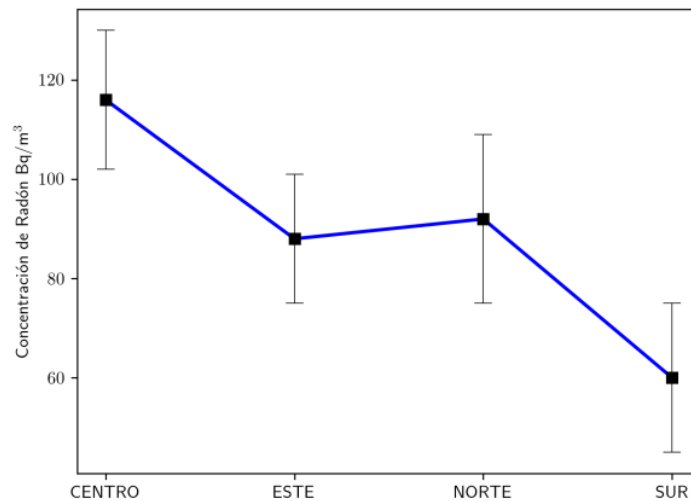
modo desnudo, por lo que el número de mediciones con G2 es menor. Esta es la razón principal por lo que estos valores pueden tener una mayor incertidumbre estadística con respecto a los medidos con el modo desnudo. Los parámetros estadísticos han sido calculados por zona y se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Concentraciones de radón por zona de la provincia de Lima utilizando detectores LR-115 en monitor G2.

Zona o Cono	Puntos de muestreo	Min [Bq·m ⁻³]	Max [Bq·m ⁻³]	Mediana [Bq·m ⁻³]	Media aritmética [Bq·m ⁻³]	Media geométrica [Bq·m ⁻³]
Centro	24	25	306	109	116 ±14	94±2
Este	31	20	292	72	88±13	67±2
Norte	17	20	235	64	92±17	67±2
Sur	14	22	208	37	60 ±15	45±2

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) a fin de comparar los resultados considerando los 4 grupos o zonas en que se divide la provincia de Lima, para evaluar si se tiene diferencias significativas entre éstos. Asumiendo como hipótesis nula que no hay diferencias significativas entre las medias de la concentración de radón entre las 4 zonas se calculó el valor F igual a 1.98629, mucho menor que en el caso de los monitores abiertos, lo que puede indicar que las concentraciones de radón en estas 4 zonas pueden tener cierta similitud estadística. Adicionalmente se tiene el valor p que dio por resultado 0.12255 que corrobora esta hipótesis, por lo que se puede afirmar que no existen diferencias significativas entre las medias de los grupos estudiados.

La Figura 5.11 muestra los valores promedios de concentración de radón para las cuatro zonas de estudio. Puede observarse además que si bien los 4 grupos juntos siguen siendo estadísticamente diferentes, esta diferencia es menor que con respecto a las mediciones con los detectores desnudos.



1 **Figura 5.11.** Valores promedios de concentración de radón usando cámaras de difusión para las cuatro zonas de estudio.

80 El promedio mundial de la concentración de radón intramuros es de $39 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, sin embargo la Organización Mundial de la Salud (WHO [158]) proporcionar un nivel de referencia recomendado de $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a no ser excedido para no representar un riesgo para la salud de los pobladores. Con respecto a los datos del monitoreo de radón utilizando detectores LR-115 en el monitor G2, se determinó la media para la provincia de Lima en $(66 \pm 2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Hay que tener en cuenta que el 40.7% de los monitores registraron por debajo del límite de detección del monitor G2. En la Figura 5.12 se muestran las distribuciones de las concentraciones de Radón por cada zona.

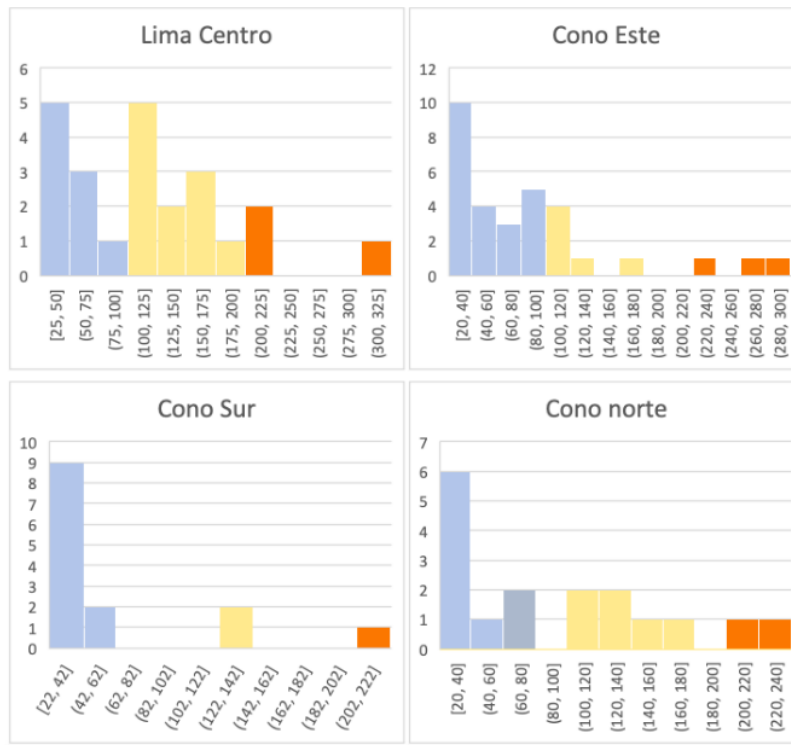


Figura 5.12. Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de Lima utilizando monitores G2.

3450 El 6.4% del total de las mediciones dieron valores en el rango de acción por exposición
 3451 crónica (superior a $200\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) indicado por el Reglamento de Seguridad Radiológica (D.S.
 3452 Nro. 009-97-EM), Anexo IV, Radón en viviendas y puestos de trabajo, adoptados por la
 3453 Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN).

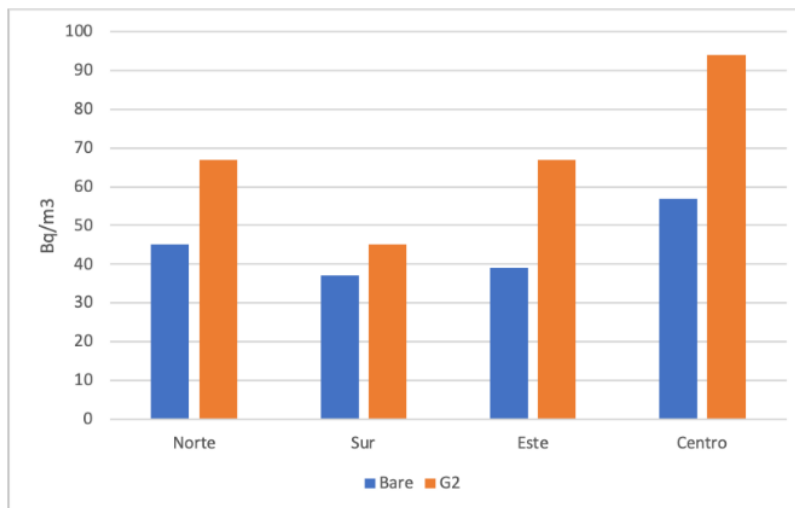
3454 En términos de dosis, de acuerdo a ICRP 126 [61], se puede estimar considerando un
 3455 factor de equilibrio de 0.4, la población de la provincia de Lima está en promedio expuesta
 3456 a una dosis de $3.564\text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ debido a la concentración de radón, lo que equivale a 0.297
 3457 WLM. Debe resaltarse que el monitor G2 ha obtenido un buen comportamiento en cuanto a
 3458 su estabilidad en condiciones ambientales de alta humedad y cambios de temperatura como
 3459 se presentan en la ciudad de Lima. El porcentaje de humedad relativa alcanza el 99% en
 3460 los meses de invierno (julio - agosto) que podría producir efectos de condensación y punto
 3461 de rocío [3], esto junto con el alto nivel de particulado en la ciudad que puede producir

3462 obstrucción, son factores que pueden afectar a monitores con filtros, esto no es el caso del
3463 G2 que funcionó en forma correcta.

3464 5.4.3 Contraste de los resultados obtenidos utilizando detectores desnudos y cámaras 3465 de difusión.

3466 Al contrastar los resultados de las mediciones de la concentración de radón en la provincia
3467 de Lima utilizando detectores en modo desnudo y utilizando la cámara de difusión G2, se
3468 debe tener claro que ambos resultados no son comparables pues miden cosas diferentes. Los
3469 detectores desnudos miden al radón, la progenie no depositada aérea (que no necesariamente
3470 su progenitor fue registrado), al radón y a la progenie de éste que este dentro del rango de
3471 energías que pueda ser detectado. El monitor G2 mide al radón que ingresó al monitor y a la
3472 progenie de éste producida al interior del monitor.

3473 La Figura 5.13 muestra ambos resultados por zona, indicando los promedios de las
3474 concentraciones en cada caso. Se evidencia que los resultados indicados por las cámaras
3475 G2 muestran valores MG promedios de concentración mayores que los obtenidos utilizando
3476 detectores desnudos. Al igual que los resultados arrojados por los detectores desnudos, Lima
3477 Centro tiene los mayores niveles medios encontrados. La tendencia en el orden de estas 4
3478 zonas se mantiene igual para ambos tipos de mediciones.



3479 Figura 5.13. Distribución de las concentraciones de radón en cada zona de la provincia de
3480 Lima utilizando monitores G2.

3479 Para evaluar la diferencia estadística entre ambas mediciones (utilizando el modo abierto
3480 y el monitor G2), se utilizó la prueba U de Mann-Whitney. Los resultados de esta prueba
3481 indican que ambas modas fueron significativamente diferentes ($p = 0,0004$) con un nivel de
3482 confianza del 95%.

3483 Para analizar la diferencia de los resultados puede señalarse estas dos hipótesis:

- 3484 • Los detectores desnudos en la pared tuvieron un aporte significativo aporte del torón y
3485 su progenie.
- 3486 • El factor de equilibrio asumido fue mayor que el valor real. Debe recordarse que se
3487 asumió un valor promedio mundial estimado por la UNSCEAR y que podría variar de
3488 acuerdo a nuestras condiciones ambientales.

3489 Estos factores deben tenerse en cuenta en futuras investigaciones. Es de resaltar que
3490 ambos casos los promedios están por debajo del nivel de referencia de $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
3491 establecido por la autoridad nacional en base a recomendaciones de la IAEA, ya que estos
3492 valores son los primeros validados en nuestro país.

3493 Conclusiones

3494 Se han cumplidos los objetivos generales y específicos planteados en esta tesis, lo que nos
3495 permite concluir siguiente:

- 3496 • Los detectores de huellas nucleares en modo desnudo son una alternativa para realizar
3497 monitoreos a mediana y gran escala de carácter exploratorio con fines de determinar la
3498 concentración de radón intramuros, tanto como las cámaras de difusión.
- 3499 • Una simulación utilizando Métodos Monte Carlo permitió conocer la respuesta del
3500 detector LR-115 expuesto en modo desnudo y determinar lo que realmente registra el
3501 detector en cuanto a las contribuciones de los isótopos de radón, torón y sus progenies.
- 3502 • Se desarrollaron las bases de un método y un programa de simulación para calcular las
3503 sensibilidades parciales de un detector de LR-115 en modo desnudo para registrar huel-
3504 las provenientes de radón, torón y sus progenies y así estimar el factor de calibración
3505 de los detectores, el cual está de acuerdo con los resultados experimentales.
- 3506 • Se analizaron la influencia de diversos factores como materiales de construcción,
3507 antigüedad de las edificaciones, condiciones de ventilación, condiciones de entorno
3508 (suelo, tránsito) y se determinó su relación con los valores de concentración de radón
3509 obtenidos.
- 3510 • Se realizó un monitoreo de radón intramuros utilizando SSNTDs en la provincia de
3511 Lima, presentándose el primer mapa de radón en el Perú.

3512 Resultados adicionales y recomendaciones

- 3513 • Se propone una metodología mediante simulación para determinar las sensibilidades
3514 parciales en detectores desnudos a partir de la densidad de huellas inducida, expuestos
3515 a diferentes distancias de una fuente alfa plana, con resultados similares y de forma
3516 rápida y simple con respecto a procedimientos experimentales que requieren fuentes
3517 de radón y cámaras de calibración certificadas.

- 3518 • Las fuentes alfa emisoras electrodepositadas pueden ser utilizadas para el proceso
3519 de calibración, independientemente de su espesor. Los valores de las sensibilidades
3520 parciales encontrados se corresponden con estas variaciones de tamaño de la fuente,
3521 de volúmenes activos del detector, energía de emisión de la fuente alfa y otras de sus
3522 características.
- 3523 • Se demostró que la proposición de ⁴estimar el coeficiente de calibración de un detector
3524 LR-115 tipo 2 en cámara de difusión de cualquier geometría y tamaño (utilizando el pro-
3525 grama desarrollado con los parámetros encontrados) tiene validez en la aproximación.
3526 En otras palabras, no sería necesario determinar experimentalmente el coeficiente de
3527 calibración por la exposición del monitor a concentraciones conocidas en una cámara
3528 de radón. Es importante enfatizar que las condiciones de revelado y modo de análisis
3529 de las trazas deben preservarse.
- 3530 • ⁴Se determinó que las concentraciones de radón en la provincia de Lima están por
3531 debajo del nivel de acción; en particular para el modo desnudo, la media geométrica
3532 fue de $49 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, y para los monitores G2 fue de $66 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.
- 3533 • Se obtuvieron resultados utilizables en la determinación de límites de intervención. En
3534 el caso de los detectores desnudos, el 88.98% de los dispositivos registraron medidas
3535 por debajo de $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, que incluye a los que reportaron valores por debajo del
3536 límite de detección. De un total de 9.84% de 19 detectores registraron medidas entre
3537 100 y $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que solo el 1.18% registró concentraciones superiores
3538 a $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Por otro lado, en el caso de los monitores G2, el 63.05% de los
3539 dispositivos registraron medidas inferiores a $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. El 7.17% de los monitores
3540 registraron medidas entre 100 y $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que sólo el 9.78% de los
3541 monitores registraron valores superiores a $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.
- 3542 • Se determinó que los detectores desnudos siguen una distribución logarítmica normal
3543 a diferencia del resultado obtenido para el monitor G2; un importante resultado que
3544 apunta hacia un programa de mediciones que debe ser superior a un valor de umbral.
- 3545 • Se demostró que los detectores desnudos registran principalmente la contribución de
3546 ^{222}Rn . Adicionalmente se demostró que la contribución de ^{220}Rn y sus descendientes
3547 son de una importancia de segundo orden. En el caso de los monitores G2, registran la
3548 concentración de ^{222}Rn y la progenie que se produce dentro de la cámara, y cumplen
3549 con los requisitos de ángulo crítico y rango de energía adecuado para producir huellas.

- 3550 • Se confirmó que la concentración de ^{222}Rn está estrechamente relacionada con las
3551 zonas, como lo demuestra la fuerte correlación con las características geológicas.
3552 Evidentemente está relacionada con otras variables como la edad de construcción. Este
3553 factor parece indicar que el mantenimiento adecuado de las viviendas (sin grietas ni
3554 fisuras) contribuye a niveles más bajos de ^{222}Rn en el interior de las viviendas.
- 3555 • Se ha creado el primer mapa ^{222}Rn en Perú, concretamente en la provincia capital:
3556 Lima. Aunque los resultados no son concluyentes, se puede afirmar que los niveles
3557 detectados no suponen un riesgo elevado para la población, ya que los valores medios
3558 de concentración de ^{222}Rn para ambos modos de exposición se encontraban por debajo
3559 del nivel de referencia sugerido por la OMS. Se necesitan más mediciones para estudiar
3560 otras regiones.
- 3561 • Se logró establecer la importancia de monitorear los niveles de ^{222}Rn en interiores
3562 e implementar ²⁷⁶prácticas adecuadas de mantenimiento de viviendas para reducir la
3563 exposición. En base a los resultados obtenidos, es evidente que los detectores LR-115,
3564 ya sea que se utilicen en modo desnudo o en modo cámara de difusión, presentan un
3565 buen desempeño y pueden ser empleados en este tipo de estudio, dado su bajo costo y
3566 facilidad de uso. Son adecuados para laboratorios que realizan investigaciones sobre
3567 temas relacionados.

3568 **Referencias**

- 3569 [1] Abo-Elmagd, M., Mansy, M., Eissa, H., and El-Fiki, M. (2006). Major parameters
3570 affecting the calculation of equilibrium factor using SSNTD-measured track densities.
3571 *Radiation measurements*, 41(2):235–240. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.007s>.
- 3572 [2] Abo-Elmagd, M., Saleh, A., and Afifi, G. (2018). Estimation of residential radon doses
3573 from the exhalation rate measurements-A correlation of experimental and theoretical
3574 calculations. *Radiation Protection Dosimetry*, 182(4):555–561. [https://doi.org/10.1093/](https://doi.org/10.1093/rpd/ncy115)
3575 [rpd/ncy115](https://doi.org/10.1093/rpd/ncy115).
- 3576 [3] AccuWeather (2023). Tiempo actual en Lima, Lima, Perú. Available online: [https://](https://www.accuweather.com/es/pe/lima/264120/current-weather/264120)
3577 www.accuweather.com/es/pe/lima/264120/current-weather/264120 (accessed on 07 May
3578 2023).
- 3579 [4] Aparecido, R., Rodríguez, C., Vasquez, R., Espinoza, G., Golzarri, J., Martínez, T.,
3580 Canoba, A., López, F., Arnaud, M., Oliveira, A., et al. (2002). Indoor radon measurements
3581 in six Latin American countries. *Geofísica internacional*, 41(4):453–457.
- 3582 [5] A.R. Da Silva, A. and M. Yoshimura, E. (2003). Calibration of LR-115 for ^{222}Rn moni-
3583 toring taking into account the plateau effect. *Radiation protection dosimetry*, 103(4):367–
3584 370. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006155>.
- 3585 [6] Askari, H., Ghandi, K., Rahimi, M., and Negarestani, A. (2008). Theoretical cal-
3586 culation on CR-39 response for radon measurements and optimum diffusion cham-
3587 bers dimensions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 596(3):368–383.
3588 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.151>.
- 3590 [7] Avinash, P., Rajesh, S., Kerur, B., and Mishra, R. (2014). Radon, thoron and their
3591 progeny concentration variations in dwellings of Gogi region, Yadgir district of Karnataka,
3592 India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302:1321–1326.
- 3593 [8] Belgaid, M. and Amrani, D. (2004). Investigations and use of LR-115 track detectors for
3594 radon measurements. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20555909>.

- 3595 [9] Bossus, D. (1984). Emanating power and specific surface area. *Radiation Protection*
3596 *Dosimetry*, 7(1-4):73–76. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082966>.
- 3597 [10] Calmet, D., Ameon, R., Beck, T., Bombard, A., Bourquin, M., Brun, S., De Jong,
3598 P., Forte, M., Fournier, M., Herranz, M., et al. (2011). International standardisation
3599 work on the measurement of radon in air and water. *Radiation protection dosimetry*,
3600 145(2-3):267–272.
- 3601 [11] Canoba, A., Gnoni, G., Truppa, W., and Nuclear, A. R. (2007). Norm measurements in
3602 the oil and gas industry in Argentina. *PARTE I*, page 33. [https://www.argentina.gob.ar/
3603 sites/default/files/mt_2007a.pdf#page=34](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mt_2007a.pdf#page=34) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3604 [12] Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and energy*
3605 *security*, 6(2):48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>.
- 3606 [13] Chen, J. (2009). A preliminary design of a radon potential map for Canada: a multi-tier
3607 approach. *Environ. Earth Sci.*, 59:775–782. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0073-x>.
- 3608 [14] Cheng, Y. S. (1997). Wall deposition of radon progeny and particles in a spherical
3609 chamber. *Aerosol Science and Technology*, 27(2):131–146.
- 3610 [15] Choi, V., Ng, C., Lam, R., Janik, M., Sorimachi, A., Kranrod, C., Nikezic, D., Tokonami,
3611 S., and Yu, K. (2010). Long-term determination of airborne radon progeny concentra-
3612 tions using LR 115 detectors and the effects of thoron. *Radiation protection dosimetry*,
3613 141(4):404–407. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq255>.
- 3614 [16] CSN (2023). Mapa de zonificación por municipio de radón. Disponible online:
3615 <https://www.csn.es/mapa-de-zonificacion-por-municipio> (accedido el 3 de Junio de 2023).
- 3616 [17] Daraktchieva, Z., Howarth, C., and Algar, R. (2012). *Results of the 2012 HPA intercom-*
3617 *parison of passive radon detectors*. Centre for Radiation, Chemical and Environmental
3618 Hazards.
- 3619 [18] Darby, S., Hill, D., Deo, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochic-
3620 chio, F., Falk, R., Farchi, S., Figueiras, A., et al. (2006). Residential radon and lung
3621 cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons
3622 with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies
3623 in Europe. *Scandinavian journal of work, environment & health*, pages 1–84.
- 3624 [19] Dávila Obando, A. (2019). Medición de Radón 222 atmosférico en la ciudad de
3625 Huancayo en el periodo del 2013-2016. Tesis de Maestría. [http://hdl.handle.net/20.500.
3626 12404/14231](http://hdl.handle.net/20.500.12404/14231).

- 3627 [20] Dubois, G. et al. (2005). An overview of radon surveys in Europe. *European Commis-*
3628 *sion*, pages 1–168.
- 3629 [21] Durrani, S. A. and Bull, R. K. (2013). *Solid state nuclear track detection: principles,*
3630 *methods and applications*, volume 111. Elsevier.
- 3631 [22] Dwivedi, K., Ghosh, S., Singh, S., Satyanarayana, J., Murthy, G., Prasad, J., Srivas-
3632 tava, A., et al. (1997). Indoor radon measurements in some Indian cities. *Radiation*
3633 *measurements*, 28(1-6):647–649. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00157-1).
- 3634 [23] Eappen, K. and Mayya, Y. (2004). Calibration factors for LR-115 (type-II) based
3635 radon thoron discriminating dosimeter. *Radiation measurements*, 38(1):5–17. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2003.09.003>.
- 3637 [24] Eappen, K., Ramachandran, T., Mayya, Y., and Nambi, K. (1998). LR-115 detector
3638 response to alpha energies above 5.0 MeV: application to thoron dosimetry. In *Proceedings*
3639 *of the seventh national symposium on environment*.
- 3640 [25] Elío, J., Cinelli, G., Bossew, P., Gutiérrez-Villanueva, J. L., Tollefsen, T., De Cort, M.,
3641 Nogarotto, A., and Braga, R. (2019). First steps towards an all-european indoor radon
3642 map. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 19:2451–2464.
- 3643 [26] Elío, J., Crowley, Q., Scanlon, R., Hodgson, J., and Zgaga, L. (2018). Estimation of
3644 residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung
3645 cancer incidence. *Environ. Int.*, 114:69–76. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.025>.
- 3646 [27] Espinosa, G. et al. (1994). *Nuclear tracks in solids*. México D.F., México.
- 3647 [28] Espinosa, G. and Gammage, R. (1998). Indoor radon concentration survey in Mexico.
3648 *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 236(1-2):227–229. <https://doi.org/10.1007/bf02386347>.
- 3650 [29] Espinosa, G. and Tommasino, L. (2015). Surface-deposition and distribution of the
3651 radon-decay products indoors. *Journal of Environmental Radioactivity*, 143:80–84.
- 3652 [30] Etiopé, G., Guerra, M., and Raschi, A. (2005). Carbon dioxide and radon geohaz-
3653 ards over a gas-bearing fault in the Siena Graben (Central Italy). *TAO: Terrestrial,*
3654 *Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(4):885. [https://pdfs.semanticscholar.org/3f0f/](https://pdfs.semanticscholar.org/3f0f/b17426e1c9523aa3187b0c26c419ad02febb.pdf)
3655 [b17426e1c9523aa3187b0c26c419ad02febb.pdf](https://pdfs.semanticscholar.org/3f0f/b17426e1c9523aa3187b0c26c419ad02febb.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).

- 3656 [31] Etiope, G. and Martinelli, G. (2002). Migration of carrier and trace gases in the
3657 geosphere: an overview. *Physics of the earth and planetary interiors*, 129(3-4):185–204.
3658 [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00292-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00292-8).
- 3659 [32] Evans, R. D. and Goodman, C. (1980). Determination of the thoron content of air and
3660 its bearing on lung cancer hazards in industry. *Health Physics*, 38(6):920–928.
- 3661 [33] Faj, Z. and Planinic, J. (1991). Dosimetry of radon and its daughters by two SSNT
3662 detectors. *Radiation protection dosimetry*, 35(4):265–268. [https://doi.org/10.1093/](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080958)
3663 [oxfordjournals.rpd.a080958](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080958).
- 3664 [34] Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R. M. (2022). *Nuclear tracks in solids:*
3665 *principles and applications*. Univ of California Press.
- 3666 [35] Giustini, F., Ciotoli, G., Rinaldini, A., Ruggiero, L., and Voltaggio, M. (2019). Mapping
3667 the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regres-
3668 sion: A case study from a volcanic area of central Italy. *Sci. Total Environ.*, 661:449–464.
3669 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.146>.
- 3670 [36] Godoy, M., Iunes, P., Oliveira, R., Paulo, S., et al. (2002). Effects of environmental
3671 conditions on the radon daughters spatial distribution. *Radiation Measurements*, 35(3):213–
3672 221. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(02\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00039-2).
- 3673 [37] Gonzalez Esqueche, M. A. (2022). Determinación del nivel de radón-
3674 222 proveniente de suelos en el distrito de lambayeque año 2019. [https://](https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/11127/Gonzalez_Esqueche_Maria_Asuncion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
3675 [repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/11127/Gonzalez_Esqueche_](https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/11127/Gonzalez_Esqueche_Maria_Asuncion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
3676 [Maria_Asuncion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/11127/Gonzalez_Esqueche_Maria_Asuncion.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- 3677 [38] Green, P., Bull, R., and Durrani, S. (1978). Particle identification from track-etch rates
3678 in minerals. *Nuclear Instruments and Methods*, 157(1):185–193. [https://doi.org/10.1016/](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90605-5)
3679 [0029-554X\(78\)90605-5](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90605-5).
- 3680 [39] Grossi, C., Chambers, S. D., Llido, O., Vogel, F. R., Kazan, V., Capuana, A., Werczynski, S.,
3681 Curcoll, R., Delmotte, M., Vargas, A., et al. (2020). Intercomparison study of
3682 atmospheric ^{222}Rn and ^{222}Rn progeny monitors. *Atmospheric Measurement Techniques*,
3683 13(5):2241–2255. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2241-2020>.
- 3684 [40] Guevara Pillaca, César (2019). Medición de radón 222 en Lima Metropolitana utilizando
3685 tres tipos de monitores con detectores de trazas nucleares. Tesis de Maestría. [https://](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14626)
3686 tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14626.

- 3687 [41] Hansen, V., Petersen, D., Sogaard-Hansen, J., Rigét, F. F., Mosbech, A., Clausen,
3688 D. S., Mulvad, G., and Rönnqvist, T. (2023). Indoor radon survey in Greenland and dose
3689 assessment. *J. Environ. Radioact.*, 257:107080. [https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107080)
3690 [107080](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107080).
- 3691 [42] Harting, F. and Hesse, U. (1879). Der Lungenkrebs, die Bergkrakhet inden Schieberger
3692 gruben, Telit, Eulenbergs Vierteljahrshr, Gerichtl. Med. Offentl. Gesundheit. *Neue Folge*,
3693 30:296.
- 3694 [43] Health Protection Agency (2009). *Health Protection Agency Annual Report and*
3695 *Accounts 2009*. London, UK. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/248278/0612.pdf)
3696 [system/uploads/attachment_data/file/248278/0612.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/248278/0612.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3697 [44] ICRP (1991). *ICRP publication 60: 1990 recommendations of the international*
3698 *commission on radiological protection*. Number 60. Elsevier Health Sciences.
- 3699 [45] INEI (2023). Resultados Definitivos de los Censo Nacionales 2017. Disponible online:
3700 https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digiales/Est/Lib1583/ (ac-
3701 cedido el 3 de Junio de 2023).
- 3702 [46] INGEMMET (1999). Carta Geológica Nacional - 501 Cuadrángulos Geológicos
3703 Digitales de la Carta Nacional 1960 - 1999.
- 3704 [47] International Commission on Radiological Protection (2010). *2010 Annual Report*.
3705 Ontario, Canada. <https://www.icrp.org/docs/ICRP%20Annual%20Report%202010.pdf>
3706 (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3707 [48] IPCC (2014). AR5 Synthesis Report - Climate Change 2014. [https://www.ipcc.ch/site/](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)
3708 [assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (accedido el 28 de Mayo de
3709 2023).
- 3710 [49] Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y., and Phaneuf, M. (2013). Measurement
3711 and calculation of radon releases from NORM residues. [https://www-pub.iaea.org/mtcd/](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs474_webfile.pdf)
3712 [publications/pdf/trs474_webfile.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs474_webfile.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3713 [50] Jacobi, W. and Eisfeld, K. (1980). Dose to tissues and effective dose equivalent by
3714 inhalation of radon-222, radon-220 and their short-lived daughters. Technical report,
3715 Gesellschaft fuer Strahlen-und Umweltforschung mbH Muenchen.
- 3716 [51] Jäkel, O., Bert, C., Fossati, P., and Kamada, T. (2016). ICRU report 93: prescribing,
3717 recording, and reporting light ion beam therapy. *J ICRU*, 16(1-2):37–58.

- 3718 [52] Janik, M., Omori, Y., and Yonehara, H. (2015). Influence of humidity on radon and
3719 thoron exhalation rates from building materials. *Applied radiation and Isotopes*, 95:102–
3720 107.
- 3721 [53] Jiráne, M. and Hulka, J. (2000). Radon diffusion coefficient in radon-proof membranes–
3722 determination and applicability for the design of radon barriers. *International Journal on*
3723 *Architectural Science*, 1(4):149–155.
- 3724 [54] Joint Research Centre (2018). Annual Activity Report. [https://commission.europa.eu/
3725 system/files/2019-06/jrc_aar_2018_final.pdf](https://commission.europa.eu/system/files/2019-06/jrc_aar_2018_final.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3726 [55] Khalaf, H. N., Mostafa, M., Vasyanovich, M., and Zhukovsky, M. (2019). Comparison
3727 of radioactive aerosol size distributions (Activity, number, mass, and surface area). *Applied*
3728 *Radiation and Isotopes*, 145:95–100.
- 3729 [56] Kitson-Mills, D., Sovoe, S., Opoku-Ntim, I., Kyei, K. A., Marnotey, S., Anim-Sampong,
3730 S., Kwabeng, M. A., Otoo, F., and Baiden, F. (2019). An assessment of indoor radon
3731 level in a suburb of Ghana. *Environmental Research Communications*, 1(6):061002.
3732 <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab2af7>.
- 3733 [57] Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J.-P., Murith, C., Palacios, M.,
3734 and Baechler, S. (2014). Major influencing factors of indoor radon concentrations in
3735 Switzerland. *J. Environ. Radioact.*, 129:7–22. [https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.
3736 010](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.010).
- 3737 [58] Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J.-P., Murith, C., Palacios, M.,
3738 and Baechler, S. (2015a). Improved predictive mapping of indoor radon concentrations
3739 using ensemble regression trees based on automatic clustering of geological units. *J.*
3740 *Environ. Radioact.*, 147:51–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.05.006>.
- 3741 [59] Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J.-P., Murith, C., Palacios, M.,
3742 and Baechler, S. (2015b). Predictive analysis and mapping of indoor radon concentrations
3743 in a complex environment using kernel estimation: an application to Switzerland. *Sci.*
3744 *Total Environ.*, 505:137–148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.0640>.
- 3745 [60] Kudo, H., Tokonami, S., Omori, Y., Ishikawa, T., Iwaoka, K., Sahoo, S., Akata, N.,
3746 Hosoda, M., Wanabongse, P., Pornnumpa, C., et al. (2015). Comparative dosimetry for
3747 radon and thoron in high background radiation areas in China. *Radiation protection*
3748 *dosimetry*, 167(1-3):155–159. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv235>.

- 3749 [61] Lecomte, J.-F., Solomon, S., Takala, J., Jung, T., Strand, P., Murith, C., Kiselev, S.,
3750 Zhuo, W., Shannoun, F., and Janssens, A. (2014). ICRP publication 126: radiological
3751 protection against radon exposure. *Annals of the ICRP*, 43(3):5–73.
- 3752 [62] Leung, S., Nikezic, D., Leung, J., and Yu, K. (2007). Derivation of V function for LR
3753 115 SSNTD from its sensitivity to 220Rn in a diffusion chamber. *Applied radiation and*
3754 *isotopes*, 65(3):313–317. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.08.006>.
- 3755 [63] Leung, S., Nikezic, D., and Yu, K. (2006). Passive monitoring of the equilibrium
3756 factor inside a radon exposure chamber using bare LR 115 SSNTDs. *Nuclear Instruments*
3757 *and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and*
3758 *Associated Equipment*, 564(1):319–323. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.04.031>.
- 3759 [64] Liu, B. Y., Pui, D. Y., and Lin, B. Y. (1986). Aerosol charge neutralization by a
3760 radioactive alpha source. *Particle & Particle Systems Characterization*, 3(3):111–116.
- 3761 [65] Liza, R., Pereyra, P., Rau, J., Guzman, M., Sajo-Bohus, L., and Palacios, D. (2023).
3762 Assessment of Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Peruvian Gold Mine
3763 Tailings to Produce a Geopolymer Cement. *Atmosphere*, 14(3):588.
- 3764 [66] Loffredo, F., Opoku-Ntim, I., Kitson-Mills, D., and Quarto, M. (2022a). Gini Method
3765 Application: Indoor Radon Survey in Kpong, Ghana. *Atmosphere*, 13(8):1179. <https://doi.org/10.3390/atmos13081179>.
- 3766 [67] Loffredo, F., Opoku-Ntim, I., Meo, G., and Quarto, M. (2022b). Indoor Radon Mon-
3767 itoring in Kindergarten and Primary Schools in South Italy. *Atmosphere*, 13(3):478.
3768 <https://doi.org/10.3390/atmos13030478>.
- 3769 [68] Loffredo, F., Savino, F., Amato, R., Irollo, A., Gargiulo, F., Sabatino, G., Serra,
3770 M., and Quarto, M. (2021). Indoor radon concentration and risk assessment in 27
3771 districts of a public healthcare company in Naples, South Italy. *Life*, 11(3):178. <https://doi.org/10.3390/life11030178>.
- 3772 [69] Lucas, H. F. (1957). Improved low-level alpha-scintillation counter for radon. *Review*
3773 *of Scientific Instruments*, 28(9):680–683. <https://doi.org/10.1063/1.1715975>.
- 3774 [70] Mapa de Lima (2023). Mapa de las regiones de la provincia de Lima. Disponible
3775 online: <https://www.mapadelima.com/mapa-de-regiones-de-lima/> (accedido el 3 de Junio
3776 de 2023).

- 3779 [71] Mariño Salazar, J. and Zavala Carrión, B. L. (2015). El complejo volcánico Hualca
3780 Hualca, Ampato y Sabancaya: riqueza paisajística y peligros volcánicos. Instituto Ge-
3781 ológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET.
- 3782 [72] Marsh, J. and Bailey, M. (2013). A review of lung-to-blood absorption rates for radon
3783 progeny. *Radiation protection dosimetry*, 157(4):499–514. [https://doi.org/10.1093/rpd/](https://doi.org/10.1093/rpd/nct179)
3784 [nct179](https://doi.org/10.1093/rpd/nct179).
- 3785 [73] Martín-Landrove, R., Sajo-Bohus, L., and Palacios, D. (2013). Nuclear track evolution
3786 by capillary condensation during etching in SSNT detectors. *Radiation measurements*,
3787 50:241–245. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.06.012>.
- 3788 [74] Martínez, J. M. (1986). Determinación de procesos litorales en playas de arena, según
3789 el contraste de los valores granulométricos. *Boletín. Instituto Español de Oceanografía*,
3790 3(3):17–22.
- 3791 [75] Mayya, Y., Eappen, K., and Nambi, K. (1998). Methodology for mixed field inhalation
3792 dosimetry in monazite areas using a twin-cup dosimeter with three track detectors. *Radi-*
3793 *ation protection dosimetry*, 77(3):177–184. [https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032308)
3794 [a032308](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032308).
- 3795 [76] Michel, J. (1987). Sources. *Environmental radon*, pages 81–130.
- 3796 [77] Miles, J. (2004). *Methods of radon measurement and devices*. Czech Republic.
- 3797 [78] Miller, C. and Howarth, C. (2020). Results of the 2019 intercomparison of passive
3798 radon detectors. *Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Public*
3799 *Health England, PHE CRCE 060*.
- 3800 [79] Ministerio de Fomento (1977). *Comisión Venezolana de Normas Industriales*. Fon-
3801 donorma, Caracas, Venezuela. <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/259-77.pdf>
3802 (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3803 [80] Mishra, R., Joshi, M., Meisenberg, O., Gierl, S., Prajith, R., Kanse, S., Rout, R., Sapra,
3804 B., Mayya, Y., and Tschiersch, J. (2017). Deposition and spatial variation of thoron decay
3805 products in a thoron experimental house using the Direct Thoron Progeny Sensors. *J.*
3806 *Radiol. Prot.*, 37(2):379. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa6408>.
- 3807 [81] Mishra, R., Zunic, Z. S., Venoso, G., Bochicchio, F., Stojanovska, Z., Carpentieri, C.,
3808 Prajith, R., Sapra, B., Mayya, Y., Ishikawa, T., et al. (2014). An evaluation of thoron (and

- 3809 radon) equilibrium factor close to walls based on long-term measurements in dwellings.
3810 *Radiat. Prot. Dosim.*, 160(1-3):164–168. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu083>.
- 3811 [82] Mitev, K., Cassette, P., Pressyanov, D., Georgiev, S., Dutsov, C., Michielsen, N., and
3812 Sabot, B. (2020). Methods for the experimental study of ^{220}Rn homogeneity in calibration
3813 chambers. *Applied Radiation and Isotopes*, 165:109259. [https://doi.org/10.1016/j.apradiso.](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109259)
3814 [2020.109259](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109259).
- 3815 [83] Mohankumar, Mary N. (2005). Concerns on the health effects of low-dose ionizing
3816 radiations from naturally occurring radioactive materials (NORM). Technical report.
- 3817 [84] Moharram, B. (2000). The influence of mechanical vibrations of railway and car
3818 traffics on the radon exhalation using track detector technique. [https://doi.org/10.1097/](https://doi.org/10.1097/00004032-199802000-00008)
3819 [00004032-199802000-00008](https://doi.org/10.1097/00004032-199802000-00008).
- 3820 [85] Moussallam, Y., Tamburello, G., Peters, N., Apaza, F., Schipper, C. I., Curtis, A.,
3821 Aiuppa, A., Masias, P., Boichu, M., Bauduin, S., et al. (2017). Volcanic gas emissions
3822 and degassing dynamics at Ubinas and Sabancaya volcanoes; implications for the volatile
3823 budget of the central volcanic zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,
3824 343:181–191. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.027>.
- 3825 [86] Murphy, P., Dowdall, A., Long, S., Curtin, B., and Fenton, D. (2021). Estimating
3826 population lung cancer risk from radon using a resource efficient stratified population
3827 weighted sample survey protocol—Lessons and results from Ireland. *J. Environ. Radioact.*,
3828 233:106582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106582>.
- 3829 [87] Nader, A. (2019). The determination of equilibrium factor of radon and thoron using
3830 LR-115 type II detector in a selected area from Basra Governorate, Iraq. In *Journal of*
3831 *Physics: Conference Series*, volume 1258, page 012032. IOP Publishing.
- 3832 [88] National Research Council and others (1988). Health risks of radon and other internally
3833 deposited alpha-emitters: BEIR IV.
- 3834 [89] National Research Council (US) Committee on Health Risks of Exposure to Radon
3835 (BEIR VI) (1999). *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*. National Academies
3836 Press (US).
- 3837 [90] Nazarov, A. (2003). Grain-boundary diffusion in nanocrystals with a time-dependent
3838 diffusion coefficient. *Physics of the Solid State*, 45:1166–1169. [https://doi.org/10.1134/1.](https://doi.org/10.1134/1.1583809)
3839 [1583809](https://doi.org/10.1134/1.1583809).

- 3840 [91] Nikezić, D. and Jančićjević, A. (2002). Bulk etching rate of LR115 detectors. *Applied*
3841 *radiation and isotopes*, 57(2):275–278. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(02\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(02)00109-4).
- 3842 [92] Nikezic, D., Ng, F., and Yu, K. (2004). Theoretical basis for long-term measurements of
3843 equilibrium factors using LR 115 detectors. *Applied radiation and isotopes*, 61(6):1431–
3844 1435. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.065>.
- 3845 [93] Nikezic, D. and Yu, K. (2006). Computer program TRACK_TEST for calculating
3846 parameters and plotting profiles for etch pits in nuclear track materials. *Computer Physics*
3847 *Communications*, 174(2):160–165.
- 3848 [94] Nikezic, D. and Yu, K. (2007). Computer simulation of radon measurements with
3849 nuclear track detectors. *Computer physics research trends*, 3:119–150.
- 3850 [95] Omori, Y., Tokonami, S., Sahoo, S. K., Ishikawa, T., Sorimachi, A., Hosoda, M., Kudo,
3851 H., Pornnumpa, C., Nair, R. R. K., Jayalekshmi, P. A., et al. (2016). Radiation dose due to
3852 radon and thoron progeny inhalation in high-level natural radiation areas of Kerala, India.
3853 *Journal of Radiological Protection*, 37(1):111. [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/37/1/111/meta)
3854 [1361-6498/37/1/111/meta](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/37/1/111/meta).
- 3855 [96] Onishchenko, A., Malinovsky, G., Vasilyev, A., and Zhukovsky, M. (2017). Radon
3856 measurements in kindergartens in Ural region (Russia). *Radiation Protection Dosimetry*,
3857 177(1-2):112–115.
- 3858 [97] Palacios, D., Sajo-Bohus, L., Castillo, J., Bermudez, J., and Alfonso, J. (2004). Distri-
3859 bution of gamma emitter radionuclides in offshore sediments of the Orinoco Delta.
- 3860 [98] Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J., Cinelli, G., Gruber,
3861 V., et al. (2018). Literature review of Indoor radon surveys in Europe. *Publications Office*
3862 *of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/977726>.
- 3863 [99] Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J. K., Cinelli, G., and
3864 Gruber, V. (2019). Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. *Journal of*
3865 *environmental radioactivity*, 204:163–174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.04.010>.
- 3866 [100] Papastefanou, C. (2008). Radioactive aerosols. *Radioactivity in the Environment*,
3867 12:11–58.
- 3868 [101] Paquet, F., Bailey, M., Leggett, R. W., Lipsztein, J., Marsh, J., Fell, T., Smith,
3869 T., Nosske, D., Eckerman, K. F., Berkovski, V., et al. (2017). ICRP publication 137:

- 3870 occupational intakes of radionuclides: part 3. *Annals of the ICRP*, 46(3-4):1-486. ²⁴⁷
3871 <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0146645317734963>.
- 3872 [102] Parajuli, P., Thapa, D., and Shah, B. (2015). Study of radon exhalation rate in soil ⁹²
3873 samples of kathmandu valley using passive detector LR115. *Inter J Chem Phys Sci*,
3874 4(4):30-9.
- 3875 [103] Paschoa, A. and Pohl-Rülling, J. (2005). Early thoron concentration levels in Guara- ²⁰⁷
3876 pari: Dosimetric implications. In *Radioactivity in the Environment*, volume 7, pages ¹³²
3877 678-686. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07083-4](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07083-4).
- 3878 [104] Pereyra, P. (1990). Aplicaciones de la técnica de huellas nucleares en dosimetría de ¹⁸⁰
3879 partículas alfa. Tesis de Bachiller.
- 3880 [105] Pereyra, P., Guevara-Pillaca, C. J., Liza, R., Pérez, B., Rojas, J., Vilcapoma L, L., ²
3881 Gonzales, S., Sajo-Bohus, L., López-Herrera, M. E., and Palacios Fernández, D. (2023a).
3882 Estimation of Indoor ²²²Rn Concentration in Lima, Peru Using LR-115 Nuclear Track
3883 Detectors Exposed in Different Modes. *Atmosphere*, 14(6):952. [https://doi.org/10.3390/](https://doi.org/10.3390/atmos14060952)
3884 [atmos14060952](https://doi.org/10.3390/atmos14060952).
- 3885 [106] Pereyra, P., Palacios, D., Yoshimura, E. M., and Sajo-Bohus, L. (2023b). Monte Carlo ¹⁸
3886 simulation of a simple and fast method to experimentally determine the partial sensitivity
3887 of a bare LR-115 detector using planar alpha sources. *Radiation Measurements*, page
3888 106951. ¹³ <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2023.106951>.
- 3889 [107] Pérez, B., López, M., and Palacios, D. (2020). Theoretical and experimental study of ³
3890 the LR-115 detector response in a non-commercial radon monitor. *Applied Radiation and*
3891 *Isotopes*, 160:109112. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109112>.
- 3892 [108] Pérez, B., López, M., and Palacios, D. (2021). Concentric rings formation on etched ²
3893 ²²²Rn in bare mode by unconventional exposition. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*,
3894 496:37-44. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.014>. ¹⁹⁷
- 3895 [109] Pérez-Vidal, H., Lunagómez-Rocha, M., and Acosta-Pérez, L. (2010). Análisis de ⁸⁸
3896 partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cundu-
3897 acán, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26(2):151-162.
- 3898 [110] Peters, C., Kim, J., Song, C., Ge, C., and Demers, P. (2019). O8A-1 Estimating the ¹¹³
3899 burden of lung cancer due to occupational exposure to radon gas. ²⁴¹ [http://dx.doi.org/10.](http://dx.doi.org/10.1136/OEM-2019-EPI.187)
3900 [1136/OEM-2019-EPI.187](http://dx.doi.org/10.1136/OEM-2019-EPI.187).

- 3901 [111] Planinic, J. (1992). ⁵² 222Rn detection efficiency and sensitivity coefficient of the LR
3902 115-II nuclear track detector. *Health physics*, 62(4):356–358.
- 3903 [112] Porstendörfer, J. (1994). Properties and behaviour of radon and thoron and their decay
3904 products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25(2):219–263. [https://doi.org/10.1016/](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9)
3905 [0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9).
- 3906 [113] Porstendörfer, J. (2001). Physical parameters and dose factors of the radon and thoron
3907 decay products. *Radiation Protection Dosimetry*, 94(4):365–373. [https://doi.org/10.1093/](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512)
3908 [oxfordjournals.rpd.a006512](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512).
- 3909 [114] Pressyanov, D. and Dimitrov, D. (2020). The problem with temperature dependence
3910 of radon diffusion chambers with anti-thoron barrier. *Rom. J. Phys*, 65:801.
- 3911 [115] Protection, Radiological ²⁴⁰ (2007). ICRP publication 103. *Ann ICRP*, 37(2.4):2.
- 3912 [116] Quindós, L. (1995). ¹¹ Radón: " un gas radiactivo de origen natural en su casa". Consejo
3913 de Seguridad Nuclear.
- 3914 [117] Quintero, R., Alonso, D., Rayo, L., ²³ Parado, G., Porras, A., Reyes, C., Guzmán, M.,
3915 and Acero, F. (2018). Estudio preliminar de materiales radiactivos de ocurrencia natural y
3916 tecnológica (norm / tenorm) en la explotación de fosfatos en el departamento de boyacá,
3917 colombia.
- 3918 [118] Radiation Protection Series Publication ¹⁴³ (2008). Management of Naturally Occurring
3919 Radioactive Material (NORM). [https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/](https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps15.pdf)
3920 [pubs/rps/rps15.pdf](https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps15.pdf).
- 3921 [119] Ramachandran, T., Eappen, K., Nair, R., Mayya, Y., and Sadasivan, S. (2003). Radon-
3922 thoron levels and inhalation dose distribution patterns in India dwellings. Technical report,
3923 Bhabha Atomic Research Centre.
- 3924 [120] Ramachandran, T., Eappen, K., Shaikh, A., and Mayya, Y. (2001). Indoor radon levels
3925 and equilibrium factors in Indian dwellings. *Radiat. Prot. Environ.*, 24(1-2):420–422.
- 3926 [121] Ramola, R. C., Kandari, M. S., Negi, M. S., and Choubey, V. M. (2000). A study of
3927 diurnal variation of indoor radon concentrations. *Japanese Journal of Health Physics*,
3928 35(2):211–216. <https://doi.org/10.5453/jhps.35.211>.
- 3929 [122] Rana, M. A. (2018). ⁵⁴ CR-39 nuclear track detector: An experimental guide. *Nuclear*
3930 *Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers,*

- 3931 *Detectors and Associated Equipment*, 910:121–126. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.077>.
3932
- 3933 [123] Ref, ICRP (1990). International Commission on Radiological Protection Statement
3934 on Radon. [https://www.icrp.org/docs/ICRP_Statement_on_Radon\(November_2009\).pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Statement_on_Radon(November_2009).pdf)
3935 (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 3936 [124] Rojas, J., Palacios, D., Pereyra, P., Pérez, B., Bohus, L. S., and López, M. E. (2018).
3937 A semi-empirical approach to estimate the parameters determining the LR-115 detector
3938 response in radon measurements. *Radiation Measurements*, 118:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.08.005>.
3939
- 3940 [125] Ruano-Ravina, A., Quindós-Poncela, L., Sainz Fernández, C., and Barros-Dios, J. M.
3941 (2014). Radón interior y salud pública en españa: tiempo para la acción. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2014.09.0030>.
3942
- 3943 [126] Ruiz, R., Galvez-Nino, M., Poquioma, E., Limache-García, A., Amorin, E., Olivera,
3944 M., Valdiviezo, N., Trejo, J. M., Heredia, A., Sarria, G., et al. (2020). Lung cancer in Peru.
3945 *Journal of Thoracic Oncology*, 15(6):891–898.
- 3946 [127] Sabbarese, C., Ambrosino, F., and Roca, V. (2020). Analysis by scanner of tracks
3947 produced by radon alpha particles in CR-39 detectors. *Radiat. Prot. Dosim.*, 191(2):154–
3948 159. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa140>.
- 3949 [128] Sahoo, B. and Sapra, B. (2015). Advances in measurement of indoor ²²²Rn and ²²⁰Rn
3950 gas concentrations using solid state nuclear track detectors. In *Solid State Phenomena*,
3951 volume 238, pages 116–126. Trans Tech Publ.
- 3952 [129] Aidou, Modibo, O. B., Joseph Emmanuel, N. N., German, O., Michaux, K. N., and
3953 Abba, H. Y. (2020). Indoor radon measurements using radon track detectors and electret
3954 ionization chambers in the bauxite-bearing areas of Southern Adamawa, Cameroon.
3955 *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18):6776. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186776>.
3956
- 3957 [130] Sakoda, A., Ishimori, Y., and Yamaoka, K. (2011). A comprehensive review of radon
3958 emanation measurements for mineral rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation
3959 and Isotopes*, 69(10):1422–1435. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.06.009>.
- 3960 [131] Schauer, D. A. and Linton, O. W. (2009). NCRP report No. 160, ionizing radiation
3961 exposure of the population of the United States, medical exposure—are we doing less

- 3962 with more, and is there a role for health physicists? *Health physics*, 97(1):1–5. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000356672.44380.b7>.
3963
- 66
3964 [132] Semwal, P., Agarwal, T. K., Singh, K., Joshi, M., Gusain, G. S., Sahoo, B. K., and
3965 Ramola, R. C. (2019). Indoor inhalation dose assessment for thoron-rich regions of Indian
3966 Himalayan belt. *Environmental Science and Pollution Research*, 26:4855–4866.
- 2
3967 [133] SENAMHI (2023). Monitoreo de la Calidad de Aire, para Lima Metropolitana.
3968 Disponible online: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-del-aire> (accedido el 3 de
3969 Junio de 2023).
- 7
3970 [134] Serge Didier, T. S., Saïdou, Tokonami, S., Hosoda, M., Suzuki, T., Kudo, H., and
3971 Bouba, O. (2019). Simultaneous measurements of indoor radon and thoron and inhalation
3972 dose assessment in Douala City, Cameroon. *Isotopes Environ. Health Stud.*, 55(5):499–
3973 510. <https://doi.org/10.1080/10256016.2019.1649258>.
- 86
3974 [135] Shang, B., Tschiersch, J., Cui, H., and Xia, Y. (2008). Radon survey in dwellings
3975 of Gansu, China: the influence of thoron and an attempt for correction. *Radiation and
3976 Environmental Biophysics*, 47(3):367–373. <https://doi.org/10.1007/s00411-008-0163-2>.
- 137
3977 [136] Silva, N., Bossew, P., Filho, A. F., Campos, T., Pereira, A., Yoshimura, E., Veiga,
3978 L., Campos, M., Rocha, Z., Paschuk, S., et al. (2014). Towards a Brazilian radon
3979 map: consortium radon Brazil. *Radiation Protection Dosimetry*, 160(1-3):226–230.
3980 <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu089>.
- 22
3981 [137] Silverman, M. P. (2017a). Analysis of residence time in the measurement of radon
3982 activity by passive diffusion in an open volume: a micro-statistical approach. *World
3983 Journal of Nuclear Science and Technology*, 7:252.
- 22
3984 [138] Silverman, M. P. (2017b). Brownian motion of decaying particles: Transition proba-
3985 bility, computer simulation, and first-passage times. *Journal of Modern Physics*, 8:1809.
3986 <https://doi.org/10.4236/jmp.2017.811108>.
- 22
3987 [139] Silverman, M. P. and Mudvari, A. (2018). Brownian motion of radioactive particles:
3988 derivation and monte carlo test of spatial and temporal distributions. *World Journal of
3989 Nuclear Science and Technology*, 8:86.
- 170
3990 [140] Sima, O. (2001). Monte carlo simulation of radon ssnt detectors. *Radiation measure-
3991 ments*, 34(1-6):181–186. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00147-0).

- 3992 [141] Singh, S., Mehra, R., and Singh, K. (2005). Seasonal variation of indoor radon
3993 in dwellings of Malwa region, Punjab. *Atmos. Environ.*, 39(40):7761–7767. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.030>.
3994
- 3995 [142] Sohrabi, M. (2013). World high background natural radiation areas: Need to protect
3996 public from radiation exposure. *Radiation Measurements*, 50:166–171. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.03.011>.
3997
- 3998 [143] Stojanovska, Z., Boev, B., Zunic, Z. S., Ivanova, K., Ristova, M., Tsenova, M., Ajka,
3999 S., Janevik, E., Taleski, V., and Bossew, P. (2016). Variation of indoor radon concentration
4000 and ambient dose equivalent rate in different outdoor and indoor environments. *Radiat.*
4001 *Environ. Biophys.*, 55:171–183. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0640-y>.
- 4002 [144] Tirmarche, M., Harrison, J., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E., Marsh, J., et al.
4003 (2010). ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement
4004 on radon. *Annals of the ICRP*, 40(1):1–64.
- 4005 [145] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation and others
4006 (1988). UNSCEAR 1988 Report, Sources, effects and risks of ionizing radiation. *United*
4007 *Nations, New York*.
- 4008 [146] UNSCEAR (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scien-*
4009 *tific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 Report, Volume I:*
4010 *Report to the General Assembly, with Scientific Annexes-Sources*. United Nations.
- 4011 [147] UNSCEAR (2009). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Sci-*
4012 *entific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2006 Report, Report.*
4013 *Sources to Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, vol. II (Annex E).*
4014 United Nations.
- 4015 [148] Urban, M. and Piesch, E. (1981). Low level environmental radon dosimetry with a
4016 passive track etch detector device. *Radiation protection dosimetry*, 1(2):97–109. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a079961>.
4017
- 4018 [149] USEPA, E. (1993). Protocols for radon and radon decay product measurements in
4019 homes. *Washington: EPA*. [https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2019-07/](https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2019-07/documents/indoor_radon_and_radon_decay_product_measurement_device_protocol.pdf)
4020 [documents/indoor_radon_and_radon_decay_product_measurement_device_protocol.](https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2019-07/documents/indoor_radon_and_radon_decay_product_measurement_device_protocol.pdf)
4021 [pdf](https://archive.epa.gov/epa/sites/production/files/2019-07/documents/indoor_radon_and_radon_decay_product_measurement_device_protocol.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 4022 [150] Vaizoglu, S. A. and Güler, Ç. (1999). Indoor radon concentrations in Ankara dwellings.
4023 *Indoor Built Environ.*, 8(5):327–331. <https://doi.org/10.1159/000024661>.

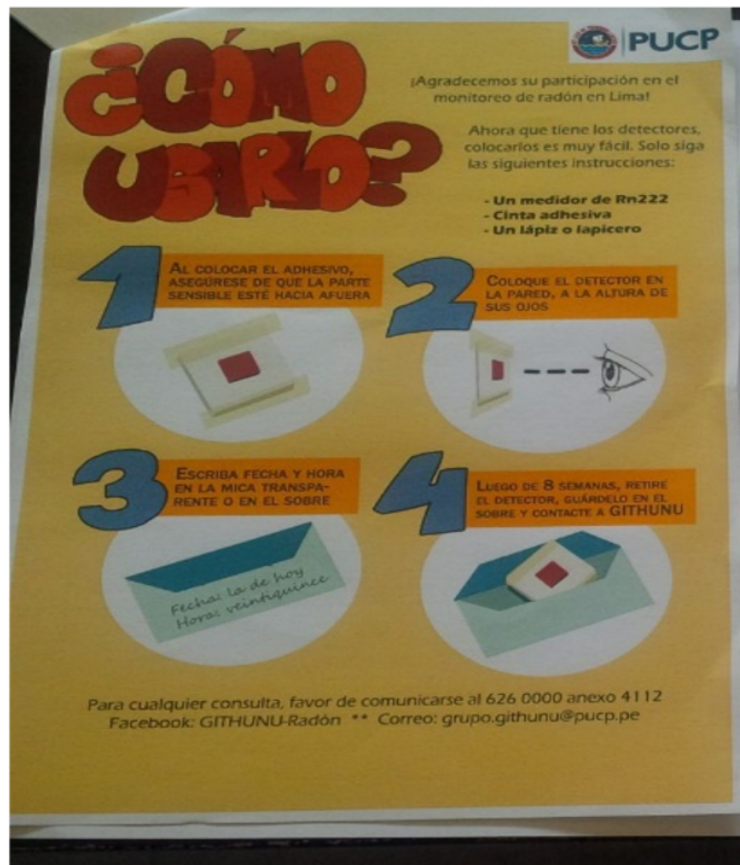
- 4024 [151] Valdivia, S. A. P. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire deter-
4025 minado por material particulado PM10 y PM2, 5 en Lima Metropolitana. In *Anales*
4026 *Científicos*, volume 77, pages 273–283. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- 4027 [152] Vilcapoma, L. L., López Herrera, M. E., Pereyra, P., Palacios, D. F., Pérez, B., Rojas,
4028 J., and Sajo-Bohus, L. (2019). Measurement of radon in soils of Lima City-Peru during
4029 the period 2016-2017. *Earth Sci. Res. J.*, 23(3):171–183. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n3.74108>.
- 4030 [153] Virk, H. (1999). Indoor radon levels near the radioactive sites of Himachal Pradesh,
4031 India. *Environ. Int.*, 25(1):47–51. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(98\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00096-8).
- 4032 [154] Weeks, A. et al. (2008). *Paracelsus (Theophrastus Bombastus von Hohenheim, 1493-*
4033 *1541): essential theoretical writings*, volume 5. Brill.
- 4034 [155] WHO (2007). International radon project: survey on radon guidelines, programmes
4035 and activities. Technical report, World Health Organization.
- 4036 [156] Willey, C. and Tanner, C. (1964). A Steady-State Method for Laboratory Measurement
4037 of the Oxygen Diffusivity of Porous Materials. *Soil Science Society of America Journal*,
4038 28(6):733–737.
- 4039 [157] Wołoszczuk, K. and Skubacz, K. (2018). Particle size distribution of the radon progeny
4040 and ambient aerosols in the Underground Tourist Route “Liczyrzepa” Mine in Kowary
4041 Adit. In *E3S Web of Conferences*, volume 28, page 01040. EDP Sciences.
- 4042 [158] World Health Organization and others (2009). *WHO Handbook on indoor radon: a*
4043 *public health perspective*. World Health Organization.
- 4044 [159] World Health Organization and others (2014). *Quantitative risk assessment of the*
4045 *effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*. World Health
4046 Organization.
- 4047 [160] World Health Organization and others (2015). Protection of the Public against Expo-
4048 sure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Specific Safety Guide.
4049 <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1651web-62473672.pdf> accedido el
4050 12 de Junio de 2023.
- 4051 [161] World Health Organization and others (2021). WHO global air quality guidelines:
4052 particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon
4053 monoxide: executive summary.
- 4054

- 4055 [162] Wysocka, M., Skubacz, K., Chmielewska, I., Urban, P., and Bonczyk, M. (2019).
4056 Radon migration in the area around the coal mine during closing process. *International*
4057 *Journal of Coal Geology*, 212:103253. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103253>.
- 4058 [163] Ye, Y., Chen, G., Dai, X., Huang, C., Yang, R., and Kearfott, K. J. (2019). Experimental
4059 study of the effect of water level and wind speed on radon exhalation of uranium tailings
4060 from heap leaching uranium mines. *Environmental Science and Pollution Research*,
4061 26:25702–25711. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05788-6>.
- 4062 [164] Yu, C., Zielen, A., Cheng, J.-J., LePoire, D., Gnanapragasam, E., Wallo I.I.I., A.,
4063 William W., and Peterson, H. (2001). User's manual for RESRAD version 6. Technical
4064 report, Argonne National Lab., IL (US). [https://publications.anl.gov/anlpubs/2001/07/](https://publications.anl.gov/anlpubs/2001/07/40176.pdf)
4065 [40176.pdf](https://publications.anl.gov/anlpubs/2001/07/40176.pdf) (accedido el 28 de Mayo de 2023).
- 4066 [165] Yu, K., Leung, S., Nikezic, D., and Leung, J. (2008). Equilibrium factor determination
4067 using SSNTDs. *Radiation measurements*, 43:S357–S363. [https://doi.org/10.1016/j.](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.024)
4068 [radmeas.2008.03.024](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.024).
- 4069 [166] Yu, K. and Nikezic, D. (2011). Long-term determination of airborne radon progeny
4070 concentrations using LR 115 solid-state nuclear track detectors. *Radiation measurements*,
4071 46(12):1799–1802. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.04.025>.
- 4072 [167] Yu, K., Nikezic, D., Ng, F., and Leung, J. (2005). Long-term measurements of radon
4073 progeny concentrations with solid-state nuclear track detectors. *Radiation measurements*,
4074 40(2-6):560–568. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.03.007>.
- 4075 [168] Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., and Biersack, J. P. (2010). Srim—the stopping and range
4076 of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*
4077 *B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11-12):1818–1823.

4078 **Anexo A**

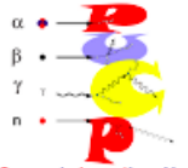
4079 **Documentos entregados a los voluntarios participantes en el**
4080 **monitoreo de radón en Lima**

4081 **Instructivo de colocación de los detectores**



4082

Formulario para los voluntarios del monitoreo de radón en Lima



Grupo de Investigación
de Huellas Nucleares

Ficha de Ubicación Detector de Rn 222

Responsable:

Código de los detectores

--	--

Datos Generales:

Dirección					
Distrito			Teléfono		
Edad aprox. de la construcción (años)		Número Habitantes		Número Fumadores:	
La casa está en:	avenida	calle		Interior o pasaje	
El tráfico es:	intenso	medio		bajo	
Transitan mayormente:	Pesados (ómnibus y camiones)			Livianos (autos)	
En los alrededores hay:	Fábricas con emisión de gases	Fábrica sin emisión de gases	Cables de alta tensión	aeropuerto	

Características del lugar de monitoreo

sala	cocina	dormitorio	baño	Garaje	
Sótano	semisótano	Primer piso	Segundo piso	otro	
¿Fuman en la habitación?			si	no	
¿Tiene ventana(s)?			si	no	
¿Quedan abiertas?	siempre	nunca	En el día	Por la noche	Por horas
¿Otro sistema?	Ventilador de techo	Aire acondicionado	Extractor de aire	otro	Nada
El sistema adicional está prendido	siempre	nunca	Solo de día	Solo de noche	Por momentos
Material de construcción		ladrillos	adobe	drywall	otros
Recubrimiento	pintura	madera	papel	mayólica	otros

Si el recubrimiento es pintura:

Tiempo aproximado		Mas de 5 años		Menos de 5 años		
¿Tiene fisuras?		si		No		
Tipo:	látex	Al agua	Base imprimante	esmalte	otro	No recuerda

Otras características

En forma general puede decir que la habitación tiene buena ventilación.			si	no	
La luz solar le da	Por la mañana		Por la tarde		nunca
El piso es de	cemento	mayólica	madera	tapiz	Otro:

Observaciones (colocar cualquier otra característica que pueda ser de interés en la ubicación)

Muchas gracias por su participación.

Contacto: Laboratorio de Huellas Nucleares (3er. Piso Física)

Patrizia Pereyra

Oficina 626 2000

ANEXOS 4112 / 4111 / 4127

4083 **Anexo B**

4084 **Logros Académicos**

4085 **Publicaciones**

- 4086 1. **Pereyra P**, Guevara-Pillaca, C. J., Liza, R., Pérez, B., Rojas, J., Vilcapoma L, Gonzales, S., L., Sajo-Bohus, L., López-Herrera, M. E. & Palacios Fernández, D. Estimation
4087 of Indoor ²²²Rn Concentration in Lima, Peru Using LR-115 Nuclear Track Detec-
4088 tors Exposed in Different Modes. *Atmosphere*, 14(6), 952. [https://doi.org/10.3390/
4089 atmos14060952](https://doi.org/10.3390/atmos14060952).
- 4091 2. **Pereyra, P.**, Palacios, D., Yoshimura, E. M., & Sajo-Bohus, L. (2023). Monte Carlo
4092 simulation of a simple and fast method to experimentally determine the partial sensi-
4093 tivity of a bare LR-115 detector using planar alpha sources. *Radiation Measurements*,
4094 106951. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2023.106951>.
- 4095 3. Liza, R., **Pereyra, P.**, Rau, J., Guzman, M., Sajo-Bohus, L., & Palacios, D. (2023).
4096 Assessment of Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Peruvian Gold Mine
4097 Tailings to Produce a Geopolymer Cement. *Atmosphere*, 14(3), 588. [https://doi.org/10.
4098 3390/atmos14030588](https://doi.org/10.3390/atmos14030588).
- 4099 4. **Pereyra, P.**, López Herrera, M. E., Palacios, D., Viloría, T., Vadillo, E., Pérez, B.,
4100 & Sajo-Bohus, L. (2020). Nuclear track detector response to energetic heavy ions:
4101 study case. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324, 609-614. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07114-8>.
- 4103 5. Bonifaz, A. P., Moliné, O. B., Schneider, J. O., La Rosa, B. L. R., Hancoo, J. R.,
4104 Rojas, V. G., Palacios, D., **Pereyra, P.** & Herrera, M. E. L. (2020). Simple and low
4105 cost alternative method for detecting photoneutrons produced in some radiotherapy
4106 treatments using SSNTDs. *Applied Radiation and Isotopes*, 161, 109169. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109169>.
- 4107

- 4108 6. Vilcapoma, L. L., López Herrera, M. E., **Pereyra, P.**, Palacios, D. F., Pérez, B.,
4109 Rojas, J., & Sajo-Bohus, L. (2019). Measurement of radon in soils of Lima City-
4110 Peru during the period 2016-2017. *Earth Sciences Research Journal*, 23(3), 171-183.
4111 <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n3.74108>.
- 4112 7. Rojas, J., Palacios, D., **Pereyra, P.**, Pérez, B., Bohus, L. S., & López, M. E. (2018). A
4113 semi-empirical approach to estimate the parameters determining the LR-115 detector
4114 response in radon measurements. *Radiation Measurements*, 118, 36-42. [https://doi.](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.08.005)
4115 [org/10.1016/j.radmeas.2018.08.005](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.08.005).
- 29
4116 8. **Pereyra, P.**, Lopez, M. E., Perez, B., Rojas, J., Martinez, J., & Leon, K. (2016).
4117 Characterization of LR-115 Type 2 Detectors for Monitoring Indoor Radon 222:
4118 Determination of the Calibration Factor. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences,*
4119 *Radiation and Applications*, 4(1), 99-106. <https://doi.org/10.15415/jnp.2016.41010>.

segunda version

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	www.mdpi.com Fuente de Internet	1%
3	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	1%
6	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
7	link.springer.com Fuente de Internet	<1%
8	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
9	tabaquismo.freehosting.net Fuente de Internet	

<1 %

10

accedacris.ulpgc.es

Fuente de Internet

<1 %

11

riull.ull.es

Fuente de Internet

<1 %

12

scholars.cityu.edu.hk

Fuente de Internet

<1 %

13

ouci.dntb.gov.ua

Fuente de Internet

<1 %

14

docplayer.es

Fuente de Internet

<1 %

15

oa.upm.es

Fuente de Internet

<1 %

16

nlistsp.inflibnet.ac.in

Fuente de Internet

<1 %

17

idoc.pub

Fuente de Internet

<1 %

18

Patrizia Pereyra, Daniel Palacios, Elisabeth Mateus Yoshimura, Laszlo Sajo-Bohus.

"Monte Carlo simulation of a simple and fast method to experimentally determine the partial sensitivity of a bare LR-115 detector using planar alpha sources", Radiation Measurements, 2023

<1 %

19

dash.harvard.edu

Fuente de Internet

<1 %

20

No-Wook Park, Yongjae Kim, Byung-Uck Chang, Geun-Ho Kwak. "County-level indoor radon concentration mapping and uncertainty assessment in South Korea using geostatistical simulation and environmental factors", *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019

Publicación

<1 %

21

core.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

22

digitalrepository.trincoll.edu

Fuente de Internet

<1 %

23

ricaxcan.uaz.edu.mx

Fuente de Internet

<1 %

24

Jesús Pardo Loaiza. "Mejora de la gestión del recurso hídrico mediante la incorporación de indicadores de regímenes ecológicos en el análisis de sistemas de recursos hídricos", *Universitat Politecnica de Valencia*, 2023

Publicación

<1 %

25

www.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

26

tesis.ipn.mx

Fuente de Internet

<1 %

27

up-rid.up.ac.pa

Fuente de Internet

<1 %

28

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

29

jnp.chitkara.edu.in

Fuente de Internet

<1 %

30

apps.who.int

Fuente de Internet

<1 %

31

B. Pérez, M.E. López, D. Palacios.
"Overlapping correction suitable for an LR-115
detector located inside a diffusion chamber",
Radiation Physics and Chemistry, 2021

Publicación

<1 %

32

brage.bibsys.no

Fuente de Internet

<1 %

33

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

34

ebuah.uah.es

Fuente de Internet

<1 %

35

www.scirp.org

Fuente de Internet

<1 %

36

academic.oup.com

Fuente de Internet

<1 %

37 ppjp.ulm.ac.id Fuente de Internet <1 %

38 www.foroiberam.org Fuente de Internet <1 %

39 iopscience.iop.org Fuente de Internet <1 %

40 www.who.int Fuente de Internet <1 %

41 www.icrp.org Fuente de Internet <1 %

42 dehesa.unex.es Fuente de Internet <1 %

43 documentop.com Fuente de Internet <1 %

44 Yongjun Ye, Shuyuan Liu, Ming Xia, Ting Yu, Shanwei Shang. "Experimental study on radon retardation effect of modular covering floats in radon-containing water", Environmental Pollution, 2023
Publicación <1 %

45 dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet <1 %

46 portal.inen.sld.pe Fuente de Internet <1 %

pt.scribd.com

47

Fuente de Internet

<1 %

48

rinconeducativo.org

Fuente de Internet

<1 %

49

www.degruyter.com

Fuente de Internet

<1 %

50

nanamep-lasnenas5.blogspot.com

Fuente de Internet

<1 %

51

www.cityu.edu.hk

Fuente de Internet

<1 %

52

dergipark.org.tr

Fuente de Internet

<1 %

53

issuu.com

Fuente de Internet

<1 %

54

K.C.C. Pires, M. Assunção, M.A. Rana, S. Guedes, R. Künzel, N.M. Trindade. "Etching and optical properties of 1–2MeV alpha particles irradiated CR-39 detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022

Publicación

<1 %

55

dicalblog.wordpress.com

Fuente de Internet

<1 %

56

edepositireland.ie

Fuente de Internet

<1 %

57

repositorio.unican.es

Fuente de Internet

<1 %

58

covid19.ccg.unam.mx

Fuente de Internet

<1 %

59

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

60

eprints.ugd.edu.mk

Fuente de Internet

<1 %

61

scholarspace.manoa.hawaii.edu

Fuente de Internet

<1 %

62

www.boe.es

Fuente de Internet

<1 %

63

Ana Mostečak, Dario Perković, Frankica Kapor, Želimir Veinović. "RADON MAPPING IN CROATIA AND ITS RELATION TO GEOLOGY", Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 2018

Publicación

<1 %

64

inis.iaea.org

Fuente de Internet

<1 %

65

Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC

Trabajo del estudiante

<1 %

assets.researchsquare.com

66

Fuente de Internet

<1 %

67

edoc.unibas.ch

Fuente de Internet

<1 %

68

www-pub.iaea.org

Fuente de Internet

<1 %

69

www.rivanet.com.ar

Fuente de Internet

<1 %

70

prezi.com

Fuente de Internet

<1 %

71

Octavio Lázaro-Mancilla, Víctor Hugo Garduño-Monroy, Avith Mendoza-Ponce, Ángel Figueroa-Soto et al. "Concentraciones de gas radón (^{222}Rn) en suelo de la zona urbana de Morelia, Michoacán, México y su relación con fallas potencialmente sísmicas y asociadas con el proceso de subsidencia-fluencia", Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2020

Publicación

<1 %

72

www.jove.com

Fuente de Internet

<1 %

73

Silvana Beltrán-Torres, Katalin Zsuzsanna Szabó, Gergely Tóth, Edit Tóth- Bodrogi, Tibor Kovács, Csaba Szabó. "Estimated versus field measured soil gas radon concentration and

<1 %

soil gas permeability", Journal of Environmental Radioactivity, 2023

Publicación

74

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

75

gig.eu

Fuente de Internet

<1 %

76

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

77

worldwidescience.org

Fuente de Internet

<1 %

78

Biswajit Das, Argha Deb. "Theoretical evaluation of calibration factor for CR-39 track detector for alpha radioactivity measurement in natural water", Radiation Physics and Chemistry, 2021

Publicación

<1 %

79

Hirokazu Miyoshi, Fumio Kida, Kenji Yamada, Mami Nakamura, Hitoshi Hase. "Dose responses of scattered- and direct-X-ray-irradiated CR-39 and methylviologen-encapsulated silica nanocapsule-doped CR-39 and their mechanisms", Results in Optics, 2023

Publicación

<1 %

80

dehesa.unex.es:8080

Fuente de Internet

<1 %

81	static02.nmbu.no Fuente de Internet	<1 %
82	www.imedpub.com Fuente de Internet	<1 %
83	José Ordóñez Ródenas. "Desarrollo de Modelos de Simulación por Monte Carlo como Apoyo a la Medida de Radiactividad Ambiental en Operación Rutinaria y de Emergencias", Universitat Politecnica de Valencia, 2020 Publicación	<1 %
84	K. Mitev, S. Georgiev, B. Sabot. "Approaches for reduction of the temperature bias on radon detectors packed in anti-thoron polymer membranes", Applied Radiation and Isotopes, 2021 Publicación	<1 %
85	Submitted to Universidad Estadual Paulista Trabajo del estudiante	<1 %
86	www.rivm.nl Fuente de Internet	<1 %
87	www.suin-juricol.gov.co Fuente de Internet	<1 %
88	Submitted to Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %

89

Ganiyu Abayomi Dawodu. "Fitting Models of Vulnerability to Toxicity with Generalized Linear Models", International Journal of Data Science and Analysis, 2017

Publicación

<1 %

90

Jaeyeon Kim, Seong - Sun Lee, Seung - Wook Ha, Won - Tak Joun, Yeojin Ju, Kang - Kun Lee. " Natural as a tracer of mixing and volatilization in a shallow aquifer during a injection experiment ", Hydrological Processes, 2020

Publicación

<1 %

91

Sardar Qader Othman, Ali Hassan Ahmed, Sarbaz Ibrahim Mohammed. "Assessment of 222Rn, 226Ra, 238U, 218Po, and 214Po activity concentrations in the blood samples of workers at selected building material factories in Erbil City", Environmental Monitoring and Assessment, 2023

Publicación

<1 %

92

mjs.uomustansiriyah.edu.iq

Fuente de Internet

<1 %

93

www.bmuv.de

Fuente de Internet

<1 %

94

J. Nunes, J. Silva, H. Freitas, L. Neves, A. Pereira. "Isolation of natural radiation to indoor applications with wood-based

<1 %

products: a case study of the central region of Portugal", International Wood Products Journal, 2015

Publicación

95	ehp.niehs.nih.gov Fuente de Internet	<1 %
96	gchron.copernicus.org Fuente de Internet	<1 %
97	mafiadoc.com Fuente de Internet	<1 %
98	www.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
99	"Medical Geology", Wiley, 2023 Publicación	<1 %
100	opac.pucv.cl Fuente de Internet	<1 %
101	saber.ucv.ve Fuente de Internet	<1 %
102	J.J. Rojas, M.E. López, B. Pérez. "Preliminary applications carried out in a new-build radon chamber using CR-39 detectors inside non-commercial diffusion chambers", Radiation Physics and Chemistry, 2023 Publicación	<1 %
103	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %

104	orcid.org Fuente de Internet	<1 %
105	Debajyoti Barooah, Simi Barman, Sarat Phukan. "Simultaneous measurements of radon and thoron, and their progeny levels in dwellings on anticlinal structures of Assam, India", Environmental Monitoring and Assessment, 2014 Publicación	<1 %
106	Shittu Abdullahi, Aznan Fazli Ismail, Muhamad Samudi Yasir. "Radiological hazard analysis of Malaysia's ceramic materials using generic and RESRAD-BUILD computer code approach", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020 Publicación	<1 %
107	agupubs.onlinelibrary.wiley.com Fuente de Internet	<1 %
108	cirworld.org Fuente de Internet	<1 %
109	perso.univ-lyon2.fr Fuente de Internet	<1 %
110	www.repository.cam.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
111	m.moam.info Fuente de Internet	<1 %

112	<p>Ángeles Rodríguez-Martínez, Alberto Ruano-Ravina, María Torres-Durán, Mariano Provencio et al. "Residential Radon and Small Cell Lung Cancer. Final Results of the Small Cell Study", Archivos de Bronconeumología, 2021</p> <p>Publicación</p>	<1 %
113	<p>Submitted to Adtalem Global Education</p> <p>Trabajo del estudiante</p>	<1 %
114	<p>Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS</p> <p>Trabajo del estudiante</p>	<1 %
115	<p>idus.us.es</p> <p>Fuente de Internet</p>	<1 %
116	<p>www.unscear.org</p> <p>Fuente de Internet</p>	<1 %
117	<p>Kyle R. Kellenbenz, Kabindra M. Shakya. "Spatial and temporal variations in indoor radon concentrations in Pennsylvania, USA from 1988 to 2018", Journal of Environmental Radioactivity, 2021</p> <p>Publicación</p>	<1 %
118	<p>Se-Won Park, Hee Reyoung Kim. "Preliminary DCGLW for surface soil of Kori Unit-1 decommissioning site according to habit data and age of human receptors", Annals of Nuclear Energy, 2021</p> <p>Publicación</p>	<1 %

119	e-spacio.uned.es Fuente de Internet	<1 %
120	opha.on.ca Fuente de Internet	<1 %
121	www.agroscope.admin.ch Fuente de Internet	<1 %
122	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
123	M. Sreenath Reddy. "Indoor radon levels in urban Hyderabad area, Andhra Pradesh, India", Radiation Protection Dosimetry, 01/21/2009 Publicación	<1 %
124	Xiaoling Zhong, Sau Chung Fu, Ka Chung Chan, Christopher Y.H. Chao. "Experimental study of particle deposition on patterned microstructured surfaces in a chamber environment", Journal of Aerosol Science, 2021 Publicación	<1 %
125	cdn.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
126	dspace.uclv.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
127	repositorio.unicamp.br Fuente de Internet	<1 %

128	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
129	B.K. Sahoo, B.K. Sapra. "Advances in Measurement of Indoor ^{222}Rn and ^{220}Rn Gas Concentrations Using Solid State Nuclear Track Detectors", Solid State Phenomena, 2015 Publicación	<1 %
130	Submitted to University of Portsmouth Trabajo del estudiante	<1 %
131	istas.net Fuente de Internet	<1 %
132	metroradon.eu Fuente de Internet	<1 %
133	Submitted to Colegio Peruano Britanico Trabajo del estudiante	<1 %
134	Iyer, R.. "Four decades of nuclear tracks research in India", Radiation Measurements, 200306 Publicación	<1 %
135	docplayer.biz.tr Fuente de Internet	<1 %
136	ojs.diffundit.com Fuente de Internet	<1 %
137	portal.if.usp.br	

Fuente de Internet

<1 %

138 pubs.usgs.gov
Fuente de Internet

<1 %

139 www.davidpublisher.com
Fuente de Internet

<1 %

140 www.dora.lib4ri.ch
Fuente de Internet

<1 %

141 azdoc.tips
Fuente de Internet

<1 %

142 etd.uwc.ac.za
Fuente de Internet

<1 %

143 www.parliament.vic.gov.au
Fuente de Internet

<1 %

144 [Environmental Radon, 1987.](#)
Publicación

<1 %

145 Longxiang Li, Brent A. Coull, Petros Koutrakis.
"A national comparison between the
collocated short- and long-term radon
measurements in the United States", *Journal
of Exposure Science & Environmental
Epidemiology*, 2023
Publicación

<1 %

146 Patricia MacQueen, Francisco Delgado, Kevin
Reath, Matthew E. Pritchard et al. "Volcano -

<1 %

Tectonic Interactions at Sabancaya Volcano, Peru: Eruptions, Magmatic Inflation, Moderate Earthquakes, and Fault Creep", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020

Publicación

147	docs.wixstatic.com Fuente de Internet	<1 %
148	ecotec.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
149	volum-i.uab.cat Fuente de Internet	<1 %
150	www.bib.irb.hr Fuente de Internet	<1 %
151	www.scipedia.com Fuente de Internet	<1 %
152	www.springerprofessional.de Fuente de Internet	<1 %
153	Submitted to Cardiff University Trabajo del estudiante	<1 %
154	Submitted to National University of Ireland, Galway Trabajo del estudiante	<1 %
155	Sixue Dong, Fuquan Zhang, Nicki Schlegel, Weiwei Wang, Jiayao Sun, Yinxiangzi Sheng, Xiaobin Xia. "The influence of beam optics asymmetric distribution on dose in scanning	<1 %

carbon - ion radiotherapy", Journal of Applied
Clinical Medical Physics, 2022

Publicación

156	Submitted to University of Surrey Trabajo del estudiante	<1 %
157	docplayer.com.br Fuente de Internet	<1 %
158	dspace.ipen.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
159	iea.blob.core.windows.net Fuente de Internet	<1 %
160	N. Antovic, P. Vukotic, R. Zekic, R. Svrkota, R. Ilic. "Indoor radon concentrations in urban settlements on the Montenegrin Coast", Radiation Measurements, 2007 Publicación	<1 %
161	aprenderly.com Fuente de Internet	<1 %
162	encyclopedia.nm.org Fuente de Internet	<1 %
163	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
164	grupoecopetrol.blogspot.com Fuente de Internet	<1 %
165	ingenieriacivil.cedex.es Fuente de Internet	<1 %

<1 %

166 lookformedical.com
Fuente de Internet

<1 %

167 patents.google.com
Fuente de Internet

<1 %

168 teses.usp.br
Fuente de Internet

<1 %

169 wiki.seg.org
Fuente de Internet

<1 %

170 "Monte-Carlo Modelling and Experimental
Study of Radon and Progeny Radiation
Detectors for Open Environment", Progress in
Clean Energy Volume 1, 2015.
Publicación

<1 %

171 Submitted to King Saud University
Trabajo del estudiante

<1 %

172 M.H. Banrón, J. Elío, Q.G. Crowley. "Using
geogenic radon potential to assess radon
priority area designation, a case study around
Castleisland, Co. Kerry, Ireland", Journal of
Environmental Radioactivity, 2022
Publicación

<1 %

173 agenda.pucp.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

174	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
175	publications.jrc.ec.europa.eu Fuente de Internet	<1 %
176	revistadefisicamedica.es Fuente de Internet	<1 %
177	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
178	www.comunidad.madrid Fuente de Internet	<1 %
179	www.thefreelibrary.com Fuente de Internet	<1 %
180	files.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
181	healthinfo.uclahealth.org Fuente de Internet	<1 %
182	research.rug.nl Fuente de Internet	<1 %
183	www.osti.gov Fuente de Internet	<1 %
184	buleria.unileon.es Fuente de Internet	<1 %
185	cict.umcc.cu Fuente de Internet	<1 %

186	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
187	podcasts.google.com Fuente de Internet	<1 %
188	repositorio.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
189	sites.google.com Fuente de Internet	<1 %
190	www.cigna.com Fuente de Internet	<1 %
191	www.egusphere.net Fuente de Internet	<1 %
192	www.greenheck.com Fuente de Internet	<1 %
193	www.jourlib.org Fuente de Internet	<1 %
194	www.observatoriosalud.org.ar Fuente de Internet	<1 %
195	FERVANI INGENIERIA Y MEDIO AMBIENTE S.A.C. FERVANI S.A.C.. "Plan de Adecuación Ambiental para la Modificación de Ubicación de la Planta de Inyección de Agua de Producción en el Ex Lote VII-IGA0004736", R.D. N° 213-2016-MEM/DGAAE, 2021 Publicación	<1 %

196 Hiroshige Matsuoka, Shigehisa Fukui, Takahisa Kato. "Nanomeniscus Forces in Undersaturated Vapors: Observable Limit of Macroscopic Characteristics", Langmuir, 2002
Publicación <1 %

197 Kayla A. Lippincott, Emily A. Rosengarten, Arijit Sengupta, Dean J. Campbell. "Using Polymers and Pigments to Produce Laser Interference Rings", Journal of Chemical Education, 2019
Publicación <1 %

198 Liuba Coretchi, Antoaneta Ene, Serghei Virlan, Mariana Gincu, Aurelia Ababii, Angela Capatina, Alla Overcenco, Valentin Sargu. "Children's Exposure to Radon in Schools and Kindergartens in the Republic of Moldova", Atmosphere, 2022
Publicación <1 %

199 P. Murphy, A. Dowdall, S. Long, B. Curtin, D. Fenton. "Estimating population lung cancer risk from radon using a resource efficient stratified population weighted sample survey protocol – Lessons and results from Ireland", Journal of Environmental Radioactivity, 2021
Publicación <1 %

200 Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador
Trabajo del estudiante <1 %

201	Submitted to University of East London Trabajo del estudiante	<1 %
202	Submitted to University of Johannesburg Trabajo del estudiante	<1 %
203	Submitted to University of Nottingham Trabajo del estudiante	<1 %
204	nepis.epa.gov Fuente de Internet	<1 %
205	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
206	www.hud.gov Fuente de Internet	<1 %
207	"Documented optimum and threshold for ionising radiation", International Journal of Nuclear Law, 2007 Publicación	<1 %
208	"Ecological and Health Effects of Building Materials", Springer Science and Business Media LLC, 2022 Publicación	<1 %
209	Mukhtar A. Rana, Arnaldo L. Lixandrão Filho, Sandro Guedes. "A new phenomenological model for annealing of fission tracks in apatite: laboratory data fitting and geological benchmarking", Physics and Chemistry of Minerals, 2021	<1 %

210	Submitted to Universidad Industrial de Santander UIS Trabajo del estudiante	<1 %
211	Submitted to Universidad de La Laguna Trabajo del estudiante	<1 %
212	Yupeng Yao, Weihai Zhuo, Chao Zhao, Zhiling Li, Ziqi Qiang, Shiyan Yang, Bo Chen. "Comparison of morphological characteristics for alpha tracks in CR-39 using different radon monitors", Radiation Measurements, 2023 Publicación	<1 %
213	archbronconeumol.org Fuente de Internet	<1 %
214	igfae.usc.es Fuente de Internet	<1 %
215	repositorioinstitucional.uson.mx Fuente de Internet	<1 %
216	vdocuments.mx Fuente de Internet	<1 %
217	www.ciudadrodrigo.net Fuente de Internet	<1 %
218	www.eckardt.fr Fuente de Internet	<1 %
219	www.fao.org Fuente de Internet	<1 %

<1 %

220

www.science.gov

Fuente de Internet

<1 %

221

"Summaries", World's Poultry Science Journal, 2021

Publicación

<1 %

222

1library.co

Fuente de Internet

<1 %

223

Ankita Mazumder, Zinnia Chowdhury, Dwaipayan Sen, Chiranjib Bhattacharjee.

"Electric field assisted membrane separation for oily wastewater with a novel and cost-effective electrocoagulation and electroflotation enhanced membrane module (ECEFMM)", Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2020

Publicación

<1 %

224

Submitted to Universidad Peruana Cayetano Heredia

Trabajo del estudiante

<1 %

225

ddd.uab.cat

Fuente de Internet

<1 %

226

dokumen.tips

Fuente de Internet

<1 %

227

minerva.usc.es

Fuente de Internet

<1 %

228 nivanatur.com
Fuente de Internet

<1 %

229 usermanual.wiki
Fuente de Internet

<1 %

230 www.conacyt.gob.sv
Fuente de Internet

<1 %

231 "Valorización de sistemas mineralizados en etapas tempranas de exploración: Aplicación en distrito minero Til Til", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022
Publicación

<1 %

232 CESEL S A. "ITS para la Modificación de Componentes Auxiliares de la Planta de Cal Katawi Rumi-IGA0008840", R.D. N° 174-2017-PRODUCE/DVMYPE-I/DGAAMI, 2020
Publicación

<1 %

233 ELISA ADELL SALES. "Material particulado y bioaerosoles en el aire de granjas de aves y conejos: cuantificación, caracterización y medidas de reducción", Universitat Politècnica de Valencia, 2014
Publicación

<1 %

234 Jornet i Sala, Núria. "Detectores de semiconductor : calibración y aplicaciones a la

<1 %

dosimetría in vivo en pacientes sometidos a
tratamientos con radioterapia externa /",
Bellaterra : Universitat Autònoma de
Barcelona,, 2004

Fuente de Internet

235 Submitted to Universidad de Las Palmas de Gran Canaria <1 %
Trabajo del estudiante

236 cgi.seriasa.se.test.levonline.com <1 %
Fuente de Internet

237 davixu.iespana.es <1 %
Fuente de Internet

238 docplayer.net <1 %
Fuente de Internet

239 es.unionpedia.org <1 %
Fuente de Internet

240 ges.rgo.ru <1 %
Fuente de Internet

241 oem.bmj.com <1 %
Fuente de Internet

242 pubmed.ncbi.nlm.nih.gov <1 %
Fuente de Internet

243 repositorio.conicyt.cl <1 %
Fuente de Internet

244 repositorio.uam.es
Fuente de Internet

<1 %

245 repositorio.uladech.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

246 ruc.udc.es
Fuente de Internet

<1 %

247 samafind.sama.gov.sa
Fuente de Internet

<1 %

248 svmh.com
Fuente de Internet

<1 %

249 www.asesor.com.pe
Fuente de Internet

<1 %

250 www.caloryfrio.com
Fuente de Internet

<1 %

251 www.diariodeavisos.com
Fuente de Internet

<1 %

252 www.limaeste.gob.pe
Fuente de Internet

<1 %

253 www.lpi.usra.edu
Fuente de Internet

<1 %

254 www.pharmaceutical-care.es
Fuente de Internet

<1 %

255 www.produccioncientificaluz.org
Fuente de Internet

<1 %

256

www.turismo.zonalitoral.com

Fuente de Internet

<1 %

257

Bernardo Antonio Oliver Borrachero. "Estudio de la utilización de fibras naturales en materiales compuestos laminados para fabricación de componentes de automoción", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

<1 %

258

Eappen, K.P.. "Estimation of radon progeny equilibrium factors and their uncertainty bounds using solid state nuclear track detectors", Radiation Measurements, 200603

Publicación

<1 %

259

FERVANI INGENIERIA Y MEDIO AMBIENTE S.A.C. FERVANI S.A.C.. "ITS del Proyecto de Modificación de la Ubicación de Cuarenta y Cuatro (44) Pozos de Desarrollo y Líneas de Conducción en el Lote VII/VI-IGA0005173", R.D. N° 063-2018-SENACE-JEF/DEAR, 2020

Publicación

<1 %

260

GARCIA CERNA ROBERTO PIERO. "ITS para el Proyecto de Modificación y Ampliación de la Estación de Servicios Existente de Venta al Público de GLP para Uso Automotor (Gasocentro)-IGA0020526", R.D. N° 282-2016-MEM/DGAAE, 2022

Publicación

<1 %

261 J & E CONSULTORES GENERALES S.R.L.. "EIA-SD del Proyecto Instalación de la Línea de Transmisión en 60 kV Pongo de Caynarachi - Yurimaguas y Subestaciones-IGA0002612", R.D. N° 196-2017-MEM/DGAAE, 2020
Publicación

262 NAKAMURA CONSULTORES SAC - NAKCSAC. "Segunda Actualización del Plan de Manejo Ambiental del DAP del Predio Callao-IGA0016805", R.D. N° 00125-2022-PRODUCE/DGAAMI , 2022
Publicación

263 P. Pereyra, M. E. López Herrera, D. Palacios, T. Viloría, E. Vadillo, B. Pérez, L. Sajo-Bohus. "Nuclear track detector response to energetic heavy ions: study case", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020
Publicación

264 Román Belda Ortega. "Mejora del streaming de vídeo en DASH con codificación de bitrate variable mediante el algoritmo Look Ahead y mecanismos de coordinación para la reproducción, y propuesta de nuevas métricas para la evaluación de la QoE", Universitat Politecnica de Valencia, 2021
Publicación

265 Submitted to Universidad de las Islas Baleares
Trabajo del estudiante

266	<p>VINEMI CONSTRUCTORES GENERALES EIRL. "ITS para el Proyecto Modificación y Ampliación de Estación de Servicios de Combustibles Líquidos y GNV para la Venta de GLP de Uso Automotor de la Empresa Red Internacional de Combustible y Servicio Automotriz-IGA0015379", R.D. N° 148-2017-MEM/DGAAE, 2021</p>	<1 %
Publicación		
267	<p>Violeta Hansen, Dorthe Petersen, Jens Søgaard-Hansen, Frank Farsø Rigét et al. "Indoor radon survey in Greenland and dose assessment", Journal of Environmental Radioactivity, 2023</p>	<1 %
Publicación		
268	<p>aip.scitation.org</p>	<1 %
Fuente de Internet		
269	<p>cip.brapci.inf.br</p>	<1 %
Fuente de Internet		
270	<p>convencion.uclv.cu</p>	<1 %
Fuente de Internet		
271	<p>edisciplinas.usp.br</p>	<1 %
Fuente de Internet		
272	<p>eeea.ca</p>	<1 %
Fuente de Internet		
273	<p>ir.amu.ac.in</p>	<1 %
Fuente de Internet		

<1 %

274 members.fortunecity.es
Fuente de Internet

<1 %

275 moam.info
Fuente de Internet

<1 %

276 pesquisa.bvsalud.org
Fuente de Internet

<1 %

277 physics.nist.gov
Fuente de Internet

<1 %

278 repositorio.ucv.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

279 repositorio.uni.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

280 researchonline.lshtm.ac.uk
Fuente de Internet

<1 %

281 riaa.uaem.mx:8080
Fuente de Internet

<1 %

282 sedici.unlp.edu.ar
Fuente de Internet

<1 %

283 tbtims.wto.org
Fuente de Internet

<1 %

284 vri.unmsm.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

285	www.acienciasgalilei.com Fuente de Internet	<1 %
286	www.alice.cnptia.embrapa.br Fuente de Internet	<1 %
287	www.cinvestav.mx Fuente de Internet	<1 %
288	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1 %
289	www.dehisi.org Fuente de Internet	<1 %
290	www.gacetasanitaria.org Fuente de Internet	<1 %
291	www.ivic.ve Fuente de Internet	<1 %
292	www.losverdesdeandalucia.org Fuente de Internet	<1 %
293	www.mtas.es Fuente de Internet	<1 %
294	www.munlima.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
295	www.paot.org.mx Fuente de Internet	<1 %
296	www.radiation-dosimetry.org Fuente de Internet	<1 %

297	www.radioprotection.org Fuente de Internet	<1 %
298	www.rietschle.co.uk Fuente de Internet	<1 %
299	www.scientific.net Fuente de Internet	<1 %
300	www.sociedadgeologica.es Fuente de Internet	<1 %
301	www.vtechphones.com Fuente de Internet	<1 %
302	"Creación de defectos ópticos poco profundos en sólidos por implantación de iones", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2020 Publicación	<1 %
303	"Dispersión del MP10 en Temuco : construcción del escenario base y análisis del cumplimiento de la normativa ambiental", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012 Publicación	<1 %
304	F. Paquet, M.R. Bailey, R.W. Leggett, J. Lipsztein et al. "ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3", Annals of the ICRP, 2018 Publicación	<1 %
305	FIDEL SALAS VICENTE. "Investigación y modelización de la adherencia, el desgaste y	<1 %

la fenomenología de daño asociada a la rodadura en contactos rueda-carril de aceros al carbono y bainíticos.", Universitat Politecnica de Valencia, 2015

Publicación

306

García, . "Reservoir siltation", Dam Maintenance and Rehabilitation II, 2010.

Publicación

<1 %

307

ISABELLE YVONNE JOSÉPHINE GERARDY. "Evaluation d'un système de planification pour un traitement de brachythérapie gynécologique en utilisant des techniques Monte Carlo et des mesures expérimentales", Universitat Politecnica de Valencia, 2011

Publicación

<1 %

308

József Pálfalvi, László Sajó-Bohus. "Cosmic Radiation Detection by Solid State Nuclear Track Detector Technique", Solid State Phenomena, 2015

Publicación

<1 %

309

Koyang François, Awe Richard, Bineng Guillaume Samuel, Ndimantchi Ayoba et al. "Assessment of Natural Radiation Exposure Due to ^{222}Rn and External Radiation Sources: Case of the Far North, Cameroon", Health Physics, 2022

Publicación

<1 %

310 R Mishra, M Joshi, O Meisenberg, S Gierl, R Prajith, S D Kanse, R Rout, B K Sapra, Y S Mayya, J Tschiersch. "Deposition and spatial variation of thoron decay products in a thoron experimental house using the Direct Thoron Progeny Sensors", Journal of Radiological Protection, 2017
Publicación

311 Shaymaa Awad Kadhim, Allawi Hamead Harjan, Shatha F. Alhous, Qassim Shamkhi AL-Khafaji. "Study of the difference between uranium concentrations in blood samples of healthy, newly infected and women who took chemotherapy in Iraq, Najaf", AIP Publishing, 2022
Publicación

312 carpena.ifas.ufl.edu
Fuente de Internet

313 coek.info
Fuente de Internet

314 eprints.lincoln.ac.uk
Fuente de Internet

315 files.pucp.education
Fuente de Internet

316 fr.slideshare.net
Fuente de Internet

317	funcai.org Fuente de Internet	<1 %
318	ins.astursalud.es Fuente de Internet	<1 %
319	isaiascomentario.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
320	nardus.mpn.gov.rs Fuente de Internet	<1 %
321	pdfslide.tips Fuente de Internet	<1 %
322	remon.jrc.ec.europa.eu Fuente de Internet	<1 %
323	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
324	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
325	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
326	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
327	repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet	<1 %
328	repository.usta.edu.co Fuente de Internet	<1 %

329	revistabionatura.com Fuente de Internet	<1 %
330	scirp.org Fuente de Internet	<1 %
331	slideplayer.com Fuente de Internet	<1 %
332	tentulogo.com Fuente de Internet	<1 %
333	www.apecyl.com Fuente de Internet	<1 %
334	www.bellezaintegral.com Fuente de Internet	<1 %
335	www.casadelest.org Fuente de Internet	<1 %
336	www.eafit.edu.co Fuente de Internet	<1 %
337	www.jornada.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
338	www.kemiko.com.mx Fuente de Internet	<1 %
339	www.laopinion.com Fuente de Internet	<1 %
340	www.mappinginteractivo.com Fuente de Internet	<1 %

341	www.mineria.gov.ar Fuente de Internet	<1 %
342	www.refertil.info Fuente de Internet	<1 %
343	www.scielo.br Fuente de Internet	<1 %
344	www.scielo.org.co Fuente de Internet	<1 %
345	www.tdx.cat Fuente de Internet	<1 %
346	www.todoingenieria.com Fuente de Internet	<1 %
347	www11.urbe.edu Fuente de Internet	<1 %
348	CASTROMONTE LUNA RODOLFO SULPICIO. "PIGARS de la Provincia de Lima 2014- IGA0004062", Ordenanza N° 1803, 2021 Publicación	<1 %
349	Frank Florez Montes. "Análisis dinámico del confort en edificios con estrategias de control adaptativo en modos deslizantes", Universitat Politecnica de Valencia, 2020 Publicación	<1 %
350	futur.upc.edu Fuente de Internet	<1 %

351 Boris John Vasquez-Reyes, Fiorela Judith Bravo-Martinez, Jose Antonio Coral-Morante, Franklin Cordova-Buiza. "Inbound marketing strategy on social media and the generation of experiences in fast food consumers", *Innovative Marketing*, 2023
Publicación <1 %

352 Marco Galvez - Nino, Rossana Ruiz, Katia Roque, Ofelia Coanqui, Natalia Valdivieso, Mivael Olivera, Apar Kishor Ganti, Luis Mas. "Real - world outcomes of therapy in advanced non-small cell lung cancer mutated in Peru ", *Thoracic Cancer*, 2022
Publicación <1 %

353 [doku.pub](#)
Fuente de Internet <1 %

354 [vsip.info](#)
Fuente de Internet <1 %

355 [www.scielo.org.mx](#)
Fuente de Internet <1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado