

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE GRADUADOS



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

Mapeo de Radón 222 en interiores en el Distrito de Los Olivos (Lima - Perú) del 2015 al 2016.

Tesis para Optar el Grado Académico de
MAGISTER EN FÍSICA

AUTOR:

Stwartk Alain Torres Burga

ASESOR:

Dra. María Elena López Herrera

JURADO:

Dr. Eduardo Ruben Massoni Kamimoto

Mg. Sc. Patrizia Edel Pereyra Anaya



Resumen

El Radón 222 gas radiactivo, emisor de partículas alfas, que proviene de la cadena de desintegración del Uranio 238; emana desde el subsuelo de forma natural hacia el medio ambiente y se concentra en mayor cantidad en ambientes cerrados, como por ejemplo habitaciones con poca ventilación. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el gas Radón 222 es el segundo causante de muerte por cáncer de pulmón. Actualmente, muchos gobiernos y organismos internacionales han recomendado que las exposiciones al gas Radón en las casas sean conocidas y mitigadas en los casos necesarios. Sin embargo, en nuestro país no existe un marco legal oficial basada en estudios locales para interiores, requisito fijado por la Organización Internacional de Energía Atómica (IAEA). Se sabe que los niveles de Radón en viviendas varían ampliamente de un área a otra de acuerdo a la geología del lugar, e incluso para un solo tipo de suelo; los niveles de Radón varían dependiendo de las características de la casa y de los hábitos de vida de los ocupantes, así también por condiciones de ventilación, uso de aerosoles que incrementa los efectos sobre la salud de sus habitantes. Para identificar y medir Radón en diferentes viviendas, fue necesario realizar mediciones de las concentraciones de este gas usando detectores de trazas nucleares (LR 115 tipo 2, en modo desnudo) con el objetivo de hacer un mapeo en el distrito. Se realizaron muestreos en 5 periodos, comprendidos desde Octubre del 2015 hasta Enero del 2017, obteniendo así las concentraciones de Radón en el distrito de Los Olivos en el rango de $69,35 \text{ Bq/m}^3$ a $364,08 \text{ Bq/m}^3$. La data obtenida cumple con la Log normalidad por cada periodo de medición lo cual es característica en este tipo de investigaciones. Este trabajo forma parte del proyecto 120-PNICP-PIAP-2015 "Desarrollo de un sistema de monitoreo de Radón 222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima - Perú", el cual abarca un monitoreo a gran escala en la ciudad de Lima, para establecer un precedente y conocer los niveles a los cuales se encuentra expuesta la población.

Agradecimientos

Le doy gracias a mis padres Fernando y Nelly por su constante apoyo y por brindarme una educación de calidad a lo largo de mi vida.

A mi hermano Zinedine por ser mi motivo de superación cada día y por los grandes momentos compartidos.

A mi novia por ser mi consejera y su apoyo incondicional a en estos dos años de estudio.

A mi gran amigo Nerón que ahora se encuentra lejos de mi, por las alegrías que me brindaste.

A mi asesora Dra. María Elena López Herrera por sus consejos y motivación durante la maestría que me han ayudado a ser mejor profesional.

A mi profesora Mg. Sc. Patrizia Pereyra Anaya quién me permitió participar de esta investigación.

A todas las personas que me permitieron acceder a su hogar y ser parte de este trabajo de investigación.

A CienciActiva - CONCYTEC por la oportunidad brindada.

Índice

1. Introducción.	1
1.1. Radiactividad natural.	1
1.2. Decaimiento alfa (α).	2
1.3. Ecuaciones de Bateman.	4
1.4. Unidades, definiciones.	5
2. Presencia del Radón 222 en el aire.	6
2.1. Procedencia del Radón 222.	6
2.2. Propiedades del Radón 222.	7
2.3. Descendientes del Radón 222.	8
2.4. Transporte del Radón 222 desde el subsuelo.	10
2.5. Efectos del Radón 222 sobre la salud.	12
2.6. Radón 222 en interiores.	13
3. Detectores de huellas nucleares de estado sólido.	15
3.1. Detector LR 115 tipo 2.	15
3.1.1. Características del LR 115 Tipo 2.	16
3.2. Mecanismos de formación de una huella.	17
3.2.1. Geometría de la traza generada por incidencia normal y a V_T constante.	18
3.2.2. Geometría de la traza generada por incidencia oblicua y V_T constante.	19
4. Mapeos de Radón 222.	22
4.1. Mapeo de Radón en Austria.	24
4.2. Mapeo de Radón en Bélgica.	25
4.3. Mapeo de Radón en República Checa.	25
4.4. Mapeo de Radón en Dinamarca.	26
4.5. Mapeo de Radón en Finlandia.	26
4.6. Mapeo de Radón en Alemania.	26
4.7. Mapeo de Radón en Grecia.	27
4.8. Mapeo de Radón en Irlanda.	27
4.9. Mapeo de Radón en Italia.	27
4.10. Mapeo de Radón en Países Bajos.	27
4.11. Mapeo de Radón en Portugal.	28
4.12. Mapeo de Radón en Eslovenia.	28
4.13. Mapeo de Radón en España.	28
5. El comportamiento Log normal de las concentraciones de Radón 222.	29
6. Metodología aplicada en el presente trabajo.	30
6.1. Identificación de la zona de estudio.	30
6.2. Método de muestreo utilizado.	33
6.3. Ubicación y recolección de detectores.	35
6.4. Baño químico.	37
6.5. Lectura de detectores.	39

7. Resultados.	41
7.1. Primer periodo.	41
7.2. Segundo periodo.	45
7.3. Tercer periodo.	50
7.4. Cuarto periodo.	57
7.5. Quinto periodo.	62
7.6. Mapeo de Radón 222 para el distrito de Los Olivos (2015 - 2016). . .	67
8. Conclusiones.	75
A. ANEXO I: Ubicación GPS de los lugares de medición en el distrito de Los Olivos, Lima - Perú.	81
B. ANEXO II: Características del lugar de monitoreo.	84



Índice de figuras

1.	Transmisión de una partícula cuántica a través de la barrera de potencial de forma arbitraria [1]	2
2.	Efecto túnel en una barrera de potencial rectangular [1]	3
3.	Porcentajes de las abundancias relativas de los tres isótopos naturales del Uranio, elaborada para este trabajo.	6
4.	Propiedades químicas del Radón 222 [2]	7
5.	El Radón 222 contenido en un volumen de aire cerrado y sus descendientes con crecimiento en el tiempo [3] [4]	8
6.	Procesos básicos que influyen en el balance de la actividad del Radón e hijas cerca de paredes [4].	9
7.	Variación de las concentraciones de las hijas del Radón 222 con la distancia a la pared en detectores LR 115 tipo 2[4].	9
8.	El radón se puede mover a través de grietas en las rocas y a través de los espacios de poros en suelos [5].	10
9.	Lima entre las capitales más contaminadas de América Latina por particulados en el aire [6].	12
10.	Formación de huellas en LR 115 Tipo 2, en rangos de energía y luego de un baño químico [7].	16
11.	Parámetros utilizados para describir la geometría de las trazas generadas por el baño químico: R, longitud total de la traza latente; L, la longitud de la traza atacada por el baño químico; L_e , longitud de la traza grabada (cono de grabado); h, espesor de la superficie removida por el baño químico; d, diámetro del cono de grabado. Por simplicidad, se ha representado una huella vertical. El caso más general, donde la huella hace un ángulo θ con la superficie. En el caso de la huella inclinada, el diámetro de la abertura se sustituye por los ejes mayores y menores, D y d, de la abertura elíptica. El cono grabado a continuación subtiende una longitud proyectada S sobre la superficie del detector [8].	17
12.	Geometría del desarrollo de la traza. El ángulo de incidencia es normal con respecto a la superficie del detector, y V_T es constante [9].	18
13.	Construcción para el cálculo del eje mayor de la abertura de una traza elíptica y parámetros relacionados de la traza grabada [8]	19
14.	Construcción para el cálculo del eje menor, d, para la abertura de una traza grabada elíptica situada en el plano del papel (denominada "nueva superficie") [8].	20
15.	Mapa de la zonificación del distrito de Los Olivos [10]	31
16.	Mapa de suelos en el distrito de Los Olivos [11]	32
17.	Mapa del distrito de Los Olivos con una grilla de $1km \times 1km$ y con los correspondientes lugares de medición marcados con puntos amarillos	34
18.	Folleto explicativo para el uso del detector de Radón 222 proporcionado por el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU-PUCP).	35
19.	Ficha de ubicación del detector de Radón 222 proporcionado por el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU-PUCP).	36

20.	Portaobjetos con capacidad para 5 detectores LR 115	37
21.	Sistema para el grabado de detectores LR 115.	38
22.	Captura de pantalla del software utilizado para el conteo de las trazas dejadas por las partículas alfas del Radón 222	39
23.	Gráfico de barras para el primer periodo de medición	42
24.	Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el primer periodo de medición	43
25.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al primer periodo de medición	43
26.	Gráfico de barras para el segundo periodo de medición	48
27.	Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el segundo periodo de medición	48
28.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al segundo periodo de medición	49
29.	Gráfico de barras para el tercer periodo de medición	54
30.	Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el tercer periodo de medición	55
31.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al tercer periodo de medición	55
32.	Gráfico de barras para el cuarto periodo de medición	60
33.	Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el cuarto periodo de medición	60
34.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al cuarto periodo de medición	61
35.	Gráfico de barras para el quinto periodo de medición	65
36.	Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el quinto periodo de medición	65
37.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al quinto periodo de medición	66
38.	Gráfico de barras de los promedios de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos.	70
39.	Histograma de los promedios de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos	71
40.	Histograma del logaritmo natural de las concentraciones anuales	72
41.	Relación entre el factor de ventilación de cada vivienda con las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3)	73
42.	Mapa de Radón 222 del distrito de Los Olivos durante el 2015 al 2016.	74

Índice de tablas

1.	Propiedades físicas y químicas del Radón 222 [12] [13].	7
2.	Propiedades de los descendientes del Radón 222. [14] [13].	8
3.	La tabla muestra el porcentaje de muertes por cáncer de pulmón ocasionadas por radón en interiores en personas no fumadoras, fumadoras y público en general [15].	13
4.	Concentraciones de Radón en interiores en países de la OCDE (n.d. no disponible). Fuentes: WHO (2007), UNSCEAR (2000), Billon et al. (2005) y Monzler et al. (2008).	14
5.	Se aplica sólo en trazas para las cuales el cono de grabado se proyecta desde debajo de la abertura de la traza cuando se ve desde arriba. El tiempo t_0 se refiere al momento en que el grabador alcanza el final de la trayectoria de daño latente [8].	21
6.	Las organizaciones que llevaron a cabo programas nacionales de mapeo del Radón [16]	23
7.	Metodologías de mapeo del Radón utilizadas en los programas de cartografía [16]	24
8.	Características del primer periodo de muestreo.	41
9.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el primer periodo de muestreo.	42
10.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el primer periodo de muestreo.	42
11.	Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al primer periodo de medición.	43
12.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.	44
13.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.	44
14.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.	44
15.	Características del segundo periodo de muestreo.	45
16.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el segundo periodo de medición (N.D.es un detector no entregado, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	46
17.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el segundo periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	47
18.	Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al segundo periodo de medición.	49
19.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.	49
20.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.	50

21.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.	50
22.	Características del tercer periodo de muestreo.	50
23.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas (<i>Trazas/mm²</i>) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	51
24.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas (<i>Trazas/mm²</i>) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	52
25.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	53
26.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	54
27.	Momentos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) correspondiente al tercer periodo de medición.	55
28.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.	56
29.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.	56
30.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.	56
31.	Características del cuarto periodo de muestreo.	57
32.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas (<i>Trazas/mm²</i>) para el cuarto periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	58
33.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) para el cuarto periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).	59
34.	Momentos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) correspondiente al cuarto periodo de medición.	61
35.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.	61
36.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.	62
37.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.	62
38.	Características del quinto periodo de muestreo.	62
39.	Resultados obtenidos de las densidades de huellas (<i>Trazas/mm²</i>) para el quinto periodo de medición.	63
40.	Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (<i>Bq/m³</i>) para el quinto periodo de medición.	64

41.	Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al quinto periodo de medición.	66
42.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.	66
43.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.	67
44.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.	67
45.	Resultados de los cinco periodos de medición.	68
46.	Resultados de los cinco periodos de medición.	69
47.	Momentos de los promedios de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) en el distrito de Los Olivos.	71
48.	Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 anual.	72
49.	Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 anuales.	72
50.	Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 anuales.	72
51.	Ubicación GPS de los lugares de medición.	81
52.	Ubicación GPS de los lugares de medición.	82
53.	Ubicación GPS de los lugares de medición.	83
54.	Características del lugar de monitoreo	85
55.	Características del lugar de monitoreo.	86
56.	Características del lugar de monitoreo.	87
57.	Características del lugar de monitoreo.	88
58.	Características del lugar de monitoreo.	89
59.	Características del lugar de monitoreo.	90
60.	Características del lugar de monitoreo.	91

1. Introducción.

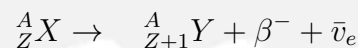
1.1. Radiactividad natural.

La radiactividad natural fue descubierta en 1866 por Henri Becquerel mientras llevaba a cabo estudios de luminiscencia en sales de Uranio, las cuales eran capaces de reproducir siluetas de ciertos objetos opacos colocados sobre unas placas fotográficas, aun cuando éstas se encontraban adecuadamente protegidas por papel negro. Este asombroso descubrimiento marcó el inicio de una nueva área de estudio en la física [17]. De inmediato, otros científicos comenzaron a estudiar este nuevo fenómeno. Marie Curie le dio el nombre de radiactividad a la emisión espontanea de radiación por parte de ciertos elementos inestables. Marie Curie junto a su esposo Pierre Curie fueron quienes descubrieron los elementos radiactivos Radio y Polonio; y en 1903 junto a Henri Becquerel compartieron el premio Nobel de Física [18].

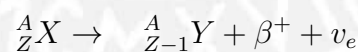
Esta es un fenómeno físico mediante el cual un átomo inestable (llamado padre) decae, emitiendo espontáneamente partículas o radiación electromagnética, en uno o más átomos (llamados hijas). El átomo resultante al cual decae el padre puede continuar siendo inestable, y por lo tanto sigue decayendo hasta alcanzar una configuración electrónica estable.

Si se tiene un átomo padre X, con número atómico Z y número de masa A, el cual decae en un núcleo hijo Y; a través de los siguientes posibles modos de desintegración: alfa, beta -, beta +, captura electrónica, decaimiento gamma y conversión interna [19] [20].

Decaimiento beta negativo (β^-) en este proceso un neutrón se transforma en un protón, un electrón β^- y en un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$). Tal como se indica en la siguiente ecuación [19] [20]:



Decaimiento beta positivo (β^+), en este proceso un neutrón se transforma en un protón, un positrón β^+ y en un neutrino electrónico (ν_e). Tal como se indica en la siguiente ecuación [19] [20]:



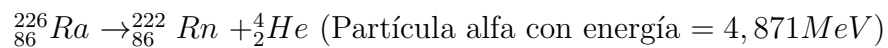
Captura electrónica, proceso mediante el cual un electrón, generalmente de la capa K, es capturado por el núcleo del átomo, para luego combinarse con un protón y así generar un neutrón y un neutrino, los cuales son expulsados del núcleo [19] [20].

Decaimiento gamma (γ), en este proceso el núcleo padre posee un exceso de energía, el cual emite fotones, decayendo así en un núcleo hijo, el cual puede ser estable o puede continuar decayendo [19] [20].

Conversión interna, un núcleo padre cede energía a un electrón, generalmente de la capa K, el cual es expulsado con una energía cinética igual a la energía de excitación, menos la energía de enlace del electrón orbital [19] [20].

1.2. Decaimiento alfa (α).

Los núcleos que poseen 210 o más nucleones son tan grandes, que las fuerzas nucleares de corto alcance que las mantienen unidas y que dependen de su número de masa A , apenas son capaces de controlar la repulsión mutua entre sus protones, proporcional a Z^2 . Tales núcleos inestables (núcleos padres) emiten partículas alfa (núcleos de helio) y se convierten en nuevos núcleos (núcleos hijas) cuyo número atómico disminuye en dos y su número de masa se reduce en cuatro con el objetivo de aumentar su estabilidad mediante la reducción de su tamaño, entonces la emisión alfa se representa como [21]:



Mientras que un núcleo pesado puede, en principio, de forma espontánea reducir su tamaño por la desintegración alfa, sigue existiendo el problema de cómo una partícula alfa realmente escapa del núcleo. Así también, se sabe que la energía de una partícula alfa es menor que la altura de barrera de potencial del núcleo y de acuerdo con la física clásica la partícula alfa debería permanecer atrapada en el interior del núcleo, tal es el caso del Radio 226 cuya barrera de potencial posee una energía de 30 MeV para ser superada, mientras que la energía de la partícula alfa emitida durante el proceso de desintegración radiactiva es aproximadamente de 5 MeV, entonces es de 25 MeV la energía necesaria para el escape de dicha partícula, es decir, clásicamente no puede cruzar la barrera [21].

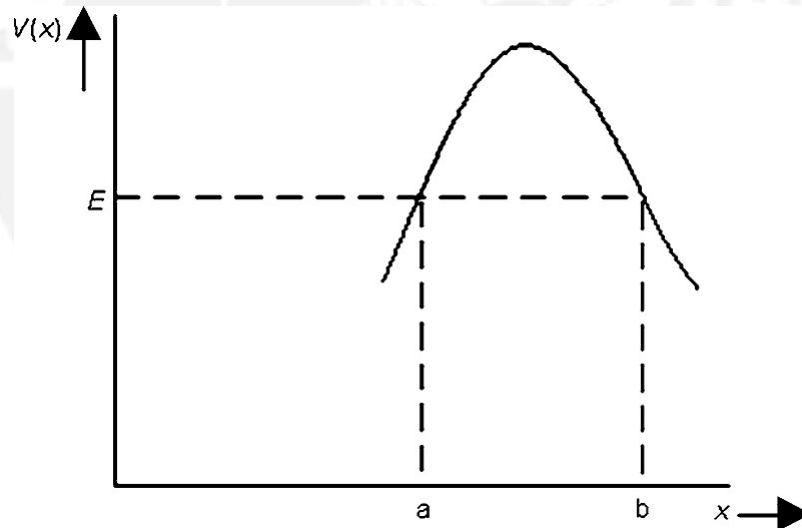


Figura 1: Transmisión de una partícula cuántica a través de la barrera de potencial de forma arbitraria [1]

Esta paradoja fue resuelta por Gamow, Gurney y Condon en 1928 mediante la mecánica cuántica [1] [22]. Debido a las propiedades ondulatorias de la partícula alfa, tiene la probabilidad de fugarse a través de la barrera de potencial. Entonces para poder evaluar la transferencia de esta partícula a través de una barrera de potencial de forma arbitraria, como se muestra en la figura 1, se puede utilizar la aproximación del coeficiente de transmisión de una barrera de potencial rectangular, en la que las

partículas incidentes pueden ser considerados como una onda a lo largo del eje x positivo, como si indica en la figura 2, con una función de onda plana.

La probabilidad que una partícula pase a través de una barrera de potencial es llamada efecto túnel [23], donde la transferencia de la partícula viene dada por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{E}{V_o} \left[1 - \frac{E}{V_o} \right] \exp \left[\frac{-2a}{\hbar} \sqrt{2m(V_o - E)} \right] \quad (1)$$

Donde:

E : Energía de la partícula.

V_o : Altura de la barrera de potencial.

a : amplitud de la barrera de potencial.

\hbar : Constante de Planck reducida.

m : Masa de la partícula.

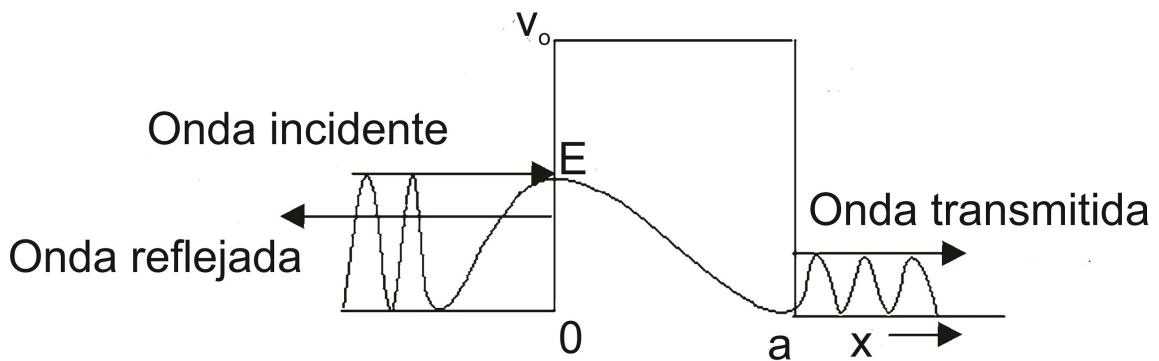


Figura 2: Efecto túnel en una barrera de potencial rectangular [1]

El orden de magnitud de la transferencia de una partícula a través de una barrera de forma arbitraria puede ser calculada mediante la búsqueda de la altura promedio de la barrera y tratándola como una barrera rectangular, como se muestra en la figura 1, [1]. La transferencia dado por la ecuación (1) se puede aproximar a

$$T \simeq \exp \left\{ -2 \int_a^b \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} [V(x) - E]} dx \right\} \quad (2)$$

donde $a = R$ (Radio del núcleo) y b definen los límites de la barrera que ha de ser atravesada. Se supone que cuando una partícula alfa está dentro del núcleo, se comporta como una partícula libre movimiento de ida y vuelta que golpea la barrera, por lo cual [1]:

Probabilidad de fuga de la partícula / segundo = (Tasa de impactos sobre la barrera) \times (El factor de Transferencia)

Mediante la mecánica cuántica, con el efecto túnel, podemos estimar el factor de transferencia con el llamado Factor de Gamow (1928) como la siguiente integral [1] [21] [22].

$$G = 2 \int_a^b \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} [V(r) - E]} dr \quad (3)$$

Donde el límite superior de la barrera se obtiene estableciendo la energía cinética E igual a la energía potencial cuando la partícula abandona la barrera, como se indica en la figura 1 [1], por lo tanto

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{2Ze^2}{b} \quad (4)$$

Y con

$$V(r) = \frac{2Ze^2}{r} \quad (5)$$

Reemplazando (4) y (5) en (3), y evaluando la integral obtenemos la solución para el Factor de transferencia de Gamow

$$G = \frac{4\pi Ze^2}{\hbar v} - \frac{8}{\hbar} \sqrt{mZe^2 R} \quad (6)$$

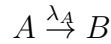
El primer término es mayor que el segundo por el factor $(\frac{\pi}{4})\sqrt{\frac{b}{R}}$ y por lo tanto es el término que predomina. El primer término de (5) se denomina exponente Gamow, entonces el valor aproximado correspondiente para el factor transferencia a través de la barrera de potencial es [1]:

$$T \simeq \exp\left(-\frac{4\pi Ze^2}{\hbar v}\right) = \exp\left[-\frac{4\pi Z}{137\beta}\right] \quad (7)$$

donde se ha utilizado el valor de la constante de estructura fina $\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, y $\beta = \frac{v}{c}$, c es la velocidad de la luz. La ecuación (6) indica que la barrera nuclear será impenetrable si $\frac{4Z}{137\beta} \gg 1$ [1]

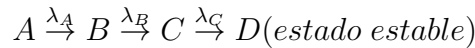
1.3. Ecuaciones de Bateman.

Si analizamos el decaimiento de dos isótopos radiactivos, A y B, donde se forma B a partir de la desintegración de A, veremos en primer lugar la desintegración de A usando la ley fundamental de la radiactividad [1] [24].



$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

Sin embargo, en la mayoría de procesos de desintegración radiactiva no se detienen en la decadencia de una hija, sino continua en una cadena de desintegración, es decir un padre decae en otros nucleidos inestables, llamadas hijas, hasta alcanzar un estado estable.



Suponiendo que las concentraciones iniciales de todas las hijas a excepción del núcleo padre son iguales a cero, entonces se puede generalizar para un material que se somete a varias desintegraciones. Esta generalización se llevó a cabo por primera vez por Bateman en 1910 [25].

La ecuación de Bateman para determinar la concentración del i -ésimo radionucleido es [25]:

$$N_i(t) = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{(i-1)} N_1 \sum_{j=1}^i \frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{k=1, k \neq j} (\lambda_k - \lambda_j)}$$

Donde:

$N_i = 0$ para $i > 1$

λ_i es la constante de decaimiento correspondiente al i -ésimo radionucleido de la cadena de desintegración.

1.4. Unidades, definiciones.

Las unidades estándares para la actividad de una fuente radiactiva son:

Curie (Ci), es la medida de $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo. Originalmente este número representaba la cantidad de desintegraciones observadas en 1 gramo de Radio durante un segundo [19].

Becquerel (Bq), es la unidad del Sistema Internacional (SI) de radiactividad que ha sustituido al Curie [19].

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq$$

Rutherford (R), es la medida de 10^6 desintegraciones por segundo [1].

2. Presencia del Radón 222 en el aire.

2.1. Procedencia del Radón 222.

El Radón es un elemento radiactivo de origen natural que posee tres isótopos naturales producidas por radionucleidos en la corteza terrestre, los cuales están presentes en tres cadenas de desintegración radiactiva [17].

- En la cadena de desintegración del Uranio (U 238), como Radón 222, con un periodo de semidesintegración de 3,8 días, al que se le denomina simplemente Radón [17] [14].
- En la cadena de desintegración del Torio (Th 232), como Radón 220, con un periodo de semidesintegración de 54,5 segundos, al que se le denomina Torón [17] [14].
- En la cadena de semidesintegración del Actinio (U 235), como Radón 219, con un periodo de semidesintegración de 3,92 segundos, al que se le denomina Actinón [17] [14].

El Uranio es un elemento radioactivo presente naturalmente en la corteza terrestre en forma de minerales (mezclas de óxidos y otros) que son las principales fuentes de la radiactividad natural. La radiactividad de los minerales de Uranio y los residuos que se originan son causados por la desintegración de los isótopos radiactivos.

El Uranio tiene tres isótopos naturales: el Uranio 238 (U 238); Uranio 235 (U 235); y el Uranio 234 (U 234); todos los cuales son radiactivos, las abundancias relativas de U 238, U 235 y U 234 son el 99,28 %, 0,71 % y 0,006 %, respectivamente, tal como se describe en la figura 3 (Attendorn y Bowen 1997; Ragnarsdottir y Charlet 2000) [26].

La gran diferencia en la vida media de Radón (3,8 d) y Torón (55 s) es importante para la liberación de estos gases desde el subsuelo y su distribución en la atmósfera libre por encima de la tierra, y por lo tanto en el aire que respiramos [27].

■ U 238 (99,28%) ■ U 235 (0,71%) ■ U 234 (0,006%)



Figura 3: Porcentajes de las abundancias relativas de los tres isótopos naturales del Uranio, elaborada para este trabajo.

2.2. Propiedades del Radón 222.

El Radón 222 es un gas incoloro, insípido, inodoro, y esencialmente inerte a presión y temperatura ambiental estándar, fue descubierto por Fredrich Erns Dorn en 1900 [12]. Pertenece a los gases nobles (grupo 18 de la tabla periódica), es un descendiente de la cadena de desintegración del Uranio 238 cuya vida media de 4,4 millones de años del mismo orden de la edad de la tierra [17], los descendientes de la cadena de desintegración del Uranio 238 se encuentran en estado sólido, a excepción del Radón 222 el cual se encuentra presente en la naturaleza en estado gaseoso, lo cual hace que emane fácilmente del subsuelo hacia el medio ambiente. Sus características y propiedades más importantes se encuentran descritas en la tabla 1 y figura 4.

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas del Radón 222 [12] [13].

Número de masa	222
Número atómico	86
Punto de fusión	-71° C
Punto de ebullición	-61,8° C
Densidad a 20° C	$9,96 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$
Solubilidad en agua a 20° C	$230 \text{ cm}^3/\text{L}$
Vida media	3,825 días
Actividad específica	$1,3 \times 10^{27} \text{ Bq/g}$
Energía de decaimiento	5,49 MeV



Figura 4: Propiedades químicas del Radón 222 [2]

2.3. Descendientes del Radón 222.

Los descendientes del Radón 222 se dividen en dos grupos: Los de corta vida media como el Po - 218, Pb - 214, Bi - 214 y Po - 214, de vidas medias menores a 30 minutos, y los descendientes de vidas largas como el Pb - 210, Bi - 210 y Po - 210, como se muestra en la tabla 2. [17] [27].

Tabla 2: Propiedades de los descendientes del Radón 222. [14] [13].

Isótopo	Tipo de radiación	Energía alfa (MeV)	Vida media
Rn 222	alfa	5,490	3,823 días
Po 218	alfa	6,000	3,094 minutos
Pb 214	beta	6,874	26,8 minutos
Bi 214	beta		19,9 minutos
Po 214	alfa	7,690	164,3 μs
Pb 210	beta		22,23 años
Bi 210	beta		5,012 días
Po 210	alfa	5,407	138,38 días
Pb 206	estable		

Si consideramos un volumen definido de aire que contiene una concentración inicial de Radón 222 libre de descendientes, vemos que la concentración de los descendientes aumenta mientras que el Radón 222 disminuye en el tiempo, este comportamiento se describe en la figura 5, demostrando el comportamiento de su decaimiento.

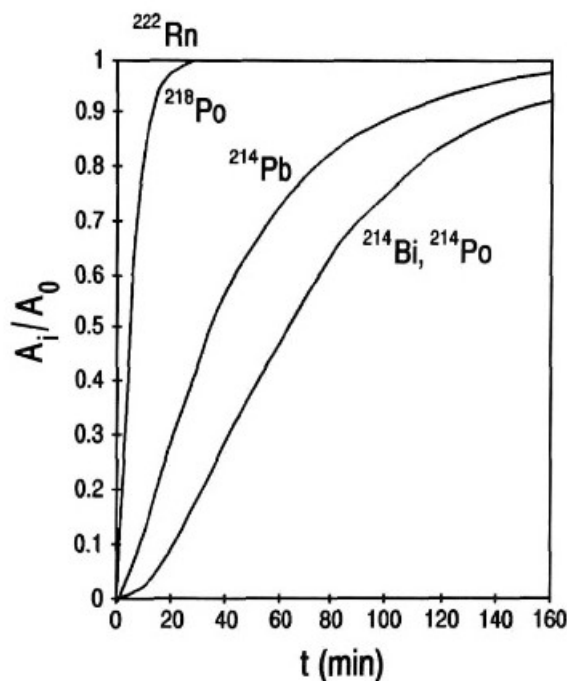


Figura 5: El Radón 222 contenido en un volumen de aire cerrado y sus descendientes con crecimiento en el tiempo [3] [4]

Por lo tanto podemos ver que el Radón 222 e hijas siempre están presentes en el aire. Sin embargo, existen procesos físicos como adhesión a los aerosoles atmosféricos, deposición y retroceso de las hijas del Radón (conocido como efecto plate out), los cuales influyen en las concentraciones de las hijas del Radón 222 cerca de superficies como paredes, tal como se describe en la figura 6 [4]. El aumento de aerosoles en el aire incrementa el número de hijas del Radón adheridas a este particulado.

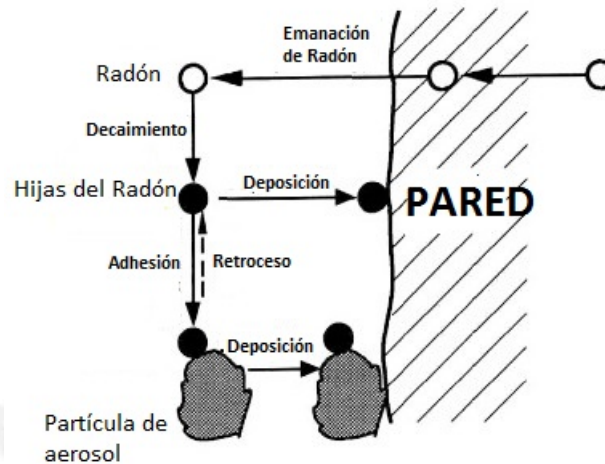


Figura 6: Procesos básicos que influyen en el balance de la actividad del Radón e hijas cerca de paredes [4].

Por lo tanto se produce una disminución de las concentraciones de las hijas del Radón 222 cerca de la pared, es decir cuando las hijas del Radón estén más próximas de una superficie su concentración se verá disminuida, ya que van a estar depositadas sobre la superficie, y esto lo podemos ver en la figura 7.

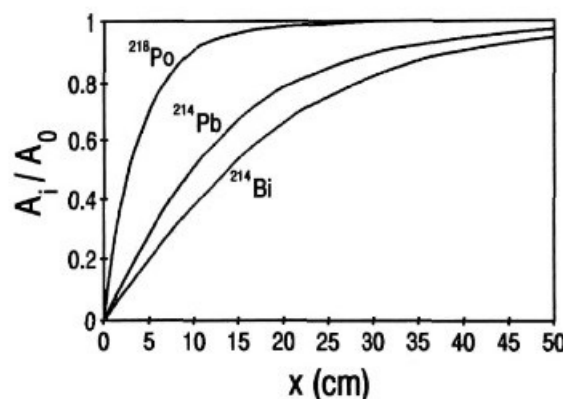


Figura 7: Variación de las concentraciones de las hijas del Radón 222 con la distancia a la pared en detectores LR 115 tipo 2[4].

2.4. Transporte del Radón 222 desde el subsuelo.

El Uranio se encuentra presente desde la formación de la tierra en las rocas y en el suelo, en algunos lugares en mayor concentración que en otros, y como se sabe en su cadena de desintegración radiactiva se encuentran en su mayoría, elementos sólidos a excepción del Radón 222 que es gaseoso. El Radón 222, siendo un gas radiactivo, se emana al exterior cuando el Radio 226 que es su antecesor se desintegra al interior de las rocas, y atraviesa el suelo escapando por las fracturas y aberturas en las rocas y suelos.

La facilidad y eficiencia con que este gas se mueve en el espacio poroso o en fracturas, afectan a la cantidad de Radón 222 que puede ingresar a un ambiente. Si el Radón es capaz de moverse fácilmente en espacios porosos, puede viajar una gran distancia antes de que se desintegre, y es muy probable que se acumule en altas concentraciones dentro de los ambientes, en un edificio por ejemplo[5].

Las contribuciones de fuentes tales como los océanos o las aguas subterráneas y el gas natural son relativamente pequeñas, pero no despreciables [28], comparadas con las que nos proporciona el subsuelo. Por estas razones, las casas construidas en zonas con suelos más secos, altamente permeables y lechos de roca, tales como laderas de las colinas, bocas y fondo de los cañones, depósitos glaciares gruesas, y lechos de roca fracturada o cavernoso, pueden tener altos niveles de Radón en el interior[5].

Hay un gran número de factores que afectan el transporte del Radón 222 en el subsuelo: tipos de roca, presencia de agua, coeficiente de difusión y geometría del poro, así también la permeabilidad del suelo y otros como se muestra en la figura 8.

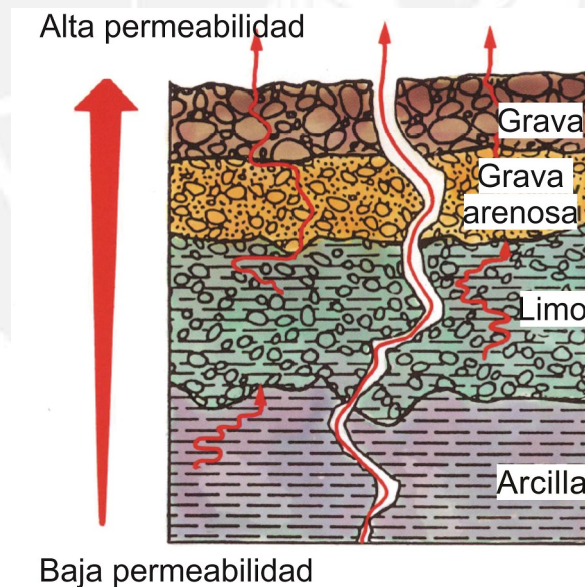


Figura 8: El radón se puede mover a través de grietas en las rocas y a través de los espacios de poros en suelos [5].

Los mecanismos físicos responsables del transporte del Radón 222 del subsuelo al interior de los edificios fue descrito en detalle por Nazaroff (1992) [29]. La diferencia espacial de concentración de Radón que existe entre la superficie y el subsuelo induce un flujo difusivo de Radón hacia la superficie. Así también un flujo de Radón

advectivo puede iniciarse si existe una diferencia de presión de aire espacial en el subsuelo.

El modelo matemático que describe la generación y transporte de radón se basa en la ecuación diferencial parcial para el transporte de Radón en estado estacionario de dos dimensiones en un medio poroso. Esta ecuación puede expresarse como [30]

$$\underbrace{D_e \nabla^2 C}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\frac{k}{\varepsilon \cdot \mu} \vec{\nabla} p \vec{\nabla} C}_{\text{Convección}} + \underbrace{G}_{\text{Generación}} - \underbrace{\lambda C}_{\text{Decaimiento}} = 0$$

Donde:

D_e es el coeficiente efectivo de difusión [m^2/s]

C es la concentración de Radón [Bq/m^3]

k es la permeabilidad del suelo [m^2]

ε es la porosidad suelo

μ es la viscosidad dinámica del gas en el suelo [$Pa \cdot s$]

p es la presión relativa de la fase gaseosa en el suelo [Pa]

λ es la constante de desintegración del Radón [s^{-1}]

G es la tasa de generación de Radón [$Bq/m^3 \cdot s$].

Donde las mayores consideraciones en el modelo son las siguientes [30]:

- Cada elemento es homogéneo (permeabilidad, porosidad y coeficiente de difusión constantes dentro de cada elemento).
- El flujo del gas en el suelo es lineal de acuerdo con la Ley de Darcy, $\vec{v} = -\frac{k}{\varepsilon \mu} \vec{\nabla} p$.
- El gas en el suelo es incompresible, $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$.
- La distribución de la presión es regida por la ecuación de Laplace $\nabla^2 p = 0$

Esta ecuación puede ser resuelta dependiendo de condiciones y particularidades de cada lugar, y teniendo en cuenta parámetros ambientales.

2.5. Efectos del Radón 222 sobre la salud.

El Radón 222 es un gas radiactivo emisor de partículas alfas, y al tratarse de un gas inerte no puede metabolizarse; los mecanismos que explican su toxicidad (Garzón 1992), se basan en que las partículas alfas por él emitidas o por sus hijas, pueden producir ionizaciones en el seno de la materia celular. La energía que posee una partícula alfa de Radón 222 (5,49 MeV) o energías de las alfas de sus descendientes, puede ser depositada en su totalidad sobre una célula generando así la creación de iones, radicales libres, o bien romper moléculas claves, como el ADN [31] ocasionando daño o la destrucción de dicha célula.

Sin embargo, el Radón 222 como fuente de radiación externa al organismo no se considera un serio problema, ya que la epidermis funciona como blindaje para las partículas alfas emitidas durante el proceso de desintegración radiactiva. Por el contrario, cuando esta fuente de partículas alfas penetra en el organismo (generalmente por inhalación), se instala en el interior del tracto respiratorio cuyos tejidos están mucho menos protegidos que los del cuerpo externo, y, por ello, las partículas emitidas podrán alcanzar las células a las que lesionarán o destruirán, pudiendo aparecer, tras un determinado período, llamado latencia, un cáncer en el tracto respiratorio [31].

Es preciso aclarar que el Radón 222, en sí mismo, no presenta un alto riesgo, debido a que al ser gas, e inerte, apenas se fija sobre las superficies interiores del árbol respiratorio, en cambio, sus descendientes "sólidos" de vida corta se adhieren a esas superficies, constituyendo pequeñas fuentes muy intensas llamados puntos calientes, que proporcionan comparativa y localmente un elevado flujo de partículas a las células más próximas [31]. Así también la distribución del tamaño de las partículas en el aire también influye en la dosis recibida por las vías aéreas, ya que la deposición de los descendientes del Radón 222 es mayor en presencia de particulados y aerosoles ambientales [32], y según el reciente informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la polución y presencia de particulado en el aire, las principales ciudades de América Latina como Ciudad de México, Buenos Aires, Bogotá, Caracas, Lima o Sao Paulo presentan índices de material particulado (PM) muy por encima de los valores recomendados ($20\mu m$ y $10\mu m$) [6], como se muestra en la figura 9. Por lo cual en nuestra capital encontraremos mayor cantidad de hijas de Radón 222 adheridas a este particulado.



Figura 9: Lima entre las capitales más contaminadas de América Latina por particulados en el aire [6].

Puesto que, incluso una sola partícula alfa puede provocar daños genéticos significativos en una célula, la posibilidad de daños al ADN asociados al Radón 222 se da con cualquier nivel de exposición [33]. Sin embargo, el riesgo de muerte por cáncer de pulmón se incrementa con la concentración de actividad y tiene mayor incidencia sobre personas fumadoras que las personas que nunca han fumado, es decir es la primera causante de muertes por cáncer de pulmón ocasionadas por Radón en personas no fumadoras y la segunda en personas fumadoras. En la tabla 3 se indica el riesgo de muerte por cáncer pulmón ocasionado por Radón 222.

Tabla 3: La tabla muestra el porcentaje de muertes por cáncer de pulmón ocasionadas por radón en interiores en personas no fumadoras, fumadoras y público en general [15].

Niveles de Radón <i>Bq/m³</i>	Riesgo de muerte por cáncer de pulmón ocasionado por la exposición de radón en viviendas		
	No fumadores	Fumadores	Público en general
740	3,6 %	26,3 %	10,5 %
370	1,8 %	15,0 %	5,6 %
296	1,5 %	12,0 %	4,5 %
148	0,7 %	6,2 %	2,3 %
74	0,4 %	3,2 %	1,2 %
46,25	0,2 %	2,0 %	0,7 %
14,8	0,1 %	0,6 %	0,2 %

2.6. Radón 222 en interiores.

Dado que el Radón 222 es un elemento gaseoso presente en el aire, reconocido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como el primer causante de cáncer de pulmón en personas no fumadoras, indica que este riesgo se incrementa al aumentar sus niveles de concentración en ambientes interiores habitables. Por lo cual lugares de poca ventilación como sótanos, habitaciones sin ventanas o espacios cerrados, son los que tienden a concentrar este gas en mayor proporción, originando así un mayor riesgo para las personas que se encuentran en estos lugares.

Por lo cual en 30 países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) se han llevado a cabo estudios de medición para determinar la distribución de las concentraciones residenciales de Radón y cuyos resultados se muestran en la tabla 4. De la cual se estima, que en todo el mundo, la concentración media de Radón en interiores es de $39Bq/m^3$ [33].

Tabla 4: Concentraciones de Radón en interiores en países de la OCDE (n.d. no disponible). Fuentes: WHO (2007), UNSCEAR (2000), Billon et al. (2005) y Monzler et al. (2008).

País de la OCDE	Niveles de Radón en interiores [Bq/m^3]		
	Media aritmética	Media geométrica	Desviación típica
Alemania	49	37	2.0
Australia	11	8	2.1
Austria	91	15	n.d.
Bélgica	48	38	2
Canadá	28	11	3.9
Dinamarca	59	39	2.2
Eslovaquia	87	n.d.	n.d.
España	90	46	2.9
Estados Unidos	46	25	3.1
Finlandia	120	84	2.1
Francia	89	53	2.0
Grecia	55	44	2.4
Hungría	82	62	2.1
Irlanda	89	57	2.4
Islandia	10	n.d.	n.d.
Italia	70	52	2.1
Japón	16	13	1.8
Luxemburgo	110	70	2
México	140	90	n.d.
Noruega	89	40	n.d.
Nueva Zelanda	22	20	n.d.
Países Bajos	23	18	1.6
Polonia	49	31	2.3
Portugal	62	45	2.2
Reino Unido	20	14	3.2
República de Corea	53	43	1.8
República Checa	140	44	2.1
Suecia	108	56	n.d.
Suiza	78	51	1.8
Media mundial	39		

Como se puede apreciar, por los resultados de la tabla anterior, las mediciones de Radón 222 en nuestro país están más que justificadas.

3. Detectores de huellas nucleares de estado sólido.

El campo de la detección de las trazas nucleares del estado sólido tuvo su origen en 1958 cuando D.A. Young [9] descubrió las primeras trazas en un cristal de LiF, el cual se puso en contacto con una lámina de óxido de Uranio, siendo irradiado con neutrones térmicos; la superficie del cristal reveló una serie de huecos poco profundos después del tratamiento con un reactivo químico ($\text{HF} + \text{CH}_3\text{COOH}$) saturado con FeF_3 [34]. Las regiones dañadas constituían zonas con mayor actividad química que las zonas circundantes no dañadas. Un año después, Silk y Barnes [35] reportaron el hallazgo de regiones dañadas en micas, utilizaron el microscopio electrónico de transmisión para investigar trazas de partículas cargadas pesadas en micas. Fleischer et al.[36] realizó extensas investigaciones de este método, aplicando el método en micas y a otros materiales como minerales, polímeros (plásticos), etc.

3.1. Detector LR 115 tipo 2.

El detector LR 115 tipo 2 es una película que consta de una base de poliéster de $100 \mu\text{m}$ de grosor, que está recubierta con una capa delgada de $12 \mu\text{m}$ de nitrato de celulosa de color rojo sensible a las partículas alfas. Cuando una partícula alfa incide sobre el nitrato de celulosa genera un daño en la estructura molecular, el cual se puede observar usando un microscopio cuando la película expuesta se graba en un baño de solución diluida de hidróxido sodio (NaOH) bajo condiciones de presión y temperatura establecidas durante la calibración de la película. Después de este procesamiento se perciben pequeños agujeros bajo el microscopio que pueden contarse y así ser cuantificados con precisión. Los orificios tienen diámetros de $1 \mu\text{m}$ a $15 \mu\text{m}$ y están situados donde la película fue golpeada por partículas alfa (la película LR115 no es sensible a otros tipos de radiación, como beta, gamma o rayos X) [7].

Las películas detectoras después de ser expuestas en un ambiente interior son tratadas químicamente en un proceso de grabado. Después del grabado, las huellas o trazas nucleares de las películas son visibles bajo un microscopio, como se indica en la figura 10. La estabilidad y el control de los parámetros críticos (temperatura, concentración del baño de grabado y tiempo de grabado) son los requisitos básicos para obtener resultados fiables y precisos. Pequeñas variaciones en la temperatura del baño pueden causar resultados incorrectos. Sin embargo, dado que el tiempo de grabado de las películas LR115 es de sólo 1,5 horas (comparado con 8 horas para otros materiales empleados para la detección) y el hecho de que las películas LR115 son grabadas en pequeños recipientes se minimizan los cambios de temperatura por lo tanto los resultados de análisis de los detectores de Radón 222 LR 115 son fiables y precisos [7].

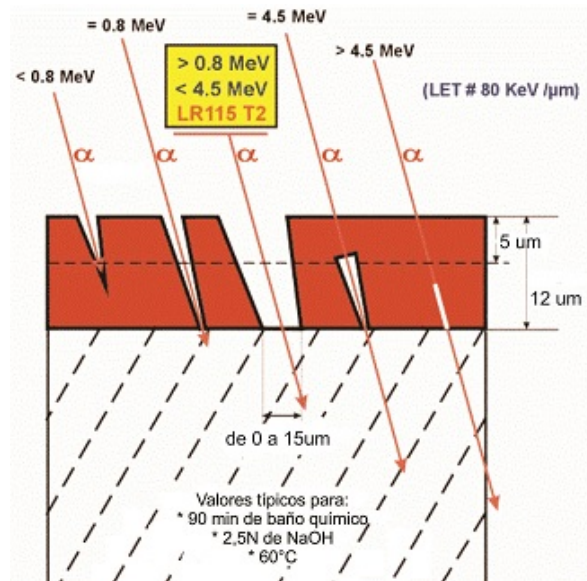


Figura 10: Formación de huellas en LR 115 Tipo 2, en rangos de energía y luego de un baño químico [7].

3.1.1. Características del LR 115 Tipo 2.

Se describen a continuación las características del nitrato de celulosa LR 115 tipo 2 de acuerdo a las condiciones de fabricación [7]:

- Posee un rango de medición de energía entre 0,8 MeV a 4,5 MeV.
- La distancia mínima de detección de partículas alfa para el Radón 222 es de unos 5 mm y la distancia máxima para la detección es de aproximadamente 35 mm para el Radón 222.
- Son insensibles a la deposición superficial de productos de desintegración de Radón que emiten alfa, tales como Po 218, lo que constituye una gran ventaja.
- El nivel de saturación es de aproximadamente 600 trazas/ mm^2 (diámetro de trazas: 1 - 15 μm).
- La exposición máxima a la cual puede ser sometida el LR 115 es de 70 MBq.h/ m^3 . Y la exposición mínima, que significa el umbral de detección más bajo, es de sólo 2 kBq.h / m^3 .

3.2. Mecanismos de formación de una huella.

El baño químico usando una sustancia grabadora al cual se somete el detector de trazas nucleares (LR 115) es el método de mayor uso para la ampliación de la imagen de las trazas dejadas por las partículas alfas del Radón 222 y su progenie sobre el detector (traza latente), como se indica en la figura 11, haciéndolas visibles al microscopio óptico, el ataque químico se produce por disolución rápida de la región dañada por la traza, que en el material donde no hay daño (no ha incidido una partícula alfa) el ataque químico es más lento [8].

La velocidad de ataque químico a lo largo de la huella se denomina velocidad de ataque de la traza V_T , y para algunos modelos se asume que es lineal. El material no dañado circundante es atacado a una velocidad V_B , la velocidad de grabado. La velocidad de ataque químico es generalmente constante para un material dado y para un agente de ataque dado aplicado bajo un conjunto específico de condiciones de ataque químico, aunque en cristales dependerá a menudo de la orientación cristalográfica y en algunos polímeros puede variar con la profundidad por debajo de la superficie original.

Las velocidades de grabado en las trazas dependerán, además de los factores mencionados anteriormente, de la cantidad de daño localizada en la región del núcleo de la huella (y por lo tanto en las propiedades de la partícula formadora de la traza), y variarán normalmente a lo largo de una traza individual [8].

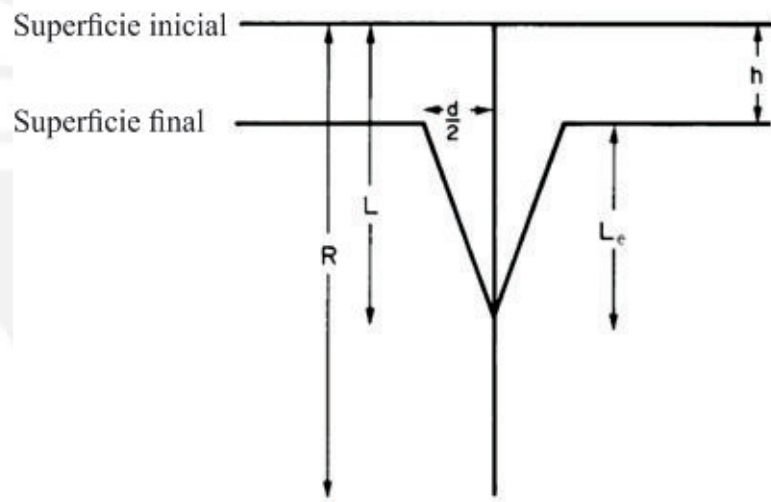


Figura 11: Parámetros utilizados para describir la geometría de las trazas generadas por el baño químico: R , longitud total de la traza latente; L , la longitud de la traza atacada por el baño químico; L_e , longitud de la traza grabada (cono de grabado); h , espesor de la superficie removida por el baño químico; d , diámetro del cono de grabado. Por simplicidad, se ha representado una huella vertical. El caso más general, donde la huella hace un ángulo θ con la superficie. En el caso de la huella inclinada, el diámetro de la abertura se sustituye por los ejes mayores y menores, D y d , de la abertura elíptica. El cono grabado a continuación subtende una longitud proyectada S sobre la superficie del detector [8].

3.2.1. Geometría de la traza generada por incidencia normal y a V_T constante.

Los primeros estudios sobre los diámetros generados por el baño químico sobre una traza fue realizada por Fleischer y Price en 1964 [37] para la determinación de longitudes de trazas grabables de fragmentos de fisión que entran en detectores de vidrio en ángulo recto. Supusieron un modelo simple de grabado de trazas según el cual la traza es un pozo cónico con un ángulo $\delta = \arcsen\left(\frac{V_B}{V_T}\right)$ que evoluciona como resultado de procesos simultáneos de grabado, a lo largo de la traza y sobre el detector no afectado, que tiene lugar con velocidades de ataque de la traza constante (V_T) y velocidad de grabado (V_B), como se muestra en la figura 12.

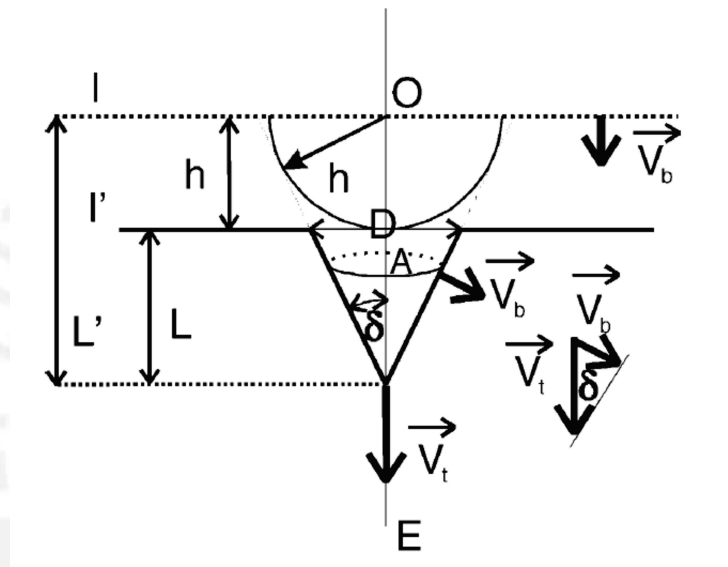


Figura 12: Geometría del desarrollo de la traza. El ángulo de incidencia es normal con respecto a la superficie del detector, y V_T es constante [9].

Donde la profundidad de la traza viene dada como:

$$L = (V_T - V_B)t$$

En el cual t es el tiempo de grabado, así también se puede determinar el diámetro de la traza generada sobre el detector después del baño químico:

$$D = 2h\sqrt{\frac{V-1}{V+1}}$$

Con $V = \frac{V_T}{V_B}$, si $V \gg 1$ entonces de la ecuación anterior obtenemos:

$$D \approx 2h$$

En la cual el diámetro de la huella depende del espesor removido durante el proceso de grabado. Sin embargo este es un método que considera únicamente incidencias de partículas alfas perpendiculares al detector.

3.2.2. Geometría de la traza generada por incidencia oblicua y V_T constante.

En aplicaciones más realistas, las partículas impactan el detector con incidencia oblicua en lugar de una incidencia normal. Un ejemplo típico es la irradiación de un detector por partículas alfa emitidas por el Radón y sus descendientes, donde todos los ángulos de incidencia son posibles. Otro ejemplo es la irradiación por rayos cósmicos. Por lo tanto, es importante describir la incidencia de partículas sobre el detector con incidencia perpendicular así como con incidencia oblicua [9]. Este problema fue considerado en detalle por Somogyi y Szalay [9], en el cual se considera la traza dejada por una partícula con incidencia oblicua, la cual luego del baño químico genera un cono oblicuo y en la superficie podemos observar una elipse, por lo tanto la abertura de la traza correspondiente es elíptica. La elipse se caracteriza por su eje mayor D y su eje menor d . Estos dos parámetros son características importantes de una abertura de traza por incidencia oblicua [9], tal como se indica en las figuras 13 y 14.

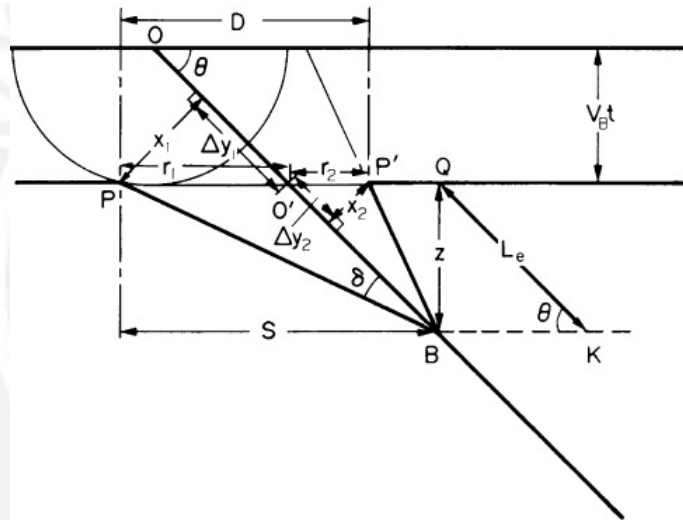


Figura 13: Construcción para el cálculo del eje mayor de la abertura de una traza elíptica y parámetros relacionados de la traza grabada [8]

La traza mostrada tiene un V_T constante (con $V = V_T/V_B = 3$), y se encuentra en un ángulo $\theta = 45^\circ$ con la superficie del detector. Donde D es el eje principal de la abertura de la traza elíptica que, en el tiempo t de grabado, donde la traza se divide en O en partes desiguales, r_1 y r_2 . δ (que es igual al ángulo crítico θ_c) es el semi-ángulo del cono grabado, cuya proyección en la superficie del detector tiene una longitud $S = L_e \cos\theta + r_1$ (Aquí $O'Q = BK = L_e \cos\theta$) [8]

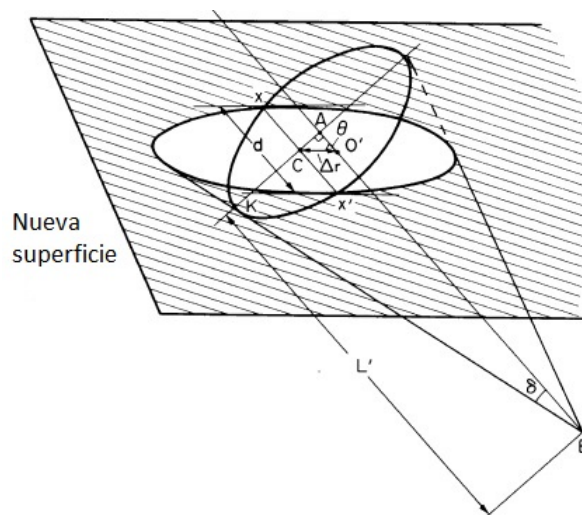


Figura 14: Construcción para el cálculo del eje menor, d , para la abertura de una traza grabada elíptica situada en el plano del papel (denominada "nueva superficie") [8].

La traza, que sigue AB , hace un ángulo θ con el plano horizontal del papel. A medida que el grabado ha procedido desde la superficie original hacia abajo, el punto en el que la pista interseca al eje mayor de la abertura se ha alejado cada vez más del centro de la elipse, C ; de modo que, en la situación representada, el punto de intersección es O' , una distancia Δr lejos de C . Para determinar el eje secundario XX' de la elipse, se procede como sigue. Imagine un plano vertical que contenga la traza y el eje principal que se extienda a lo largo de CO' . Baja una perpendicular desde el punto C hacia la traza; llamamos al punto de intersección A , de modo que $\angle CAO' = 90^\circ$, y $CA = \Delta r \sin \theta$. A continuación, imagine que el cono de grabado tiene una base (circular) perpendicular al eje central BA , el círculo (centrado en A) que pasa por los puntos X , K y X' , como se muestra; de modo que los radios AK y AX son iguales (donde $AK = AB \tan \delta$; δ siendo el ángulo del semicono). Entonces, dado que los ejes mayor y menor de la elipse están en ángulos rectos entre sí, y la traza AB continúa en el plano vertical que pasa por AB y $O'C$ (a cuyo plano el eje semimenor XC es normal), Por lo tanto $\angle XCA$ es también un ángulo recto. Pero CA y AX son conocidos; $CX (= \frac{1}{2}d)$ puede, por lo tanto, ser obtenido por el teorema de Pitágoras [8].

En la tabla 5 se resumen las fórmulas de la geometría de una traza oblicua con V_T constante.

Tabla 5: Se aplica sólo en trazas para las cuales el cono de grabado se proyecta desde debajo de la abertura de la traza cuando se ve desde arriba. El tiempo t_0 se refiere al momento en que el grabador alcanza el final de la trayectoria de daño latente [8].

Parámetro	Símbolo	Fórmula
Eje mayor de la traza	D	$\frac{2h(V^2, -1)^{1/2}}{V \sin\theta + 1}$
Eje menor de la traza	d	$2h\left(\frac{V \sin\theta, -1}{V \sin\theta + 1}\right)^{1/2}$
Longitud proyectada ($t < t_0$)	S_0	$S_0 \cdot h\left(\frac{V \sin\theta, -1}{\tan\theta}\right) + \frac{h}{\sin\theta} \cdot \frac{V \sin\theta, -1}{(V^2, -1)^{1/2} \cdot \sin\theta - \cos\theta}$
Longitud proyectada ($t > t_0$)	S_1	$\left(R - \frac{h}{\sin\theta}\right)\cos\theta + \frac{h}{\sin\theta} \cdot \frac{V \sin\theta - 1}{(V^2, -1)^{1/2} \cdot \sin\theta - \cos\theta} + h - R/V$

Sin embargo, los modelos anteriormente mencionados consideran una V_T constante y en un caso real este parámetro puede variar, así también se necesita evaluar la formación de huellas generadas por una incidencia normal y oblicua, este es el caso de nuevos modelos de los cuales han sido propuestos por diferentes autores como el modelo de Somogyi - Szalay [37] el cual considera una V_T variable, así también supone que la parte final de la traza grabada es aguda; en el modelo de Fromm et al. [38] considera una acción de ataque químico que se descompone en dos etapas alternativas usando primero una velocidad variable V_T para grabar la trayectoria de iones dañada y luego una velocidad constante V_B para ampliar la pista fuera de las regiones dañadas de la trayectoria grabada; en el modelo de Fewes and Henshaw [39] el análisis proporcionado se basó en la estructura de la traza generada por partículas alfa en el detector CR-39; el modelo presentado por Nikezic and Yu [40] se basa en la asunción de las ecuaciones conocidas para la formación de la traza en el caso bidimensional.

4. Mapeos de Radón 222.

El objetivo principal de realizar un mapeo de Radón 222 es cartografiar la variación geográfica, para poder establecer la probabilidad de que los edificios nuevos o existentes superen el nivel de acción del Radón 222 que pueda afectar a los habitantes; esta información puede utilizarse para diversos fines, como dirigir campañas de información que fomenten la medición de los niveles de Radón en los hogares o permitir que se mejoren las regulaciones de construcción para evitar que los edificios nuevos tengan problemas en relación al Radón 222 y su progenie [41]. Desde una perspectiva nacional de salud pública, la magnitud del problema del Radón depende en gran medida de la geología, específicamente del contenido de Radio 226 y de la permeabilidad de la formación rocosa, otros factores que juegan un papel importante son los métodos de construcción de los edificios y el clima [42]. Normalmente los datos están agrupados por límites administrativos (municipios, regiones, condados, etc.), límites geológicos (tipo de suelo, tipo de roca, etc.) o áreas uniformes tales como cuadrículas de 5 o 10 km; la mayoría de los países de Europa han llevado a cabo mapeos de Radón de algunos o de todos sus territorios respectivos, en la tabla 6 se presenta una lista de las organizaciones de cada país responsables de llevar a cabo el ejercicio de mapeo [16].

La metodología de cartografía del Radón más comúnmente empleada se basa en las mediciones del gas Radón en interiores. Esta técnica se aplica en cierta medida en 18 países. De hecho, la cartografía del Radón en Austria, Dinamarca, Hungría, Irlanda, Portugal, Eslovenia y Suiza se basa únicamente en las mediciones de Radón en interiores. Sin embargo, varios países combinan uno o más métodos para producir mapas de Radón. Por ejemplo, las mediciones de gases en el suelo teniendo en cuenta la superficie y la geología subsuperficial forman la base de la cartografía en la República Checa y Alemania, mientras que la base para la cartografía del Radón en Finlandia es la medición del Radón en interiores junto con la cartografía geológica y la subestructura de los edificios [16]. En la tabla 7 se muestra las diferentes metodologías de mapeo del Radón utilizadas por los países participantes [16].

Tabla 6: Las organizaciones que llevaron a cabo programas nacionales de mapeo del Radón [16]

País	Organización
Austria	Universidad de Viena
Bélgica	FANC (Agencia Federal de Control Nuclear)
República Checa	Varios institutos académicos / universidades, el Servicio Geológico Checo y consultores privados con experiencia en técnicas geológicas
Dinamarca	Instituto Nacional de Higiene Radiológica, Estudio Geológico de Dinamarca y Groenlandia, Laboratorio Nacional de Risoe2
Finlandia	STUK2 (Autoridad de Radiación y Seguridad Nuclear de Finlandia) con la cooperación de las autoridades municipales
Francia	Francia IRSN (Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear) y BRGM (Oficina de Recursos Geológicos y Mineros)
Alemania	BFS (Oficina Federal de Protección Radiológica), Kemski y Geólogos Asociados
Grecia	Varios laboratorios universitarios sin centro de coordinación
Hungría	Instituto Nacional de Investigación de Radiobiología y Radiohigiene
Irlanda	RPII (Instituto de Protección Radiológica de Irlanda)
Italia	Instituto Nacional Italiano de Salud, Agencia de Protección Ambiental y Servicios Técnicos, organizaciones públicas en varias regiones sin centro de coordinación
Países Bajos	RIVM (Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente), KVI (Instituto Versneler Kernfisistsh)
Polonia	Instituto Geológico Polaco
Portugal	ITN2 (Instituto Tecnológico y Nuclear)
Rumania	Varios Institutos sin centro de coordinación
Eslovenia	Instituto Josef Stefan
España	Universidades de Cantabria, Catalana, Canarias-Ciemat, CSN (Consejo de Seguridad Nuclear), ENUSA Industrias Avanzadas
Suecia	Consultores privados en nombre de varios municipios sin centro de coordinación
Suiza	SFOPH (Oficina Federal de Salud Pública de Suiza)
Reino Unido	NRPB (Junta Nacional de Protección Radiológica)

Tabla 7: Metodologías de mapeo del Radón utilizadas en los programas de cartografía [16]

Mediciones de Radón en interiores	Mediciones de Radón en suelo	Mapeo geológico	Otros métodos
Austria	República Checa	República Checa	República Checa
Bélgica	Francia	Finlandia	Finlandia
República Checa	Alemania	Francia	Grecia
Dinamarca	Grecia	Alemania	España
Finlandia	Polonia	Italia	Suecia
Francia	Rumania	Polonia	
Alemania	Suecia	España	
Grecia			
Hungría			
Irlanda			
Italia			
Países Bajos			
Portugal			
Rumania			
Eslovenia			
España			
Suiza			
Reino Unido			

A continuación se detalla una breve descripción del programa de mapeo del Radón en algunos países europeos y las metodologías empleadas.

4.1. Mapeo de Radón en Austria.

Desde 1992 hasta 2002, se llevó a cabo en Austria, el Proyecto Nacional de Radón de Austria, con el objetivo de evaluar la concentración de Radón en las viviendas austriacas e identificar las zonas con concentraciones elevadas de Radón. La decisión fue llevar a cabo mediciones sistemáticas del Radón en interiores y no evaluar el riesgo de Radón de las prospecciones geogénicas (contenido de Radio en el suelo, Radón en el subsuelo, permeabilidad y geología), ya que en Austria se disponía de más conocimientos sobre las técnicas de medición en interiores que sobre las influencias geológicas del Radón. Los resultados fueron publicados sobre la base de los municipios y para dar información sobre el riesgo actual de Radón en interiores. La estrategia elegida fue medir el gas Radón en hogares estadísticamente seleccionados y aleatoriamente, en las dos habitaciones más utilizadas (sala y dormitorio), con una densidad de medición proporcional a la densidad de población. Por lo tanto, los resultados son representativos de las áreas habitadas. Se llevaron a cabo 10 000 mediciones en hogares de Austria [43].

El mapa austríaco del potencial del Radón fue puesto al día en 2012. El principio y la metodología siguieron siendo los mismos, pero incluyeron todas las mediciones en interiores de los años anteriores, que se han recogido en la base de datos del Radón austríaco central. Hasta ahora, 30 000 registros están en la base de datos

y sólo se han utilizado medidas en las viviendas para el mapa del Radón, usando detectores de estado sólido, pero se está evaluando la opción de incluir mediciones en los lugares de trabajo y edificios públicos [43].

4.2. Mapeo de Radón en Bélgica.

La encuesta nacional de mediciones de Radón en interiores se ha llevado a cabo utilizando detectores pasivos de trazas nucleares que fueron instalados en casas seleccionadas al azar por la policía de las comunas en el primer piso (sala). Las mediciones se realizaron durante 3 meses en el invierno. Se proporcionaron cuestionarios para obtener detalles de la colocación del detector, la dirección completa y las características de las casas que podrían influir en los niveles de Radón, tales como sistema de calefacción, doble acristalamiento, circulación de aire y si hubiera un sótano bajo la habitación de medida. Se hacen más observaciones en casas con niveles de Radón de más de $400 Bq/m^3$ y en el vecindario de estos hogares de alto nivel. Los lugares de la casa fueron dibujados por la policía de las comunas en un mapa topográfico o un mapa de la ciudad en la mayoría de los casos. Estos mapas sirvieron para encontrar las coordenadas exactas con la ayuda de mapas topográficos escaneados. En los casos en el cual no se dispuso de un mapa de localización de casas, utilizaron un atlas de calles junto con mapas topográficos escaneados para encontrar las coordenadas aproximadas. Aunque aún no se ha completado la encuesta nacional del Radón en interiores, se recogió el conjunto de datos de aproximadamente 2200 mediciones a largo plazo de 3 meses en la parte más importante del país. La variación espacial de las concentraciones de Radón en interiores se modeló por variogramas. Se construyó un mapa de distribución de Radón utilizando la técnica de kriging log-normal (método de interpolación espacial) y se utilizó un Sistema de Información Geográfica para digitalizar, procesar e integrar una variedad de datos, incluyendo mapas geológicos, concentraciones de Radón asociadas con localizaciones de la casa y un mapa administrativo, etc. También se evaluó las relaciones entre varios conjuntos de datos espaciales con el objetivo de producir Mapas de riesgo de Radón [44].

4.3. Mapeo de Radón en República Checa.

El programa de mapeo del riesgo de Radón comenzó en la República Checa hace 27 años. El programa se basa en la estrecha cooperación entre la Oficina Estatal de Seguridad Nuclear y el Instituto Nacional de Protección Radiológica. Ambas instituciones se ocupan de la distribución y evaluación de detectores de trazas nucleares en viviendas particulares [45].

- 1990: Los primeros mapas de Radón se realizaron en una escala 1: 200 000 que cubre las regiones de la zona del estado.
- 1998: El mapa de riesgo de Radón se realizó en una escala 1: 500 000 se incluyó en el Atlas del mapa de la República Checa, junto con otros 10 mapas geocientíficos.

- 1999: El Servicio Geológico Checo también utiliza los mapas geológicos vectorizados en la escala de 1: 50 000, lo que permite construir mapas más detallados índices de radón.
- 2009 - 2012: Las actividades de investigación durante este periodo permitieron precisar los mapas índices de Radón con respecto al potencial de Radón del subsuelo geológico profundo, basado en 9 100 datos de la base de datos de Radón.

4.4. Mapeo de Radón en Dinamarca.

Se llevó a cabo una nueva encuesta sobre el Radón 222 en interiores. Las mediciones se realizaron con detectores de trazas nucleares CR 39 por un periodo de 1 año en 3019 casas unifamiliares. En cada uno de los 275 municipios se hicieron de 3 a 23 mediciones en viviendas. Dentro de cada municipio, las casas fueron seleccionadas al azar. Un resultado importante de la encuesta es la predicción de la fracción de casas en cada municipio con un promedio anual de concentración de Radón por encima de $200 Bq/m^3$ [46].

4.5. Mapeo de Radón en Finlandia.

La Autoridad de Radiación y Seguridad Nuclear (STUK) comenzó a investigar las concentraciones de Radón en interiores en los años setenta. Las mediciones se han llevado a cabo a mayor escala desde 1986, y se han tomado principalmente en viviendas de poca altura y en primer piso, las mediciones se tomaron durante el período de calentamiento (desde principios de noviembre hasta finales de abril) debido a que la concentración de Radón es mayor durante la estación fría. El período de medición fue de 2 meses. Marcaron las posiciones de las casas bajo estudio en los mapas y enviaron los mapas a STUK, quién determinó las coordenadas de las viviendas y los tipos de suelos de las obras a partir de los cuestionarios cumplimentados por los propietarios y de los mapas geológicos. Aproximadamente 2000 viviendas de poca altura y 1.000 departamentos se midieron durante 1990-1991. Las variaciones en la concentración de Uranio y la permeabilidad del suelo afectan la distribución geográfica de las concentraciones de Radón en interiores. La concentración media de Radón y el número de altas concentraciones suelen ser mayores en casas construidas sobre tipos de suelos permeables [47].

4.6. Mapeo de Radón en Alemania.

El mapa de riesgo de Radón de Alemania se realizó a una escala de 1:2000000 (escala geográfica), se basa en la concentración de Radón en el suelo, se consideró el uso de una rejilla con un área de 3 km x 3 km, a la que se le asignó una serie de atributos como propiedades geológicas, permeabilidad al gas en el suelo, concentración de actividad de Radón en el gas del suelo y clase de Radón potencial. Sin embargo en las zonas geológicamente más uniformes, la distancia media entre los puntos de medición fue de aproximadamente 25 km [48].

4.7. Mapeo de Radón en Grecia.

Se analizaron 1440 muestras de suelo, recogidas en toda Grecia, para determinar la radioactividad natural (Ra 226, Th 232 y K 40) cada muestra fue tomada de sitios aparentemente inalterados en áreas abiertas en la superficie del suelo usando una espada especialmente fabricada que recogió la capa superficial de 1 cm del suelo. El muestreo abarcó todas las subdivisiones geográficas del continente y se realizó en siete períodos de tiempo discretos entre 1986 y 1992 [49].

4.8. Mapeo de Radón en Irlanda.

La primera encuesta exhaustiva sobre el Radón en las viviendas irlandesas se llevó a cabo a mediados de los años ochenta por McLaughlin y Wasiolek en 1988 [16]. La primera cartografía del riesgo de Radón en Irlanda fue realizada por Madden et al. en 1994 [16] y fue esencialmente una encuesta de seguimiento que se concentró en áreas previamente identificadas de alto potencial de Radón. La información disponible públicamente sobre el potencial de Radón en Irlanda del Norte se basa actualmente en los resultados del Radón en interiores en un cuadrado de 1 km, un enfoque que no tiene en cuenta el origen geológico del Radón. Este estudio describe una estimación espacialmente más precisa del potencial de Radón de Irlanda del Norte utilizando un método integrado de mapeo del potencial de Radón basado en las mediciones de Radón en interiores y la geología que se desarrolló originalmente para cartografiar el potencial de Radón en Inglaterra y Gales [50].

4.9. Mapeo de Radón en Italia.

En Italia, las regiones y provincias autónomas son responsables del control de la radiactividad ambiental en su territorio. Entre 1989 y 1996, el Instituto Nacional Italiano de Salud, la Agencia para la Protección del Medio Ambiente y los Servicios Técnicos y las organizaciones públicas de varias regiones realizaron una encuesta nacional representativa destinada a estimar las distribuciones nacionales y regionales. Las mediciones se realizaron en 5361 viviendas en 232 ciudades. Las metodologías empleadas para la cartografía del Radón varían según la región. En Bolzano se realizó un mapa descriptivo sobre una base geográfico-administrativa (municipio). En la región del Véneto se aplicó un método geo-estadístico de cartografía. El mapa del Radón de la región de Friuli-Venezia Giulia se basó en 5000 mediciones en 1319 escuelas. Se elaboró un mapa descriptivo (valores medios, percentiles, etc.). También se mostraron mapas que muestran los porcentajes de escuelas en cada municipio con una o más habitaciones con concentraciones de Radón superiores a 200, 400 y 500 Bq/m^3 . En la región de Cerdeña, la cartografía se basó en mediciones de Radón en interiores en viviendas privadas y escuelas primarias [16].

4.10. Mapeo de Radón en Países Bajos.

En 1995 y 1996, las concentraciones de Radón y los flujos de aire efectivos se midieron en aproximadamente 1500 viviendas construidas entre 1985 y 1993 en to-

dos los municipios holandeses. El objetivo principal de este trabajo fue describir la tendencia en la concentración media de Radón y cuantificar las contribuciones de las fuentes más importantes de Radón. Las mediciones se llevaron a cabo en áreas de vida utilizando detectores de grabado en la traza y el período de medición fue de aproximadamente un año [16].

4.11. Mapeo de Radón en Portugal.

El programa de evaluación de Radón en interiores fue implementado por el Departamento de Protección y Seguridad Radiológica en 1987. Portugal esta administrativamente dividido en 18 distritos y cada distrito abarca varias ciudades. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando detectores de trazas nucleares (LR-115, tipo II), los cuales fueron expuestos durante un periodo de uno a tres meses. Los detectores, así como cuestionarios se distribuyeron a 2000 habitantes mediante la cooperación de maestros y alumnos [51].

4.12. Mapeo de Radón en Eslovenia.

El primer estudio sistemático del Radón en Eslovenia se realizó en el período invernal 1993-94. De un total de 1000 casas seleccionadas al azar, el Radón en 892 hogares se midió utilizando detectores de trazas nucleares CR-39. Los mapas de las concentraciones de Radón en Eslovenia se construyeron en diferentes formatos, incluidos las grillas de la cuadrícula (5 km x 5 km y 10 km x 10 km), también se elaboró un mapa con concentraciones medias anuales en todos los distritos administrativos (comunidades) [52].

4.13. Mapeo de Radón en España.

Alrededor de 12 000 mediciones de concentraciones de Radón en interiores se han realizado desde que el programa nacional de Radón en España comenzó a finales de los años ochenta. Una proporción significativa de ellos resultó de la última campaña realizada de 2009 al 2012. Esta campaña completó la primera versión de un mapa basado en una cuadrícula de 10 km x 10 km que cubre todo el territorio mediante el uso del software Google Earth. Las mediciones se realizaron con detectores de trazas nucleares CR 39. Se colocaron los detectores en la habitación más ocupada de la vivienda de 1 a 2 m de altura evitando corrientes de aire o fuentes de calor. El período de exposición fue entre 3 y 6 meses durante las temporadas de otoño e invierno. Cada detector fue distribuido acompañado de instrucciones de un cómo utilizar el detector junto con una breve explicación del proyecto [53].

En resumen, de lo expuesto anteriormente se puede apreciar que no hay una metodología única para determinar los niveles de Radón 222 y su progenie en ambientes interiores, pero si es un común denominador el interés y la participación de las diferentes instituciones para la determinación del nivel promedio nacional, así como también el esfuerzo para establecer un límite de referencia recomendable a fin de minimizar riesgos en la población.

5. El comportamiento Log normal de las concentraciones de Radón 222.

Existen dos tipos principales de comportamiento que describen la variación aleatoria que se produce en los datos de muchas investigaciones científicas. Un tipo es la conocida variabilidad normal la cual se describe por la distribución Normal, la otra es la variabilidad log normal que es describe por una distribución Log normal y ambas distribuciones se basan en variables independientes [54]. La diferencia proviene del hecho de que para la distribución Normal los efectos de estas variables son aditivos, mientras que para la distribución Log normal los efectos son multiplicativos como lo demostraron Limpert et al (2001)[55]. Hattis y Burmaster (1994) [56] demostraron que en muchos procesos físicos, químicos, biológicos y toxicológicos las variables aleatorias siguen las distribuciones logarítmicas normales, es decir tienen un efecto multiplicativo, por ejemplo las concentraciones de contaminantes en el agua, los metales en el tejido biológico, el fósforo en los lagos, los sólidos disueltos en las aguas subterráneas, los radionucleidos en el suelo, etc [54].

El término "misticismo Log normal" fue acuñado por Tóth et al. (2006) [57] para el comportamiento de los datos de concentración de Radón en interiores de las encuestas geográficas y muy a menudo parecen estar bastante exactamente distribuidos de manera Log normal. Así también hay muchos ejemplos que demuestran que las concentraciones de Radón en interiores en muchos países se ajustan más o menos a una distribución Log normal (Cohen 1986 [58], Nero et al 1986 [59], White et al 1992 [60], Gunby et al 1993 [61], Marcinowski et al 1994 [62], Miles 1994 [63], 1998 [64], Kim et al 2003 [65], Hámori et al 2006 [66]).

Es por eso, que se ha reconocido que el modelo Log normal se ajusta bien a las distribuciones de Radón 222 hasta aproximadamente 200 Bq/m^3 y que por encima de este nivel hay una salida de la Log normalidad, lo que ha llevado a diferentes especulaciones y modelos tratando de explicar esto (Murphy y Organo 2008 [67], Andersen y otros 2001 [46], Tuia y Kanevski 2008 [68], Bossew 2010 [57]). Sin embargo un análisis más preciso de los datos por Kies et al (1996) [54] ha establecido que el modelo Log normal se ajusta mejor cuando se considera una sola formación geológica y que los datos se desvían del modelo cuando se encuentra sobre un país o región.

Varios factores determinan la cantidad de Radón en una casa, como el contenido de Radio en el subsuelo y materiales de construcción, la permeabilidad del suelo debajo, las vías de entrada a los hogares, la subpresión en los hogares, las tasas de ventilación, etc. Donde todos estos factores, aparte del primero, son factores multiplicadores. Por lo tanto, debemos esperar que las concentraciones del Radón sean Log normalmente distribuidas en una unidad geológica específica [54].

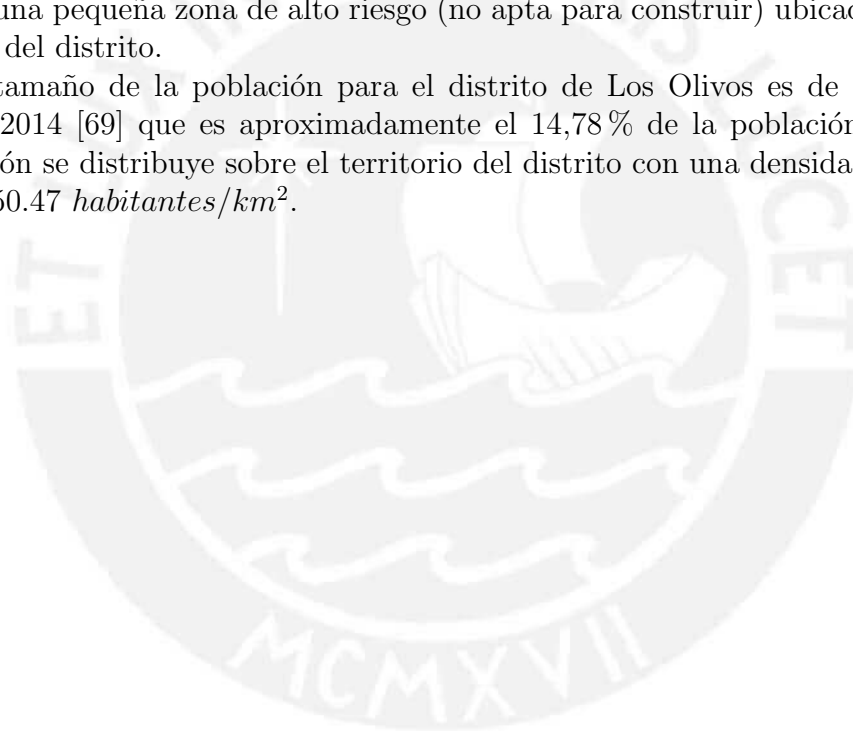
6. Metodología aplicada en el presente trabajo.

6.1. Identificación de la zona de estudio.

El distrito de Los Olivos es uno de los ocho distritos que conforman Lima Norte, limita por el norte con el distrito de Puente Piedra, al este con el distrito de Comas y el distrito de Independencia y al sur-oeste con el distrito de San Martín de Porres. Posee una extensión territorial de $18,25 \text{ km}^2$ y una elevación de 75 msnm [69]. El distrito de Los Olivos está distribuido políticamente como se indica en la Figura 15.

El tipo de suelo que caracteriza al distrito de Los Olivos, según el Centro Peruano Japonés de Investigaciones sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) se describe en la Figura 16, el cual aborda los tipos de suelos por zonas de acuerdo al riesgo sísmico. En este mapa se diferencia entre las zonas aptas para construir y las zonas con mayor riesgo sísmico. El distrito está completamente poblado, incluyendo las zonas de riesgo sísmico. Donde las zonas aptas para construir corresponden a afloramientos rocoso, estratos de grava que conforman los lechos de los ríos Chillón y Rímac, así también se encuentran zonas de suelos granulares finos y suelos arcillosos. Y una pequeña zona de alto riesgo (no apta para construir) ubicada en la parte central del distrito.

El tamaño de la población para el distrito de Los Olivos es de 365 921 para el año 2014 [69] que es aproximadamente el 14,78% de la población de Lima; la población se distribuye sobre el territorio del distrito con una densidad poblacional de $20050.47 \text{ habitantes/km}^2$.



Mapa de suelos en los distritos de Lima

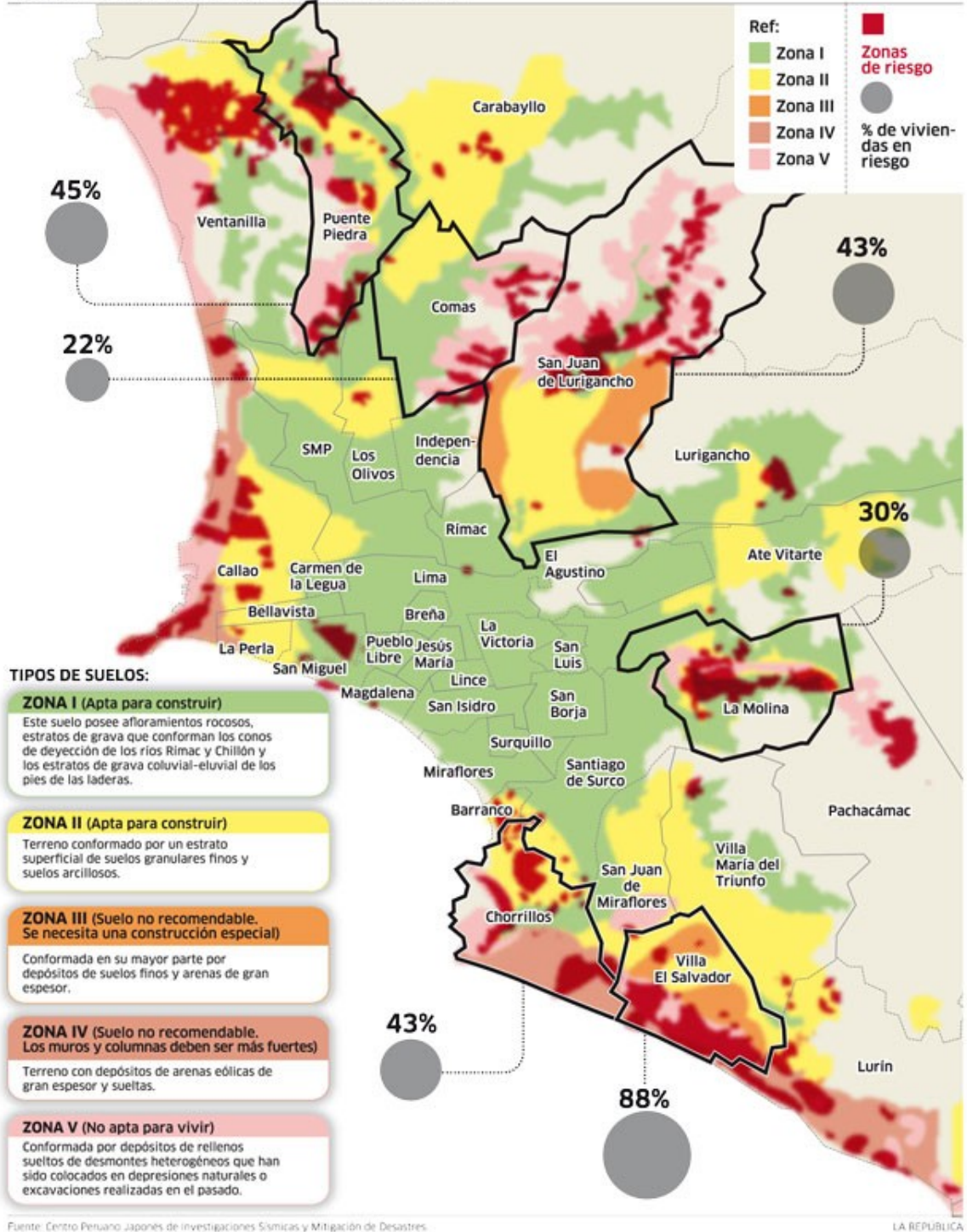


Figura 16: Mapa de suelos en el distrito de Los Olivos [11]

6.2. Método de muestreo utilizado.

Se eligió una muestra representativa de la población con el propósito de inferir los resultados buscados según nuestra hipótesis de trabajo. La muestra examinada fue seleccionada de forma que cumpla con las condiciones necesarias afín de lograr una representación adecuada de la población, tomando en cuenta los rasgos esenciales de dicha población, los cuales son importantes para esta investigación. Para que una muestra sea representativa, y por lo tanto útil, debe de reflejar las similitudes y diferencias encontradas en la población, es decir ejemplificar las características de ésta.

En este trabajo se consideró el uso de una grilla de 1 km x 1 km (grilla definida en el proyecto PIAP-3-P-671-14 "Desarrollo de un sistema de monitoreo de Radón 222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima - Perú"); y de acuerdo a la densidad poblacional del distrito se estimó un mínimo de cuatro casas por 1 km^2 a ser monitoreadas. En cada grilla, se buscó ubicar las 4 casas (elegidas al azar) y se solicitó la disponibilidad de sus habitantes para participar en esta investigación; los detectores se colocaron en los lugares de mayor permanencia de los usuarios (sala y dormitorio) ubicados siempre en el primer piso, se descartó mediciones en viviendas de segundo piso o más. En la figura 17 se presenta la grilla con los lugares de monitoreo (sus ubicaciones GPS vienen detalladas en el ANEXO I)

En nuestro estudio se empleó dos enfoques principales para la producción del mapeo de Radón del distrito de Los Olivos, la información geológica del distrito (Figura 15) con su respectiva zonificación (Figura 16) y la información obtenida de las encuestas realizadas a los responsables de cada lugar de medición en el distrito (ver ANEXO II). El uso de mapas geológicos se empleó como indicador de los tipos de suelos que conforman el distrito, así también fue de suma importancia conocer las características de densidad poblacional como también su extensión superficial. Ya que el distrito posee las mismas características de geología en la parte norte y sur; y una geología distinta en la parte central, esto se tomó en cuenta para la distribución de detectores y se consideró que el distrito de Los Olivos posee una distribución poblacional uniforme.

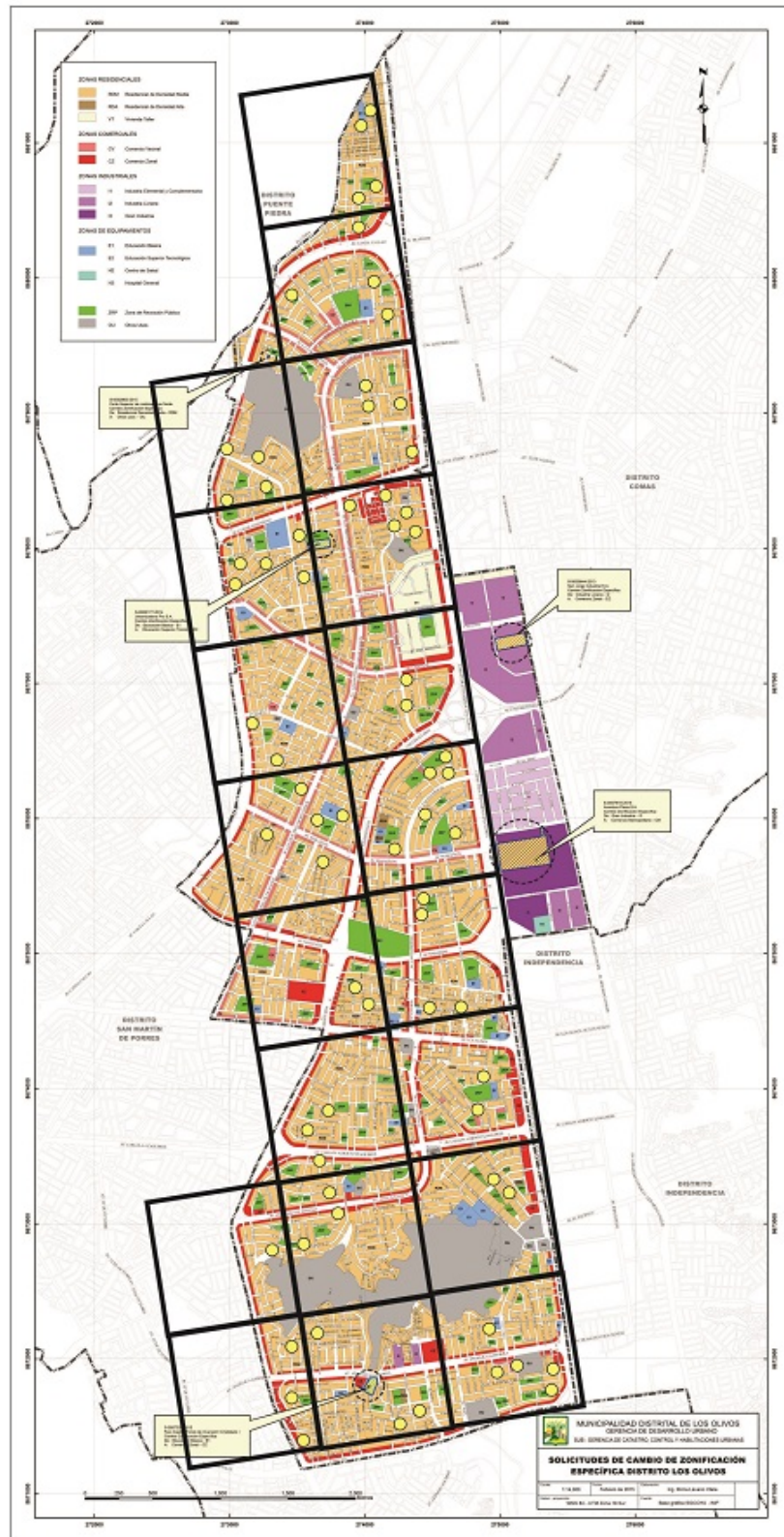


Figura 17: Mapa del distrito de Los Olivos con una grilla de $1\text{km} \times 1\text{km}$ y con los correspondientes lugares de medición marcados con puntos amarillos

6.3. Ubicación y recolección de detectores.

Se consideró el siguiente procedimiento para la ubicación de los detectores, así como también para su recolección:

1. Los detectores se distribuyeron aleatoriamente en el distrito de Los Olivos teniendo en cuenta la grilla de 1 km x 1 km usada en este muestreo.
2. Se informó el propósito de la investigación a cada responsable de hogar (usuario), cuya la finalidad fue contar con el acceso para la ubicación de los detectores en su vivienda.
3. En los correspondientes hogares seleccionados se entregó dos detectores por periodo de muestreo (se realizaron 5 periodos de muestreo), colocándolos en los lugares de mayor permanencia de los usuarios (dormitorio y sala), por un periodo mínimo de 8 semanas, a una altura de 160 cm sobre el nivel de piso, tal como se indica en el folleto explicativo de la figura 18.

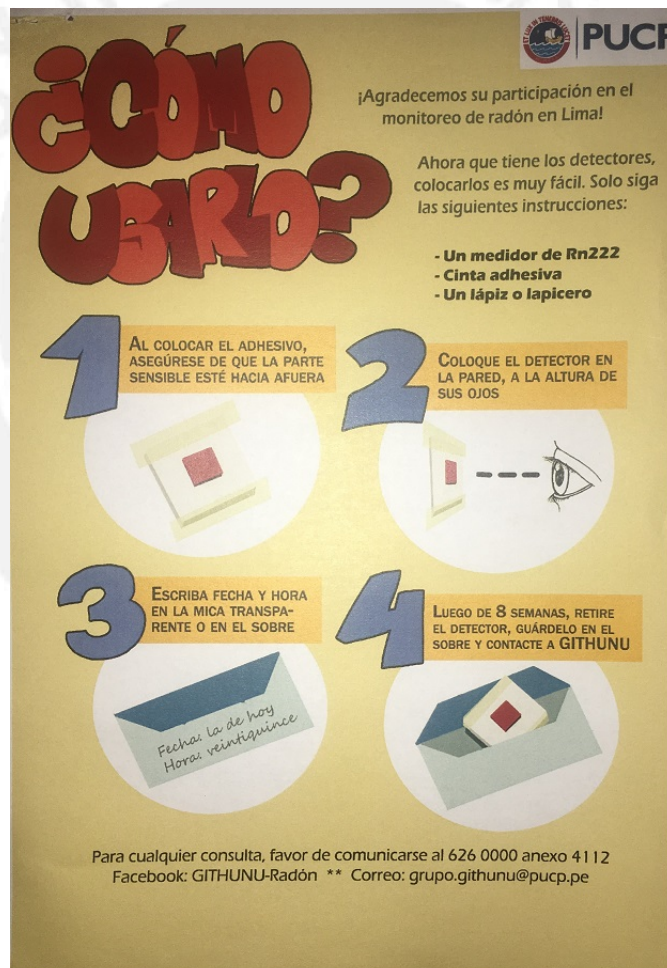



Figura 18: Folleto explicativo para el uso del detector de Radón 222 proporcionado por el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU-PUCP).

4. Así mismo cada responsable de la vivienda se encargó de llenar una ficha técnica donde describe las características de su vivienda (ventilación, edad de la vivienda, etc.), tal como se indica en la figura 19.



**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 seropuerto

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
Recubrimiento	pintura	madera	papel	mayólica
				otros

Si el recubrimiento es pintura:

Tiempo aproximado	Más 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
Correo: grupo.githunu@puccp.pe

Figura 19: Ficha de ubicación del detector de Radón 222 proporcionado por el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU-PUCP).

5. Luego del tiempo establecido, se recogió los detectores y así mismo se permitió el cambio por unos nuevos hasta cumplir cinco periodos de medición.

6.4. Baño químico.

Una vez realizado el recojo de detectores, estos deben ser sometidos a un baño químico para que las huellas latentes en el detector sean visibles al microscopio óptico. Se enumera los pasos que se siguió para el correcto grabado de las trazas generadas por las partículas alfas del Radón 222.

1. Se colocan los detectores en el portaobjetos (capacidad para cinco detectores), detallando en la parte superior el código correspondiente a cada uno de ellos, tal como se indica en la Figura 20.

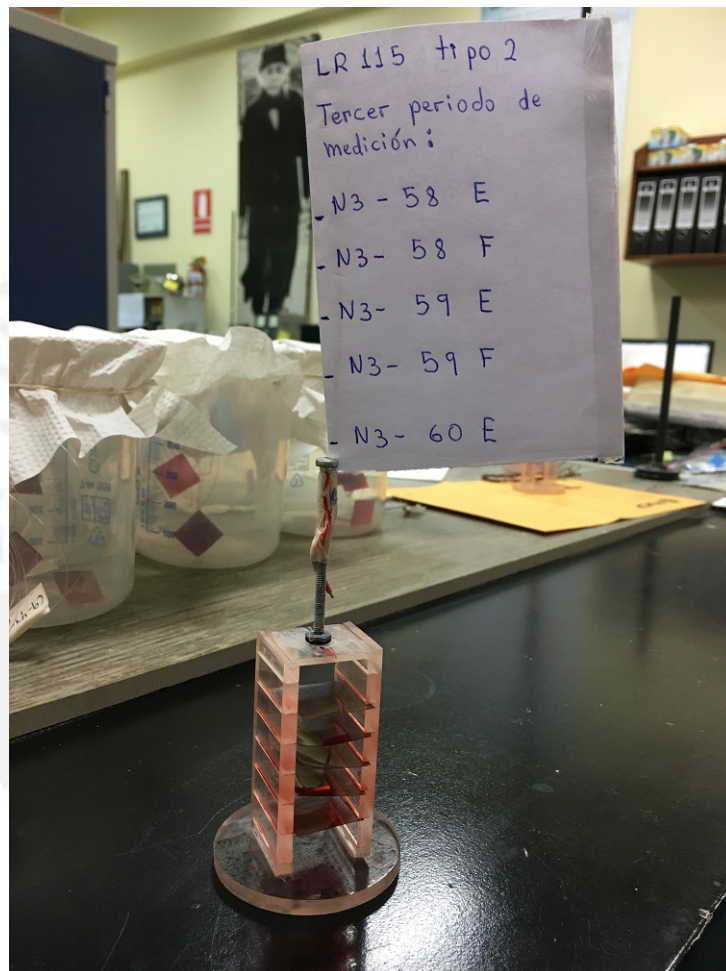


Figura 20: Portaobjetos con capacidad para 5 detectores LR 115

2. Luego se sumergen en una solución de NaOH a 2,5N, la cual se encuentra a una temperatura de $(60 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ por un periodo de 90 minutos de grabado químico, como indica la Figura 16. La estabilidad y el control de los parámetros críticos como temperatura, concentración de la solución y el tiempo de grabado son los requisitos básicos con el fin de obtener resultados fiables y precisos. La variación de estos parámetros nos puede causar resultados erróneos.



Figura 21: Sistema para el grabado de detectores LR 115.

3. Luego de haber sometido los detectores al grabado químico durante 90 minutos estos se sumergen en agua destilada, con el objetivo de detener la corrosión del nitrato de celulosa, durante un tiempo de 30 minutos. Este proceso se repite dos veces cambiando de solución de enjuague.
4. Finalmente se exponen durante 60 minutos a secado por ventilación a temperatura ambiente.

6.5. Lectura de detectores.

Una vez realizado el grabado de detectores LR 115 tipo 2, con el propósito de agrandar el tamaño de las trazas dejadas por las partículas alfas del Radón 222, se procede a realizar el conteo de las mismas teniendo en cuenta el siguiente procedimiento.

1. Se coloca el detector sobre una porta muestras con la parte sensible hacia el lente del microscopio.
2. Se enfoca el lente del microscopio con aumento de 10X sobre la superficie del detector LR 115, para poder observar las trazas generadas por las partículas alfas.
3. El microscopio se encuentra acoplado a una cámara CCD la cual permite transmitir la imagen a una PC, y a través de esta se realiza el conteo de las trazas con el Software Leica Application Suite, como se puede ver en la figura 23.

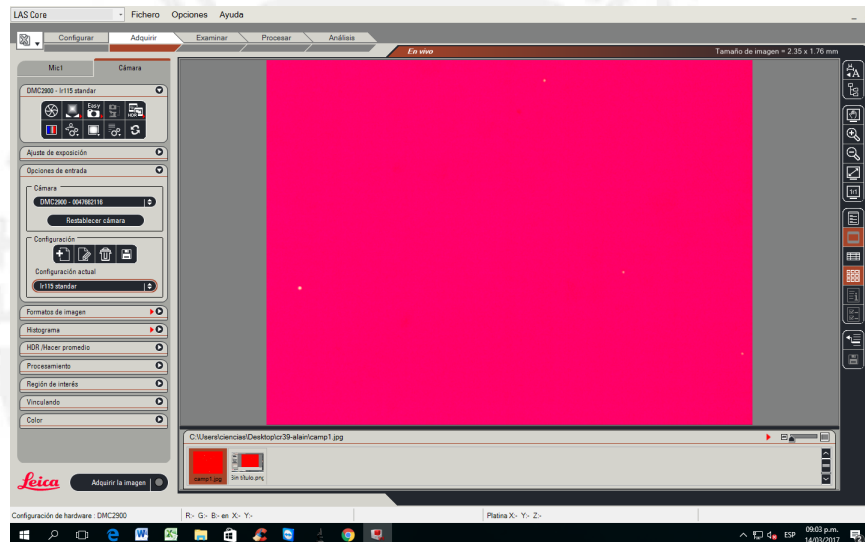


Figura 22: Captura de pantalla del software utilizado para el conteo de las trazas dejadas por las partículas alfas del Radón 2222

4. Se repite el paso número 3 sobre 5 campos diferentes ubicados en el detector, seleccionados al azar y de acuerdo al procedimiento general establecido en el proyecto PIAP-3-P-671-14 "Desarrollo de un sistema de monitoreo de Radón 222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima - Perú".
5. El software nos proporciona un área de lectura de $1,03 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ lo cual permite determinar la densidad de trazas por unidad de área correspondiente para los 5 campos de medición realizados.

6. Finalmente se usa el factor de calibración de $(0,020 \pm 0,002) \frac{\text{Trazas} \times \text{cm}^{-2} \times \text{d}^{-1}}{\text{Bq/m}^3}$ [70] [71] establecido en el proyecto PIAP-3-P-671-14 "Desarrollo de un sistema

de monitoreo de Radón 222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima - Perú”, el cual nos permitió determinar la concentración de actividad del Radón 222 presente en cada habitación donde se ubicó el detector.



7. Resultados.

A continuación se describen los cinco periodos de medición, en los cuales por cada periodo se detalla el intervalo de tiempo en días que duró la medición, hubieron algunos puntos en los cuales se monitoreo por un tiempo mayor a 8 semanas, las temperaturas y humedades fueron obtenidas de SENAMHI [72], así también se presenta la cantidad de detectores repartidos y recogidos. Se presenta gráficos de barras, histogramas, momentos de las concentraciones, histogramas de los logaritmos de las concentraciones, sus respectivos momentos y los test empleados para comprobar la normalidad del Logaritmo Natural de las concentraciones de Radón 222. Y finalmente se presentan las concentraciones de Radón 222 anuales, así como su correspondiente análisis estadístico, la correlación con la ventilación para cada lugar de muestreo y el mapa del Radón 222 para el distrito de Los Olivos del 2015 al 2016.

7.1. Primer periodo.

Se muestra en la tabla 8, las condiciones ambientales del primer periodo, el número de viviendas, el número de detectores distribuidos y el número de detectores recuperados.

Tabla 8: Características del primer periodo de muestreo.

Inicio	15 de Octubre de 2015
Fin	31 de Diciembre de 2015
Temperatura promedia (°C)	19,49
Humedad promedia (%)	84,13
N° de viviendas inicial	6
N° de detectores entregados	12
N° de viviendas monitoreadas	6
N° de detectores recogidos	12
N° de detectores en buen estado	12
N° de detectores en mal estado	0

En la tabla 9 se muestra las densidades de huellas y en la tabla 10 las concentraciones de Radón 222 para cada ambiente (sala y dormitorio), con su respectivo promedio el cual se considera representativo para cada vivienda.

Tabla 9: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el primer periodo de muestreo.

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-001	56	135,92 ± 38,86	194,17 ± 43,46
N-002	56	135,92 ± 23,82	97,09 ± 0,94
N-003	56	116,50 ± 19,45	233,01 ± 65,89
N-004	56	116,50 ± 19,45	174,76 ± 36,37
N-005	56	174,76 ± 36,37	135,92 ± 23,82
N-006	77	155,34 ± 23,83	155,34 ± 23,83

Tabla 10: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el primer periodo de muestreo.

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-001	121,36 ± 36,76	173,37 ± 42,50	147,36 ± 28,09 (19 %)
N-002	121,36 ± 24,49	86,69 ± 8,71	104,02 ± 12,99 (12 %)
N-003	104,02 ± 20,24	208,04 ± 62,40	156,03 ± 32,80 (21 %)
N-004	104,02 ± 20,24	156,03 ± 36,02	130,03 ± 20,66 (16 %)
N-005	156,03 ± 36,02	121,36 ± 24,49	138,70 ± 21,78 (16 %)
N-006	100,87 ± 18,47	100,87 ± 18,47	100,87 ± 18,47 (18 %)

En la figura 23 se presenta el gráfico de barras de las concentraciones para cada lugar de medición, y en la figura 24 su correspondiente histograma. También se presentan el análisis estadístico descriptivo en la tabla 11.

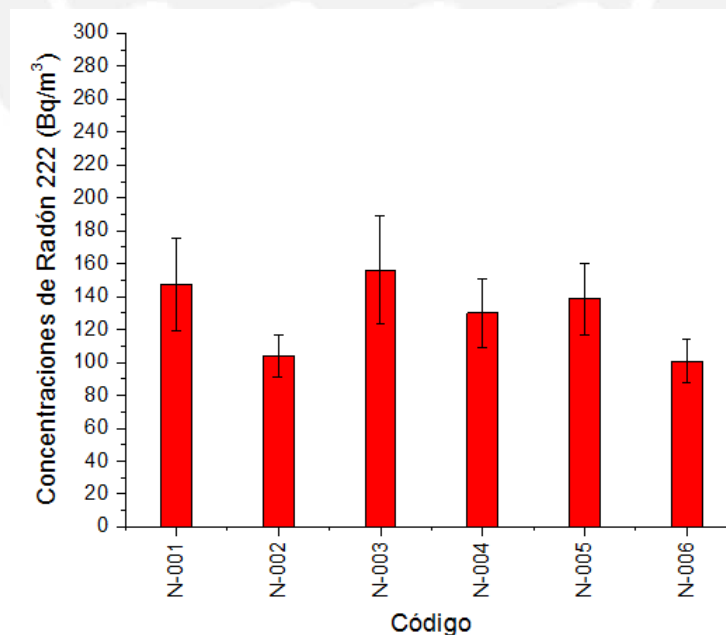


Figura 23: Gráfico de barras para el primer periodo de medición

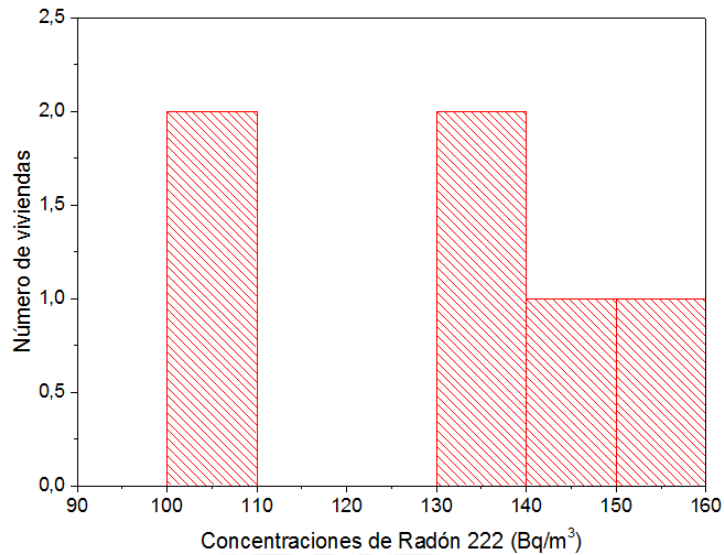


Figura 24: Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el primer periodo de medición

Tabla 11: Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al primer periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
6	100,87	156,3	129,50	127,77	22,70	-0,38	-1,78

Se hace el análisis logarítmico normal de las concentraciones de Radón 222 del primer periodo, se presenta en el gráfico 25 el histograma correspondiente. Y en la tabla 12 se presenta su análisis estadístico descriptivo.

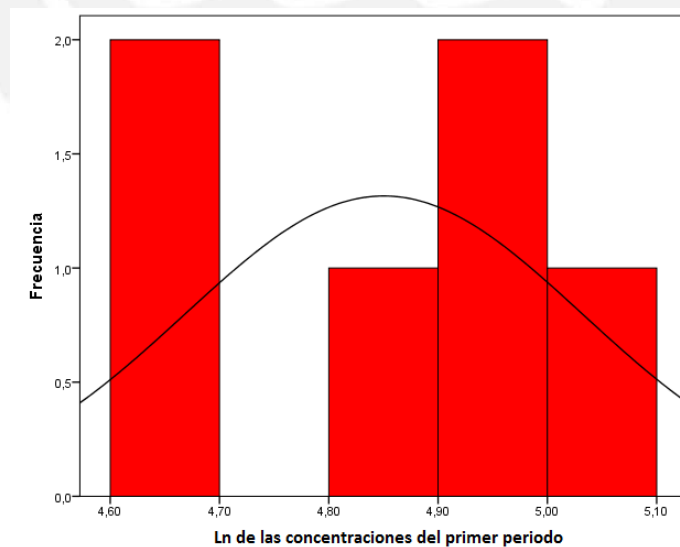


Figura 25: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al primer periodo de medición

Tabla 12: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
6	4,61	5,05	4,85	0,18	-0,52	-1,80

En las tablas 13 y 14 se evalúa la normalidad del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 con los test de Shapiro - Wilk y Kolmogorov - Smirnov.

Tabla 13: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
6	0,89	0,31	La distribución de prueba es normal

Tabla 14: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al primer periodo de medición.

Test de Normalidad Kolmogorov - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
6	0,21	1	La distribución de prueba es normal

En este periodo hubo pocas mediciones debido que las personas contactadas en un inicio fueron relativamente pocas y algunas no respondieron como se esperaba, por lo que se tuvo que cambiar de estrategia en los siguientes periodos. A pesar de este inconveniente los resultados muestran lo esperado en una investigación de esta naturaleza, que se manifiesta en el comportamiento Log normal de las mediciones de Radón 222.

7.2. Segundo periodo.

Se muestra en la tabla 15, las condiciones ambientales del segundo periodo, el número de viviendas (el cual aumento significativamente), el número de detectores distribuidos y el número de detectores recuperados.

Tabla 15: Características del segundo periodo de muestreo.

Inicio	7 de Enero de 2016
Fin	17 de Marzo de 2016
Temperatura promedio (°C)	24,22
Humedad promedio (%)	78,29
N° de viviendas inicial	44
N° de detectores entregados	88
N° de viviendas monitoreadas	24
N° de detectores recogidos	44
N° de detectores en buen estado	40
N° de detectores en mal estado	4

En la tabla 16 se muestra las densidades de huellas y en la tabla 17 las concentraciones de Radón 222 correspondientes al segundo periodo.

Tabla 16: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el segundo periodo de medición (N.D.es un detector no entregado, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-001	56	77,67 ± 19,43	174,76 ± 36,37
N-002	56	194,17 ± 43,46	194,17 ± 30,76
N-004	56	271,84 ± 36,42	485,44 ± 110,80
N-005	56	213,59 ± 94,15	77,67 ± 19,43
N-007	56	D.D.	N.D.
N-008	56	116,50 ± 19,45	427,18 ± 65,98
N-011	56	233,01 ± 58,30	D.D.
N-012	56	135,92 ± 23,82	N.D.
N-016	56	194,17 ± 30,76	291,26 ± 61,47
N-017	56	213,59 ± 36,39	310,68 ± 56,69
N-018	56	194,17 ± 30,76	466,02 ± 89,10
N-019	56	310,68 ± 47,66	194,17 ± 53,21
N-020	56	271,84 ± 64,45	407,77 ± 47,73
N-021	56	D.D.	271,84 ± 19,60
N-022	56	271,84 ± 47,64	213,59 ± 36,39
N-023	56	271,84 ± 36,42	155,34 ± 23,83
N-027	56	233,01 ± 38,90	D.D.
N-030	56	233,01 ± 72,69	291,26 ± 68,71
N-031	56	349,51 ± 38,98	368,93 ± 83,59
N-032	56	213,59 ± 47,61	174,76 ± 36,37
N-033	56	77,67 ± 19,43	N.D.
N-034	56	77,67 ± 19,43	155,34 ± 49,53
N-036	56	116,50 ± 19,45	252,43 ± 38,91
N-045	56	135,92 ± 23,82	252,43 ± 49,57

Tabla 17: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el segundo periodo de medición (N.D. es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-001	69,35 ± 18,68	156,04 ± 36,03	112,69 ± 20,29 (18 %)
N-002	173,37 ± 42,50	173,37 ± 32,48	173,37 ± 26,74 (15 %)
N-004	242,71 ± 40,58	433,43 ± 108,01	338,07 ± 57,69 (17 %)
N-005	190,71 ± 86,20	69,35 ± 18,68	130,03 ± 44,10 (34 %)
N-007	D.D.	N.D.	N.D.
N-008	104,02 ± 20,24	381,41 ± 70,18	242,71 ± 36,52 (15 %)
N-011	208,04 ± 56,06	D.D.	208,04 ± 56,06 (13 %)
N-012	121,36 ± 24,49	N.D.	121,36 ± 12,24 (10 %)
N-016	173,37 ± 32,48	260,05 ± 60,73	216,71 ± 34,44 (16 %)
N-017	190,71 ± 37,67	277,39 ± 57,72	234,05 ± 34,46 (15 %)
N-018	173,37 ± 32,48	416,09 ± 89,78	294,73 ± 47,74 (16 %)
N-019	277,39 ± 50,80	173,37 ± 50,57	225,38 ± 35,84 (16 %)
N-020	242,71 ± 62,45	364,08 ± 56,05	303,40 ± 41,96 (14 %)
N-021	D.D.	242,71 ± 29,92	242,71 ± 29,92 (12 %)
N-022	242,71 ± 48,97	190,71 ± 37,67	216,71 ± 30,89 (14 %)
N-023	242,71 ± 40,58	138,70 ± 25,40	190,71 ± 23,94 (13 %)
N-027	208,04 ± 40,49	D.D.	208,04 ± 40,49 (19 %)
N-030	208,04 ± 68,15	260,05 ± 66,63	234,05 ± 47,66 (20 %)
N-031	312,06 ± 46,75	329,40 ± 81,58	320,73 ± 47,01 (15 %)
N-032	190,71 ± 46,59	156,04 ± 36,03	173,37 ± 29,45 (17 %)
N-033	69,35 ± 18,68	N.D.	69,35 ± 18,68 (27 %)
N-034	69,35 ± 18,68	138,70 ± 46,35	104,02 ± 24,99 (24 %)
N-036	104,02 ± 20,24	225,38 ± 41,41	164,70 ± 23,05 (14 %)
N-045	121,36 ± 24,49	225,38 ± 49,66	173,37 ± 27,69 (16 %)

En la figura 26 se presenta el gráfico de barras de las concentraciones para cada lugar de medición, y en la figura 27 su correspondiente histograma. También se presentan el análisis estadístico descriptivo en la tabla 18.

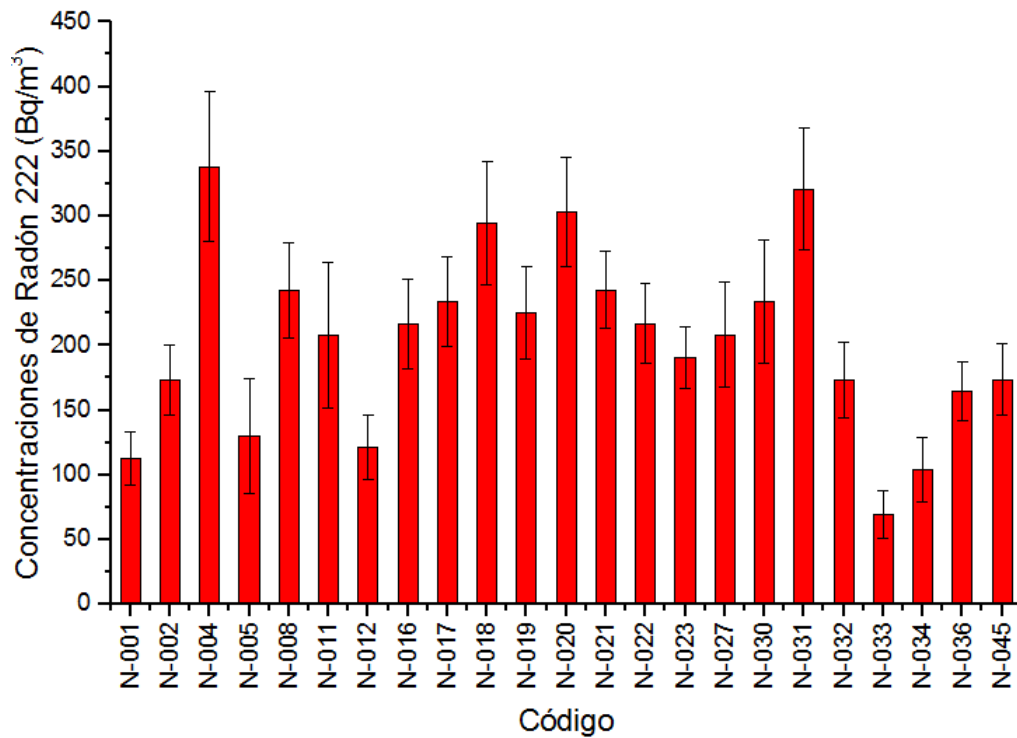


Figura 26: Gráfico de barras para el segundo periodo de medición

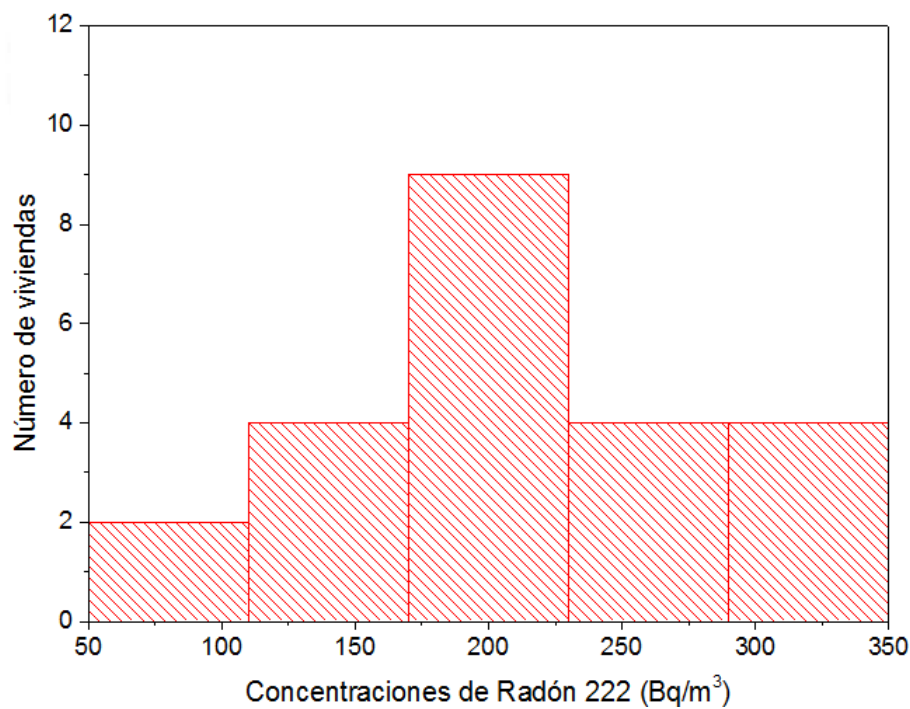


Figura 27: Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el segundo periodo de medición

Tabla 18: Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al segundo periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
23	69,35	338,07	204,27	191,28	70,27	0,07	-0,37

Se hace el análisis logarítmico normal de las concentraciones de Radón 222 del segundo periodo, se presenta en el gráfico 28 el histograma correspondiente. Y en la tabla 19 se presenta su análisis estadístico descriptivo.

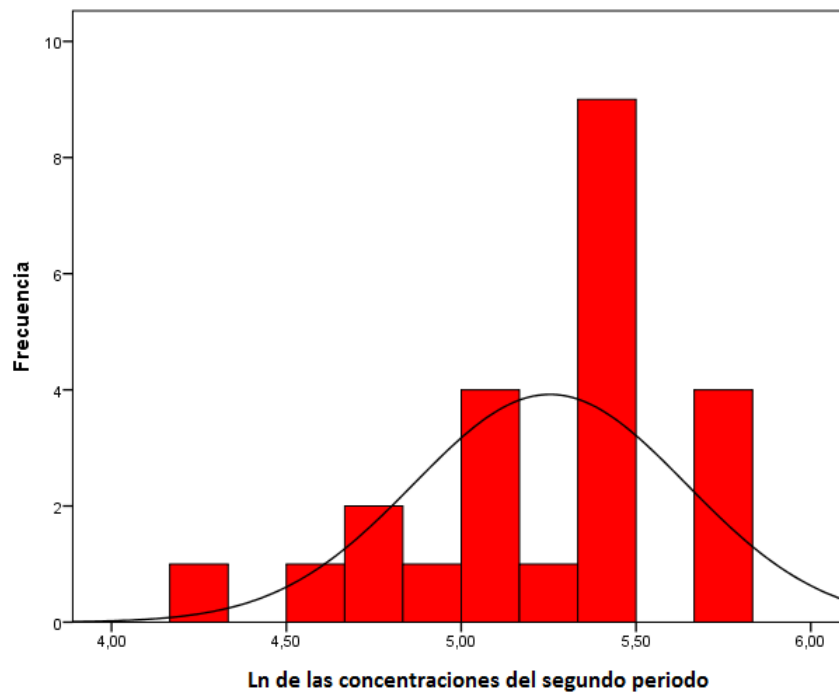


Figura 28: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al segundo periodo de medición

Tabla 19: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
23	4,24	5,82	5,25	0,40	-0,86	0,70

En las tablas 20 y 21 se evalúa la normalidad del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 con los test de Shapiro - Wilk y Kolmogorov - Smirnov.

Tabla 20: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
23	0,94	0,17	La distribución de prueba es normal

Tabla 21: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al segundo periodo de medición.

Test de Normalidad Kolmogorov - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
23	0,15	0,63	La distribución de prueba es normal

Se puede apreciar que al aumentar la cantidad de puntos en el segundo periodo de medición, la estadística en general mejora y permite una mejor visualización de la curva típica Log normal en este tipo de investigación.

7.3. Tercer periodo.

Se muestra en la tabla 22, las condiciones ambientales del tercer periodo, el número de viviendas (se consiguió la mayor cantidad de sitios a medir), el número de detectores distribuidos y el número de detectores recuperados.

Tabla 22: Características del tercer periodo de muestreo.

Inicio	1 de Abril de 2016
Fin	9 de Julio de 2016
Temperatura promedia (°C)	19,82
Humedad promedia (%)	83,91
N° de viviendas inicial	81
N° de detectores entregados	162
N° de viviendas monitoreadas	47
N° de detectores recogidos	94
N° de detectores en buen estado	70
N° de detectores en mal estado	24

En la tabla 23 y 24 se muestra las densidades de huellas, en la tabla 25 y 26 las concentraciones de Radón 222 correspondientes al tercer periodo.

Tabla 23: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el tercer periodo de medición (N.D. es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-001	108	388,35 ± 53,31	291,26 ± 68,71
N-004	56	194,17 ± 30,76	252,43 ± 58,30
N-005	79	233,01 ± 38,90	194,17 ± 43,46
N-007	56	155,34 ± 38,86	233,01 ± 23,89
N-011	56	252,43 ± 84,67	174,76 ± 36,37
N-016	82	271,84 ± 36,42	252,43 ± 38,91
N-018	77	213,59 ± 36,39	213,59 ± 56,65
N-019	79	155,34 ± 23,83	155,34 ± 38,86
N-020	73	174,76 ± 36,37	194,17 ± 30,76
N-024	56	233,01 ± 49,56	213,59 ± 56,65
N-025	72	174,76 ± 56,64	155,34 ± 23,83
N-032	72	291,26 ± 43,51	174,76 ± 36,37
N-034	67	174,76 ± 19,49	174,76 ± 19,49
N-035	66	194,17 ± 30,76	155,34 ± 23,83
N-036	56	155,34 ± 23,83	213,59 ± 19,53
N-043	56	116,50 ± 19,45	213,59 ± 36,39
N-044	56	174,76 ± 47,59	213,59 ± 36,39
N-046	82	213,59 ± 71,37	310,68 ± 83,57
N-050	79	135,92 ± 23,82	116,50 ± 19,45
N-052	56	135,92 ± 23,82	174,76 ± 36,37
N-053	56	310,68 ± 56,69	155,34 ± 38,86
N-055	56	233,01 ± 38,90	330,10 ± 49,61
N-056	56	D.D.	135,92 ± 23,82
N-057	56	233,01 ± 23,89	D.D.
N-058	56	252,43 ± 38,91	D.D.
N-059	56	252,43 ± 23,91	D.D.
N-061	56	174,76 ± 36,37	330,10 ± 49,61
N-062	56	D.D.	330,10 ± 58,34
N-063	56	D.D.	310,68 ± 47,66
N-065	56	407,77 ± 77,77	D.D.
N-067	56	407,77 ± 68,08	D.D.
N-068	56	D.D.	D.D.
N-069	56	D.D.	D.D.

Tabla 24: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-070	56	D.D.	D.D.
N-071	56	D.D.	D.D.
N-072	56	D.D.	D.D.
N-073	56	D.D.	D.D.
N-074	56	D.D.	310,68 ± 47,66
N-075	56	291,26 ± 43,51	194,17 ± 30,76
N-077	56	213,59 ± 36,39	291,26 ± 43,51
N-079	56	D.D.	368,93 ± 36,50
N-080	56	213,59 ± 36,39	349,51 ± 84,71
N-082	56	252,43 ± 38,91	349,51 ± 24,02
N-083	56	310,68 ± 56,69	213,59 ± 36,39
N-084	56	252,43 ± 49,57	310,68 ± 47,66
N-085	56	D.D.	252,43 ± 38,91
N-089	56	D.D.	233,01 ± 49,56

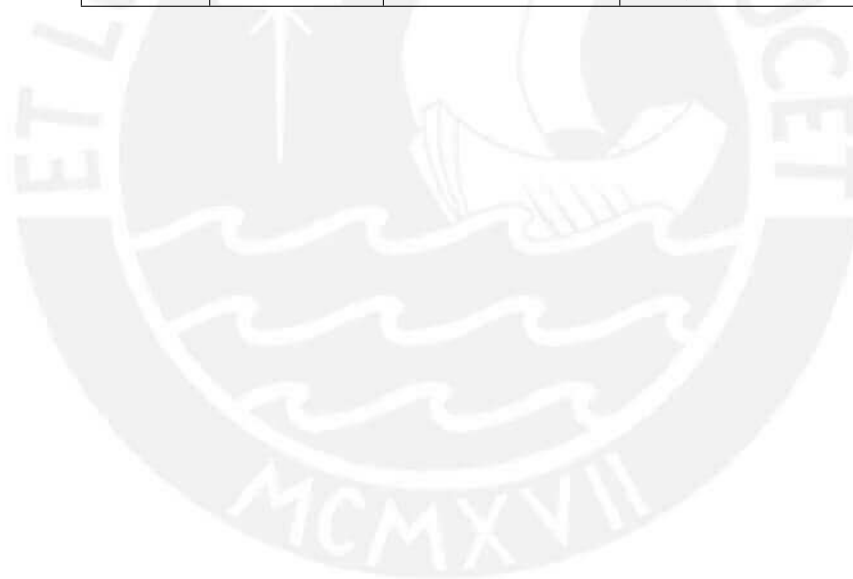


Tabla 25: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el tercer periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-001	179,79 ± 30,54	134,84 ± 34,55	157,32 ± 23,05 (15 %)
N-004	173,37 ± 32,48	225,38 ± 56,73	199,38 ± 32,68 (16 %)
N-005	147,47 ± 28,70	122,90 ± 30,13	135,18 ± 20,80 (15 %)
N-007	138,70 ± 37,37	208,04 ± 29,80	173,37 ± 23,90 (14 %)
N-011	225,38 ± 78,89	156,03 ± 36,02	190,71 ± 43,36 (23 %)
N-016	165,76 ± 27,71	153,92 ± 28,28	159,84 ± 19,80 (12 %)
N-018	138,70 ± 27,40	138,70 ± 39,31	138,70 ± 23,96 (17 %)
N-019	98,32 ± 18,00	98,32 ± 26,49	98,32 ± 16,01 (16 %)
N-020	119,70 ± 27,64	133,00 ± 24,91	126,35 ± 18,60 (15 %)
N-024	208,04 ± 48,89	190,71 ± 54,06	199,38 ± 36,44 (18 %)
N-025	121,36 ± 41,16	107,87 ± 19,75	114,62 ± 22,83 (20 %)
N-032	202,27 ± 36,36	121,36 ± 28,02	161,81 ± 22,95 (14 %)
N-034	130,42 ± 19,54	130,42 ± 19,54	130,42 ± 13,81 (11 %)
N-035	147,10 ± 27,56	117,68 ± 21,55	132,39 ± 17,49 (13 %)
N-036	138,70 ± 25,40	190,71 ± 25,84	164,70 ± 18,12 (11 %)
N-043	104,02 ± 20,24	190,71 ± 37,67	147,36 ± 21,38 (15 %)
N-044	156,03 ± 45,27	190,71 ± 37,67	173,37 ± 29,45 (17 %)
N-046	130,24 ± 45,43	189,44 ± 54,37	159,84 ± 35,42 (22 %)
N-050	86,03 ± 17,36	73,74 ± 14,35	79,88 ± 11,26 (14 %)
N-052	121,36 ± 24,49	156,03 ± 36,02	138,70 ± 21,78 (16 %)
N-053	277,39 ± 57,72	138,70 ± 37,37	208,04 ± 34,38 (17 %)
N-055	208,04 ± 40,49	294,73 ± 53,20	251,39 ± 33,43 (13 %)
N-056	D.D.	121,36 ± 24,49	121,36 ± 24,49 (20 %)
N-057	208,04 ± 29,80	D.D.	208,04 ± 29,80 (14 %)
N-058	225,38 ± 41,41	D.D.	225,38 ± 41,41 (18 %)
N-059	225,38 ± 31,04	D.D.	225,38 ± 31,04 (14 %)
N-061	156,03 ± 36,02	294,73 ± 53,20	225,38 ± 32,13 (14 %)
N-062	D.D.	294,73 ± 59,85	294,73 ± 59,85 (20 %)
N-063	D.D.	277,39 ± 50,80	277,39 ± 50,80 (18 %)
N-065	364,08 ± 78,40	D.D.	364,08 ± 78,40 (22 %)
N-067	364,08 ± 70,85	D.D.	364,08 ± 70,85 (19 %)
N-068	D.D.	D.D.	N.D.
N-069	D.D.	D.D.	N.D.

Tabla 26: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el tercer periodo de medición (N.D. es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-070	D.D.	D.D.	N.D.
N-071	D.D.	D.D.	N.D.
N-072	D.D.	D.D.	N.D.
N-073	D.D.	D.D.	N.D.
N-074	D.D.	277,39 ± 50,80	277,39 ± 50,80 (18 %)
N-075	260,06 ± 46,75	173,37 ± 32,48	216,71 ± 28,46 (13 %)
N-077	190,71 ± 37,67	260,06 ± 46,75	225,38 ± 30,02 (13 %)
N-079	D.D.	329,40 ± 46,34	329,40 ± 46,34 (14 %)
N-080	190,71 ± 37,67	312,07 ± 81,82	251,39 ± 45,04 (18 %)
N-082	225,38 ± 41,41	312,07 ± 37,87	268,72 ± 28,06 (10 %)
N-083	277,39 ± 57,72	190,71 ± 37,67	234,05 ± 34,46 (15 %)
N-084	225,38 ± 49,66	277,39 ± 50,80	251,39 ± 35,52 (14 %)
N-085	D.D.	225,38 ± 41,41	225,38 ± 41,41 (18 %)
N-089	D.D.	208,04 ± 48,89	208,04 ± 48,89 (24 %)

En la figura 29 se presenta el gráfico de barras de las concentraciones para cada lugar de medición, y en la figura 30 su correspondiente histograma. Y se presentan el análisis estadístico descriptivo en la tabla 27.

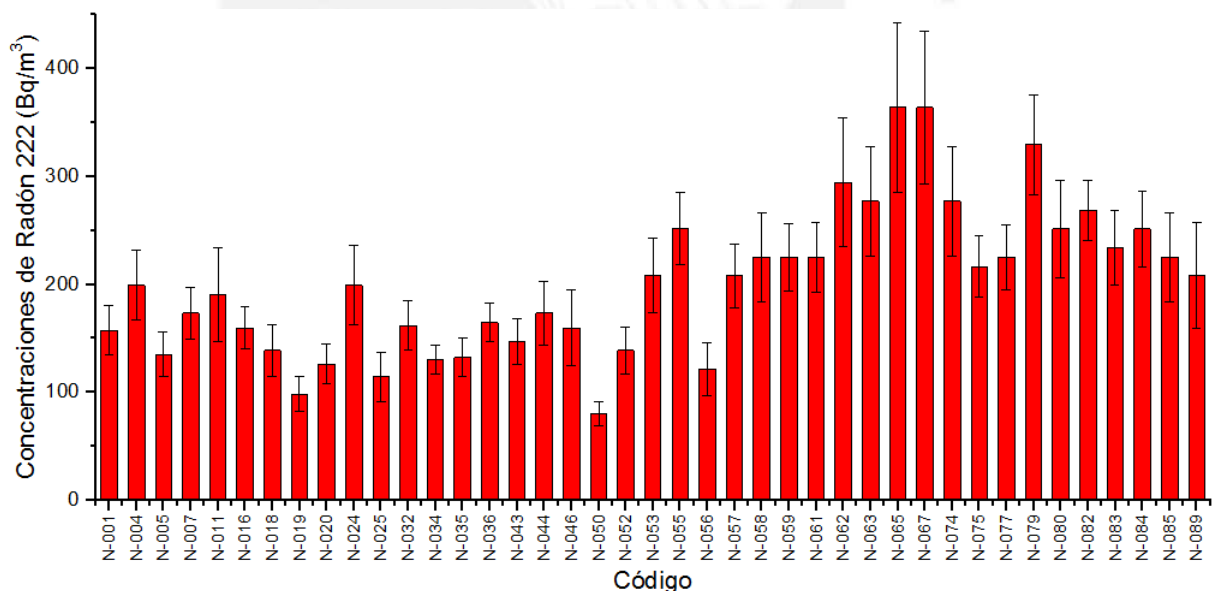


Figura 29: Gráfico de barras para el tercer periodo de medición

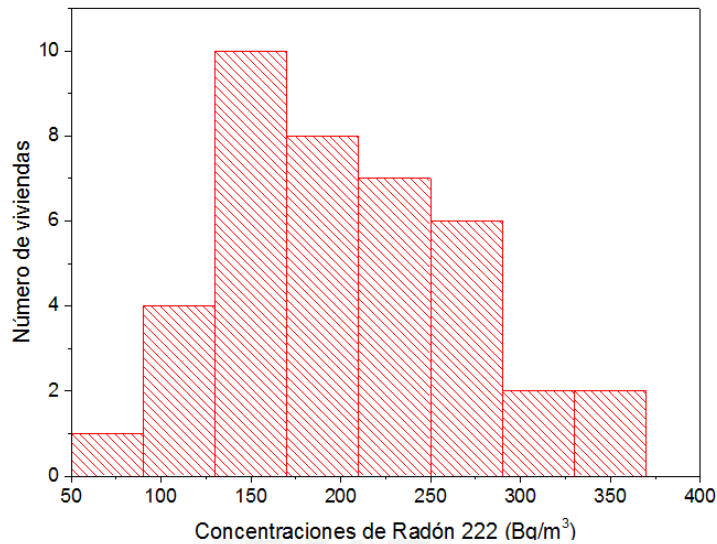


Figura 30: Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el tercer periodo de medición

Tabla 27: Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al tercer periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
41	79,88	364,08	200,85	189,68	68,16	0,58	0,06

Se hace el análisis logarítmico normal de las concentraciones de Radón 222 del primer periodo, se presenta en el gráfico 31 el histograma correspondiente. Y en la tabla 28 se presenta su análisis estadístico descriptivo.

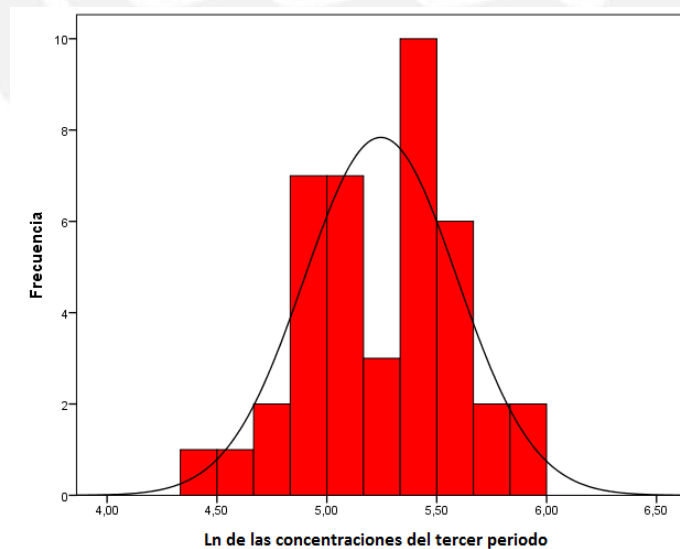


Figura 31: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al tercer periodo de medición

Tabla 28: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
41	4,38	5,90	5,25	0,35	-0,24	-0,20

En las tablas 29 y 30 se evalúa la normalidad del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 con los test de Shapiro - Wilk y Kolmogorov - Smirnov.

Tabla 29: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
41	0,98	0,81	La distribución de prueba es normal

Tabla 30: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al tercer periodo de medición.

Test de Normalidad Kolmogorov - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
41	0,10	0,87	La distribución de prueba es normal

Este es el periodo con mayor cantidad de datos obtenidos, por lo cual el análisis estadístico mejor en relación a los dos periodos anteriores.

7.4. Cuarto periodo.

Se muestra en la tabla 31, las condiciones ambientales del cuarto periodo, el número de viviendas (que bajo relativamente respecto al periodo anterior), el número de detectores distribuidos y el número de detectores recuperados.

Tabla 31: Características del cuarto periodo de muestreo.

Inicio	9 de Julio de 2016
Fin	1 de Octubre de 2016
Temperatura promedio (°C)	16,58
Humedad promedio (%)	86,35
N° de viviendas inicial	34
N° de detectores entregados	68
N° de viviendas monitoreadas	27
N° de detectores recogidos	54
N° de detectores en buen estado	36
N° de detectores en mal estado	18

En la tabla 32 se muestra las densidades de huellas y en la tabla 33 las concentraciones de Radón 222 correspondientes al cuarto periodo.

Tabla 32: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el cuarto periodo de medición (N.D.es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-052	84	D.D.	D.D.
N-053	84	D.D.	D.D.
N-055	84	485,44 ± 227,74	291,26 ± 53,43
N-056	84	D.D.	D.D.
N-057	84	446,60 ± 130,33	D.D.
N-058	84	D.D.	D.D.
N-059	84	D.D.	D.D.
N-061	84	D.D.	310,68 ± 81,29
N-062	84	543,69 ± 68,35	252,43 ± 50,21
N-065	84	D.D.	310,68 ± 81,29
N-067	84	233,01 ± 86,87	135,92 ± 53,19
N-068	84	621,36 ± 146,72	349,51 ± 65,46
N-069	84	349,51 ± 110,75	485,44 ± 97,20
N-070	84	427,18 ± 159,95	563,11 ± 202,65
N-071	84	291,26 ± 56,49	D.D.
N-073	84	407,77 ± 123,47	737,86 ± 185,72
N-077	84	582,52 ± 85,01	D.D.
N-082	84	310,68 ± 62,52	233,01 ± 53,23
N-083	84	388,35 ± 106,01	D.D.
N-084	84	427,18 ± 147,30	679,61 ± 256,95
N-085	84	776,70 ± 200,34	271,84 ± 76,63
N-086	84	271,84 ± 61,87	D.D.
N-087	84	233,01 ± 53,23	349,51 ± 53,29
N-088	84	233,01 ± 53,23	601,94 ± 144,12
N-089	84	524,27 ± 174,14	291,26 ± 118,94
N-090	84	174,76 ± 43,45	349,51 ± 86,90
N-091	84	D.D.	446,60 ± 109,84

Tabla 33: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el cuarto periodo de medición (N.D. es un detector no devuelto, D.D. es un detector dañado en el proceso de grabación).

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-052	D.D.	D.D.	N.D.
N-053	D.D.	D.D.	N.D.
N-055	288,95 ± 138,60	173,37 ± 36,22	231,16 ± 71,63 (31 %)
N-056	D.D.	D.D.	N.D.
N-057	265,83 ± 82,00	D.D.	265,83 ± 82,00 (31 %)
N-058	D.D.	D.D.	N.D.
N-059	D.D.	D.D.	N.D.
N-061	D.D.	184,93 ± 51,80	184,93 ± 51,80 (28 %)
N-062	323,62 ± 51,98	150,25 ± 33,45	236,94 ± 30,91 (13 %)
N-065	D.D.	184,93 ± 51,80	184,93 ± 51,80 (28 %)
N-067	138,70 ± 53,53	80,91 ± 32,68	109,80 ± 31,36 (29 %)
N-068	369,86 ± 94,84	208,04 ± 44,17	288,95 ± 52,31 (18 %)
N-069	208,04 ± 69,13	288,95 ± 64,67	248,50 ± 47,33 (19 %)
N-070	254,28 ± 98,54	335,18 ± 125,20	294,73 ± 79,66 (27 %)
N-071	173,37 ± 37,83	D.D.	173,37 ± 37,83 (22 %)
N-073	242,72 ± 77,40	439,20 ± 118,95	340,96 ± 70,96 (21 %)
N-077	346,74 ± 61,34	D.D.	346,74 ± 61,34 (18 %)
N-082	184,93 ± 41,55	138,70 ± 34,58	161,81 ± 27,03 (17 %)
N-083	231,16 ± 67,20	D.D.	231,16 ± 67,20 (29 %)
N-084	254,28 ± 91,29	404,53 ± 158,21	329,40 ± 91,33 (28 %)
N-085	462,32 ± 127,90	161,81 ± 48,40	312,07 ± 68,37 (22 %)
N-086	161,81 ± 40,22	D.D.	161,81 ± 40,22 (25 %)
N-087	138,70 ± 34,58	208,04 ± 37,93	173,37 ± 25,67 (15 %)
N-088	138,70 ± 34,58	358,30 ± 92,97	248,50 ± 49,60 (20 %)
N-089	312,07 ± 108,25	173,37 ± 72,89	242,72 ± 65,25 (27 %)
N-090	104,02 ± 27,88	208,04 ± 55,76	156,03 ± 31,17 (20 %)
N-091	D.D.	265,83 ± 70,58	265,83 ± 70,58 (27 %)

En la figura 32 se presenta el gráfico de barras de las concentraciones para cada lugar de medición, y en la figura 33 su correspondiente histograma. También se presentan el análisis estadístico descriptivo en la tabla 34.

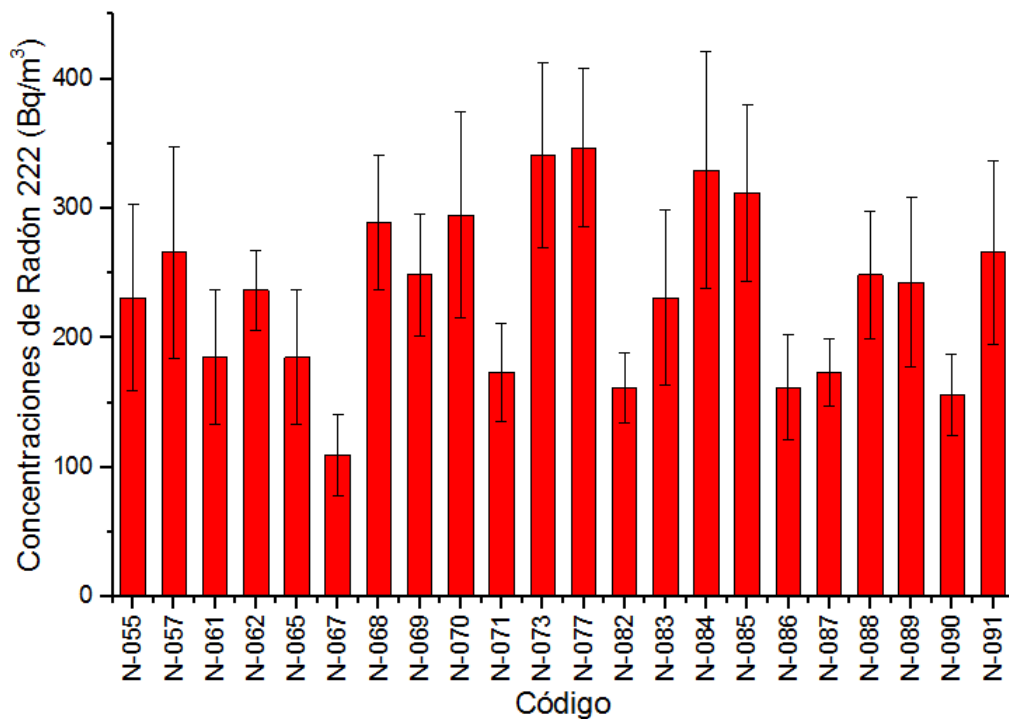


Figura 32: Gráfico de barras para el cuarto periodo de medición

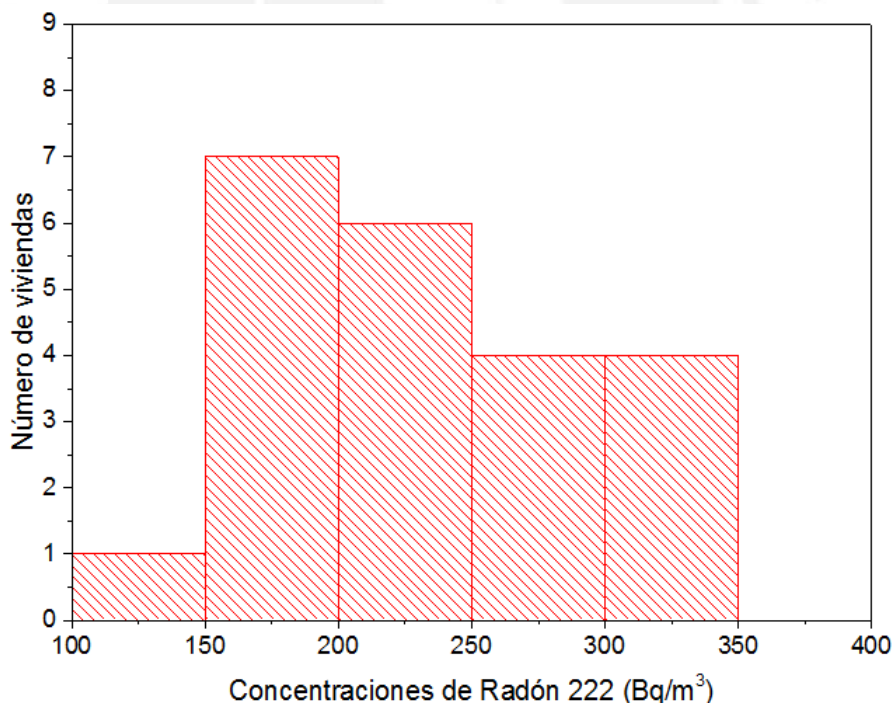


Figura 33: Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el cuarto periodo de medición

Tabla 34: Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al cuarto periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
22	109,80	346,74	235,89	226,37	66,41	0,02	-0,87

Se hace el análisis logarítmico normal de las concentraciones de Radón 222 del primer periodo, se presenta en el gráfico 34 el histograma correspondiente. Y en la tabla 35 se presenta su análisis estadístico descriptivo.

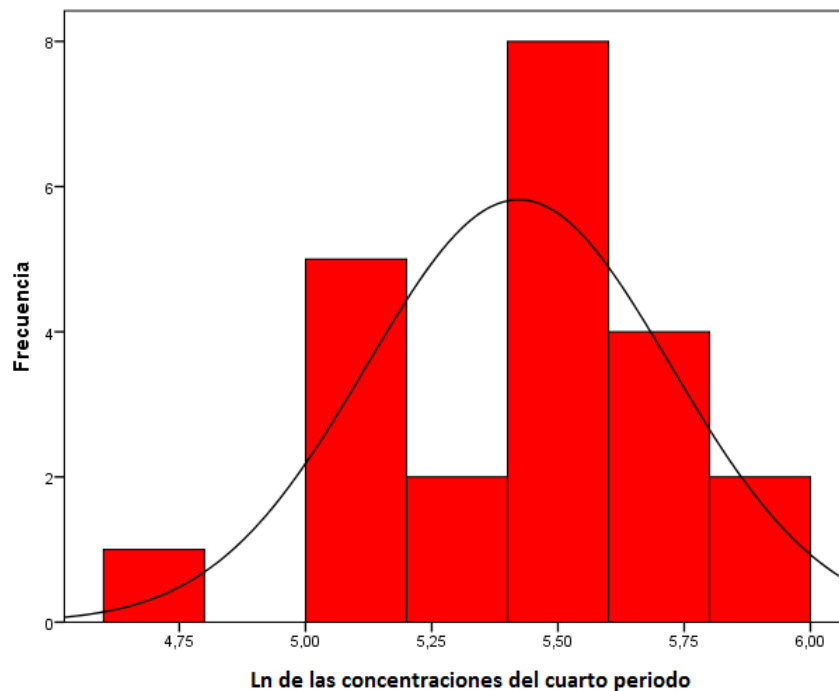


Figura 34: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al cuarto periodo de medición

Tabla 35: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
22	4,70	5,85	5,42	0,30	-0,544	-0,16

En las tablas 36 y 37 se evalúa la normalidad del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 con los test de Shapiro - Wilk y Kolmogorov - Smirnov.

Tabla 36: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
22	0,95	0,28	La distribución de prueba es normal

Tabla 37: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al cuarto periodo de medición.

Test de Normalidad Kolmogorv - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
22	0,16	0,60	La distribución de prueba es normal

El comportamiento estadístico de los datos de este periodo es similar a los obtenidos en los periodos anteriores.

7.5. Quinto periodo.

Se muestra en la tabla 38, las condiciones ambientales del quinto periodo, el número de viviendas, el número de detectores distribuidos y el número de detectores recuperados.

Tabla 38: Características del quinto periodo de muestreo.

Inicio	1 de Octubre de 2016
Fin	30 de Enero de 2017
Temperatura promedia (°C)	20,65
Humedad promedia (%)	80,39
N° de viviendas inicial	35
N° de detectores entregados	70
N° de viviendas monitoreadas	25
N° de detectores recogidos	46
N° de detectores en buen estado	43
N° de detectores en mal estado	3

En la tabla 39 se muestra las densidades de huellas y en la tabla 40 las concentraciones de Radón 222 correspondientes al quinto periodo.

Tabla 39: Resultados obtenidos de las densidades de huellas ($Trazas/mm^2$) para el quinto periodo de medición.

Código	Días de exposición	Densidad de huellas ($Trazas/mm^2$)	
		Sala	Dormitorio
N-001	126	466,02 ± 64,56	854,37 ± 57,22
N-016	126	135,92 ± 23,82	194,17 ± 30,76
N-017	126	N.D.	252,43 ± 23,91
N-019	126	640,78 ± 24,58	N.D.
N-028	126	D.D.	D.D.
N-045	126	407,77 ± 36,54	407,77 ± 47,73
N-052	126	601,94 ± 99,18	621,36 ± 72,90
N-053	126	621,36 ± 66,12	834,95 ± 66,34
N-055	126	1165,05 ± 196,91	1087,38 ± 78,38
N-056	129	601,94 ± 56,91	776,70 ± 126,81
N-057	129	951,46 ± 37,48	1048,54 ± 57,52
N-058	129	815,53 ± 73,08	951,46 ± 84,03
N-059	129	349,51 ± 58,35	427,18 ± 65,98
N-060	126	291,26 ± 30,83	N.D.
N-061	129	679,61 ± 53,58	563,11 ± 36,74
N-062	129	D.D.	233,01 ± 23,89
N-065	132	349,51 ± 49,62	233,01 ± 23,89
N-067	132	291,26 ± 30,83	213,59 ± 36,39
N-071	139	N.D.	310,68 ± 56,69
N-072	126	349,51 ± 65,93	271,84 ± 19,60
N-080	126	271,84 ± 36,42	601,94 ± 83,72
N-085	142	485,44 ± 61,58	271,84 ± 36,42
N-086	142	271,84 ± 36,42	213,59 ± 36,39
N-087	148	135,92 ± 23,82	135,92 ± 38,86
N-089	139	291,26 ± 53,25	310,68 ± 36,45

Tabla 40: Resultados obtenidos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) para el quinto periodo de medición.

Código	Concentración de Radón 222 (Bq/m^3)		
	Sala	Dormitorio	Promedio
N-001	184,93 ± 31,60	339,04 ± 40,80	261,98 ± 25,80 (10 %)
N-016	53,94 ± 10,88	77,05 ± 14,43	65,50 ± 9,04 (14 %)
N-017	N.D.	100,17 ± 13,80	100,17 ± 13,80 (14 %)
N-019	254,28 ± 27,23	N.D.	254,28 ± 27,23 (11 %)
N-028	D.D.	D.D.	N.D.
N-045	161,81 ± 21,73	161,81 ± 24,91	161,81 ± 16,53 (10 %)
N-052	238,87 ± 46,04	246,57 ± 38,01	242,72 ± 29,85 (12 %)
N-053	246,57 ± 36,01	331,33 ± 42,32	288,95 ± 27,78 (10 %)
N-055	462,32 ± 90,79	431,50 ± 53,19	446,91 ± 52,61 (12 %)
N-056	233,31 ± 32,11	301,05 ± 57,64	267,18 ± 32,99 (12 %)
N-057	368,78 ± 39,64	406,41 ± 46,35	387,60 ± 30,50 (8 %)
N-058	316,10 ± 42,45	368,78 ± 49,20	342,44 ± 32,49 (9 %)
N-059	135,47 ± 26,36	165,58 ± 30,47	150,52 ± 20,14 (13 %)
N-060	115,58 ± 16,83	N.D.	115,58 ± 16,83 (15 %)
N-061	263,42 ± 33,54	218,26 ± 26,06	240,84 ± 21,24 (9 %)
N-062	D.D.	90,31 ± 12,93	90,31 ± 12,93 (14 %)
N-065	132,39 ± 22,99	88,26 ± 12,64	110,33 ± 13,12 (12 %)
N-067	110,33 ± 16,07	80,91 ± 15,98	95,62 ± 11,33 (12 %)
N-071	N.D.	111,76 ± 23,25	111,76 ± 23,25 (21 %)
N-072	138,70 ± 29,61	107,87 ± 13,30	123,29 ± 16,23 (13 %)
N-080	107,87 ± 18,04	238,87 ± 40,92	173,37 ± 22,36 (13 %)
N-085	170,93 ± 27,61	95,72 ± 16,00	133,32 ± 15,96 (12 %)
N-086	95,72 ± 16,00	75,21 ± 14,86	85,46 ± 10,92 (13 %)
N-087	45,92 ± 9,26	45,92 ± 13,91	45,92 ± 8,36 (18 %)
N-089	104,77 ± 21,83	111,76 ± 17,23	108,26 ± 13,91 (13 %)

En la figura 35 se presenta el gráfico de barras de las concentraciones para cada lugar de medición, y en la figura 36 su correspondiente histograma. También se presentan el análisis estadístico descriptivo en la tabla 41.

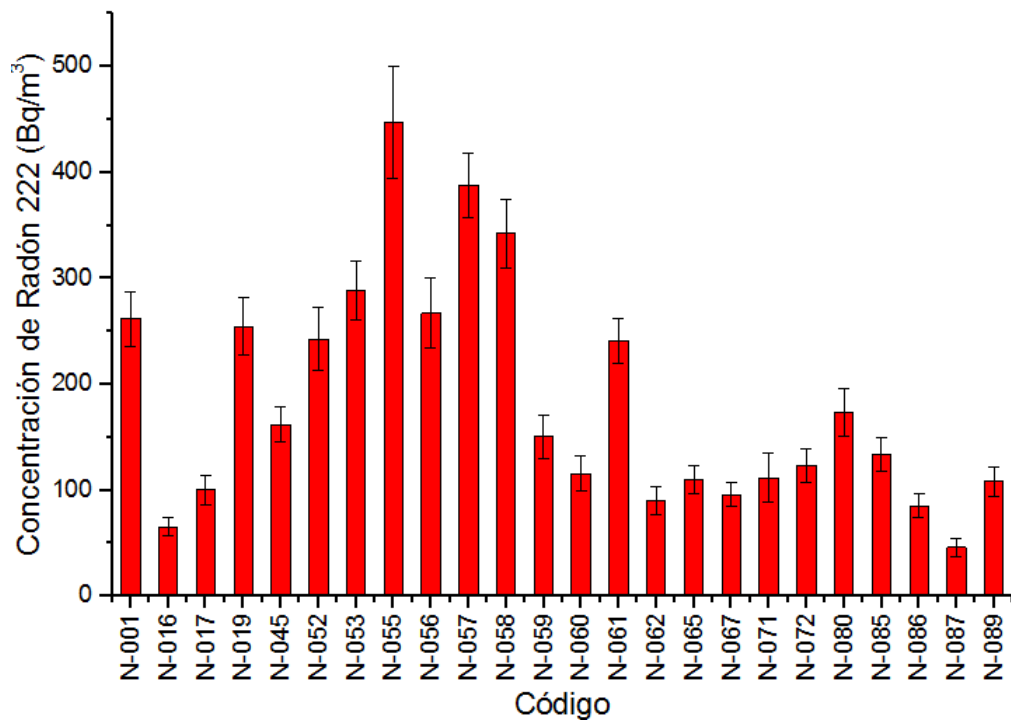


Figura 35: Gráfico de barras para el quinto periodo de medición

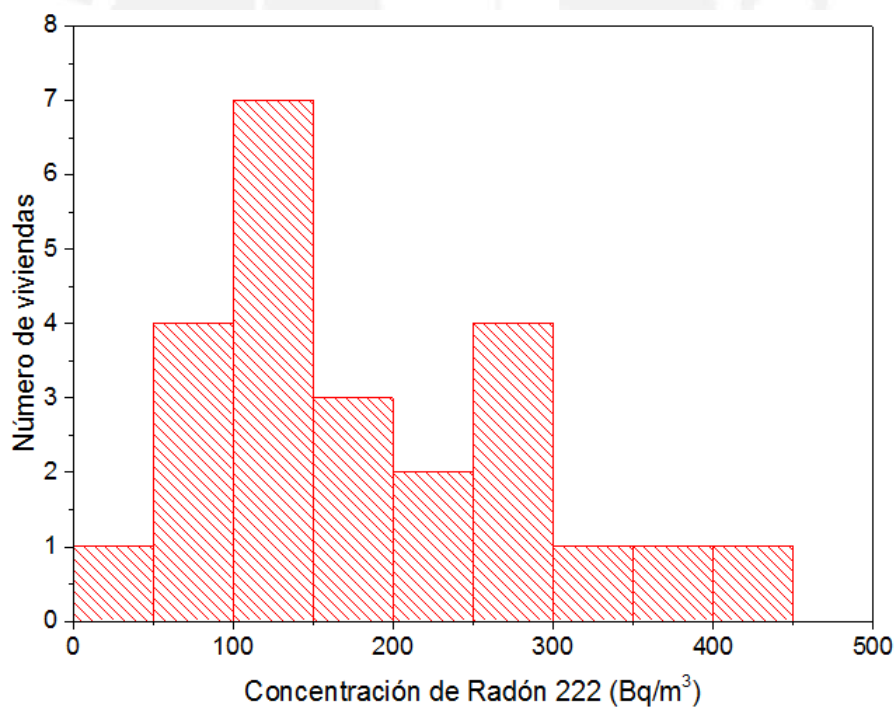


Figura 36: Histograma para las concentraciones de Radón 222 para el quinto periodo de medición

Tabla 41: Momentos de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) correspondiente al quinto periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
24	45,92	446,91	183,51	155,90	107,70	0,94	0,09

Se hace el análisis logarítmico normal de las concentraciones de Radón 222 del primer periodo, se presenta en el gráfico 37 el histograma correspondiente. Y en la tabla 42 se presenta su análisis estadístico descriptivo.

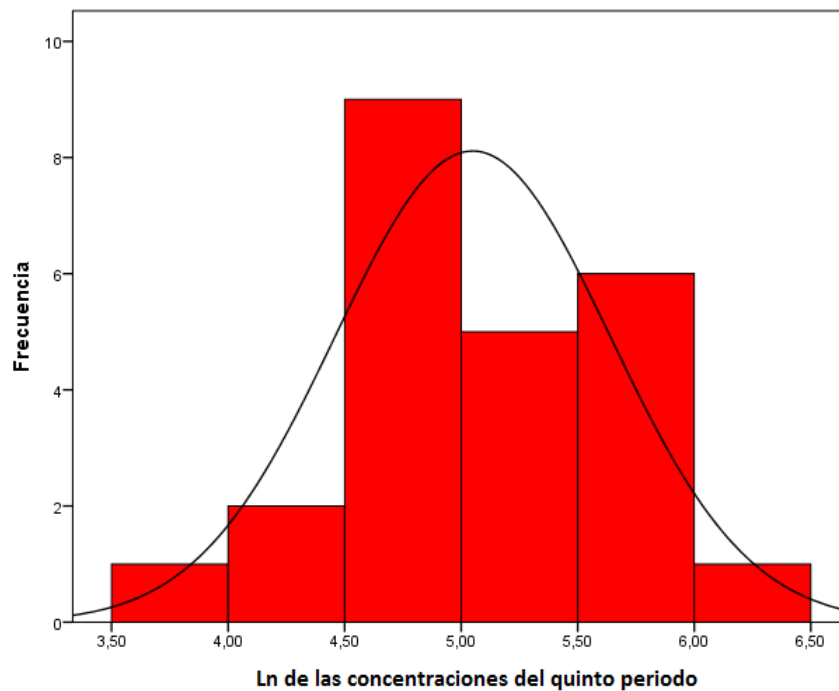


Figura 37: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones correspondientes al quinto periodo de medición

Tabla 42: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
24	3,83	6,10	5,05	0,59	0,00	-0,69

En las tablas 43 y 44 se evalúa la normalidad del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 con los test de Shapiro - Wilk y Kolmogorov - Smirnov.

Tabla 43: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
24	0,97	0,62	La distribución de prueba es normal

Tabla 44: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 correspondiente al quinto periodo de medición.

Test de Normalidad Kolmogorov - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
24	0,14	0,67	La distribución de prueba es normal

En este último periodo el número de viviendas monitoreadas fue similar al periodo anterior; el análisis estadístico también muestra el comportamiento esperado.

7.6. Mapeo de Radón 222 para el distrito de Los Olivos (2015 - 2016).

Para establecer este primer mapeo de Radón 222 para el distrito de Los Olivos (2015 - 2016) se obtiene el resumen y promedio de las concentraciones de los cinco periodos muestreados.

En las tablas 45 y 46 se presenta el promedio de cada lugar de medición, considerando su participación durante los cinco periodos de medición (por razones particulares de cada responsable de las viviendas, no todas participaron en los cinco periodos).

Tabla 45: Resultados de los cinco periodos de medición.

Código	Promedio de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos (Bq/m^3)
N-001	169,84 ± 12,24 (7 %)
N-002	138,69 ± 14,87 (11 %)
N-003	156,03 ± 32,80 (21 %)
N-004	222,49 ± 23,15 (10 %)
N-005	134,64 ± 17,80 (13 %)
N-006	100,87 ± 13,06 (13 %)
N-007	173,37 ± 23,90 (14 %)
N-008	242,71 ± 36,52 (15 %)
N-011	199,38 ± 35,44 (18 %)
N-012	121,36 ± 24,49 (20 %)
N-016	147,35 ± 13,58 (9 %)
N-017	167,11 ± 18,56 (11 %)
N-018	216,71 ± 26,71 (12 %)
N-019	192,66 ± 15,93 (8 %)
N-020	214,87 ± 22,95 (11 %)
N-021	242,71 ± 29,92 (12 %)
N-022	216,71 ± 30,89 (14 %)
N-023	190,71 ± 23,94 (13 %)
N-024	199,38 ± 36,44 (18 %)
N-025	114,62 ± 22,83 (20 %)
N-027	208,04 ± 40,49 (19 %)
N-030	234,05 ± 47,66 (20 %)
N-031	320,73 ± 47,01 (15 %)
N-032	167,59 ± 18,67 (11 %)
N-033	69,35 ± 18,68 (27 %)
N-034	117,22 ± 14,28 (12 %)
N-035	132,39 ± 17,49 (13 %)
N-036	164,70 ± 14,66 (9 %)
N-043	147,36 ± 21,38 (15 %)
N-044	173,37 ± 29,45 (17 %)
N-045	167,59 ± 16,12 (10 %)
N-046	159,84 ± 35,42 (22 %)
N-050	79,88 ± 11,26 (14 %)
N-052	190,71 ± 18,48 (10 %)
N-053	248,50 ± 22,10 (9 %)
N-055	309,82 ± 31,65 (10 %)
N-056	194,27 ± 20,54 (11 %)
N-057	287,16 ± 30,81 (11 %)
N-058	283,91 ± 26,32 (9 %)
N-059	187,95 ± 18,50 (10 %)

Tabla 46: Resultados de los cinco periodos de medición.

Código	Promedio de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos (Bq/m^3)
N-060	115,58 ± 16,83 (15 %)
N-061	217,05 ± 21,52 (10 %)
N-062	207,33 ± 22,86 (11 %)
N-064	277,39 ± 50,80 (18 %)
N-065	147,63 ± 26,72 (18 %)
N-066	364,08 ± 78,40 (22 %)
N-067	189,83 ± 26,10 (14 %)
N-068	288,95 ± 52,31 (18 %)
N-069	248,50 ± 47,33 (19 %)
N-070	294,73 ± 79,66 (27 %)
N-071	142,56 ± 22,20 (16 %)
N-072	123,29 ± 16,23 (13 %)
N-073	340,96 ± 70,96 (21 %)
N-074	277,39 ± 50,80 (18 %)
N-075	216,71 ± 28,46 (13 %)
N-077	286,06 ± 34,15 (12 %)
N-079	329,40 ± 46,34 (14 %)
N-080	212,38 ± 25,14 (12 %)
N-082	215,27 ± 19,48 (9 %)
N-083	232,61 ± 37,76 (16 %)
N-084	290,40 ± 49,00 (17 %)
N-085	223,59 ± 27,17 (12 %)
N-086	123,64 ± 20,84 (17 %)
N-087	109,65 ± 13,50 (12 %)
N-088	248,50 ± 49,60 (20 %)
N-089	186,34 ± 27,57 (15 %)
N-090	156,03 ± 31,17 (20 %)
N-091	265,83 ± 70,58 (27 %)

Los resultados contenidos en las dos tablas anteriores se presentan en un solo gráfico de barras, como se indica en la figura 38 y su correspondiente histograma como lo podemos ver en la figura 39. En este caso el análisis estadístico se realiza para el total de las mediciones.

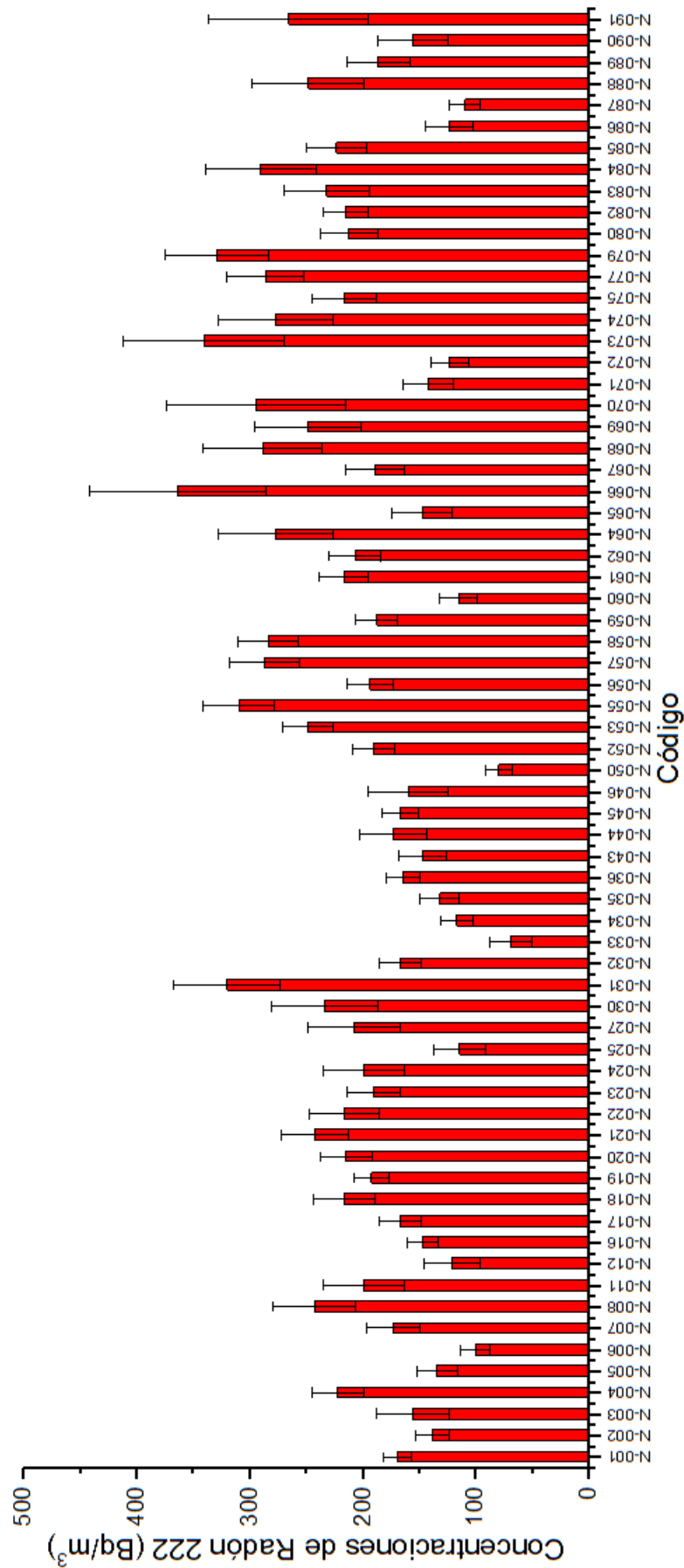


Figura 38: Gráfico de barras de los promedios de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos.

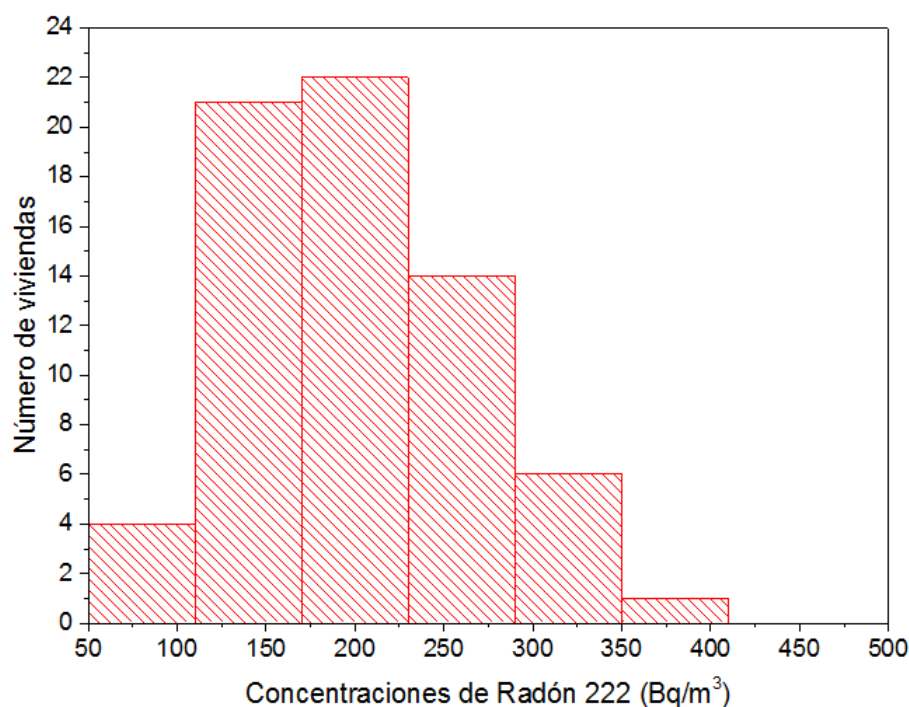


Figura 39: Histograma de los promedios de las concentraciones de Radón 222 en el distrito de Los Olivos

Tabla 47: Momentos de los promedios de las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3) en el distrito de Los Olivos.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Media geométrica	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
68	69,35	364,08	202,03	190,81	66,35	0,31	-0,43

Como era previsible, se demuestra el comportamiento Log normal de la totalidad de los datos, en acuerdo con la hipótesis que para una zona con una geología similar el comportamiento de los datos debe corresponder a una Log normalidad, hecho que se cumple en el distrito de Los Olivos, Lima - Perú. Todo esto se demuestra con la figura 40, y las tablas 49 y 50. La tabla 48 corresponde al análisis estadístico descriptivo del total de los datos.

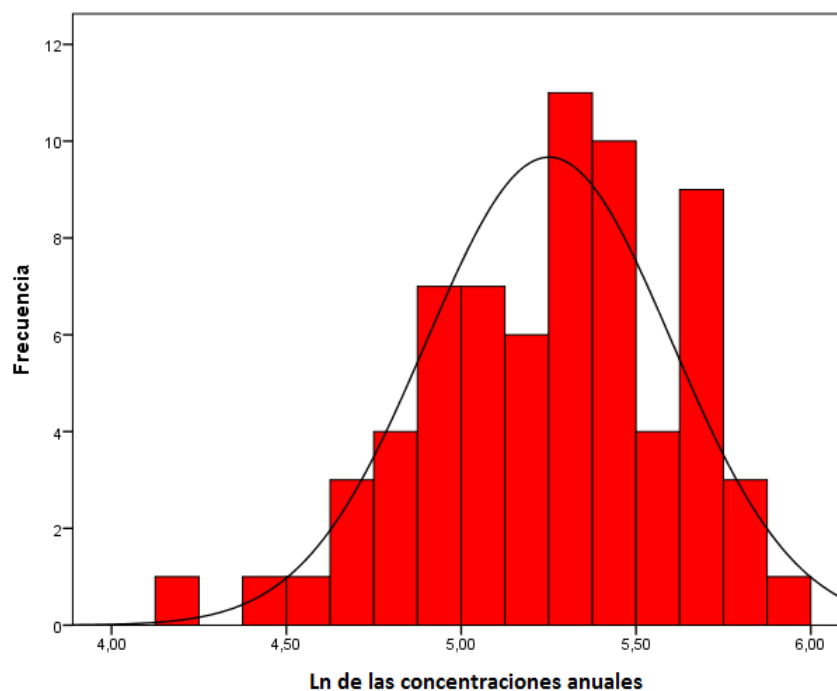


Figura 40: Histograma del logaritmo natural de las concentraciones anuales

Tabla 48: Momentos del logaritmo natural de las concentraciones de Radón 222 anual.

N° datos	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
68	4,24	5,90	5,25	0,35	-0,51	0,11

Tabla 49: Test de evaluación de normalidad Shapiro - Wilk de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 anuales.

Test de Normalidad Shapiro - Wilk			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
68	0,98	0,26	La distribución de prueba es normal

Tabla 50: Test de evaluación de normalidad Kolmogorov - Smirnov de los logaritmos naturales de las concentraciones de Radón 222 anuales.

Test de Normalidad Kolmogorov - Smirnov			
N° datos	Estadístico	Valor de p	$\alpha = 0,05$
68	0,08	0,87	La distribución de prueba es normal

Se establece una diferenciación entre las viviendas y su ventilación de acuerdo a la información obtenida de las fichas detalladas en el ANEXO II se presenta en la figura 41.

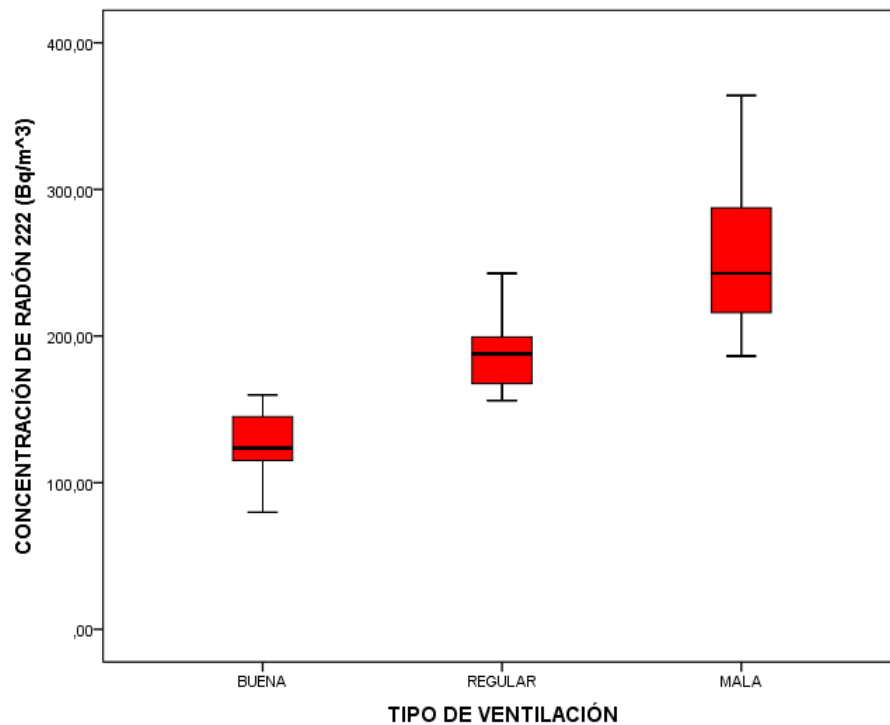


Figura 41: Relación entre el factor de ventilación de cada vivienda con las concentraciones de Radón 222 (Bq/m^3)

Se puede apreciar que viviendas con mejor ventilación presentan niveles de concentración de Radón 222 relativamente más bajos que las viviendas que presentan poca ventilación.

Finalmente se presenta el mapeo de Radón 222 en el distrito de Los Olivos, Lima - Perú (figura 42); en este primer mapeo se diferencian con colores las zonas de menor a mayor concentración de este gas contaminante en las viviendas monitoreadas.

Este mapa se elaboró teniendo en consideración todos los datos medidos en este primer monitoreo, teniendo en cuenta que por consideraciones de protección radiológica no se debe ignorar ningún dato.



Figura 42: Mapa de Radón 222 del distrito de Los Olivos durante el 2015 al 2016.

*Las medidas en esta grilla se hicieron sólo en el tercer periodo.

** Las medidas en esta grilla se hicieron sólo en el cuarto periodo.

*** En esta grilla se tomó un solo punto de medición.

8. Conclusiones.

A continuación se extraen las conclusiones del estudio realizado en interiores en el Distrito de Los Olivos (Lima - Perú) del 2015 al 2016, con relación al Radón 222.

1. La metodología expuesta en el presente trabajo, así como el uso de los materiales y equipos de Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP, permitió y garantizó la fiabilidad de las mediciones de Radón 222.
2. El uso del detector LR 115 tipo 2 en modo desnudo, pegado a la pared y en posición vertical sobre una mica permite la exclusión de las alfas que puedan atravesar la parte no sensible del detector; y al ser Lima una ciudad muy contaminada por polvo, incrementa la probabilidad que las hijas de Radón se adhieran al particulado y como las concentraciones de estas se reducen cerca de las paredes, el detector ubicado sobre ésta, asegura sólo el registro las partículas alfas provenientes del Radón 222.
3. En cada periodo independiente de los demás se determinó los siguientes rangos de las concentraciones:
 - En el primer periodo el 100 % de las mediciones registradas se encuentran por debajo de 200 Bq/m^3 ,
 - En el segundo periodo el 43 % de las mediciones registradas se encuentran por debajo de 200 Bq/m^3 y el 57 % por encima de 200 Bq/m^3
 - En el tercer periodo el 51 % de las mediciones registradas se encuentran por debajo de 200 Bq/m^3 y el 49 % por encima de 200 Bq/m^3
 - En el cuarto periodo el 36 % de las mediciones registradas se encuentran por debajo de 200 Bq/m^3 y el 64 % por encima de 200 Bq/m^3
 - En el quinto periodo el 63 % de las mediciones registradas se encuentran por debajo de 200 Bq/m^3 y el 37 % por encima de 200 Bq/m^3
4. Encontramos un comportamiento Log normal de las concentraciones para todos los periodos de medición, lo cual es una característica en la mayoría de monitoreos realizados en interiores, remarcando que el distrito de Los Olivos tiene una misma geología.
5. En viviendas de mayor ventilación encontramos que los niveles de Radón 222 son menores, a diferencia de viviendas con poca ventilación.
6. El mapa de Radón 222 obtenido por primera vez para el distrito de Los Olivos, Lima - Perú constituye una herramienta valiosa para varios propósitos, como definir claramente zonas de alto riesgo de Radón 222 con la finalidad de implementar criterios importantes para la futura implementación de un manual técnico para la construcción de viviendas incluyendo la prevención del Radón. Así como también para informar a la población de medidas inmediatas para la reducción de niveles de Radón en sus viviendas.

Referencias

- [1] A. Kamal, *Nuclear Physics*. Graduate Texts in Physics, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] E. BRITANNICA, “<https://media1.britannica.com/eb-media/14/22314-004-a5a84cd7.jpg>,” tech. rep., ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2017.
- [3] M. Maiello and M. Hoover, *Radioactive Air Sampling Methods*. CRC Press, 2010.
- [4] S. Durrani and R. Ilic, *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*. 1997.
- [5] J. K. Otton, *The geology of radon*. 1992.
- [6] BBC, “http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/05/160513-ciencia_ciudad_mas_contaminada_america_latina_gtg,” tech. rep., BBC, 2017.
- [7] *Kodalpha Radon-Dosimeters and LR155 SSNTD Specifications*.
- [8] S. A. Durrani and R. K. Bull, *Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications*, vol. 111. Elsevier, 2013.
- [9] D. Nikezic and K. Yu, “Formation and growth of tracks in nuclear track materials,” *Materials Science and Engineering R*, vol. 46, pp. 51–123, 2004.
- [10] M. D. de Los Olivos, “http://portal.munilosolivos.gob.pe/muni1/images/stories/zonificacion_los_olivos.jpg,” tech. rep., Municipalidad Distrital de Los Olivos.
- [11] C. P. J. de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, “<http://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapasuelosdistritoslima>,” tech. rep., CISMID.
- [12] C. Schopfer and R. T. S. U. of New Jersey New Brunswick. Graduate School New Brunswick, *Radon Adsorption on an Aerogel*. Rutgers The State University of New Jersey - New Brunswick, 2009.
- [13] S. Keith, O. Faroon, N. Roney, F. Scinicariello, S. Wilbur, L. Ingerman, F. Lladós, D. Plewak, D. Wohlers, and G. Diamond, “Chemical, physical, and radiological information,” 2013.
- [14] *ISO 11665 - 1, Measurement of radioactivity in the environment - Air: Radon-222. Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods*.
- [15] D. Pawel and J. Puskin, “The us environmental protection agency’s assessment of risks from indoor radon,” *Health physics*, vol. 87, no. 1, pp. 68–74, 2004.
- [16] H. Synnott and D. Fenton, “An evaluation of radon mapping techniques in europe,” *European Radon Research and Industry Collaborative Concerted Action (ERRICCA 2), European Commission Contract (FIRI-CT-2001-20142)*, 2005.
- [17] W. Burcham, *Física nuclear*. Reverté, 1974.

- [18] J. Hill and D. Kolb, *Química para el nuevo milenio*. Prentice Hall, 1999.
- [19] E. B. Podgorsak *et al.*, “Radiation oncology physics,” *a handbook for teachers and students/EB Podgorsak*.—Vienna: International Atomic Energy Agency, vol. 657, 2005.
- [20] F. H. Attix, *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons, 2008.
- [21] G. Chaddha, *Quantum Mechanics*. New Age International (P) Limited, 2006.
- [22] D. J. Griffiths and E. G. Harris, *Introduction to quantum mechanics*. American Association of Physics Teachers, 1995.
- [23] B. Claude Cohen-Tannoudji, *Quantum Mechanics Volume 1*. Hermann.
- [24] A. Soria, *Física nuclear y de partículas (2a ed.)*. Educació (Universitat de Valencia): Materials, Publicacions de la Universitat de València, 2006.
- [25] S. Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Elsevier Science, 2014.
- [26] B. Lottermoser, *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [27] J. Porstendörfer, “Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 25, no. 2, pp. 219–263, 1994.
- [28] D. GURAU, D. Stanga, and M. Dragusin, “Review of the principal mechanism of radon in the environment,” *ROMANIAN JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 59, no. 9-10, pp. 904–911, 2014.
- [29] T. Kohl, F. Medici, and L. Rybach, “Numerical simulation of radon transport from subsurface to buildings,” *Journal of applied geophysics*, vol. 31, no. 1, pp. 145–152, 1994.
- [30] M. Jiranek, “Diffusive and convective transport of radon through cracks in the building understructure,” in *Radon Investigations in the Czech Republic VIII and the Fifth International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*, p. 65, Czech Geological Survey, 2000.
- [31] L. Ruipérez and U. de Oviedo, *Radón y sus riesgos*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 1992.
- [32] J. Thomas, K. Jílek, and M. Brabec, “Inversion of the jacobi-porstendörfer room model for the radon progeny,” *Nukleonika*, vol. 55, pp. 433–437, 2010.
- [33] H. Zeeb, F. Shannoun, *et al.*, “Manual de la oms sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública,” 2015.
- [34] A. Bhagwat, “Solid state nuclear track detection: Theory and applications,” 1993.

- [35] E. C. H. Silk and R. S. Barnes, "Examination of fission fragment tracks with an electron microscope," *Philosophical Magazine*, vol. 4, no. 44, pp. 970–972, 1959.
- [36] R. Fleischer, P. Price, and R. Walker, "Solid-state track detectors: applications to nuclear science and geophysics," *Annual Review of Nuclear Science*, vol. 15, no. 1, pp. 1–28, 1965.
- [37] G. Somogyi and S. Szalay, "Track-diameter kinetics in dielectric track detectors," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 109, no. 2, pp. 211–232, 1973.
- [38] M. Fromm, P. Meyer, and A. Chambaudet, "Ion track etching in isotropic polymers: etched track shape and detection efficiency," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 107, no. 1, pp. 337–343, 1996.
- [39] A. P. Fews and D. L. Henshaw, "High resolution alpha particle spectroscopy using cr-39 plastic track detector," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 197, no. 2-3, pp. 517–529, 1982.
- [40] D. Nikezic and K. Yu, "Three-dimensional analytical determination of the track parameters: over-etched tracks," *Radiation measurements*, vol. 37, no. 1, pp. 39–45, 2003.
- [41] J. Miles and K. Ball, "Mapping radon-prone areas using house radon data and geological boundaries," *Environment International*, vol. 22, pp. 779–782, 1996.
- [42] M. García-Talavera, A. García-Pérez, C. Rey, and L. Ramos, "Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information," *Journal of Radiological Protection*, vol. 33, no. 3, p. 605, 2013.
- [43] V. Gruber, W. Ringer, G. Wurm, and H. Friedmann, "Radon mapping strategies in austria," *Radiation protection dosimetry*, vol. 167, no. 1-3, pp. 65–69, 2015.
- [44] H. Zhu, J. Charlet, and A. Poffijn, "Radon risk mapping in southern belgium: an application of geostatistical and gis techniques," *Science of the Total Environment*, vol. 272, no. 1, pp. 203–210, 2001.
- [45] L. Barnet, J. Miksova, R. Tomas, and J. Karenova, "Radon risk mapping of the czech republic on a scale 1: 50000," in *Proceedings of the Radon Investigations in the Czech Republic VIII and the Fifth International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, Prague*, pp. 4–15, 2000.
- [46] C. E. Andersen, K. Ulbak, A. Damkjær, P. Kirkegaard, and P. Gravesen, "Mapping indoor radon-222 in denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey," *Science of the total environment*, vol. 272, no. 1, pp. 231–241, 2001.
- [47] A. Weltner, I. Mäkeläinen, and H. Arvela, "Radon mapping strategy in finland," in *International Congress Series*, vol. 1225, pp. 63–69, Elsevier, 2002.

- [48] J. Kemski, A. Siehl, R. Stegemann, and M. Valdivia-Manchego, "Mapping the geogenic radon potential in germany," *Science of the total environment*, vol. 272, no. 1, pp. 217–230, 2001.
- [49] M. Anagnostakis, E. Hinis, S. Simopoulos, and M. Angelopoulos, "Natural radioactivity mapping of greek surface soils," *Environment International*, vol. 22, pp. 3–8, 1996.
- [50] J. Appleton, J. Miles, and M. Young, "Comparison of northern ireland radon maps based on indoor radon measurements and geology with maps derived by predictive modelling of airborne radiometric and ground permeability data," *Science of the total environment*, vol. 409, no. 8, pp. 1572–1583, 2011.
- [51] M. Faisca, M. Teixeira, and A. Bettencourt, "Indoor radon concentrations in portugal-a national survey," *Radiation protection dosimetry*, vol. 45, no. 1-4, pp. 465–467, 1992.
- [52] M. Križman, R. Ilić, J. Skvarč, and Z. Jeran, "A survey of indoor radon concentrations in dwellings in slovenia," in *Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe–1995 (Proc. Symposium Portorož, Slovenia)*, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, pp. 66–70, 1995.
- [53] C. Sainz-Fernandez, A. Fernandez-Villar, I. Fuente-Merino, J. Gutierrez-Villanueva, J. Martin-Matarranz, M. Garcia-Talavera, S. Casal-Ordas, and L. Quindós-Poncela, "The spanish indoor radon mapping strategy," *Radiation protection dosimetry*, vol. 162, no. 1-2, pp. 58–62, 2014.
- [54] Z. Daraktchieva, J. Miles, and N. McColl, "Radon, the lognormal distribution and deviation from it," *Journal of Radiological Protection*, vol. 34, no. 1, p. 183, 2014.
- [55] E. Limpert, W. A. Stahel, and M. Abbt, "Lognormal distributions across the sciences: Keys and clues on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize lognormal distributions, which can provide deeper insight into variability and probability normal or lognormal: That is the question," *BioScience*, vol. 51, no. 5, pp. 341–352, 2001.
- [56] D. Hattis and D. E. Burmaster, "Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk analyses," *Risk Analysis*, vol. 14, no. 5, pp. 713–730, 1994.
- [57] P. Bossew, "Radon: exploring the log-normal mystery," *Journal of environmental radioactivity*, vol. 101, no. 10, pp. 826–834, 2010.
- [58] B. L. Cohen, "A national survey of 222-rn in us homes and correlating factors.," *Health physics*, vol. 51, no. 2, pp. 175–183, 1986.
- [59] A. Nero, M. Schwehr, W. Nazaroff, and K. Revzan, "Distribution of airborne radon-222 concentrations in us homes," *Science*, vol. 234, pp. 992–998, 1986.

- [60] S. White, J. W. Bergsten, B. V. Alexander, N. F. Rodman, and J. L. Phillips, "Indoor ^{222}Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states.," *Health Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 41–50, 1992.
- [61] J. Gunby, S. Darby, J. Miles, B. Green, and D. Cox, "Factors affecting indoor radon concentrations in the united kingdom.," *Health Physics*, vol. 64, no. 1, pp. 2–12, 1993.
- [62] F. Marcinowski, R. M. Lucas, and W. M. Yeager, "National and regional distributions of airborne radon concentrations in us homes.," *Health Physics*, vol. 66, no. 6, pp. 699–706, 1994.
- [63] J. Miles, "Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 56, no. 1-4, pp. 207–210, 1994.
- [64] J. Miles, "Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data.," *Health Physics*, vol. 74, no. 3, pp. 370–378, 1998.
- [65] C.-K. Kim, S.-C. Lee, D.-M. Lee, B.-U. Chang, B.-H. Rho, and H.-D. Kang, "Nationwide survey of radon levels in korea," *Health physics*, vol. 84, no. 3, pp. 354–360, 2003.
- [66] K. Hámori, E. Tóth, A. Losonci, and M. Minda, "Some remarks on the indoor radon distribution in a country," *Applied radiation and isotopes*, vol. 64, no. 8, pp. 859–863, 2006.
- [67] P. Murphy and C. Organo, "A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers," *Journal of Radiological Protection*, vol. 28, no. 3, p. 293, 2008.
- [68] D. Tuia and M. Kanevski, "Indoor radon distribution in switzerland: lognormality and extreme value theory," *Journal of environmental radioactivity*, vol. 99, no. 4, pp. 649–657, 2008.
- [69] INEI, "11 de julio dia mundial de la poblacion," tech. rep., INEI, 2014.
- [70] H. Singh, J. Singh, S. Singh, and B. Bajwa, "Regional variations pattern of indoor radon levels in some areas of punjab and haryana," *Radiation protection dosimetry*, vol. 130, no. 2, pp. 257–263, 2008.
- [71] T. Ramachandran, K. Eappen, R. Nair, Y. Mayya, and S. Sadasivan, "Radon - thoron levels and inhalation dose distribution patterns in india dwellings," tech. rep., Bhabha Atomic Research Centre, 2003.
- [72] senamhi, "http://www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estaciones=112181," tech. rep., SENAMHI.

A. ANEXO I: Ubicación GPS de los lugares de medición en el distrito de Los Olivos, Lima - Perú.

Tabla 51: Ubicación GPS de los lugares de medición.

Código	Ubicación GPS	
	Latitud	Longitud
N-001	-11,965274	-77,069109
N-002	-11,925870	-77,072091
N-003	-12,008744	-77,080428
N-004	-12,010465	-77,071351
N-005	-11,973660	-77,071405
N-006	-11,950401	-77,071126
N-007	-11,948304	-77,057049
N-008	-11,951662	-77,058787
N-009	-11,950393	-77,077045
N-010	-11,982822	-77,080327
N-011	-11,951251	-77,083271
N-012	-11,952784	-77,077563
N-013	-11,957838	-77,051874
N-014	-13,001194	-77,077667
N-015	-11,951793	-77,083951
N-016	-11,945100	-77,082448
N-017	-11,948559	-77,084084
N-018	-11,962545	-77,095158
N-019	-11,948050	-77,076329
N-020	-12,007075	-77,062639
N-021	-11,940051	-77,064311
N-022	-11,950475	-77,079537
N-023	-11,945197	-77,058061
N-024	-11,969703	-77,076984
N-025	-11,987662	-77,079451
N-026	-11,959446	-77,076056
N-027	-11,942896	-77,087519
N-028	-11,964560	-77,069731
N-029	-11,945078	-77,076945
N-030	-11,952059	-77,083324
N-031	-11,947772	-77,074045
N-032	-11,965835	-77,069002
N-033	-11,934610	-77,084646
N-034	-12,006141	-77,062521
N-035	-12,011661	-77,079494
N-036	-12,009646	-77,071297
N-037	-11,959503	-77,075870
N-038	-11,963086	-77,056089
N-039	-11,963243	-77,056754
N-040	-11,962540	-77,056572

Tabla 52: Ubicación GPS de los lugares de medición.

Código	Ubicación GPS	
	Latitud	Longitud
N-041	-11,962550	-77,056036
N-042	-11,962781	-77,055500
N-043	-11,995327	-77,076951
N-044	-11,930701	-77,054097
N-045	-11,970228	-77,069259
N-046	-11,948056	-77,081374
N-047	-11,978824	-77,072049
N-048	-11,979379	-77,072146
N-049	-11,988228	-77,100060
N-050	-11,951346	-77,083249
N-051	-11,950097	-77,072125
N-052	-12,005579	-77,063323
N-053	-12,005463	-77,063473
N-054	-12,004482	-77,064110
N-055	-12,001615	-77,065419
N-056	-12,004110	-77,080745
N-057	-12,004050	-77,080672
N-058	-11,997537	-77,081556
N-059	-11,997411	-77,080794
N-060	-11,994195	-77,079240
N-061	-11,992195	-77,077648
N-062	-11,988818	-77,079023
N-063	-11,986352	77,078757
N-064	-11,982477	-77,069597
N-065	-11,982073	-77,069881
N-066	-11,985767	-77,067279
N-067	-11,988732	-77,067365
N-068	-11,993827	-77,065528
N-069	-11,993135	-77,066183
N-070	-11,960853	-77,072252
N-071	-11,961514	-77,072112
N-072	-11,967591	-77,069838
N-073	-11,971401	-77,071715
N-074	-11,981783	-77,075138
N-075	-11,980408	-77,076565
N-076	-11,972366	-77,083057
N-077	-11,974197	-77,083735
N-078	-11,980094	-77,084,559
N-079	-11,972106	-77,078414
N-080	-11,969025	-77,075703

Tabla 53: Ubicación GPS de los lugares de medición.

Código	Ubicación GPS	
	Latitud	Longitud
N-081	-11,967714	-77,077310
N-082	-11,965868	-77,081045
N-083	-11,967023	-77,079608
N-084	-11,921519	-77,074944
N-085	-11,921466	-77,074386
N-086	-11,927597	-77,075019
N-087	-11,929119	-77,075555
N-088	-11,935669	-77,073184
N-089	-11,973350	-77,071462
N-090	-11,940097	-77,075020
N-091	-11,941818	-77,074698



B. ANEXO II: Características del lugar de monitoreo.

Los datos contenidos en las tablas 54 al 60, fueron obtenidos a partir de las fichas llenadas por el responsable de cada vivienda, donde se realizó la medición. Se consideró una vivienda con "Mala ventilación", a aquella donde nunca se abren las ventanas o se abren durante un periodo de tiempo corto (menor a 3 horas), una vivienda con Regular ventilación" se consideró a aquella cuyas ventanas se abren durante el día o gran parte del día (entre 3 a 8 horas); y una vivienda con "Buena ventilación" se consideró a aquella donde gran parte del día se encuentra ventilado (mayor a 8 horas). Los lugares de medición corresponde a hogares de planta baja (primer piso) y donde las personas permanecen el mayor tiempo (sala y dormitorio).



Tabla 54: Características del lugar de monitoreo

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-001	3	0	Regular	32	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-002	4	0	Buena	28	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-003	3	0	Regular	2	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-004	2	0	Mala	15	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica y cemento	No
N-005	3	1	Buena	40	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Cemento	No
N-006	2	0	Buena	6	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-007	4	1	Regular	35	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	No
N-008	2	1	Regular	20	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-009	5	1	Regular	No sabe	Ladrillos y cemento	Esmalte	Menor a 5 años	Cemento	No
N-010	7	1	Regular	30	Adobe	Esmalte	Mayor a 5 años	Cemento	Si
N-011	16	2	Mala	11	Ladrillos y cemento	N.R.	Menor a 5 años	Cemento	No
N-012	10	1	Buena	13	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	No
N-013	7	0	Regular	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-014	6	0	Regular	16	Ladrillos y cemento	Base imprimante	Menor a 5 años	Mayólica	Si

Tabla 55: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-015	3	0	Regular	No sabe	Ladrillos y cemento	No recuerda	Mayor a 5 años	Mayólica	Si
N-016	5	0	Buena	16	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-017	5	0	Regular	18	Ladrillos y cemento	Esmalte	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-018	4	0	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-019	3	0	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Base imprimante	Menor a 5 años	Cemento	No
N-020	5	0	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-021	6	0	Mala	30	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-022	4	0	Mala	17	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	Si
N-023	10	0	Regular	40	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-024	12	0	Regular	20	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-025	3	0	Buena	25	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-026	3	0	Buena	19	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-027	5	0	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-028	5	1	Mala	33	Ladrillos y cemento	No recuerda	Mayor a 5 años	Cemento	Si

Tabla 56: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-029	4	0	Buena	27	Ladrillos y cemento	Al agua	Mayor a 5 años	Cemento	Si
N-030	12	0	Regular	no sabe	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-031	4	0	Mala	15	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-032	4	0	Regular	25	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Cemento	No
N-033	3	0	Buena	2	Ladrillos y cemento	No recuerda	Menor a 5 años	Cemento	No
N-034	8	0	Buena	23	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-035	6	0	Buena	no sabe	Ladrillos y cemento	Esmalte	Menor a 5 años	Cemento	No
N-036	2	0	Regular	no sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-037	20	0	Buena	no sabe	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-038	5	1	Buena	20	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Madera	No
N-039	3	1	Mala	15	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-040	8	4	Buena	13	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-041	9	1	Buena	20	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	No
N-042	12	0	Buena	30	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No

Tabla 57: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-043	7	0	Buena	10	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-044	2	0	Regular	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-045	6	0	Regular	35	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Cemento	Si
N-046	5	0	Buena	5	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-047	3	0	Regular	15	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-048	4	0	Regular	20	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-049	3	0	Buena	3	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-050	7	0	Buena	4	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-051	5	0	Buena	15	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Otro	Si
N-052	3	0	Mala	5	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Madera	Si
N-053	4	0	Mala	9	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-054	6	0	Buena	60	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Madera	No
N-055	6	0	Mala	43	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-056	3	0	Regular	42	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	Si

Tabla 58: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-057	3	0	Regular	44	Ladrillos y cemento	Al agua	Mayor a 5 años	Cemento	Si
N-058	2	0	Mala	30	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-059	17	0	Regular	50	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Vinil	No
N-060	4	0	Buena	30	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Madera	Si
N-061	5	0	Mala	27	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-062	2	0	Mala	25	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Madera	No
N-063	2	0	Mala	20	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Madera	No
N-064	2	0	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-065	4	0	Buena	No sabe	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-066	6	0	Mala	45	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-067	2	0	Regular	40	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Porcelanato	No
N-068	4	0	Mala	38	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-069	4	0	Mala	40	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	Si
N-070	11	0	Mala	36	Ladrillos y cemento	Esmalte	Menor a 5 años	Cemento	No

Tabla 59: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo de pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-071	6	0	Buena	40	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	Si
N-072	10	0	Buena	40	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-073	4	0	Mala	10	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-074	8	0	Mala	25	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	No
N-075	6	0	Mala	30	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-076	1	0	Buen	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-077	4	0	Mala	22	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-078	4	0	Regular	15	Ladrillos y cemento	Látex	Mayor a 5 años	Mayólica	No
N-079	5	1	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	No
N-080	5	1	Regular	20	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-081	2	0	Regular	7	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-082	6	0	Mala	20	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-083	5	0	Mala	15	Ladrillos y cemento	Base imprimante	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-084	3	0	Mala	10	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	Si

Tabla 60: Características del lugar de monitoreo.

Código	Nº Habs.	Nº de Fumadores	Ventilación	Edad de la constr.	Material de constr.	Tipo de pintura	Tiempo pintado	Tipo de piso	Fisuras en paredes y/o piso
N-085	5	0	Mala	5	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-086	6	0	Buena	25	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-087	4	2	Buena	20	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Cemento	Si
N-088	5	0	Regular	30	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-089	4	1	Mala	No sabe	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Cemento	No
N-090	11	0	Buena	9	Ladrillos y cemento	Al agua	Menor a 5 años	Mayólica	No
N-091	4	0	Mala	26	Ladrillos y cemento	Látex	Menor a 5 años	Mayólica	No