

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**Mapeo de los Niveles de Radón 222 en el distrito de San
Martín de Porres(Lima-Perú) en el periodo 2015-2016**

Tesis para optar el grado de Magíster en Física

Autor:

Rafael Ángel Liza Neciosup

Asesor:

Dra. María Elena López Herrera

Jurado:

Dr. Eduardo Massoni Kamimoto

Dra. María Elena López Herrera

M. Sc. Patrizia Edel Pereyra Anaya

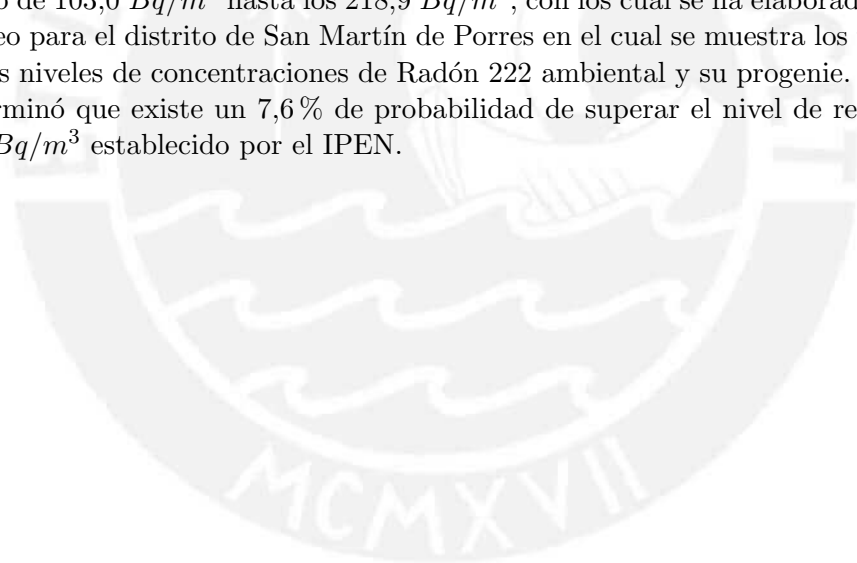
Lima, marzo de 2017



Resumen

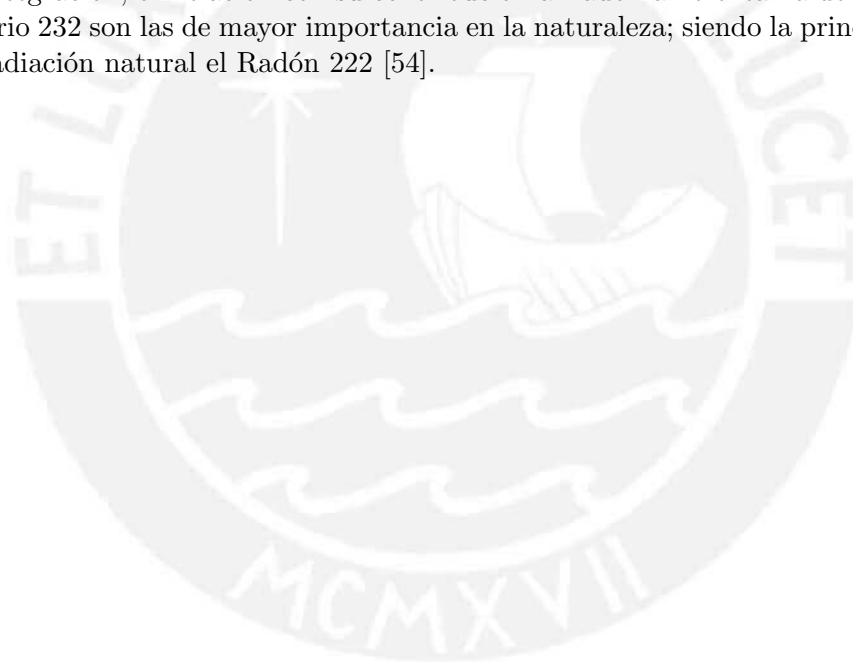
El objetivo de este trabajo es determinar los niveles de Radón 222 y su progenie en interiores en el distrito de San Martín de Porres durante cinco periodos en los años 2015-2016. Las mediciones se realizaron usando detectores pasivos de huellas nucleares de nitrato de celulosa (LR-115 tipo 2).

Las mediciones se realizaron al interior de viviendas considerando diferentes parámetros como el material de construcción, edad de la vivienda, tipo de suelo entre otros, colocando dos detectores en diferentes ambientes de las viviendas. Para la adquisición de imágenes luego de haber sometido a los detectores a un tratamiento químico que revela las huellas latentes, se empleó el software V.4.0 del microscopio óptico marca Leica, que permite una mejor calidad en cuanto a la adquisición de imágenes. Para realizar el conteo de las huellas nucleares en los detectores luego de haber adquirido las imágenes mediante el microscopio se usó el software ImageJ, para el cual se implementó un macro que permite automatizar el proceso de conteo. Finalmente con los 125 puntos de medición se reportan valores promedio por vivienda en el rango de $103,0 \text{ Bq/m}^3$ hasta los $218,9 \text{ Bq/m}^3$, con los cual se ha elaborado el primer mapeo para el distrito de San Martín de Porres en el cual se muestra las variaciones de los niveles de concentraciones de Radón 222 ambiental y su progenie. Además se determinó que existe un 7,6% de probabilidad de superar el nivel de referencia de 200 Bq/m^3 establecido por el IPEN.



Introducción

El Radón 222 es una de las principales fuentes de radiación natural, como producto de la cadena de desintegración del Uranio 238. El Radón 222 es un gas inoloro, incoloro e insípido radiactivo, emisor de partículas alfa con una energía de 5,49 MeV y decae en otros elementos como el Polonio 218, Plomo 214 entre otros isótopos de estos elementos hasta llegar a convertirse en una partícula estable de Plomo 206. Se conocen cuatro isótopos del Radón, originados en las cadenas de desintegración radiactiva presentes en la naturaleza, de las cuales existen actualmente tres. En primer lugar la cadena del Uranio 238, del cual se forma el Radio 226, para transformarse en Radón 222. En segundo lugar la cadena del Uranio 235, que da origen al Radio 223, se desintegra en Radón 219. Finalmente la cadena del del Torio 232, el cual produce Radio 224 que finalmente se transforma en Radón 220. De estas tres cadenas de desintegración, en relación con su contribución al radón ambiental la del uranio 238 y Torio 232 son las de mayor importancia en la naturaleza; siendo la principal fuente de radiación natural el Radón 222 [54].



Dedicatoria

A mis padres, Rafael y Angélica.

A mi hermana Luzmila.

Al pequeño Rodrigo

A Lez & Adri



Sé el cambio que quieres ver en el mundo.

M. Gandhi



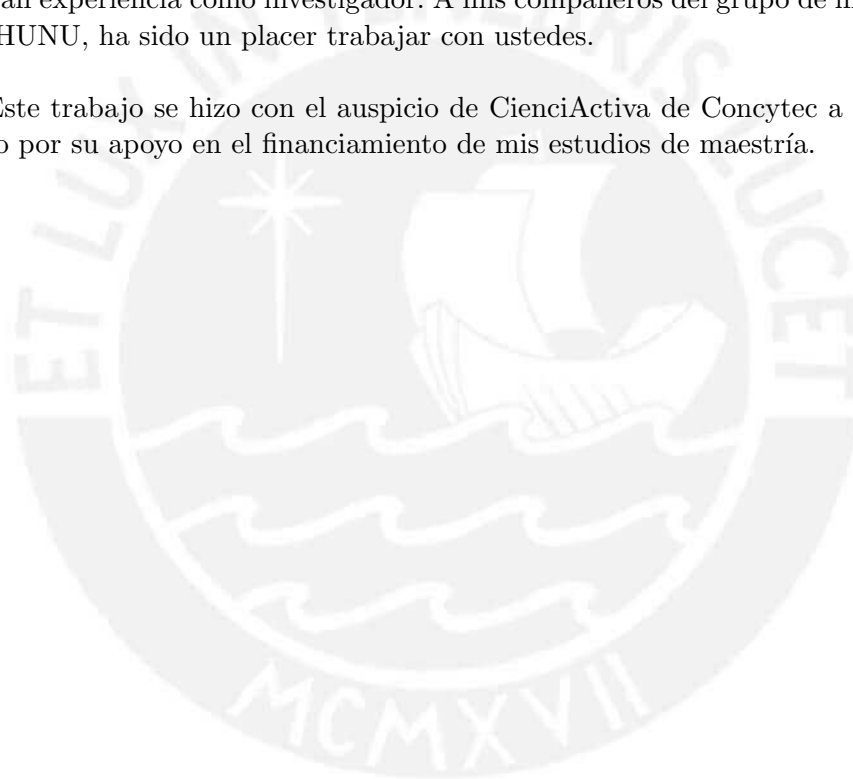
Agradecimientos

A mi familia por su constante apoyo y preocupación día a día.

A las personas que nos permitieron acceder a sus viviendas para poder realizar este trabajo de investigación, quienes de forma desinteresada aceptaron que se colocaran detectores en sus viviendas.

A mi asesora Dra. María Elena López Herrera y profesora Patrizia Pereyra, por su confianza y paciencia en estos dos años de maestría, y que gracias a sus conocimientos compartidos se logró cumplir con esta tesis. Al Dr. Daniel Palacios, por su entusiasmo, carisma y gran manera de compartir su conocimiento en el área debido a su gran experiencia como investigador. A mis compañeros del grupo de investigación GITHUNU, ha sido un placer trabajar con ustedes.

Este trabajo se hizo con el auspicio de CienciActiva de Concytec a quien agradezco por su apoyo en el financiamiento de mis estudios de maestría.



Objetivos

Generales:

Medir la concentración promedio en interiores de Radón 222 y su progenie en el distrito de San Martín de Porres en el periodo 2015-2016.

Estudiar la relación entre la concentración de Radón 222 con su distribución en los ambientes de las viviendas y el tipo del recubrimiento del suelo de las casas del distrito de estudio.

Específicos:

Obtener suficientes medidas de concentración de Radón 222 en viviendas que permitan un buen análisis estadístico que permita determinar las áreas de riesgo (prone areas).

Elaborar un primer mapeo del Radón 222 y su progenie del distrito de San Martín de Porres para una mejor referencia de los niveles de este contaminante gaseoso en el distrito.

Justificación

Los estudios realizados para medir los niveles del gas Radón 222 en las dos últimas décadas han aumentado progresivamente debido al riesgo que conlleva la acumulación de este gas en interiores y su relación con el desarrollo de ciertos tipos de cáncer, como el cáncer pulmonar y estomacal [12]. Desde el año de 1986 la organización mundial de la salud (OMS) ha catalogado al radón como agente cancerígeno del grupo 1 [53]. Desde entonces diferentes organismos internacionales relacionados a temas de salud, medio ambiente y radiaciones ionizantes como la ICRP (International Commission on Radiological Protection), IAEA (International Atomic Energy Agency), EPA (Environmental Protection Agency), WHO (World Health Organization), han afrontado esta problemática tomando medidas de prevención y correctivas ante lo que supone habitar y trabajar en lugares con niveles elevados de Radón 222. Gracias a estudios realizados en otros países, se ha creado una normativa con el fin de mantener los espacios habitables con los menores valores posible del gas Radón 222, el cual es visto como un problema de salud y que implica a sus autoridades; sin embargo en Perú a pesar de existir una normativa no se han realizado las mediciones respectivas que brinden niveles de referencia adecuados, a pesar de ser un país minero por excelencia. Con esta tesis se busca que los valores medidos en San Martín de Porres, junto a las mediciones de los demás distritos ayuden a establecer la concentración de Radón 222 y los niveles de referencia en el país y servir de base al establecimiento de la política nacional y estrategias de mitigación para proteger a la población.

Índice general

Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XIV
1. Marco Teórico	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Física de las radiaciones	1
1.2.1. Fuentes de radiación	1
1.2.2. Magnitudes y unidades	2
1.2.3. Interacción de partículas α con la materia	4
1.2.4. Desintegración radiactiva	7
1.2.5. Cadenas de desintegración radiactiva	9
1.3. Radón ^{222}Rn y su progenie	10
1.3.1. Riesgos de la exposición al gas Radón	10
1.3.2. Fuentes de Radón ^{222}Rn	11
1.3.3. Mecanismos de transporte del Radón	11
1.3.4. Decaimiento de Radón ^{222}Rn	13
1.3.5. Medición y detección de Radón ^{222}Rn	15
1.3.6. Aplicaciones	17
2. Técnicas de detección de las partículas α	19
2.1. Trazas nucleares en SSNTD	19
2.1.1. Mecanismos de la formación de huellas	20
2.1.2. Geometría de la traza grabada	20
2.2. El detector LR-115 tipo 2	23
2.3. Factores externos sobre los detectores SSNTD's que pueden afectar la medición	24
2.3.1. Térmicos	25
2.3.2. Mecánicos	25
2.3.3. Químicos	26
3. Métodos y procedimientos	27
3.1. Características del lugar de estudio	27
3.2. Distribución de los detectores	29
3.3. Grabado de los detectores LR-115 tipo 2	31
3.4. Obtención de imágenes con el microscopio	31
3.4.1. Análisis de las trazas en los detectores	33

3.4.2.	Programa usado para lectura de trazas nucleares	34
3.5.	Estadística en el proceso de conteo	35
3.6.	La distribución Log-normal para las concentraciones de los niveles de Radón	36
4.	Resultados y discusión	38
4.1.	Análisis estadístico del primer periodo	38
4.1.1.	Cálculo de la densidad de trazas y concentración	39
4.1.2.	Distribución Log-normal	40
4.1.3.	Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas	44
4.1.4.	Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo	45
4.2.	Análisis estadístico del segundo periodo	45
4.2.1.	Cálculo de la densidad de trazas y concentración	46
4.2.2.	Distribución Log-normal	47
4.2.3.	Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas	51
4.2.4.	Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo	52
4.3.	Análisis estadístico del tercer periodo	52
4.3.1.	Cálculo de la densidad de trazas y concentración	53
4.3.2.	Distribución Log-normal	55
4.3.3.	Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas	56
4.3.4.	Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo	57
4.4.	Análisis estadístico del cuarto periodo	57
4.4.1.	Cálculo de la densidad de trazas y concentración	58
4.4.2.	Distribución Log-normal	60
4.4.3.	Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas	63
4.4.4.	Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo	64
4.5.	Análisis estadístico del quinto periodo	64
4.5.1.	Cálculo de la densidad de trazas y concentración	65
4.5.2.	Distribución Log-normal	66
4.5.3.	Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas	69
4.5.4.	Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo	70
4.6.	Análisis comparativo entre periodos	70
4.6.1.	Análisis entre el segundo y tercer periodo	70
4.6.2.	Análisis entre el cuarto y quinto periodo	71
4.7.	Análisis del promedio de las concentraciones en los cinco periodos . .	73
4.7.1.	Evolución de las concentraciones en los periodos de medición	73
4.7.2.	Distribución Log-normal	74
4.7.3.	Prone-areas (Áreas de riesgo)	76
5.	Conclusiones	78
A.	Macro usado en el software ImageJ	85

B. Ubicación GPS de las viviendas monitoreadas	87
C. Parámetros ambientales durante las mediciones de Radón 222 y su influencia en la densidad de aire	91
D. Tabla de valores K-S	94
E. Ficha de datos para la ubicación de los detectores	95



Índice de figuras

1.1.	Curva característica de Bragg para una partícula alfa de Rn^{222} [2].	5
1.2.	Periodo de los emisores alfa en función de su energía [64].	8
1.3.	Diagrama de decaimiento del U^{238} [58].	10
1.4.	Transporte de Radón en suelo y materiales de construcción [52].	12
1.5.	Productos de desintegración de Rn^{222} [4]	14
1.6.	Crecimiento de la actividad de las hijas de Rn^{222} hasta lograr el equilibrio secular. Gráfica obtenida a partir de la data de [28].	15
1.7.	Procesos básicos que influyen en el balance de actividad del radón y su progenie[51].	17
2.1.	Daño de una partícula: a) en un cristal b) en un polímero [31]	20
2.2.	Modelo geométrico de la Formación de la traza [45]	21
2.3.	Desarrollo de la traza por efecto de las velocidades de grabado	22
2.4.	Simulación en SRIM para una partícula alfa con 6 MeV frenada en el poliéster del LR-115 [1]	23
2.5.	Espesor removido del detector LR-115 como función del tiempo de grabado con la temperatura como parámetro [45]	25
2.6.	Efecto de tensión mecánica en un detector [27].	26
3.1.	Distribución de suelos de la ciudad de Lima [9]	28
3.2.	Grilla de San Martín de Porres de 1km x 1km. Google maps-Elaboración propia	30
3.3.	Sistema de grabado termoestabilizado del laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP	31
3.4.	Edición de imagen con el software del microscopio Leica	32
3.5.	Captura de un campo con dos trazas perfectamente visibles con un aumento de 10X.	32
3.6.	Captura de un campo a un aumento de 10X con cinco trazas visibles y en la parte inferior daño mecánico.	33
3.7.	Captura de un campo con trazas de tamaño y forma irregular con un aumento de 10X.	33
3.8.	Discriminación de las trazas por su tamaño y forma, imagen capturada con un aumento de 10X	34
3.9.	Software Image J	34
3.10.	Campos de lectura	36
3.11.	Distribuciones lognormales de diferentes DEG [3]	37
4.1.	Puntos de medición en el primer periodo.	39

4.2. Histograma de los valores de Radón medidos en el primer periodo . .	41
4.3. Prueba de Anderson - Darling para el primer periodo	42
4.4. Estadístico Kolmogorov Smirnov para el primer periodo	43
4.5. Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el primer periodo	44
4.6. Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el primer periodo	44
4.7. Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el primer periodo .	45
4.8. Puntos de medición en el segundo periodo.	46
4.9. Histograma de los valores de Radón medidos en el segundo periodo .	48
4.10. Prueba de Anderson - Darling para concentraciones del segundo periodo.	49
4.11. Estadístico Kolmogorov Smirnov para el segundo periodo.	50
4.12. Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el segundo periodo	51
4.13. Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el segundo periodo	51
4.14. Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el segundo periodo	52
4.15. Puntos de medición en el tercer periodo.	53
4.16. Histograma de los valores de Radón medidos en el tercer periodo . .	55
4.17. Prueba de Anderson - Darling para el tercer periodo.	56
4.18. Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el tercer periodo	56
4.19. Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el tercer periodo .	57
4.20. Puntos de medición en el cuarto periodo.	58
4.21. Histograma de los valores de Radón medidos en el cuarto periodo . .	61
4.22. Prueba de Anderson - Darling para el cuarto periodo.	61
4.23. Estadístico Kolmogorov Smirnov para el cuarto periodo.	62
4.24. Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el cuarto periodo.	63
4.25. Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el cuarto periodo	63
4.26. Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el cuarto periodo .	64
4.27. Puntos de medición en el quinto periodo.	65
4.28. Histograma de los valores de Radón medidos en el quinto periodo . .	67
4.29. Prueba de Anderson - Darling para el quinto periodo.	68
4.30. Estadístico Kolmogorov Smirnov para el quinto periodo.	69
4.31. Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el quinto periodo	69
4.32. Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el quinto periodo .	70
4.33. Variaciones entre concentraciones en el segundo y tercer periodo . .	71
4.34. Variaciones entre concentraciones en el cuarto y quinto periodo . . .	72
4.35. Concentraciones promedio registradas en los cinco periodos de medición.	73
4.36. Histograma de los valores de Radón medidos en los cinco periodos .	74
4.37. Prueba de Anderson - Darling para las concentraciones de los cinco periodos	75
4.38. Estadístico Kolmogorov Smirnov para las concentraciones de los cinco periodos	76

4.39. Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 durante todo el monitorio.	77
C.1. Rango en aire de partícula alfa de Radón	92
C.2. Diferencias en rango en aire para diferentes épocas del año	93
E.1. Ficha de ubicación de los detectores (Parte I)	95
E.2. Ficha de ubicación de los detectores (Parte II)	96



Índice de tablas

1.1. Factores de Ponderación de la Radiación [20].	3
1.2. LET de distintos tipos de radiación [7]	4
1.3. Factor de ponderación de tejido.	4
1.4. Cadenas Naturales de Elementos Radiactivos [60]	9
1.5. Concentración de Ra^{226} y Rn^{222} en diferentes tipos de roca[47].	11
1.6. Ra^{226} equivalente en materiales usados en construcción [34].	11
1.7. Distancias de difusión media de los isotopos de Radón [26].	12
1.8. Características de diferentes dispositivos de medición de Rn^{222} [53].	16
2.1. Incertidumbres de medición en el detector LR-115 [40]	24
2.2. Efectos químicos en las trazas [31]	26
3.1. Materiales predominantes en paredes en el distrito de San Martín de Porres [25].	29
3.2. Materiales predominantes en pisos en el distrito de San Martín de Porres [25].	29
3.3. Número de detectores por km^2	30
4.1. Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el primer periodo.	40
4.2. Estadísticos primer periodo en Bq/m^3	40
4.3. Densidad de trazas y concentraciones en Bq/m^3 para el segundo periodo.	47
4.4. Estadísticos segundo periodo en Bq/m^3	48
4.5. Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el tercer periodo.	54
4.6. Estadísticos tercer periodo en Bq/m^3	55
4.7. Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el cuarto periodo.	59
4.8. Estadísticos cuarto periodo en Bq/m^3	60
4.9. Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el quinto periodo.	66
4.10. Estadísticos quinto periodo	66
4.11. Resumen:Anova entre el segundo y tercer periodo	71
4.12. Análisis de varianza entre el segundo y tercer periodo	71
4.13. Resumen:Anova entre el cuarto y quinto periodo	72
4.14. Análisis de varianza entre el cuarto y quinto periodo	72
4.15. Estadísticos de los cinco periodo en Bq/m^3	74
B.1. Código de casas y coordenadas GPS	87
C.1. Parámetros ambientales y sus variaciones durante la medición de Radón 222	91

C.2. Valores de temperatura, humedad relativa, presión y densidad de aire para los diferentes periodos de medición.	92
D.1. Valores de D en tests de Kolmogorov-Smirnov [11]	94



Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Antecedentes

El presente trabajo forma parte del proyecto Fincyt, "Monitoreo de Radón 222 en interiores en Lima metropolitana y el Callao", proyecto al cual le han precedido algunos trabajos de investigación realizados por miembros del grupo de investigación de técnica de huellas nucleares de la PUCP (GITHUNU), los cuales implementaron la metodología y estandarizaron los métodos de medición empleados en los diferentes estudios realizados.

Entre los trabajos realizados podemos citar a P. Pereyra et al. en mediciones de la concentración de radón 222 en interiores en Lima [48], el trabajo realizado por J. Rojas et al. en medición de niveles de radón en sótanos [57], evaluación de contaminación del aire debido a elementos radiactivos naturales, realizado por B. Perez et al. [49], trabajos en los cuales se empleó el LR-115 tipo 2 como detector pasivo, el cual hasta la fecha se viene utilizando para los trabajos de investigación realizados por el grupo de técnica de huellas nucleares y en este trabajo.

1.2. Física de las radiaciones

1.2.1. Fuentes de radiación

Radiactividad natural

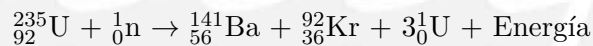
La radiactividad fue descubierta a finales del siglo XIX por Henri Becquerel mientras llevaba a cabo estudios sobre la luminiscencia de las sales de Uranio excitadas por la luz ordinaria. Becquerel colocó sales de Uranio sobre una placa fotográfica en una zona oscura, y observó que dicha placa se ennegrecía lo cual no podía deberse a la fluorescencia ya que no había sido expuesta al sol y sólo era producida por las sales de Uranio, en contraste con otras sustancias fluorescentes que no producían el mismo efecto. Además Becquerel demostró que la radiación descubierta responsable del ennegrecimiento de las placas fotográficas, podía ser desviada por un campo magnético y que podían producir la descarga de un cuerpo cargado eléctricamente, descubrimiento que permitió el empleo de las cámaras de ionización para medir cuantitativamente la intensidad de la radiación o actividad [21].

Posterior a las investigaciones de Becquerel, Marie Curie encontró que sólo el Uranio y el Torio emitían tales radiaciones y que la intensidad de la radiación dependía de la cantidad de elemento metálico presente en la muestra. En sus estudios posteriores los esposos Curie lograron demostrar la existencia de dos nuevos elementos: el Polonio y el Radio. [63]

Radiactividad artificial

En 1934 la pareja Joliot-Curie descubrió que la radiactividad no sólo podía observarse en algunos átomos de núcleos inestables, también se podía observar que sustancias bombardeadas continuaban emitiendo radiaciones aún después de retirar el elemento radiactivo emisor de partículas. Estudios posteriores demostraron que el bombardeo del Uranio 238 con neutrones lentos producía un isótopo con un periodo de 23 minutos y al desintegrarse produce otro isótopo de un nuevo elemento con $Z=93$ al que se llamó Neptunio. De esta manera, se formó el proceso de fisión nuclear inducida mediante neutrones, para producir las nuevas especies radiactivas que pasaron a formar parte de los nuevos elementos de la tabla periódica, conocidos como elementos transuranidos.

Es frecuente hablar de la radiactividad artificial en el uso de la medicina y la producción nuclear de energía eléctrica, que se obtiene a partir del proceso de fisión del Uranio al que se bombardea con neutrones, y al romperse origina dos átomos de una masa media (por ejemplo Kriptón y Bario) y liberando a su vez dos o tres neutrones que fisiónaran otros átomos de Uranio 235, originándose así una reacción en cadena. La fisión controlada de Uranio 235 genera 200 MeV equivalentes a $3,2 \cdot 10^{-11} J$ por átomo de uranio fisionado [6].



1.2.2. Magnitudes y unidades

Actividad:

Es el número de desintegraciones nucleares de una determinada masa de material radiactivo por unidad de tiempo.

Unidad antigua: Curio (Ci), el cual equivale a la actividad de un gramo de Radio 226.

$$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{des/s}$$

Unidad S.I.: Bequerelio (Bq)

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

Equivalencias:

$$1\text{Bq} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{Ci}$$

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

Concentración de la actividad:

Es la Actividad por unidad de volumen (m^3) del isótopo respectivo [33].

$$C = \frac{A}{V}$$

Unidad S.I. : Bq/m^3

Dosis Absorbida:

Es el cociente entre la energía media impartida por la radiación ionizante $d\bar{\epsilon}$ por unidad de masa dm .

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

Es válida para partículas de todo tipo y es función de la energía absorbida [33].

Unidad S.I. : J/Kg , el cual recibe el nombre de Gray (Gy)

Dosis equivalente:

Es el producto de la dosis absorbida por un factor de ponderación w_R en el punto de incidencia de la radiación, donde el valor de dicho factor dependerá del tipo de energía y rango [20].

Unidad S.I. : J/Kg , el cual recibe el nombre de Sievert (Sv); y viene dada por la expresión:

$$H = \sum w_R D_{T,R}$$

Tabla 1.1: Factores de Ponderación de la Radiación [20].

Factores de Ponderación de la Radiación		
Tipo e intervalo de energías		w_R
Fotones, todas las energías		1
Electrones y muones, todas las energías		1
Neutrones, energía	$< 10KeV$	5
	$10KeVa100KeV$	10
	$> 100KeVa2MeV$	20
	$> 2MeVa20MeV$	10
	$> 20MeV$	5
Protones distintos de los de retroceso		
Energía $> 2MeV$		5
Partículas alfa, fragmentos de fisión		20

Transferencia Lineal de Energía (LET):

También conocida como Poder de Frenado por Colisión, es la energía transferida por unidad de longitud. Cada tipo de radiación tiene su LET específica, de manera que a mayor energía, mayor poder de penetración.

$$LET = \frac{dE}{dl}$$

Su unidad en el S.I es $J.m^{-1}$, aunque también se puede expresar en $KeV/\mu m$ [20]. El concepto de LET se introdujo para facilitar la comparación entre los distintos tipos de radiación.

Tabla 1.2: LET de distintos tipos de radiación [7]

Radiaciones	LET (KeV/micra)
Rayos X Co 60	0,2
Rayos X 250 KeV	2,0
Protones 10 MeV	4,7
Protones 150 MeV	0,5
Neutrones 14 MeV	100
Partículas alfa 2.5 MeV	166
iones Fe 2 GeV	1000

Dosis efectiva:

Mide el efecto biológico como resultado de la dosis absorbida por algunos órganos. Unidad S.I : J/Kg , el cual recibe el nombre de Sievert (Sv); y viene dada por la expresión:

$$E = \sum w_T H_T$$

Donde H_T es la dosis equivalente y w_T es el factor de ponderación de tejido. Según la ICRP se ha especificado valores para w_T que se presentan en la siguiente tabla [24]:

Tabla 1.3: Factor de ponderación de tejido.

Tejido	w_T
Médula ósea	0,12
Pulmón	0,12
Vejiga	0,05
Esófago	0,05
Superficie ósea	0,01
Piel	0,01
Mama	0,05
Estómago	0,12
Colon	0,12
Tiroides	0,05
Gónadas	0,20
Hígado	0,05

1.2.3. Interacción de partículas α con la materia

Las partículas alfa (α) tienen carga positiva al igual que otros iones pesados; y cuando interactúan con la materia, se produce la formación de pares iónicos debido a la atracción Coulombiana entre la partícula alfa que atraviesa el medio material y los electrones de los átomos dentro del material. La masa de las partículas alfa es 4

una, mientras que la del electrón es $5 \cdot 10^{-4}$ una, razón por la cual también se puede producir colisión directa con los electrones atómicos. Los pares iónicos formados por la partículas alfa al atravesar el medio constan de átomos cargados positivamente y electrones libres. Para expresar la intensidad de ionización producida por una partícula cargada se utiliza el término de Ionización Específica; que se define como el número de pares iónicos primarios y secundarios formados en un material por unidad de recorrido de la partícula.

La ionización específica (J_s) se puede calcular a partir de la ionización total (J_t):

$$J_t = E_c/w \quad (1.1)$$

Siendo w la energía necesaria para producir un par de iones en un medio, en el caso del aire w tiene un valor de 35 eV. Si consideramos el cálculo de la ionización total a condiciones normales (15°C y 760 mm de Hg) viene expresada por:

$$J_t = 28,8 \times 10^4 E_c \quad (1.2)$$

Donde E_c es la energía cinética de la partícula en MeV, mientras que la Ionización específica viene expresada por:

$$J_s = J_t/dx \quad (1.3)$$

Para el caso de las partículas alfa provenientes de la desintegración del Radón 222 poseen una energía de 5,49 MeV. En el caso de Lima durante los periodos de medición la densidad del aire varía de un periodo de medición a otro, esto debido a las variaciones de temperatura, humedad relativa y presión. El alcance medio en aire ($\rho = 1,16434 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) aproximado es 4,21 cm, calculado en SRIM[1], será capaz de formar en aire $1,5 \cdot 10^5$ pares iónicos, mientras que la ionización específica será del orden de $3,7 \cdot 10^4$ pares iónicos por cm. A partir del cálculo de la ionización específica producida en el aire debido a las partículas alfa a diferentes distancias de la fuente, se obtiene la curva de Bragg.

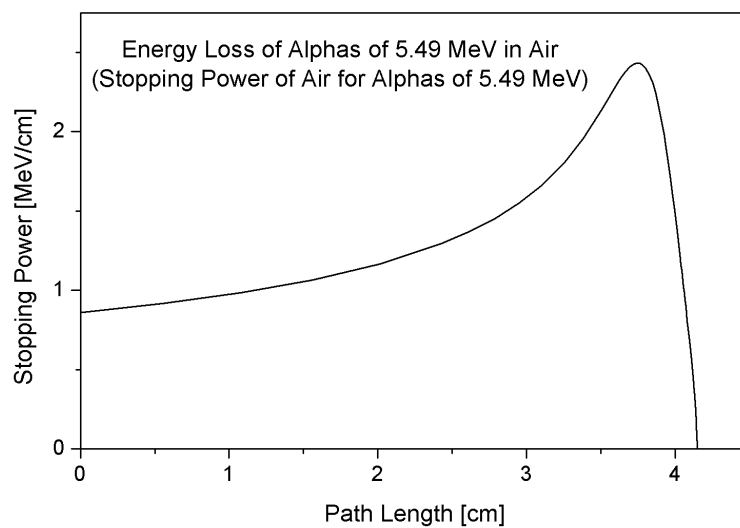


Figura 1.1: Curva característica de Bragg para una partícula alfa de Rn^{222} [2].

La distancia recorrida por las partículas alfa en el medio (rango) está en función de su energía inicial. Para el cálculo del rango de una partícula alfa con una energía de 5.49 MeV como la del Radón 222 ya calculado previamente, se puede emplear la fórmula empírica:

$$R_{air} = (0,005E + 0,285)E^{3/2} \quad (1.4)$$

Donde R es el rango lineal en cm de la partícula en aire y E es la energía en MeV. Esta fórmula se puede aplicar para partículas en el rango de 4 a 15 MeV. Sin embargo de acuerdo a cálculos realizados por Fenyves and Haiman [29] para partículas alfa en el rango de energías de 4 a 7 MeV se puede usar la versión simplificada de la fórmula empírica:

$$R_{air} = 0,318E^{3/2} \quad (1.5)$$

Y para cualquier otro medio se puede usar la relación de Bragg-Kleeman[60]

$$R' = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{A}}{\rho} R_{air} \quad (1.6)$$

Donde ρ es la densidad del medio (g/cm^3) y A es el número másico equivalente del material.

A medida que las partículas cargadas penetran en el material pierden energía, a esto se le denomina *Poder de Frenado* $S(E)$, que se define como la pérdida de energía por unidad de longitud en el medio material.

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (1.7)$$

Donde E es la energía cinética de la partícula. En el SI, el poder de frenado o stopping power se expresa en J/m.

El poder de frenado varía con la energía, razón por la cual el rango de las partículas también lo hace. Para calcular el rango promedio (R) se puede obtener integrando el poder de frenado $S(E)$ sobre la energía (E).

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)} \quad (1.8)$$

El valor de $-dE/dx$ a lo largo de una traza dejada por una partícula en su paso en un medio material se denomina también pérdida de energía específica o más apropiadamente 'tasa de pérdida de energía' [38].

Finalmente la expresión clásica que describe la pérdida de energía específica de la partícula al atravesar el medio material es la fórmula de Bethe-Bloch. Para el caso de partículas cargadas pesadas como las alfa se usa:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (1.9)$$

Donde dE/dx representa el poder de frenado de la partícula en unidades de MeV/m, r_0 es el radio del electrón $= 2,81 \cdot 10^{-15}m$, z es la carga de la partícula ($z=2$ para alfas) y mc^2 es la energía en reposo del electrón $\approx 0,511MeV$, N es el número de átomos por metro cúbico, A es el peso atómico, Z es el número atómico del medio, $\gamma = (T + mc^2)/mc^2 = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$, T es la energía cinética de la partícula en MeV y β es la velocidad relativa de fase, I es el potencial medio de excitación del medio en eV [41].

1.2.4. Desintegración radiactiva

En la desintegración de un núcleo radiactivo, se emite radiación de origen electromagnético y/o corpuscular que da origen a otro núcleo distinto el cual también es radiactivo, y continuará con el proceso de emisión de radiación hasta que aparezca un núcleo estable. El proceso de desintegración radiactiva del núcleo esta ligada al grado de inestabilidad del núcleo antecesor, y el grado de inestabilidad se puede expresar por el periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$), el cual junto a la vida media (τ) y la constante de desintegración (λ) que permite caracterizar la velocidad a la que se desintegra un núcleo radiactivo. Para predecir el número de núcleos de una sustancia radiactiva que va quedando sin desintegrarse con el paso del tiempo se emplea la Ley de desintegración radiactiva, que viene expresada por:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.10)$$

Para calcular el tiempo en que los isótopos radiactivos decaen a la mitad $N(t) = \frac{N_0}{2}$; se obtiene el periodo de semidesintegración.

$$-\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \lambda t \rightarrow t_{1/2} = 0,693 \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (1.11)$$

Regresando a la ecuación 1.10 para el número existentes de átomos a un tiempo t y derivando:

$$dN(t) = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt \quad (1.12)$$

Partiendo de la ecuación anterior se puede determinar la vida media τ como la suma de los tiempos de existencia de todos los átomos, dividido por el número inicial de ellos; y debido que el decaimiento es un proceso estadístico, un solo átomo puede tener un tiempo vida de 0 a ∞ . Entonces la vida media vendrá dada por [37]:

$$\tau = 1/N_0 \int_0^{\infty} N_0 \lambda t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.13)$$

De las ecuaciones (1.11) y (1.13) obtenemos la relación entre la vida media y el periodo de semidesintegración:

$$t_{1/2} = 0,693\tau \quad (1.14)$$

Así por ejemplo para el caso del Radón 222, tenemos:

$$t_{1/2} = 3,82 \text{ días}$$

$$\tau = 5,51 \text{ días}$$

$$\lambda = 2,099 \cdot 10^{-6} s^{-1}$$

Cuando una sustancia radiactiva decae el padre emite una partícula alfa o beta y en algunas ocasiones viene acompañado de emisión de rayos gamma, proceso por el cual se convierte en un nuevo elemento, este producto sigue siendo radiactivo y eventualmente expulsará una partícula, decayendo así en un nuevo átomo y el proceso continuará hasta que finalmente se tenga un átomo estable.

De esta manera se puede representar la secuencia de desintegración radiactiva de los núcleos pesados, los cuales a su vez se pueden clasificar en tres series radiactivas, que decaen mediante emisión alfa o beta.

En la emisión alfa el núcleo predecesor emite una partícula, que equivale a un núcleo de helio (2 protones y 2 neutrones), estas partículas son emitidas de los radionucleidos con diferentes energías en el rango de 4 a 10 MeV[41].

En experimentos realizados se han encontrado que existe una correlación entre la vida media del núcleo y la energía de la partícula alfa, de manera que a mayor energía corresponde una menor vida media [64], que se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$\log(\tau/sec) \cong \frac{148}{\sqrt{\frac{E}{MeV}}} - 53,5 \quad (1.15)$$

Y al graficar se puede ver que aunque la curva teórica es sólo una aproximación, la tendencia general del comportamiento del periodo de semidesintegración en función de la energía queda reproducida en la gráfica siguiente.

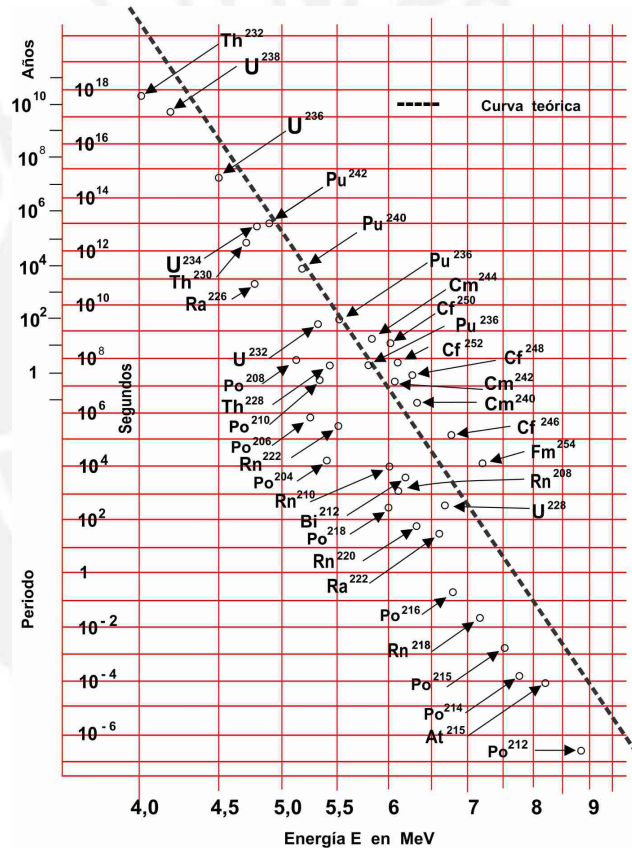


Figura 1.2: Período de los emisores alfa en función de su energía [64].

Esquema de decaimiento de las partículas α :



En el caso de las emisiones de partículas beta se emite un electrón y un anti-neutrino (positrón y neutrino para emisión beta positivo), y el número de masa no cambia, pero el número de carga cambia en +1(-1) [64].

Esquema de decaimiento de las partículas β^- :



1.2.5. Cadenas de desintegración radiactiva

En la naturaleza podemos encontrar tres cadenas de desintegración radiactiva: la del Uranio 238, Torio 232 y Actinio 235, a estas cadenas se le puede añadir la del Neptunio 237 (existente sólo en laboratorios o accidentes nucleares), que se muestran en la figura 1.4; sin embargo al poseer una vida media corta del orden de 10^6 años su cadena se considera prácticamente extinta en la naturaleza con respecto a las otros emisores padres de las series. La tierra tiene una edad aproximada de $4,5 \cdot 10^9$ años, que esta en el orden de las vidas medias del Uranio 238 y Torio 232, siendo ambas cadenas las más abundantes en la naturaleza, seguidas por la cadena del Actinio 235. Además de estas cadenas naturales, existe otro elemento radiactivo también de origen natural, el Potasio 40, el cual representa aproximadamente el 0,012 % del potasio presente en la corteza terrestre. De las tres cadenas de elementos radiactivos presentes en la naturaleza la que representa un problema de salud, es la del Uranio 238 como se puede ver en la Figura 1.3, ya que en su decaimiento se encuentra el gas Radón 222 objeto de estudio de esta tesis, que finaliza con el Plomo 206 como elemento estable (${}^{238}_{92}\text{U} \Rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb}$).

A lo largo de esta serie de decaimientos radiactivos hay una disminución de 32 nucleones lo que implica 8 desintegraciones alfa, y una disminución de 10 protones producto de 6 desintegraciones β^- que compensan las desintegraciones alfa [60].

Tabla 1.4: Cadenas Naturales de Elementos Radiactivos [60]

Serie	Tipo	Elemento	$t_{1/2}$ años	Estable
Torio	4n	Th 232	14.1×10^9	Pb 208
Neptunio	4n+1	Np 237	2.14×10^6 (no natural)	Bi 207
Uranio	4n+2	U 238	4.47×10^9	Pb 206
Actinio	4n+3	U 235	$0,704 \times 10^9$	Pb 207

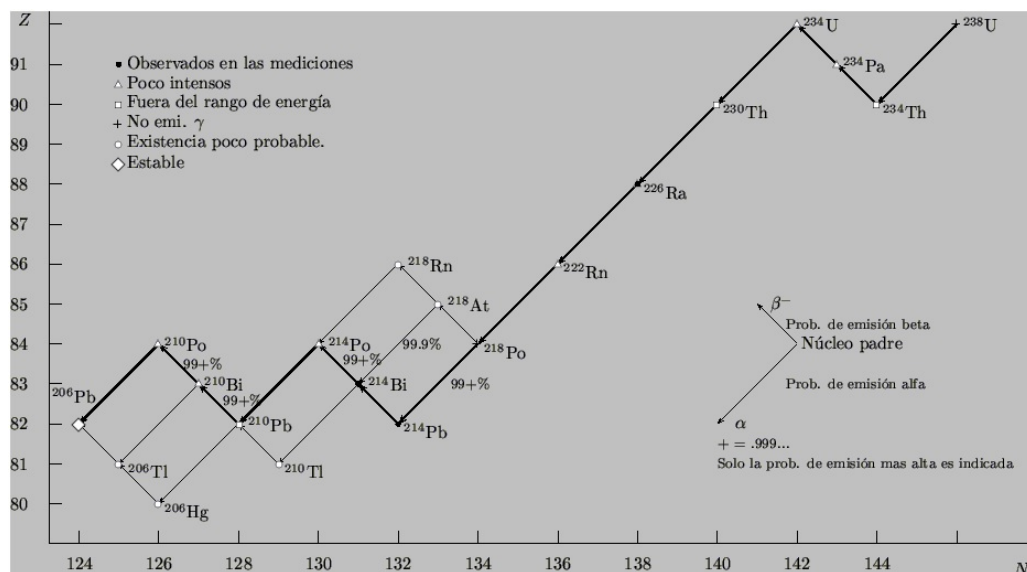


Figura 1.3: Diagrama de decaimiento del U^{238} [58].

1.3. Radón 222 y su progenie

1.3.1. Riesgos de la exposición al gas Radón

El radón y su progenie es el segundo causante de cáncer de pulmón a nivel mundial, esto es debido a que en la cadena de desintegración del Uranio 238, el Radón 222 es el único descendiente en estado gaseoso que emite partículas alfa con una energía de 5,49 MeV, esta energía de emisión de partículas alfa y su poco poder de penetración en la materia no representa riesgo para nosotros al ser frenada fácilmente por la epidermis, el problema radica cuando por proceso de inhalación (también por ingestión) este elemento radiactivo y sus descendientes entran en el organismo. Al respirar e inhalar el Radón sus descendientes se alojan finalmente en el tracto respiratorio afectando principalmente a los alvéolos pulmonares, donde la emisión de partículas alfa producto de la desintegración del Radón y su progenie estarán bombardeando las células del tejido pulmonar causando daño a nivel de ADN; según la OMS se estima que entre un 3% - 14% del total de los casos de cáncer de pulmón son atribuibles al radón, además plantea que un incremento en la concentración media a largo plazo de 100 Bq/m^3 aumenta en un 16% la probabilidad de padecer cáncer de pulmón [5].

La probabilidad de tener cáncer de pulmón causado por Radón en interiores es mayor en personas que fuman, se cree que la exposición al Radón y al consumo de cigarrillos produce un efecto combinado que excede la suma de sus efectos independientes debido a que las hijas del Radón se combinan fácilmente con el polvo y aerosoles para posteriormente por inhalación alojarse en los pulmones [17].

Con el propósito de estimar las repercusiones en la salud de los niveles de radón en interiores se elaboraron diferentes modelos de proyección de riesgo los cuales están basados en datos de exposición ocupacional y cubren diferentes parámetros como edad de las personas, tiempo de exposición entre otros factores físicos y biológicos.

De hecho la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos ha propuesto el modelo BEIR VI, el cual estima un exceso de riesgo por unidad de exposición y a diferencia de otros modelos existentes, permite tener en cuenta los hábitos de fumar [15]. Como resultado de este modelo se determinó que el riesgo de tener cáncer de pulmón a los 75 años para concentraciones de 0, 100 y 400 Bq/m^3 serían 0,4 %, 0,5 %, 0,6 % respectivamente para los no fumadores, mientras que para los fumadores sería aproximadamente 25 veces mayor, elevando las probabilidades a 10 %, 12 % y 16 % respectivamente [23].

1.3.2. Fuentes de Radón 222

El radón se produce naturalmente dentro de la cadena de desintegración del Uranio 238, elemento que está presente en los diferentes tipos de suelos y rocas. La producción de Radón depende de la cantidad de Radio 226 presente en el suelo en diferentes proporciones. La UNSCEAR en el año 1993 publicó las concentraciones de Radio 226 en diferentes tipos de rocas que se puede ver en la tabla 1.5.

Tabla 1.5: Concentración de Ra^{226} y Rn^{222} en diferentes tipos de roca[47].

Tipo de Roca	Concentración ($BqKg^{-1}$)	
	Ra 226	Rn 222
Granito	78	111
Balsato	11	10
Caliza	45	60
Arcilla, arena	60	50
Metamorfa Ígnea	50	60
Metamorfa Sedimentaria	37	49

Sin embargo el suelo y sus componentes no son la única fuente de Radón, el Radón emana naturalmente del interior de algunos materiales de construcción donde se puede encontrar algunas trazas de Radio 226 como se puede visualizar en la tabla 1.6.

Tabla 1.6: Ra^{226} equivalente en materiales usados en construcción [34].

Material	$Ra^{226} BqKg^{-1}$
Cemento	70,6
Ladrillos de cemento	78,1
Fosfoyeso	430,9
Caolinita	281,8
Bauxita	117,5

1.3.3. Mecanismos de transporte del Radón

El Radón entra a la atmósfera de los interiores de las viviendas principalmente cruzando la interfase tierra-aire o material de construcción-aire [52] a través de dos mecanismos de desplazamiento como son la difusión y convección. El gas Radón proviene de la desintegración de Radio 226 el cual esta presente en el suelo y en

los materiales de construcción en mayor o menos proporción, por ello es importante conocer que cantidad de Radio 226 existente en la zona. En el proceso de desintegración del Radio 226 una fracción de átomos de Radón 222 abandonan los granos del material y se dirigen hacia la superficie del terreno (emanación), donde la cantidad de Radón liberada a la atmósfera (exhalación) dependerá de gran manera de la porosidad del suelo. Estos mecanismos mencionados se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4: Transporte de Radón en suelo y materiales de construcción [52].

En el caso del desplazamiento por difusión el Radón se mueve desde zonas donde su concentración es alta hasta zonas de baja concentración. Al viajar el Radón a través de los poros eventualmente alcanzará la superficie y exhalará. Es importante definir la exhalación o más apropiadamente la tasa de exhalación como el flujo de átomos de Radón que atraviesan una área de material en un tiempo determinado. Para el cálculo de la exhalación de Radón por efecto de la difusión es:

$$e = \varepsilon a_B \rho \lambda_0 R_B \quad (1.18)$$

Donde R_B es $\sqrt{\frac{D_B}{\lambda_0}}$ que se conoce como longitud de difusión de los isotopos del Radón en suelo, a_B es la concentración de Radio, ε es el poder de emanación y ρ es la densidad del suelo [52].

La exhalación (e) tiene unidades de $Bq.cm^{-2}.s^{-1}$

Tabla 1.7: Distancias de difusión media de los isotopos de Radón [26].

MEDIO	Distancia Media (cm)		Constante de difusión ($cm^2.s^{-1}$)
	Radón 222	Radón 220	
Aire	220	2,85	10^{-1}
Suelo poroso	155	2	$5 \cdot 10^{-2}$
Agua	2,2	0,0285	10^{-5}
Suelo poroso saturado	1,55	0,2	$5 \cdot 10^{-6}$

El mecanismo de difusión es de mayor importancia cuando son los materiales de construcción quienes contribuyen en mayor medida a la concentración de Radón en interiores. Por otro lado, cuando se quiere explicar altas concentraciones en interiores donde el suelo es la principal fuente de Radón, la mejor explicación es la convección como mecanismo de transporte de Radón.

El transporte de Radón por convección se fundamenta en la diferencia de presiones existentes entre dos medios, en el caso del ingreso del gas Radón a viviendas las diferencias de presión serán las del suelo y el interior de las viviendas. En superficies altamente porosas donde las diferencias de presión son muy marcadas es de esperar una alta concentración de Radón. La velocidad de movimiento del gas Radón a través de los poros del material esta relacionada con la permeabilidad del medio en el que se mueve. En el caso del suelo, donde se puede considerar el gas como incompresible, la velocidad de transporte de Radón por convección a través de un medio poroso cuando el flujo es laminar y el flujo de resistencia está dominado por la viscosidad del fluido se puede expresar mediante la Ley de Darcy como [44]:

$$v_D = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (1.19)$$

Donde v_D , es el vector de velocidad, k es la permeabilidad intrínseca, μ es la viscosidad dinámica del fluido. ∇P es el gradiente de presión dinámica del suelo. Si se multiplica a la velocidad con la que el radón atraviesa el medio (v_D) por la actividad de la concentración de Radón (I^a), y se divide por el coeficiente de porosidad ε_a , se obtiene el flujo de actividad de concentración de Radón por unidad de área debido al proceso de convección J^a [44]:

$$v_D I_a = -\frac{k}{\mu \varepsilon_a} \nabla P I_a \Rightarrow J^a = -\frac{k}{\mu \varepsilon_a} \nabla P I_a \quad (1.20)$$

1.3.4. Decaimiento de Radón 222

Cuando se estudia el decaimiento radiactivo de un elemento se tiene en cuenta el periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$), la vida media (τ) y la constante de desintegración (λ), en el caso del Radón 222 sucede que la vida media es aproximadamente 200 veces mayor que cualquiera de sus productos de vida corta [8], como se puede ver en la siguiente figura.

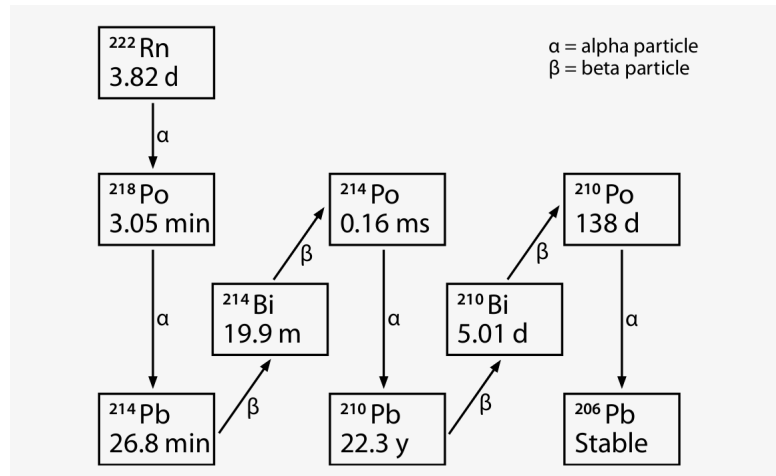


Figura 1.5: Productos de desintegración de Rn^{222} [4]

Para tratar de entender lo que ocurre con los productos de decaimiento del Radón es necesario revisar las ecuaciones de Bateman, las cuales permiten conocer el número de átomos de cada elemento en una muestra a un tiempo dado.

A partir del sistema de ecuaciones diferenciales en el que Rutherford demostró que las cantidades de sustancia de un elemento radioactivo y sus descendientes se relacionan por:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_A}{dt} &= -\lambda_1 N_A \\ \frac{dN_B}{dt} &= \lambda_1 N_A - \lambda_2 N_B \\ \frac{dN_C}{dt} &= \lambda_2 N_B - \lambda_3 N_C \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

Donde N_A es el número de átomos radioactivos del elemento inicial y N_B, N_C sus productos sucesivos que están presentes a un tiempo t [14].

Y que presentan solución:

$$\left. \begin{aligned} N_A(t) &= N_0 e^{-\lambda_1 t} \\ N_B(t) &= N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\ N_C(t) &= N_0 \left(1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}) \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

En el caso del Radón 222 y su progenie, el equilibrio radiactivo se alcanza después de aproximadamente 3 horas [43], tiempo después del cual, la relación de las actividades de los descendientes del Radón y él son aproximadamente 1, lo cual indica que después de ese tiempo se alcanza el equilibrio secular.

Por ejemplo para una fuente de Radón de actividad constante (A_{Rn222}) la relación del crecimiento de la actividad de los productos de decaimiento de corta vida respecto a la actividad de la fuente se puede observar en la siguiente gráfica:

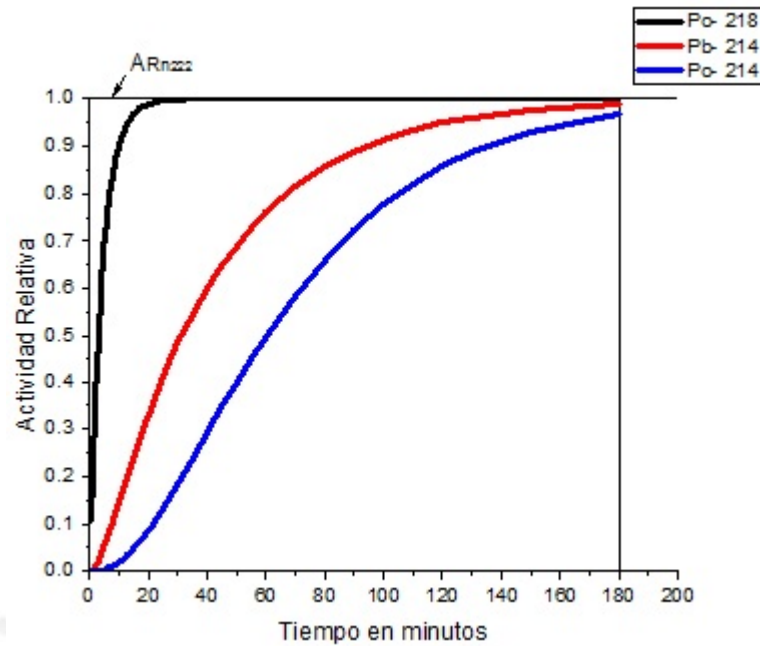


Figura 1.6: Crecimiento de la actividad de las hijas de Rn^{222} hasta lograr el equilibrio secular. Gráfica obtenida a partir de la data de [28].

1.3.5. Medición y detección de Radón 222

Para la medición de Radón se puede emplear métodos activos o pasivos y para cada método existen diferentes dispositivos. Estos métodos se deben tener en cuenta cuando se realizan las mediciones, así por ejemplo si se quiere medir a corto plazo se obtendrá una primera aproximación de lo que sucede con los niveles de Radón en el interior; sin embargo se debe tener en cuenta la estación en la que se realiza la medición debido a que los cambios de temperatura y hábitos de las personas influyen en una mejor o peor ventilación del lugar de medición, por ello es recomendable, y así lo señala la OMS en el manual sobre el radón en interiores, realizar mediciones a largo plazo usando dispositivos que proporcionen una medición de Radón integrada a largo plazo [53]. Dependiendo del tiempo en que se necesiten las mediciones, la sensibilidad y el costo del mismo se puede elegir entre los diferentes dispositivos que aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 1.8: Características de diferentes dispositivos de medición de Rn^{222} [53].

Tipo de Detector	Pasivo / Activo	Incertidumbre Típica (%)	Periodo de muestreo	Costo
Detector de huellas para partículas alfa	pasivo	10 - 25	1 - 12 meses	bajo
Detector de carbón activado	pasivo	10 - 30	2 - 7 días	bajo
Cámara iónica de electreto	pasivo	8 - 15	5 días - 1 año	medio
Dispositivo de integración electrónico	activo	- 25	2 días - año(s)	medio
Monitor continuo de radón	activo	- 10	1 hora - año(s)	alto

Para tener una estimación más exacta al realizar la medición de los niveles de radón es importante considerar el factor de equilibrio y el efecto de plate out sobre el detector y la habitación para una correcta ubicación de los detectores.

Factor de equilibrio

El riesgo de la exposición a la radiación debido al Radón es principalmente consecuencia de la inhalación de sus productos de corta vida como el Polonio 218, Plomo 214, Bismuto 214. Los sistemas de medición existentes, determinan la concentración de Radón 222 en el aire, valor que se puede relacionar con la concentración de sus descendientes de corta vida, mediante el factor de equilibrio F [65] .

$$F = \frac{C_{eq}}{C_{Rn222}} = \frac{0,105C_{Po218} + 0,516C_{Pb214} + 0,379C_{Bi214}}{C_{Rn222}} \quad (1.23)$$

Efecto Plate-out

La progenie del Radón pueden depositarse mediante los procesos básicos de fijación, retroceso y deposición, y por los parámetros específicos de la emanación y ventilación del Radón [51] en la superficie de techos, suelos, paredes, aerosoles en suspensión y sobre los detectores. En el caso de los LR-115 las partículas depositadas mediante los procesos mencionados no son detectadas por el detector debido a la ventana energética de detección que presenta, caso contrario en los detectores CR-39 (allyl diglycol carbonate) que al presentar un amplio rango de detección, sí detectan estas partículas.

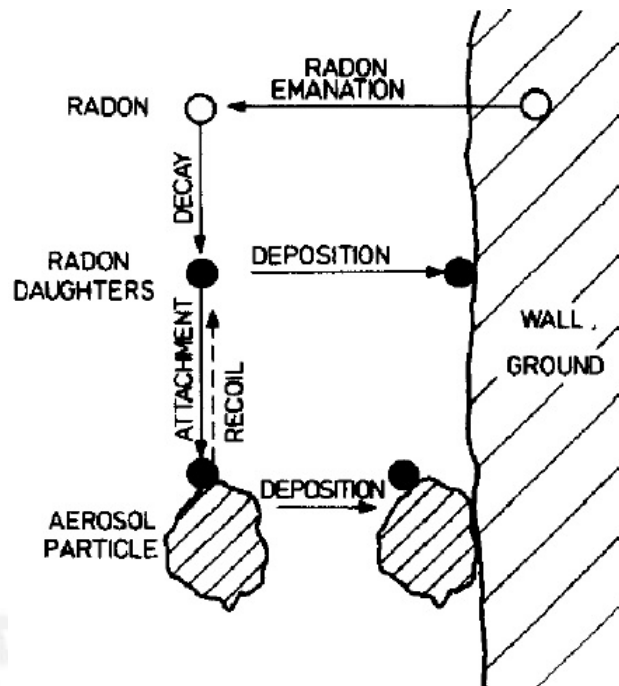


Figura 1.7: Procesos básicos que influyen en el balance de actividad del radón y su progenie[51].

1.3.6. Aplicaciones

En los trabajos realizados en el grupo de investigación, la principal aplicación de la medición de los niveles de radón es con fines de radioprotección; sin embargo se han reportados diversos estudios en los cuales se usa al radón, siendo sólo algunas:

1. Vulcanología, observaciones realizadas han demostrado que el contenido de Radón 222 aumenta en los gases que emanan del cráter de la cumbre y de las aguas termales al pie del volcán antes y durante la actividad del volcán [22]
2. Como trazador de masas de aire, debido a su periodo de semidesintegración se puede encontrar en cantidades significativas en la tropósfera, de manera que al medir su concentración se puede determinar el desplazamiento de estas masas de aire comparando los resultados con las corrientes atmosféricas [55].
3. En la prospección de yacimientos radiactivos, principalmente uraníferos, donde se mide la concentración de radón y se analiza los gradientes y sus picos de medición [18].
4. Exploración de yacimientos de petróleo, donde se ha observado una buena correlación entre la densidad de pozos de petróleo y los niveles de Rn^{222} [30]
5. En Sismología, algunos estudios han demostrado que se puede tomar las anomalías en las mediciones de radón como un precursor de un evento sísmico [50].

6. En Arqueología, área en la cual el grupo de investigación viene realizando trabajos con el propósito de encontrar una correlación entre los gradientes en el área de estudio y posible hallazgos de contextos funerarios y también con propósitos de radioprotección.



Capítulo 2

Técnicas de detección de las partículas α

Para detectar partículas alfa se utilizó la metodología de huellas nucleares en sólidos o por sus siglas en inglés SSNTM, la cual es empleada en la detección de partículas alfa. [27].

La base de la metodología es el uso de detectores de huellas nucleares de estado sólido (SSNTD), pasivos e integradores los cuales registran las partículas alfa que inciden sobre un detector en un rango de energía determinado en función del material detector, así por ejemplo en el caso del LR-115 tipo 2 (nitrato de celulosa) tiene una ventana de detección de 1,6 a 5,4 MeV [42], mientras para el caso del CR-39 (allyl diglycol carbonate) detecta prácticamente todas las partículas sin discriminar la energía que poseen debido a su mayor espesor. A pesar de que en sus inicios esta metodología tuvo sus detractores pues consideraban que los sistemas de medición electrónicos que se desarrollaban entonces tenían ventaja sobre el uso de detectores de estado sólido, con el tiempo se ha venido afianzando en diferentes laboratorios los cuales la respaldan como una herramienta confiable, de gran precisión, fácil uso, transporte y bajo costo.

2.1. Trazas nucleares en SSNTD

Al incidir una partícula alfa en un SSNTD crea a lo largo de su trayectoria una zona de daño conocida como huella latente, en el caso de los sólidos ordenados afecta su estructura cristalina, y en el caso de sólidos amorfos como los polímeros rompe sus cadenas poliméricas produciendo además radicales libres. Las huellas latentes fueron estudiadas por diversos investigadores quienes estimaron un diámetro aproximado que oscila entre 25 a 100 Å. Para poder ser contadas y obtener la densidad de huellas (número de huellas por unidad de área) en el detector es necesario realizar el grabado químico que tiene por función agrandar las huellas latentes para ser visibles al conteo por medio del microscopio óptico donde las huellas alcanzan un diámetro de unas cuantas micras [1 a 15 μm].

2.1.1. Mecanismos de la formación de huellas

Los mecanismos de formación de huellas difieren para los sólidos cristalinos y para sólidos amorfos siendo el factor de mayor importancia la producción de rayos delta o electrones secundarios, que se forman como producto del paso de la partícula alfa por el medio material en el que extrae electrones y adquieren energía del orden de KeV para luego producir nuevas ionizaciones, los cuales en el caso de los cristalinos no afecta la formación de la traza; sin embargo en el caso de los amorfos son de suma importancia, así lo demuestran algunos estudios que atribuyen a los rayos delta un aumento en el diámetro de la traza originada [39]. Algunos de los modelos planteados intentaron explicar el mecanismo de formación de trazas, pero fallaban en algunos aspectos como por ejemplo el modelo de pérdida de energía restringida planteado por Benton [16], ignora la contribución de los rayos delta y es inconsistente con algunos resultados experimentales, por otro lado el modelo de pico de explosión iónica (ion explosion spike) planteado por Fleischer es uno de los que mejor explica la formación de la traza con buenos resultados para sólidos cristalinos, pero en el caso de polímeros no considera los efectos de rayos delta. Para tratar de entender este proceso se puede ver en la Figura 2.1 el daño ocasionado por la partícula alfa al incidir en un cristal y en un polímero respectivamente,

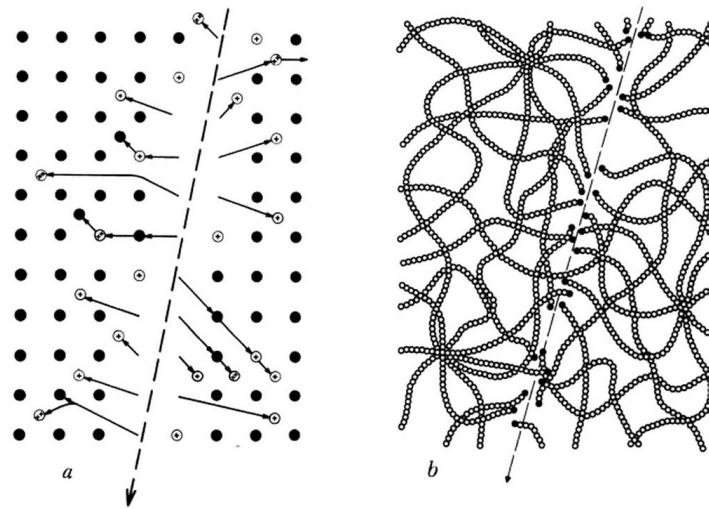


Figura 2.1: Daño de una partícula: a) en un cristal b) en un polímero [31]

2.1.2. Geometría de la traza grabada

Posterior al registro de la huella latente, se procede al tratamiento químico del detector para aumentar las dimensiones de la huella. En este proceso la sustancia grabadora genera daño en todo el material, tanto en la parte donde se ha registrado el daño por la partícula alfa (sendero) como en la superficie, de esta manera se puede considerar para un tiempo t que se somete al grabado químico, la distancia o espesor reducido vendrá dado aproximadamente por $V_T t$ para el camino recorrido por la partícula alfa y $V_B t$ para el espesor reducido en la zona no dañada. En la Figura 2.2 se puede ver el caso más simple de la formación de una huella generada por el paso de una partícula alfa sobre el detector con incidencia normal.

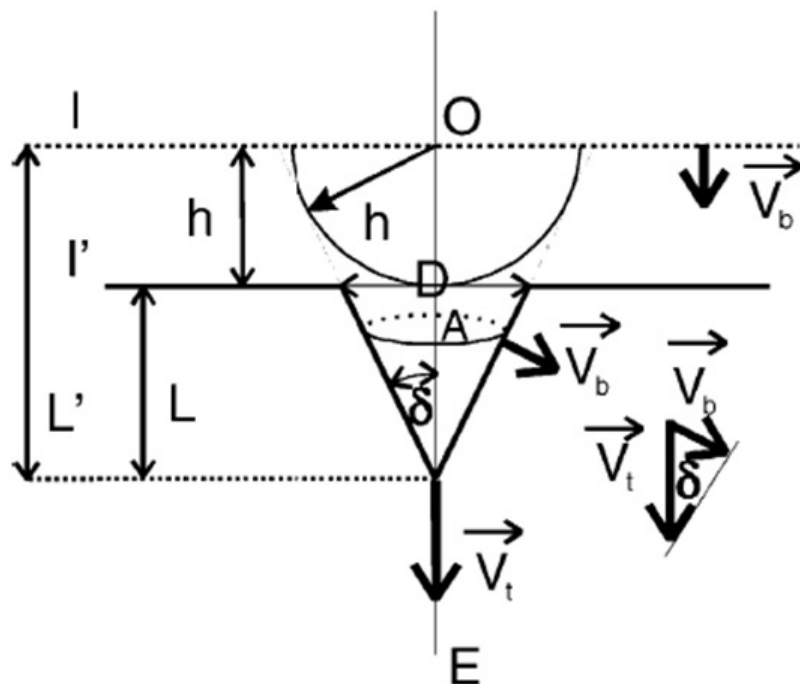


Figura 2.2: Modelo geométrico de la Formación de la traza [45]

Donde:

I : superficie inicial detector.

I' : superficie después del grabado químico.

O : punto de ingreso de la partícula .

E : punto final del recorrido de la partícula.

D : diámetro de la traza formada después del grabado químico

L : profundidad de la huella latente.

L' : profundidad de la traza grabada después del ataque químico.

V_T : velocidad de ataque a lo largo de la trayectoria de las partículas (velocidad de grabado de traza).

V_B : velocidad de grabado de las regiones no dañadas del detector (velocidad de grabado).

OE = rango de partícula en el detector.

La distancia entre I y I' es igual a h , es decir, el espesor de la capa eliminada por ataque químico[45].

Para el desarrollo de la traza por grabado químico, se forma un hemisferio con radio $h = V_B t$ alrededor de cada punto de la superficie del detector, excepto a lo largo del sendero dejado por la partícula al atravesar el material donde el grabado avanza con velocidad V_T .

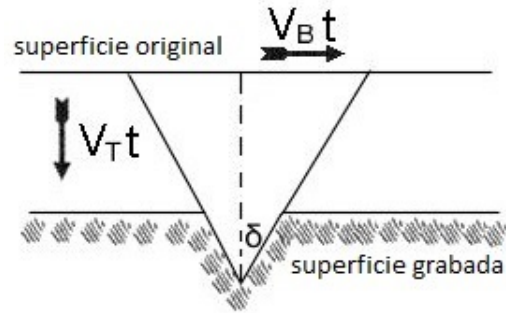


Figura 2.3: Desarrollo de la traza por efecto de las velocidades de grabado

Al existir dos velocidades de grabado como se ha mencionado líneas atrás, es importante conocer el ritmo de desgaste del detector para que la traza se desarrolle lo suficiente de manera que se pueda efectuar una buena lectura.

De la Figura 2.2 se puede observar que V_B y V_T forman un triángulo del cual se puede deducir fácilmente la siguiente relación:

$$\text{sen} \delta = \frac{V_B}{V_T} \quad (2.1)$$

De esta relación se puede realizar un cambio de variable haciendo que:

$$V_T/V_B = V \quad (2.2)$$

De manera que la ecuación se puede reescribir:

$$\text{sen} \delta = \frac{1}{V} \quad (2.3)$$

Y para que seno del ángulo exista debe cumplir que $V > 1$.

También se puede observar que si se relaciona el radio de la traza revelada $D/2$ y L , se puede obtener:

$$\text{tan} \delta = \frac{D}{2L} \quad (2.4)$$

Finalmente de la Figura 2.2 se puede obtener la relación que da la profundidad de la traza en el detector:

$$L = (V_T - V_B)t \quad (2.5)$$

Se puede realizar un cálculo geométrico y obtener:

$$\text{tan} \delta = \frac{V_B}{\sqrt{(V_T)^2 - (V_B)^2}} \quad (2.6)$$

$$\text{tan} \delta = \frac{h}{\sqrt{(V_T t)^2 - (V_B t)^2}} \quad (2.7)$$

$$\text{tan} \delta = \frac{h}{\sqrt{L^2 - h^2}} \quad (2.8)$$

Igualando (2.4) y (2.8):

$$\frac{D}{2L} = \frac{h}{\sqrt{L^2 - h^2}} \quad (2.9)$$

$$D = 2h\sqrt{\frac{V-1}{V+1}} \quad (2.10)$$

Para valores de $V \gg 1$ que corresponde a $V_t \gg V_b$, la ultima expresión se puede reducir a:

$$D \cong 2h \quad (2.11)$$

Esta relación muestra que el espesor de la capa eliminada del detector estaría directamente relacionada con el diámetro de apertura de la traza.

2.2. El detector LR-115 tipo 2

El film LR-115 tipo 2 es un detector sensible a partículas alfa formado por dos películas: una de nitrato de celulosa de espesor $12\mu\text{m}$ y una de poliéster transparente de $100\mu\text{m}$, en los casos en que las partículas incidentes con una energía mayor a la del rango detectable su poder de frenado se produce en el poliéster (ver Figura 2.4), cuando sucede esto la partícula alfa no es visible incluso después del revelado.

Este film no se ve afectado por electrones o radiación electromagnética como rayos X, rayos gamma e infrarrojo. Cuando una partícula alfa impacta con el film, causa daño localizado (huella latente) en la estructura molecular de la capa de nitrato de celulosa.

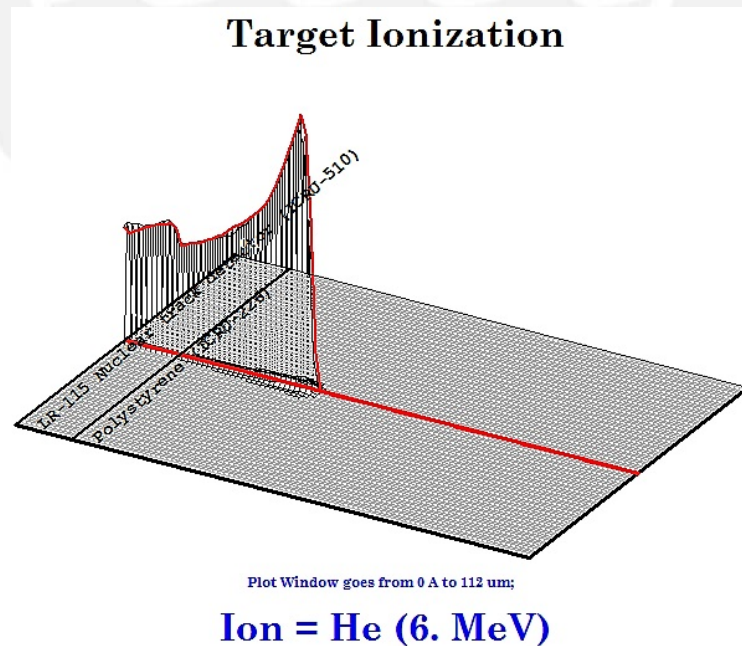


Figura 2.4: Simulación en SRIM para una partícula alfa con 6 MeV frenada en el poliéster del LR-115 [1]

Con el propósito de hacer visible la huella, el film se graba en una solución química.

Según especificaciones del proveedor (DOSIRAD) se recomienda usar NaOH a 2,5N durante un tiempo que puede variar entre 75 a 100 minutos y a una temperatura estable de 60°C con una fluctuación menor a 0,5°C.

Con este procesamiento químico las huellas latentes lograr alcanzar un diámetro que varía entre 1 a 15 μm que a la vez depende de la energía con la cual incidieron sobre el film detector. Se han realizado diversos estudios para determinar la ventana de energías detectables por el LR-115 tipo 2, los investigadores reportan diferentes valores, mientras que el fabricante establece un rango de energías detectables entre 0,8 a 4,5 MeV. Como en toda medición existe una incertidumbre presente, al realizar la propagación de errores donde intervienen los diferentes parámetros del proceso de medición, dicha incertidumbre debe estar en el rango que se puede ver en la siguiente tabla, donde en función de los días que fueron expuestos los detectores, la incertidumbre no debe superar las recomendaciones del fabricante con 2σ de nivel de confianza.

Las incertidumbres de medición en '%' y ' Bq/m^3 ' se correlacionan con diferentes tiempos de exposición y concentraciones de Radón.

Tabla 2.1: Incertidumbres de medición en el detector LR-115 [40]

Exposure (days)	Kodalpha measurement uncertainties as [$\pm Bq/m^3$] and [$\pm\%$] at 2σ confidence level					
	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm
90	8 - 11 17% - 21%	12 - 15 12% - 15%	24 - 30 6% - 8%	34 - 42 4% - 5%	38 - 47 4% - 5%	46 - 58 3% - 4%
75	9 - 19 18% - 23%	13 - 16 13% - 16%	26 - 33 6% - 8%	37 - 46 5% - 6%	41 - 52 4% - 5%	50 - 64 3% - 4%
60	10 - 13 21% - 26%	15 - 18 15% - 18%	29 - 37 7% - 9%	41 - 52 5% - 6%	46 - 58 5% - 6%	50 - 71 4% - 5%
45	12 - 15 24% - 30%	17 - 21 17% - 21%	34 - 42 8% - 11%	47 - 60 6% - 8%	53 - 67 5% - 7%	65 - 82 4% - 5%
30	15 - 18 29% - 37%	21 - 26 21% - 26%	41 - 52 10% - 13%	58 - 73 7% - 9%	65 - 82 6% - 8%	80 - 101 5% - 7%
15	21 - 26 41% - 52%	29 - 37 29% - 37%	58 - 73 15% - 18%	82 - 104 10% - 13%	92 - 116 9% - 12%	113 - 142 8% - 9%
7	30 - 38 60% - 76%	43 - 54 43% - 54%	85 - 108 21% - 27%	120 - 152 15% - 19%	134 - 170 13% - 17%	165 - 208 11% - 14%
	50 Bq/m^3	100 Bq/m^3	400 Bq/m^3	800 Bq/m^3	1000 Bq/m^3	1500 Bq/m^3

Según los estándares y normas internacionales, las incertidumbres de medición de los dispositivos de medición de radón no debe pasar el $\pm 30\%$. En el caso del tiempo de exposición de los detectores para este trabajo de investigación fue de 45 días, de acuerdo a tabla la incertidumbre en la medición para este tiempo es de 30%, valor que es aceptable según la ICRP.

2.3. Factores externos sobre los detectores SSNTD's que pueden afectar la medición

Al realizar las mediciones usando detectores de huellas nucleares es necesario conocer como los diferentes factores debido a parámetros ambientales o manipulación

del investigador antes o durante el procesamiento en el laboratorio puede alterar la lectura de las huellas.

2.3.1. Térmicos

El espesor residual del detector después del tiempo de grabado es un factor importante al realizar la lectura, variaciones de espesor residual conllevan diferencias en la eficiencia de lectura y en la ventana de detección de energías del detector, para controlar esta situación es importante que el sistema de grabado químico mantenga la temperatura establecida en el procedimiento. La temperatura y el tiempo de grabado están directamente ligados con el factor de calibración, debido a que el factor se determina bajo condiciones que deben ser repetidas en el procesamiento químico de los detectores. En la Figura 2.5 se puede ver la variación en el espesor residual del detector en función del tiempo de grabado para una misma temperatura.

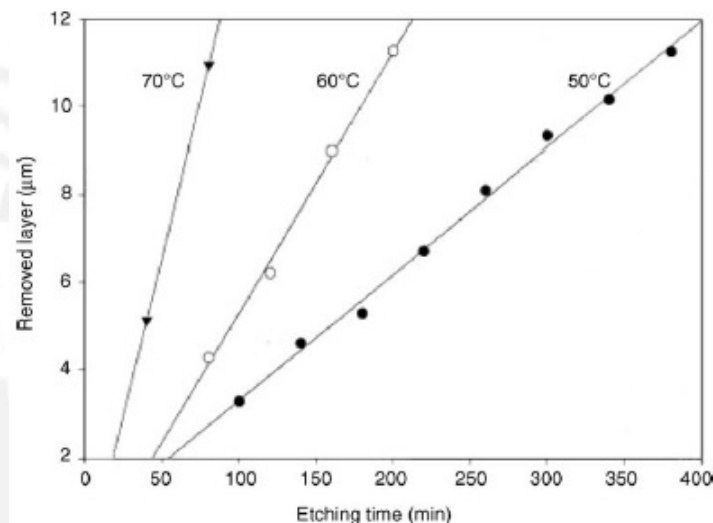


Figura 2.5: Espesor removido del detector LR-115 como función del tiempo de grabado con la temperatura como parámetro [45]

2.3.2. Mecánicos

Durante la manipulación de los detectores en el proceso de preparación para ser colocados en los lugares de medición, suele haber rasgaduras, estiramiento u otro efecto mecánico que puede ocasionar stress sobre el detector. Estos efectos son más fácil de apreciar en el LR-115 tipo 2 debido a su reducido espesor en comparación con el CR-39; sin embargo es importante considerar las formaciones de patrones que se obtienen después del revelado químico y su posterior lectura bajo el microscopio para evitar falsas lecturas.

En la Figura 2.5 se puede apreciar el efecto de stress mecánico que ha sido reportado muy a menudo en la lectura de los detectores LR-115 empleados en el desarrollo de esta tesis.

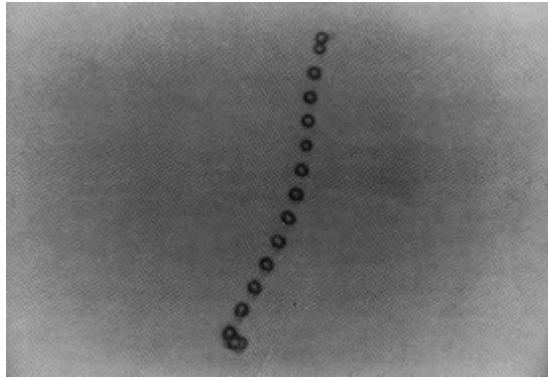


Figura 2.6: Efecto de tensión mecánica en un detector [27].

2.3.3. Químicos

Durante la exposición de los detectores en ambientes con agentes activos tales como O_2 , O_3 , H_2O_2 y H_2O Fleischer observó que puede aumentar la velocidad de desgaste de los polímeros, y en los ambientes neutros como el vacío o la atmósfera de N_2 disminuye la V_t [31].

Tabla 2.2: Efectos químicos en las trazas [31]

Detector	Agente químico	Efecto Ambiental
Nitrato de Celulosa	Ozono	Incrementa V_T/V_B
Nitrato de Celulosa	Oxígeno	Incrementa V_T/V_B
Nitrato de Celulosa	Oxígeno	Incrementa V_T o V_B
Nitrato de Celulosa	Alcanfor	Incrementa V_T/V_B
Nitrato de Celulosa	Ozono	Incrementa V_B
Nitrato de Celulosa	Agua a 50°	Incrementa V_T y V_B por igual

Capítulo 3

Métodos y procedimientos

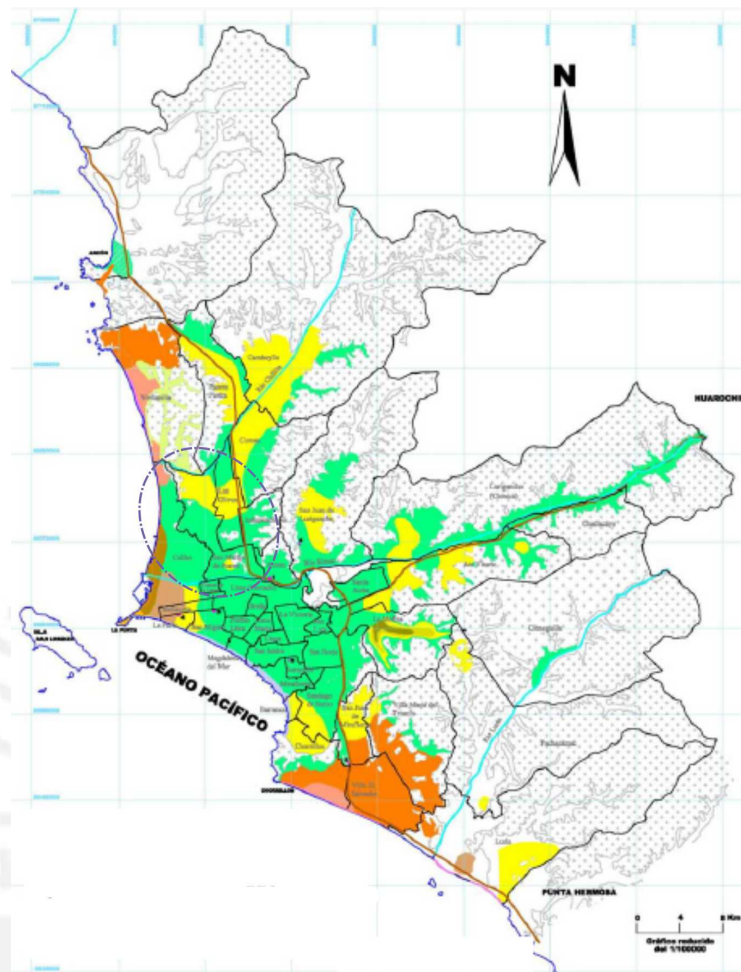
3.1. Características del lugar de estudio

El distrito de San Martín de Porres se encuentra ubicado en el cono norte de Lima Metropolitana, entre las cuencas del Río Rimac y el Río Chillón a unos 123 msnm, presenta una extensión de $41,5 \text{ Km}^2$ y limita por el norte con los distritos de Ventanilla, Puente Piedra y Los Olivos, por el sur con los distritos de Lima y Carmen de la Legua-Reynoso, por el este lo hace con Comas, Independencia y el Rimac, mientras que por el oeste limita con la Provincia Constitucional del Callao. De acuerdo al censo del 2007, San Martín de Porres contaba con 579561 habitantes, según estimaciones y proyecciones para el año 2015 (inicio de las mediciones) el distrito contaba con aproximadamente 700178 habitantes [35].

En cuanto a la litología del distrito, está constituido por gravas y arenas mediante compactos con lentes arenosos. Además la porosidad y permeabilidad del lugar hace posible la existencia de aguas subterráneas que se pueden extraer mediante pozos [25].

Un estudio realizado con fines de cimentación en el distrito de San Martín de Porres para la construcción de un edificio residencial, muestra que el tipo de suelo presente es arena limosa, mezcla de arena y grava mal graduadas [61], resultados que son similares con los presentados en el informe de la municipalidad del distrito [25].

En la Figura 3.1 se puede ver el mapa de la distribución de suelos para los distritos de Lima Metropolitana elaborado por el CISMID, donde el distrito de San Martín de Porres ha sido encerrado con líneas punteadas y se puede observar la variación del suelo entre grava aluvial, arenas y limos con un espesor menor a 10 m.



TIPOS DE SUELOS	SIMBOLO
GRAVA ALUVIAL	[Green box]
GRAVA COLUVIAL	[Light green box]
GRAVAS ANGULOSA - ARENAS PERIGLACIAL	[Green box with diagonal lines]
ARENAS Y LIMOS CON ESPESOR < 10m	[Yellow box with diagonal lines]
ARENAS Y LIMOS CON ESPESOR DE 10 a 20m	[Yellow box]
ARENAS Y LIMOS CON ESPESOR > 20m	[Light brown box]
ARCILLAS Y SUELOS ORGÁNICOS < 10m	[Brown box]
ARCILLAS Y GRAVAS POTENTES	[Orange box]
ARCILLAS BLANDAS	[Dark brown box]
ARENAS EÓLICAS	[Orange box]
SUELOS PANTANOSOS	[Light orange box]
ACANTILADOS DE LIMA	[Red box]
DEPÓSITOS MARINOS	[Pink box]

Figura 3.1: Distribución de suelos de la ciudad de Lima [9]

Los principales materiales usados en la construcción de las viviendas en el distrito según el censo del 2007 se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Materiales predominantes en paredes en el distrito de San Martín de Porres [25].

Material	Cifras absolutas	Porcentajes
Ladrillo o Bloque de cemento	116027	92,9
Adobe o tapia	2716	2,2
Madera	4489	3,6
Otros	1632	1,3

Tabla 3.2: Materiales predominantes en pisos en el distrito de San Martín de Porres [25].

Materiales	Cifras absolutas	Porcentajes
Tierra	11175	9,0
Cemento	71945	58,1
Losetas, Terrazos	32238	26,0
Parquet o madera pulida	6603	5,3
Otros	1902	1,5

En cuanto al clima, en el distrito de San Martín de Porres, en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (verano) se reportan temperaturas que oscilan entre 21° a 29°, mientras que en los meses fríos que van de junio a fines de noviembre la temperatura va de 12° a 18°. Por otro lado al igual que en la mayoría de los distritos de Lima Metropolitana, San Martín reporta altos niveles de humedad en los inviernos llegando a límites del 96 %, mientras que en el verano está alrededor del 50 a 60 %.

3.2. Distribución de los detectores

Debido a que la presente tesis forma parte del proyecto PIAP-3-P-671-14 “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE RN-22 AMBIENTAL MEDIANTE LA TÉCNICA DE HUELLAS NUCLEARES, EN LA CIUDAD DE LIMA, PERÚ”, se adoptaron algunos acuerdos para la distribución de los detectores, uno de los cuales era el dividir al distrito mediante una grilla con dimensiones de 1km x 1km como se puede ver Figura 3.2, de manera que en función de su densidad poblacional y extensión se estime la cantidad de detectores a colocar en cada cuadrado de la grilla con el objetivo de tener una muestra representativa del distrito siguiendo la metodología usada en otros países.

Tabla 3.3: Número de detectores por km^2

Tipo de distribución	Densidad poblacional	Puntos de Medición
A	Menos de 1000 hab/ km^2	0 ó 1
B	Menos de 5000 hab/ km^2	1
C	Menos de 10000 hab/ km^2	2
D	Menos de 20000 hab/ km^2	4
E	Más de 20000 hab/ km^2	6

Al distrito de San Martín de Porres en promedio por cada cuadrado de la grilla le corresponde 2 puntos de medición de acuerdo a la tabla 3.3, los cuales fueron colocados en cada uno de los 44 cuadrados que ocupan una parte del territorio del distrito.



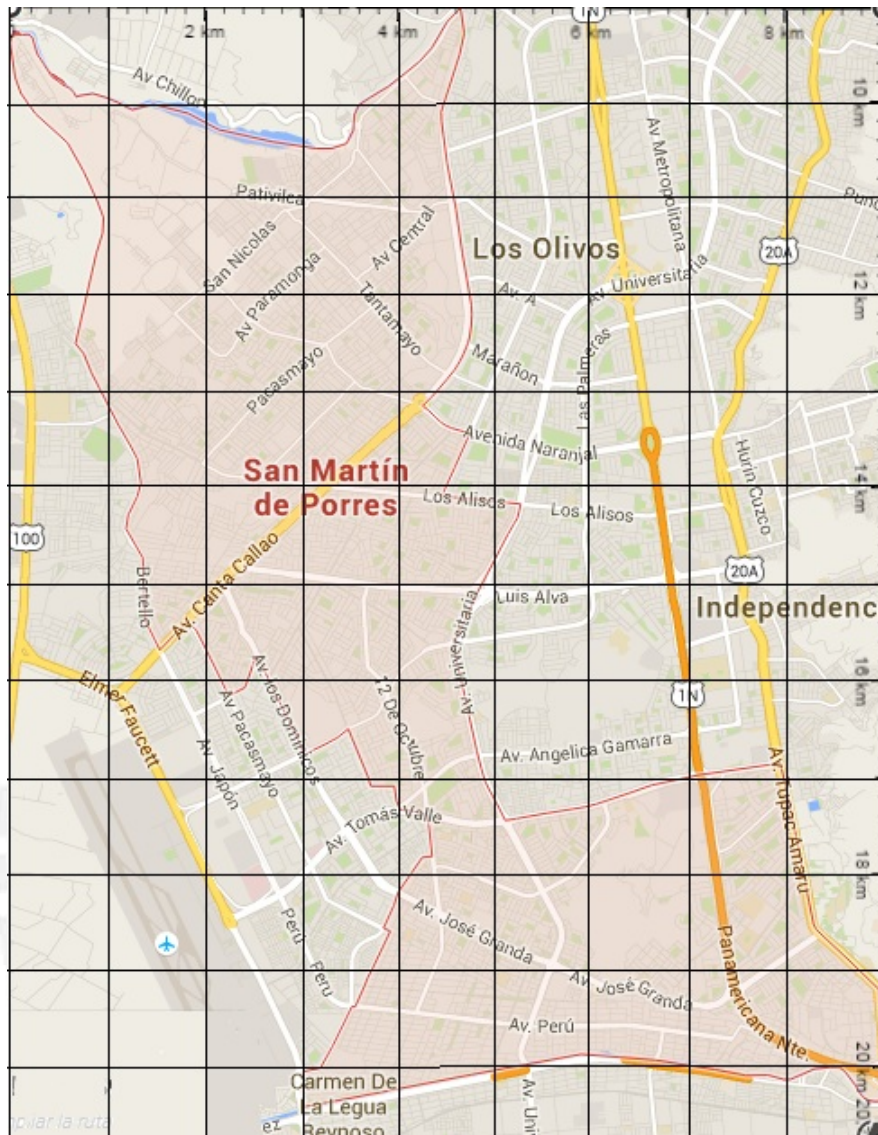


Figura 3.2: Grilla de San Martín de Porres de 1km x 1km. Google maps-Elaboración propia

3.3. Grabado de los detectores LR-115 tipo 2

Finalizado cada periodo de medición (45 días) los detectores son recogidos y preparados para el baño químico, el cual se realiza con una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) a 2,5N durante 90 minutos a una temperatura de $60^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$. Pasado los 90 minutos de ataque químico los detectores son retirados del sistema térmico y colocados en agua destilada, donde permanecen durante 20 minutos para que se detenga el efecto del Hidróxido de Sodio. Finalmente se utiliza agua destilada a presión para eliminar posibles partículas producto del desgaste de la nitrocelulosa, que se depositan en la superficie del detector y ocasionan problemas de lectura.



Figura 3.3: Sistema de grabado termoestabilizado del laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP

3.4. Obtención de imágenes con el microscopio

Pasadas 24 horas después del grabado químico, los detectores están listos para su lectura, para lo cual se emplea el microscopio óptico marca Leica a un aumento de 10X, y con ayuda del software V.4.0 del mismo microscopio se obtienen las capturas de los campos para su lectura. A pesar que en interiores la densidad de trazas son pocas (por lo general menos de 10 trazas por campo) y se pueden contar a simple vista (solo con el uso del ocular), se optó por no contarlas de manera directa, y utilizar un software apropiado, evitando así errores debido al sistema de visión de las personas, el cual no siempre es el mismo, factores como el cansancio, baja visión, entre otros podría generar desacuerdos al diferenciar entre trazas y posibles daños mecánicos. Ante ello el software resulta una herramienta importante debido a que se estandarizan los tonos de brillo, contraste y saturación en la toma de imágenes para todos los detectores. Posteriormente con ayuda del software Image J se puede contar las trazas que son perfectamente visibles. Los criterios para aceptar una traza son: geometría circular definida (circularidad) y el diámetro de la traza debe estar en el rango de 1 a 15 μm que son característica de las trazas.

En la Figura 3.4 se ve el menú principal del software del microscopio, en el lado izquierdo está la imagen sin procesar, y en la lado derecho la imagen procesada donde se ha eliminado el ruido de fondo, optimizado los niveles de brillo, contraste y saturación con el fin de resaltar las trazas registradas.

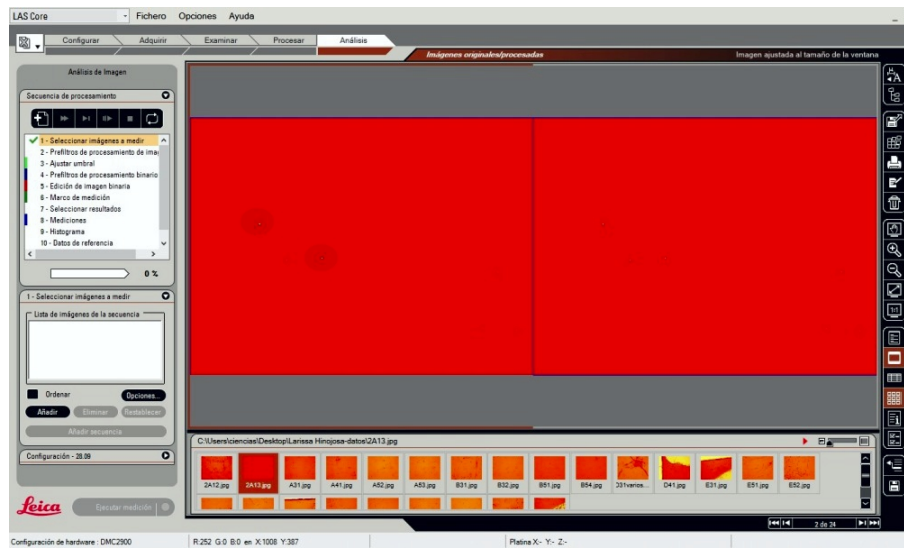


Figura 3.4: Edición de imagen con el software del microscopio Leica

Después de procesar las imágenes se procede al conteo de trazas bajo los criterios mencionados usando el macro implementado en el software imageJ (ver apéndice A). En la Figura 3.5 se pueden ver dos trazas que cumplen perfectamente con los criterios de circularidad y diámetro, mientras que en la Figura 3.6 se pueden observar 5 trazas en la parte superior y daño mecánico en la parte inferior.

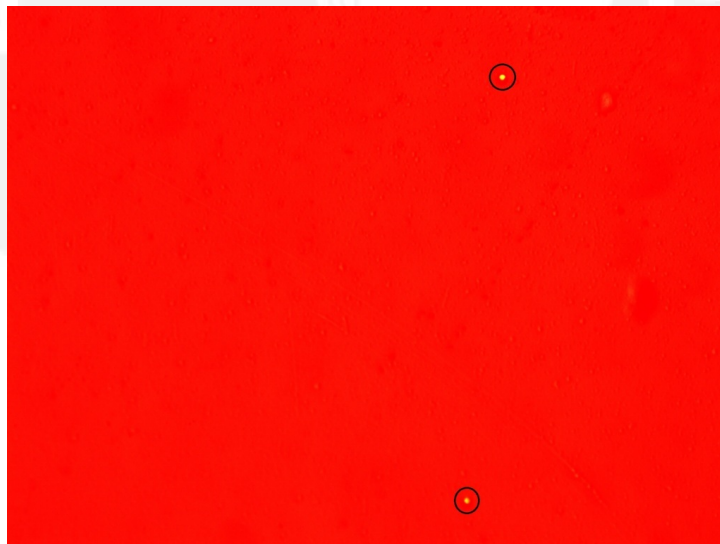


Figura 3.5: Captura de un campo con dos trazas perfectamente visibles con un aumento de 10X.

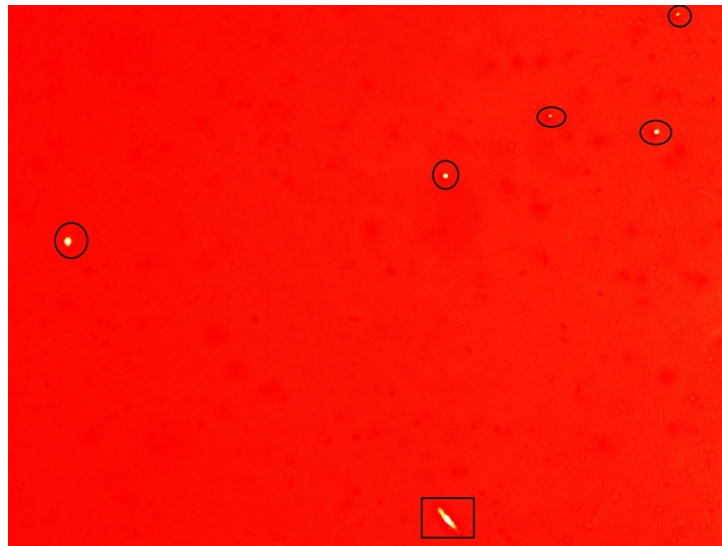


Figura 3.6: Captura de un campo a un aumento de 10X con cinco trazas visibles y en la parte inferior daño mecánico.

3.4.1. Análisis de las trazas en los detectores

La cantidad, forma y tamaño de las trazas son variables; sin embargo es común encontrar diferentes efectos en los detectores, en su mayoría daño mecánico, aparentes trazas con un tamaño superior y formas casi circulares que podrían llevar a falsos resultados. En el trabajo de investigación realizado se encontraron diferentes efectos sobre los detectores, para eliminar este problema se consideraron las trazas que están en el rango de 1 a 15 μm de diámetro referido por el fabricante del LR-115. [40]

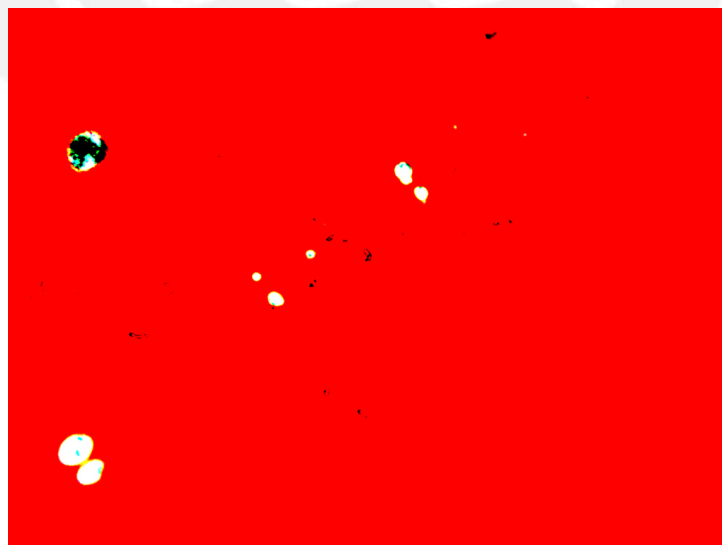


Figura 3.7: Captura de un campo con trazas de tamaño y forma irregular con un aumento de 10X.

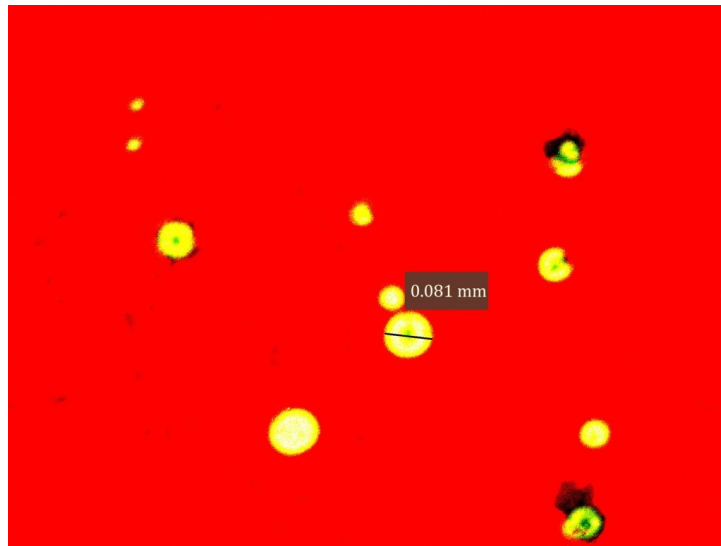


Figura 3.8: Discriminación de las trazas por su tamaño y forma, imagen capturada con un aumento de 10X

3.4.2. Programa usado para lectura de trazas nucleares

Image J

Image J es un software de dominio publico desarrollado en Java en el cual se pueden desarrollar, editar y grabar plugins y macros para el procesamiento y análisis de imágenes.

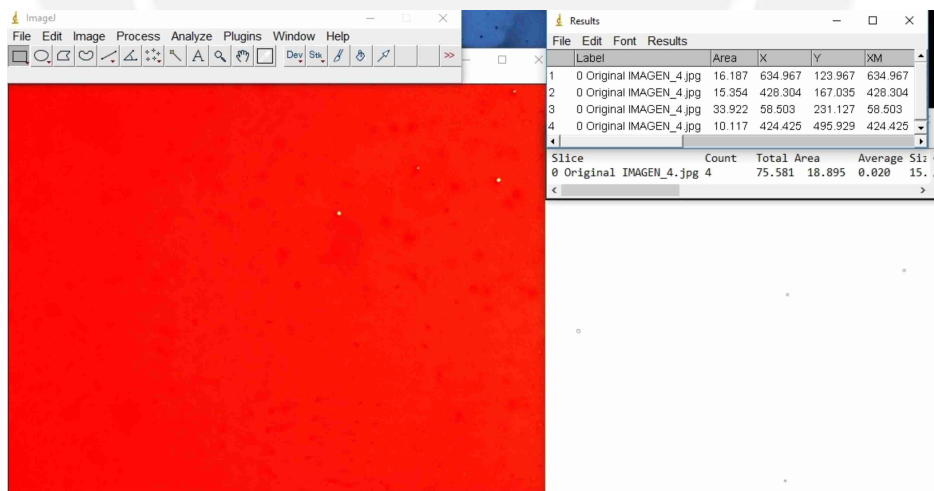


Figura 3.9: Software Image J

3.5. Estadística en el proceso de conteo

El proceso de emisión radiactiva esta regido por el azar, que se ve reflejado en las variaciones de número de partículas α emitidas de una fuente radiactiva en un tiempo dado [21]. En el caso de la emisión de partículas alfa provenientes de la desintegración de Radón 222 su probabilidad de impacto y su distribución espacial sobre el detector es pequeña y constante [41]. Adicionalmente la probabilidad que ocurra una desintegración e impacte sobre el detector en un intervalo de tiempo es asintóticamente proporcional a Δt . Bajo esas condiciones si N representa el número medio de partículas alfas emitidas en un tiempo, la probabilidad de detectar n partículas, esta dada por la distribución de Poisson [21]:

$$F(n) = \frac{N^n e^{-N}}{n!} \quad (3.1)$$

En el caso del conteo de trazas se basa en la estadística de Poisson, a partir de la cual se puede calcular el error en la medición y la cantidad de campos de visión necesarios para que el error en la densidad de trazas no supere el 10 %, y que la incertidumbre total de la medición no supere el 30 % con un nivel de confianza del 95 % [66].

Para determinar la densidad de trazas en un campo de visión, se considera el número total de trazas observadas (N_T) dividido por el área del campo de visión (A):

$$\rho = \frac{N_T}{A} \quad (3.2)$$

Para calcular el error en el cálculo de la densidad de trazas bajo la premisa que sigue la distribución de Poisson:

$$\Delta\rho = \frac{\sqrt{N_T}}{A} \quad (3.3)$$

De manera que la densidad de trazas y su error se puede expresar:

$$\rho = \frac{N_T \pm \sqrt{N_T}}{A} \quad (3.4)$$

Donde el error relativo viene dado por:

$$\varepsilon_r = \frac{\sqrt{N_T}}{N_T} = \frac{1}{\sqrt{N_T}} \quad (3.5)$$

Para analizar n campos en toda la superficie del detector, se considera el número promedio de trazas \bar{N} , de manera que la densidad de trazas será:

$$\rho = \frac{\bar{N}}{A} \quad (3.6)$$

Y el error estadístico global:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\sqrt{n\bar{N}}} \quad (3.7)$$

Esta última expresión permite determinar el error que se espera tener en la medición de la densidad de trazas, siendo n el número de campos.

Los campos de visión necesarios para cierto error ε_r es:

$$n = \frac{1}{\varepsilon_r^2 \bar{N}_T} \quad (3.8)$$

En el caso de la cantidad de campos de lectura necesarios para tener una buena estadística que no supere el límite de 10% recomendado en la determinación de la densidad de trazas, se considera para ε_r el 10%, el número promedio de trazas por campo de visión \bar{N}_T igual a 5 trazas, lo cual da como resultado 20 campos de visión, que son los que se emplearon para procesar los detectores. Este proceso estadístico difiere de las consideraciones hechas para el conteo en el proyecto general PIAP-3-P-671-14 "Desarrollo de un sistema de monitoreo de Rn-222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima", en el cual se considera sólo 5 campos de lectura en consideración de la gran cantidad de detectores a leer.

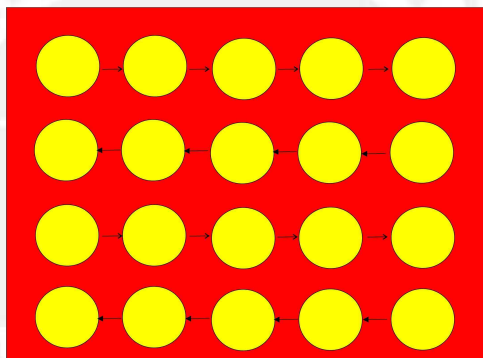


Figura 3.10: Campos de lectura

3.6. La distribución Log-normal para las concentraciones de los niveles de Radón

La concentración de los niveles de Radón en interiores se ve influenciada por una serie de factores como el contenido de Radio en los materiales de construcción, el tipo de suelo, temperatura, humedad, etc. Todos estos factores independientes entre sí contribuyen a la concentración de Radón en forma multiplicativa, lo cual lleva a inferir que su distribución se puede ajustar a una Log-normal.

La concentración de Radón en interiores se puede expresar [26]:

$$Rn_{in} = Rn_{out} + A \cdot B \cdot C + \dots \quad (3.9)$$

Donde Rn_{in} es la concentración en interiores y Rn_{out} es la concentración en exteriores, las variables A,B,C son los factores como contenido de Radio en los materiales de construcción, el tipo de suelo, temperatura, humedad, etc. Si se aplica el logaritmo a la ecuación anterior:

$$\ln(Rn_{in} - Rn_{out}) = \ln(A) + \ln(B) + \ln(C) + \dots \quad (3.10)$$

Se observa que si hay suficientes términos independientes distribuidos aleatoriamente, entonces $\ln(Rn_{in} - Rn_{out})$ debería ser distribuido normalmente [26].

La función de densidad de probabilidad de la distribución Log-normal:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

Para representar la variabilidad de las concentraciones de Radón se utiliza como parámetro indicador a la desviación estándar geométrica (DEG). En la figura se puede ver como varían las curvas de la distribución Log-normal para diferentes valores de la DEG. La media geométrica indica el valor medio de las concentraciones medidas (50%).

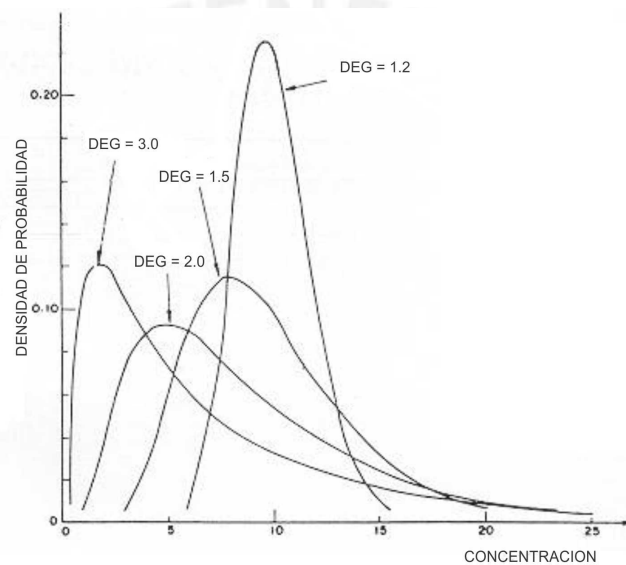


Figura 3.11: Distribuciones lognormales de diferentes DEG [3]

Diferentes autores reportan en trabajos de medición de Radón que las concentraciones medidas se ajustan a una distribución Log-normal. P. Bossew [19] hace un resumen de las diferentes distribuciones reportadas en la medición de Radón en interiores en diferentes países y plantea como conclusión más importante que para un tamaño de 10 km de grilla por zona muestreada debería arrojar resultados que se ajusten a una Log-normal. L.C.S. Gundersen y R.R. Schumann [32], en su estudio de mapeo de Radón en Estados Unidos llegan a una conclusión similar a la de P. Bossew y dice:

“Cuando los datos del radón en interiores se ven a grandes escalas, como a nivel nacional, regional o por estado, los datos tienden a ser log-normalmente distribuidos. Cuando se visualizan datos para unidades más homogéneas, como unidades geológicas o unidades espaciales más pequeñas, como ciudades y condados, los datos tienden a agruparse alrededor de un valor o varios valores y tienden a no ser log-normalmente distribuidos”.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Los factores ambientales mencionados en el capítulo anterior como temperatura, humedad, y adicionalmente la cantidad de particulado (aerosoles) son tomados en cuenta en el cálculo del factor de calibración (FC) que convierte la densidad de trazas a concentración de Radón; sin embargo las condiciones de grabado son un factor importante a tomar en cuenta en el cálculo del FC debido a que diferentes tiempos de grabado y concentración de solución NaOH influyen en el desgaste del detector y por tanto la cantidad de trazas reveladas (eficiencia de detección) es distinta, a mayor espesor reducido la eficiencia de detección aumenta, considerando que el rango de espesor reducido este entre 4 a 6 μm [46]. Se emplea un FC de $0,020 \pm 0,002 \text{ tr.cm}^{-2}/\text{Bq.d.m}^{-3}$ [56][59] el cual fue calculado en condiciones similares a las de este trabajo usando el detector en modo desnudo (bare mode).

Para estimar el porcentaje de viviendas que estaría superando un determinado nivel de referencia (NR) de Radón se toma el valor de referencia establecido por IPEN de 200 Bq/m^3 [10].

En el análisis estadístico se ha utilizado un nivel de confianza del 95 %, lo que es equivalente a decir que se trabajó con un nivel de significación inferior a 0,05.

4.1. Análisis estadístico del primer periodo

Las mediciones en el primer periodo se llevaron a cabo en los meses de Noviembre y Diciembre del 2015 en los que se reportó una temperatura promedio de $19,7 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad relativa de 83,3 % y presión atmosférica de 98KPa. Estos parámetros ambientales se reflejan en la densidad de aire $\rho_{aire} = 1,157638 \text{ Kg/m}^3$ (ver Apéndice C).

En el primer periodo se repartieron detectores para 65 puntos de medición (un par por punto), de los cuales sólo se consiguió recuperar un total de 39 pares de detectores, lo que representa el 60 % de la muestra inicial; sin embargo en el proceso de grabado por efectos químicos sobre detectores que se vieron afectados por el UV ambiental se perdieron algunos detectores, reduciendo la estadística a sólo 34 puntos de medición.

La ubicación de los puntos de medición (que corresponden a los detectores recuperados y procesados) en el distrito se muestra en el siguiente mapa de color verde.

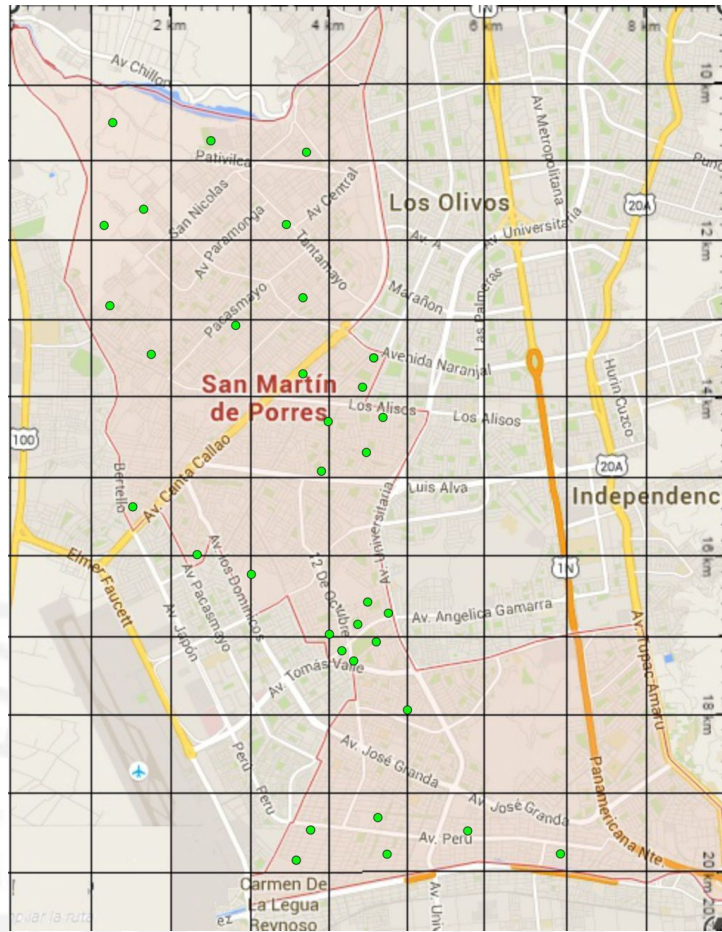


Figura 4.1: Puntos de medición en el primer periodo.

4.1.1. Cálculo de la densidad de trazas y concentración

En la siguiente tabla se muestra la densidad de trazas registradas en cada uno de los detectores para los diferentes ambientes de medición en las viviendas (A, B), sus concentraciones equivalentes y su concentración promedio por vivienda en Bq/m^3 en un tiempo promedio de 65 días.

Tabla 4.1: Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el primer periodo.

	Densidad de Trazas (Tr/cm^2)		Concentración (Bq/m^3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m^3
1	233,0 ± 40,2	77,7 ± 46,6	197,5 ± 39,3	65,8 ± 40,0	131,6 ± 56,1
2	155,3 ± 35,1	213,6 ± 30,8	138,7 ± 34,2	190,7 ± 33,5	164,7 ± 47,9
3		194,2 ± 40,1		156,6 ± 35,9	156,6 ± 35,9
4	116,5 ± 21,8	155,3 ± 35,1	114,2 ± 24,2	152,3 ± 37,6	133,3 ± 44,7
5	233,0 ± 55,0	97,1 ± 40,1	173,9 ± 44,6	72,5 ± 30,8	123,2 ± 54,2
6		174,8 ± 41,3		140,9 ± 36,1	140,9 ± 36,1
7	213,6 ± 48,6	97,1 ± 45,6	197,8 ± 49,2	89,9 ± 43,1	143,8 ± 65,4
8	233,0 ± 45,6	77,7 ± 35,0	200,9 ± 44,2	67,0 ± 30,9	133,9 ± 53,9
9		213,6 ± 48,6		197,8 ± 49,2	197,8 ± 49,2
10	97,1 ± 40,1	174,8 ± 27,6	82,3 ± 34,9	148,1 ± 27,7	115,2 ± 44,6
11	233,0 ± 40,2	97,1 ± 40,1	215,7 ± 43,0	89,9 ± 38,2	152,8 ± 57,5
12	223,3 ± 40,1		218,9 ± 45,0		218,9 ± 45,0
13		116,5 ± 21,8		109,9 ± 23,3	109,9 ± 23,3
14	194,2 ± 40,1	330,1 ± 55,1	161,8 ± 37,1	275,1 ± 53,5	218,4 ± 65,2
15	155,3 ± 51,4	252,4 ± 41,3	133,9 ± 46,3	217,6 ± 41,8	175,8 ± 62,3
16	194,2 ± 45,6	213,6 ± 48,6	151,7 ± 38,7	166,9 ± 41,5	159,3 ± 56,8
17	135,9 ± 40,1	233,0 ± 55,0	103,0 ± 32,1	176,5 ± 45,3	139,7 ± 55,5
18	233,0 ± 40,2		176,5 ± 35,2		176,5 ± 35,2
19	291,3 ± 45,7	58,3 ± 35,0	269,7 ± 50,2	53,9 ± 32,9	161,8 ± 60,0
20	155,3 ± 35,1	252,4 ± 35,2	152,3 ± 37,6	247,5 ± 42,4	199,9 ± 56,7
21	194,2 ± 33,7	213,6 ± 30,8	164,6 ± 33,0	181,0 ± 31,8	172,8 ± 45,8
22	233,0 ± 45,6		197,5 ± 43,4		197,5 ± 43,4
23	116,5 ± 21,8	135,9 ± 40,1	89,6 ± 19,0	104,6 ± 32,6	97,1 ± 37,7
24	174,8 ± 46,6	58,3 ± 27,5	134,4 ± 38,3	44,8 ± 21,6	124,6 ± 44,0
25		155,3 ± 41,2		125,3 ± 35,5	125,3 ± 35,5
26	135,9 ± 25,8		103,0 ± 22,1		103,0 ± 22,1
27	233,0 ± 40,2		176,5 ± 35,2		176,5 ± 35,2
28	174,8 ± 35,1	174,8 ± 46,6	136,5 ± 30,6	136,5 ± 38,9	136,5 ± 49,5
29	174,8 ± 59,9	77,7 ± 35,0	136,5 ± 48,7	60,7 ± 28,0	98,6 ± 56,2
30	194,2 ± 55,0	233,0 ± 25,9	161,8 ± 48,6	194,2 ± 29,0	178,0 ± 56,6
31	233,0 ± 55,0		211,8 ± 54,3		211,8 ± 54,3
32	203,2 ± 38,4	97,1 ± 40,1	173,1 ± 30,1	77,1 ± 32,7	125,1 ± 31,6
33	233,0 ± 25,9		204,4 ± 30,5		204,4 ± 30,5
34	155,3 ± 35,1		127,3 ± 31,4		127,3 ± 31,4

4.1.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.2 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación estándar geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total de 34 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.2: Estadísticos primer periodo en Bq/m^3

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
151,5	218,9	77,1	148,3	146,4	1,3

En la Figura 4.2 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón, donde se puede apreciar que la curva que describe la distribución Log-normal tiene una forma que corresponde a una DEG de 1,2 como se puede ver en la figura 3.11.

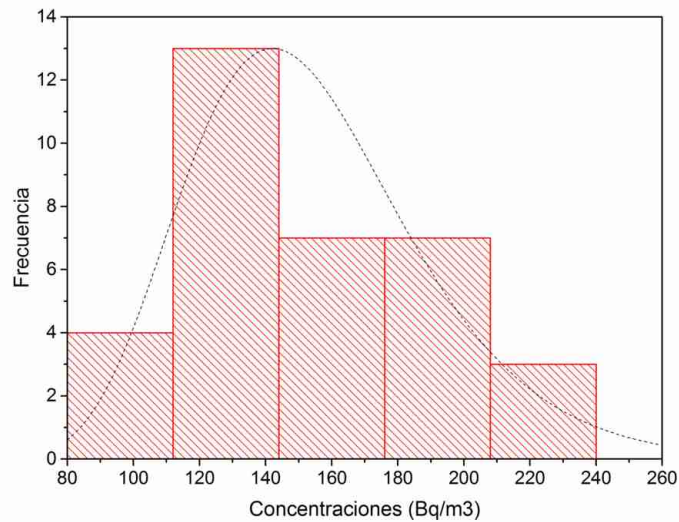


Figura 4.2: Histograma de los valores de Radón medidos en el primer periodo

Partiendo de la hipótesis que las concentraciones medidas siguen una distribución Log-normal, se puede evaluar mediante la transformación de los valores medidos a sus logaritmos y evaluar ahora su normalidad mediante las pruebas de bondad de ajuste de Anderson - Darling y Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

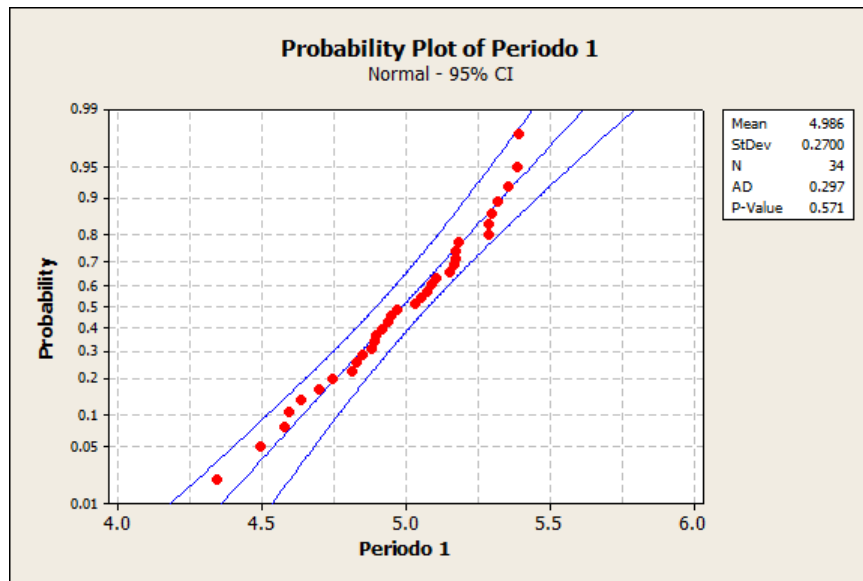


Figura 4.3: Prueba de Anderson - Darling para el primer periodo

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.3 se puede observar el P-Value igual a 0,571; valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la prueba KS el estadístico D se contrasta entre el observado (D_{obs}) y el teórico (D_{tab}). El valor D_{tab} se puede ver en el apéndice D. La hipótesis nula se aceptará cuando:

$$D_{tab} > D_{obs}$$

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

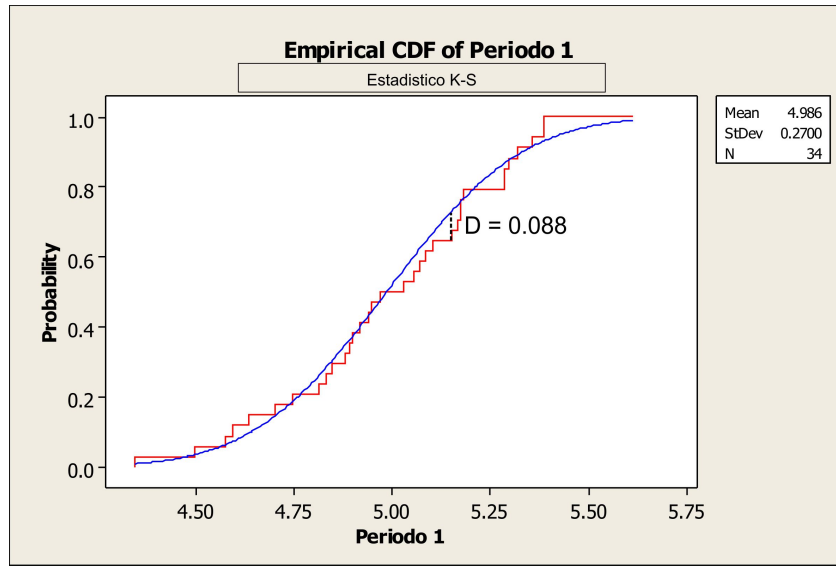


Figura 4.4: Estadístico Kolmogorov Smirnov para el primer periodo

Para un total de 34 datos con un nivel de confianza del 95 % el valor D_{obs} es igual a 0,088, mientras que el D_{tab} es igual a 0,227 ($P > 0,15$), por tanto, se aprueba la hipótesis nula.

Prone areas (Áreas de riesgo)

Conociendo la media geométrica (MG) y la desviación geométrica (DEG), es posible estimar el porcentaje de viviendas que estarían superando un determinado nivel de referencia (NR) de Radón.

$$Z = \frac{\ln(NR) - \ln(MG)}{\ln(DEG)} \quad (4.1)$$

$$Z = \frac{\ln(NR) - \mu_y}{\sigma_y} \quad (4.2)$$

$$P(Z > X) = P\left(Z > \frac{\ln(X) - \mu_y}{\sigma_y}\right) \quad (4.3)$$

$$P[Z > X] = 1 - P[Z \leq X] \quad (4.4)$$

Es importante darle forma a la expresión de la probabilidad para poder calcular los valores utilizando la tabla de distribución normal $N(0,1)$.

Finalmente para el caso del primer periodo que presenta una $MG = 146,4$, $DEG = 1,3$ se obtiene:

$$P[Z > 1,19] = 1 - P[Z \leq 1,19] \quad (4.5)$$

Valor que de acuerdo a la tabla de distribución normal es:

$$P[Z > 1,19] = 1 - 0,8829 = 0,117 \quad (4.6)$$

Lo cual indica que existe un 11,7% de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los 200 Bq/m^3 .

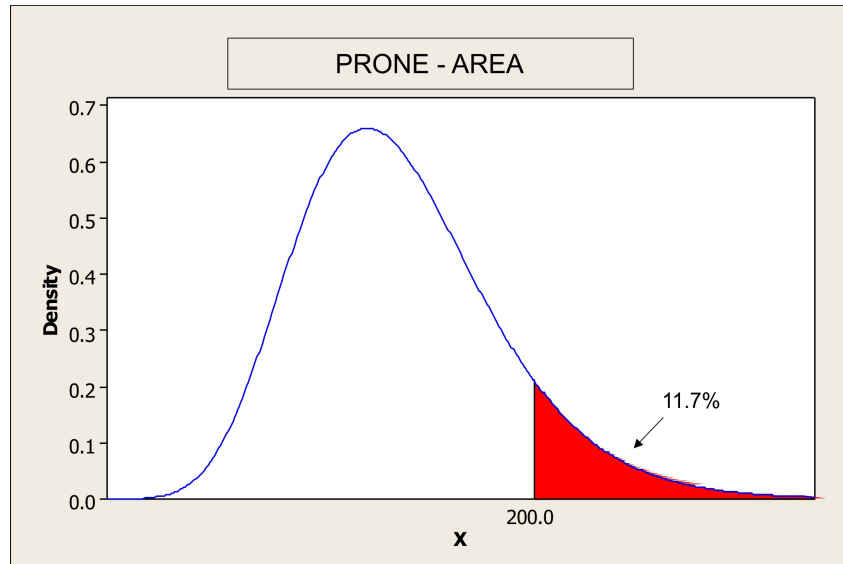


Figura 4.5: Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el primer periodo

4.1.3. Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas

Los detectores en el interior de las viviendas para el primer periodo corresponde a: 20 en salas, 21 en dormitorios, 8 en cocinas y 5 en otros ambientes como baños, y cocheras.

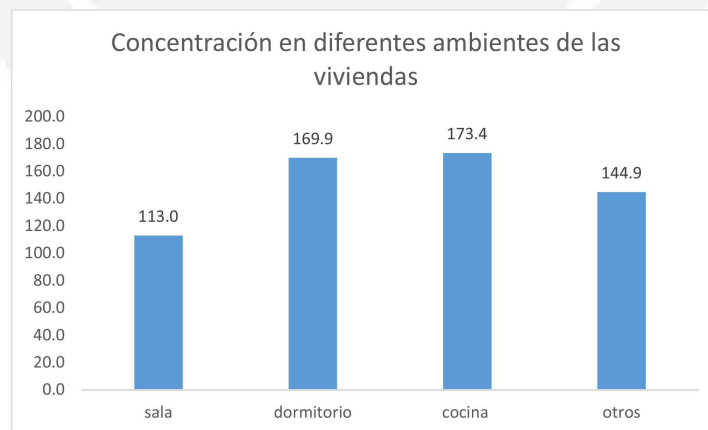


Figura 4.6: Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el primer periodo

Del gráfico de barras para las concentraciones de Radón en los ambientes de las viviendas, se puede observar que los valores más altos están presentes en las cocinas,

seguido de los dormitorios. En el caso de las cocinas, se verificó de acuerdo a la encuesta que llenan los participantes, poca ventilación y paredes sin acabados en tres puntos de medición; sin embargo de acuerdo a estudios realizados hay evidencia que el gas natural presenta cantidades variables de Radón 222 [36][13]. En el caso de los dormitorios se verificó una escasa ventilación en la mayoría de casos. Por otro lado, los valores más bajos están en las salas, donde la ventilación es mayor comparada con los demás ambientes de las viviendas.

4.1.4. Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo

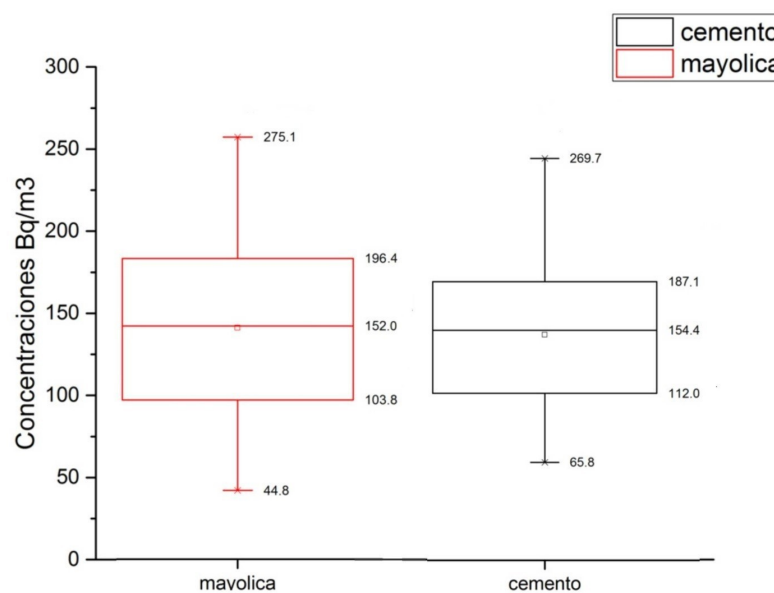


Figura 4.7: Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el primer periodo

Del gráfico de cajas se puede observar una mayor dispersión de las concentraciones medidas en suelos con acabados de mayólica; sin embargo las medianas difieren en $2 \text{ Bq}/\text{m}^3$, lo cual no permite observar una marcada diferencia entre el tipo de recubrimiento del suelo y los niveles de Radón reportados en el primer periodo.

4.2. Análisis estadístico del segundo periodo

A diferencia del primer periodo, las mediciones se realizaron en 45 días, esto debido a la poca efectividad en el recogo de detectores, lo que llevo a buscar el apoyo de algunos colegios para entregar detectores a los alumnos. En el mapa los puntos de medición se indican de dos colores (azul y verde) para los participantes de diferentes colegios.

Las mediciones en el segundo periodo se llevaron acabo en los meses de Mayo y Junio del 2016 en los que se reportó una temperatura promedio de $18,4 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad

relativa de 85,8 % y presión atmosférica de 98KPa. Estos parámetros ambientales se reflejan en la densidad de aire $\rho_{aire} = 1,163482 \text{ Kg/m}^3$ (ver Apéndice C).

En el segundo periodo se repartieron detectores para 45 puntos de medición (un par por punto), de los cuales se consiguió recuperar un total de 43 pares de detectores, lo que representa el 95,5 % de la muestra inicial; sin embargo en el proceso de grabado por efectos químicos sobre detectores que se vieron afectados por el UV ambiental se perdieron algunos detectores, reduciendo la estadística a sólo 42 puntos de medición.

La ubicación de los puntos de medición (que corresponden a los detectores recuperados y procesados) en el distrito se muestra en el siguiente mapa.

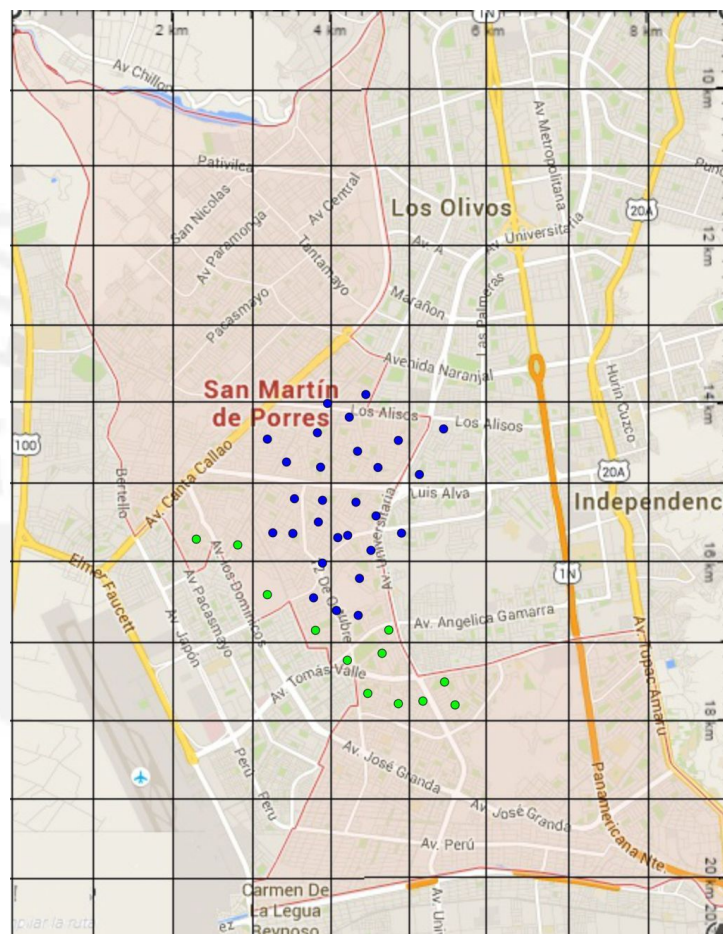


Figura 4.8: Puntos de medición en el segundo periodo.

4.2.1. Cálculo de la densidad de trazas y concentración

En la siguiente tabla se muestra la densidad de trazas registradas en cada uno de los detectores para los diferentes ambientes de medición en las viviendas (A, B), sus concentraciones equivalentes y su concentración promedio por vivienda en Bq/m^3 en un tiempo promedio de 45 días.

Tabla 4.3: Densidad de trazas y concentraciones en Bq/m^3 para el segundo periodo.

	Densidad de trazas (Tr/cm2)		Concentración (Bq/m3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m3
35	140,7 ± 26,1		156,4 ± 32,9		156,4 ± 32,9
36	135,9 ± 25,6	121,3 ± 24,2	151,0 ± 32,2	134,8 ± 30,1	142,9 ± 44,1
37	121,3 ± 24,2	155,3 ± 27,4	134,8 ± 30,1	172,6 ± 35,0	153,7 ± 46,2
38	145,6 ± 26,5	126,2 ± 24,7	161,8 ± 33,6	140,2 ± 30,8	151,0 ± 45,6
39	131,0 ± 25,2		145,6 ± 31,5		145,6 ± 31,5
40	150,4 ± 27,0		167,2 ± 34,3		167,2 ± 34,3
41	179,61 ± 29,5	150,4 ± 27,0	199,5 ± 38,4	167,2 ± 34,3	183,3 ± 51,5
42	145,6 ± 26,5	165,0 ± 28,3	161,8 ± 33,6	183,3 ± 36,4	172,6 ± 49,6
43	145,6 ± 26,5	155,3 ± 27,4	161,8 ± 33,6	172,6 ± 35,0	167,2 ± 48,6
44	131,0 ± 25,2		145,6 ± 31,5		145,6 ± 31,5
45	145,6 ± 26,5	126,2 ± 24,7	161,8 ± 33,6	140,2 ± 30,8	151,0 ± 45,6
46	160,1 ± 27,8	121,3 ± 24,2	177,9 ± 35,7	134,8 ± 30,1	156,4 ± 46,7
47		135,9 ± 25,6		151,0 ± 32,2	151,0 ± 32,2
48		179,6 ± 29,5		199,5 ± 38,4	199,5 ± 38,4
49	145,6 ± 26,5	174,7 ± 29,1	161,8 ± 33,6	194,1 ± 37,7	177,9 ± 50,5
50	131,0 ± 25,2	135,9 ± 25,6	145,6 ± 31,5	151,0 ± 32,2	148,3 ± 45,1
51	165,0 ± 28,3	150,4 ± 27,0	183,3 ± 36,4	167,2 ± 34,3	175,3 ± 50,0
52	140,7 ± 26,1	145,6 ± 26,5	156,4 ± 32,9	161,8 ± 33,6	159,1 ± 47,1
53	165,0 ± 28,3		183,3 ± 36,4		183,3 ± 36,4
54	126,2 ± 24,7		140,2 ± 30,8		140,2 ± 30,8
55	135,9 ± 25,6	150,4 ± 26,5	151,0 ± 32,2	167,2 ± 33,9	159,1 ± 46,8
56	135,9 ± 25,6		151,0 ± 32,2		151,0 ± 32,2
57	160,1 ± 27,8	169,9 ± 28,7	177,9 ± 35,7	188,7 ± 37,0	183,3 ± 51,4
58	106,8 ± 22,7	184,4 ± 29,9	118,6 ± 27,9	204,9 ± 39,0	161,8 ± 48,0
59	189,3 ± 30,3	150,4 ± 27,0	210,3 ± 39,7	167,2 ± 34,3	188,7 ± 52,5
60	121,3 ± 24,2	160,1 ± 27,8	134,8 ± 30,1	177,9 ± 35,7	156,4 ± 46,7
61	169,9 ± 28,7	135,9 ± 25,6	188,7 ± 37,0	151,0 ± 32,2	169,9 ± 49,1
62	155,3 ± 27,4	155,3 ± 27,4	172,6 ± 35,0	172,6 ± 35,0	172,6 ± 49,5
63	126,2 ± 24,7	189,3 ± 30,3	140,2 ± 30,8	210,3 ± 39,7	175,3 ± 50,3
64	145,6 ± 26,5		161,8 ± 33,6		161,8 ± 33,6
65	150,4 ± 27,0		167,2 ± 34,3		167,2 ± 34,3
66	150,4 ± 27,0	131,0 ± 25,2	167,2 ± 34,3	145,6 ± 31,5	156,4 ± 46,6
67	131,0 ± 25,2	135,9 ± 25,6	145,6 ± 31,5	151,0 ± 32,2	148,3 ± 45,1
68	150,4 ± 27,0	179,6 ± 29,5	167,2 ± 34,3	199,5 ± 38,4	183,3 ± 51,5
69	145,6 ± 26,5	131,0 ± 25,2	161,8 ± 33,6	145,6 ± 31,5	153,7 ± 46,1
70	126,2 ± 24,7	145,6 ± 26,5	140,2 ± 30,8	161,8 ± 33,6	151,0 ± 45,6
71	145,6 ± 26,5	140,7 ± 26,1	161,8 ± 33,6	156,4 ± 32,9	159,1 ± 47,1
72	111,6 ± 23,2	160,1 ± 27,8	124,0 ± 28,6	177,9 ± 35,7	151,0 ± 45,8
73	116,5 ± 23,7		129,4 ± 29,4		129,4 ± 29,4
74	150,4 ± 27,0	169,9 ± 28,7	167,2 ± 34,3	188,7 ± 37,0	177,9 ± 50,5
75	160,1 ± 27,8	140,7 ± 26,1	177,9 ± 35,7	156,4 ± 32,9	167,2 ± 48,6
76		174,7 ± 29,1		194,1 ± 37,7	194,1 ± 37,7

4.2.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.4 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación estándar geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total

de 42 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.4: Estadísticos segundo periodo en Bq/m^3

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
163	199.6	129.5	159.1	162.3	1.1

En la Figura 4.9 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón, donde se puede apreciar que la curva que describe la distribución Log-normal tiene una forma que corresponde a una DEG cercana al valor de 1,2 como se puede ver en la figura 3.11.

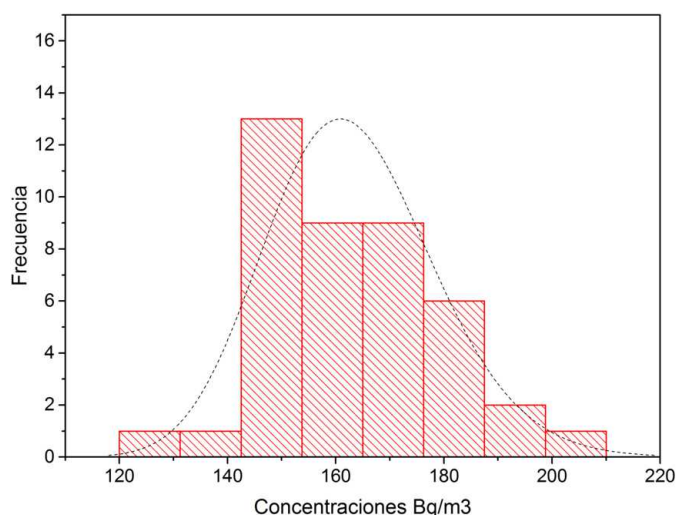


Figura 4.9: Histograma de los valores de Radón medidos en el segundo periodo

Partiendo de la hipótesis que las concentraciones medidas siguen una distribución Log-normal, se puede evaluar mediante la transformación de los valores medidos a sus logaritmos y evaluar ahora su normalidad mediante las pruebas de bondad de ajuste de Anderson - Darling y Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

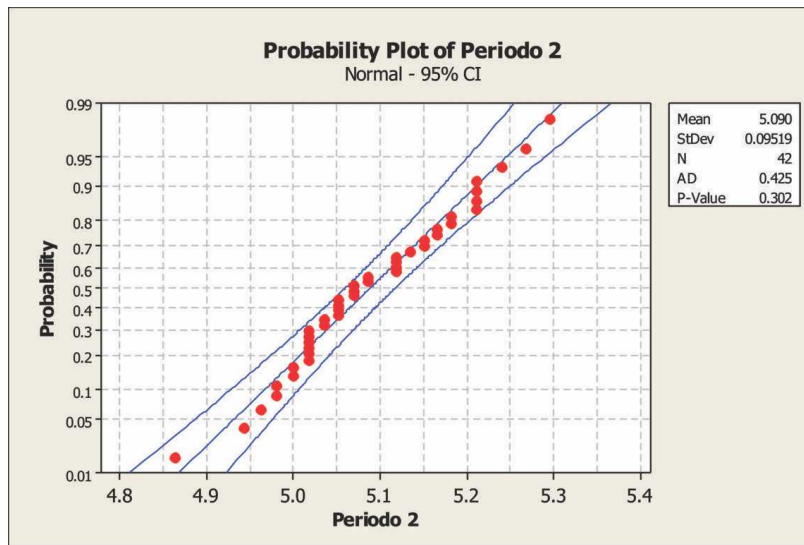


Figura 4.10: Prueba de Anderson - Darling para concentraciones del segundo periodo.

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.10 se puede observar el P-Value igual a 0,302, valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la prueba KS el estadístico D se contrasta entre el observado (D_{obs}) y el teórico (D_{tab}). El valor D_{tab} se puede ver en el apéndice D. La hipótesis nula se aceptará cuando:

$$D_{tab} > D_{obs}$$

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

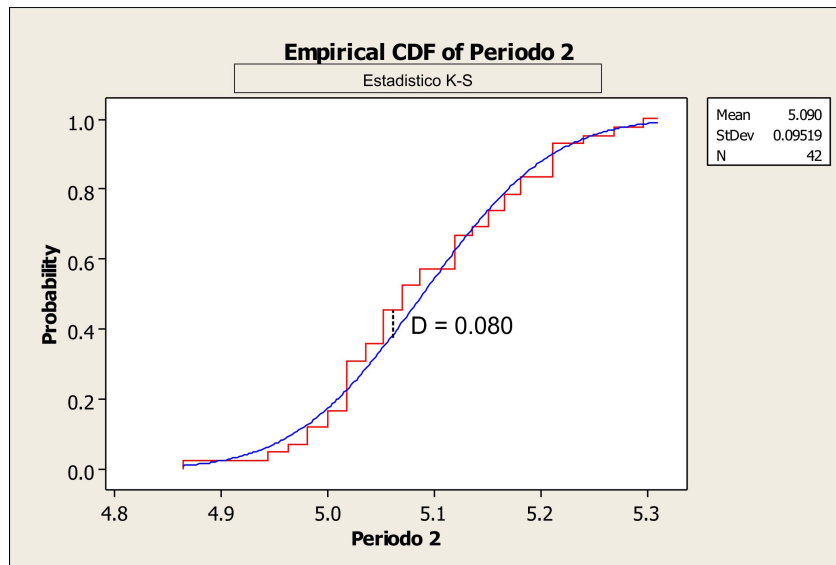


Figura 4.11: Estadístico Kolmogorov Smirnov para el segundo periodo.

Para un total de 34 datos con un nivel de confianza del 95 % el valor D_{obs} es igual a 0,080, mientras que el D_{tab} es igual a 0,205 ($P > 0,15$), por tanto, se aprueba la hipótesis nula.

Prone areas (Áreas de riesgo)

Para calcular la probabilidad de superar el nivel de referencia de $200 Bq/m^3$ se trabaja de manera análoga al primer periodo a partir de la ecuación 4.4. Con una $MG = 162,3$, $DEG = 1,1$ y un NR de $200 Bq/m^3$ se obtiene:

$$P[Z > 2,19] = 1 - P[Z \leq 2,19] \quad (4.7)$$

Valor que de acuerdo a la tabla de distribución normal es:

$$P[Z > 1,19] = 1 - 0,9857 = 0,0143 \quad (4.8)$$

Lo cual indica que existe un 1,43 % de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los $200 Bq/m^3$.

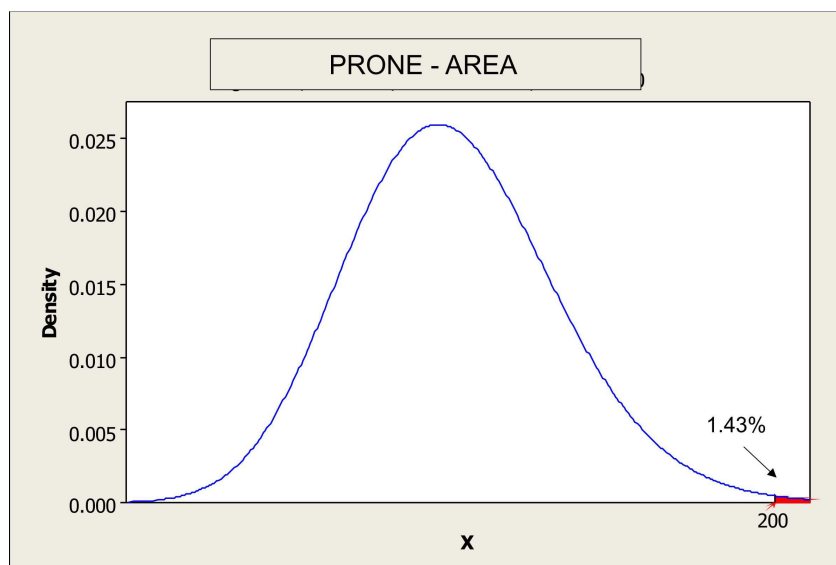


Figura 4.12: Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el segundo periodo

4.2.3. Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas

Los detectores en el interior de las viviendas para el segundo periodo se dividen en: 27 en salas, 35 en dormitorios, 5 en cocinas y 4 en otros ambientes como baños, y cocheras.

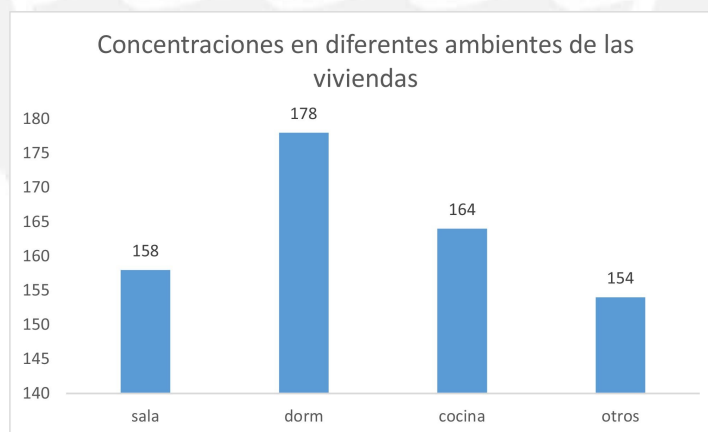


Figura 4.13: Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el segundo periodo

Del gráfico de barras para las concentraciones de Radón en los ambientes de las viviendas, se puede observar que los valores más altos están presentes en los dormitorios, seguido de las cocinas. En el caso de los dormitorios, se verificó de acuerdo a la encuesta que llenan los participantes, poca ventilación y en algunos

casos las paredes sin acabados, los mismos en los que se reportan concentraciones más elevadas, la misma situación está presente en las cocinas, donde después de comunicarse con los participantes 3 registran el uso de gas natural, dato que es de especial interés por los resultados obtenidos para este ambiente en el primer periodo. Por otro lado, los valores más bajos están en las salas, donde la ventilación es mayor, comparada con los demás ambientes de las viviendas.

4.2.4. Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo

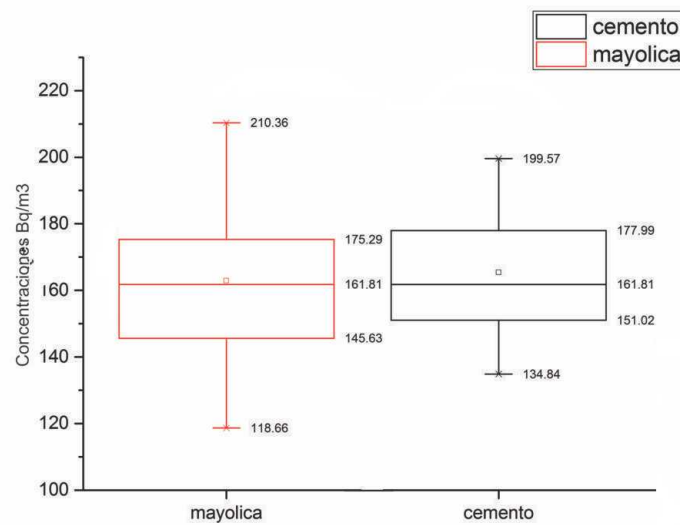


Figura 4.14: Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el segundo periodo

Del gráfico de cajas se puede observar una mayor dispersión de las concentraciones medidas en suelos con acabados de mayólica; las medianas son prácticamente las mismas, lo cual no permite observar una marcada diferencia entre el tipo de recubrimiento del suelo y los niveles de Radón reportados en el segundo periodo.

4.3. Análisis estadístico del tercer periodo

Al igual que en el segundo periodo se trabajó con algunos colegios para entregar detectores a los alumnos. En el mapa los puntos de medición se indican de tres colores, azul y verde que se mantienen del periodo anterior y rojo para participantes de un nuevo colegio.

Las mediciones en el tercer periodo se llevaron a cabo en los meses de Julio y Agosto del 2016 en los que se reportó una temperatura promedio de 16,6 °C, humedad relativa de 86,4 % y presión atmosférica de 98KPa. Estos parámetros ambientales se reflejan en la densidad de aire $\rho_{aire} = 1,171106 \text{ Kg/m}^3$ (ver Apéndice C).

En el tercer periodo se repartieron detectores para 54 puntos de medición, de los cuales se consiguió recuperar un total de 53 pares de detectores, lo que representa el 98,1% de la muestra tomada inicialmente; sin embargo en el proceso de grabado por efectos químicos sobre detectores que se vieron afectados por el UV ambiental se perdieron algunos detectores, reduciendo la estadística a sólo 51 puntos de medición. La ubicación de los puntos de medición (que corresponden a los detectores recuperados y procesados) en el distrito se muestra en el siguiente mapa.

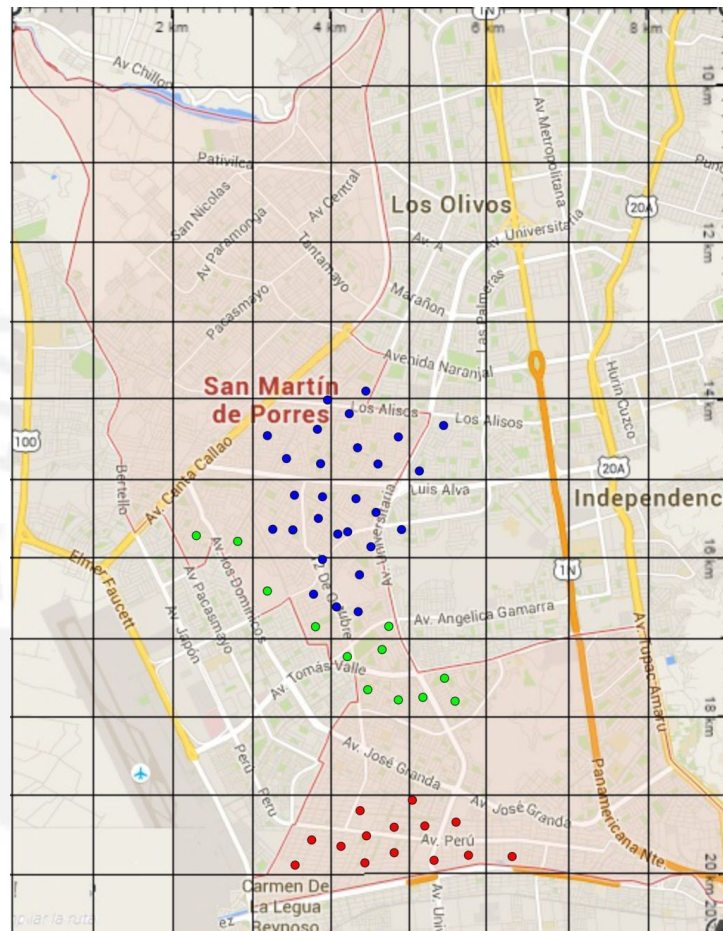


Figura 4.15: Puntos de medición en el tercer periodo.

4.3.1. Cálculo de la densidad de trazas y concentración

En la siguiente tabla se muestra la densidad de trazas registradas en cada uno de los detectores para los diferentes ambientes de medición en las viviendas (A, B), sus concentraciones equivalentes y su concentración promedio por vivienda en Bq/m^3 en un tiempo promedio de 45 días.

Tabla 4.5: Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el tercer periodo.

	Densidad de trazas (Tr/cm2)		Concentración (Bq/m3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m3
35		160,2 ± 28,1		148,3 ± 29,9	148,3 ± 29,9
36	111,6 ± 22,1	150,5 ± 26,6	124,1 ± 27,6	167,2 ± 34,0	145,6 ± 43,8
37	97,0 ± 21,0	140,8 ± 23,9	107,9 ± 25,7	156,4 ± 30,8	132,1 ± 40,1
38	160,1 ± 21,0	150,5 ± 24,7	148,3 ± 24,5	139,3 ± 26,8	143,8 ± 36,3
39		174,8 ± 30,6		194,2 ± 39,2	194,2 ± 39,2
40	165,0 ± 19,5	140,8 ± 27,7	152,8 ± 23,7	130,3 ± 28,8	141,6 ± 37,3
41	116,5 ± 20,0	126,2 ± 21,6	166,4 ± 33,2	180,3 ± 35,7	173,4 ± 48,8
42		140,8 ± 30,3		156,4 ± 37,1	156,4 ± 37,1
43	135,9 ± 23,9	135,9 ± 26,8	151,0 ± 30,6	151,0 ± 33,4	151,0 ± 45,3
44	155,3 ± 25,5	106,8 ± 19,4	172,6 ± 33,2	118,7 ± 24,6	145,6 ± 41,4
45		135,9 ± 28,6		151,0 ± 35,2	151,0 ± 35,2
46	184,4 ± 29,1	111,7 ± 19,8	170,8 ± 31,9	103,4 ± 21,0	137,1 ± 38,2
47	140,7 ± 19,3		130,3 ± 22,1		130,3 ± 22,1
48	184,4 ± 21,2	169,9 ± 19,0	205,0 ± 31,2	188,8 ± 28,3	196,9 ± 42,2
49	150,4 ± 25,7	150,5 ± 28,4	139,3 ± 27,6	139,3 ± 29,8	139,3 ± 40,6
50	126,2 ± 20,4	155,3 ± 34,6	140,2 ± 26,7	172,6 ± 42,1	156,4 ± 49,9
51		135,9 ± 22,8		151,0 ± 29,5	151,0 ± 29,5
52	135,9 ± 28,6	150,5 ± 24,7	151,0 ± 35,2	167,2 ± 32,1	159,1 ± 47,7
53	111,6 ± 25,3	101,9 ± 23,7	159,5 ± 39,5	145,6 ± 36,8	152,6 ± 54,0
54	145,6 ± 16,4	140,8 ± 25,9	161,8 ± 24,4	156,4 ± 32,7	159,1 ± 40,8
55	131,0 ± 20,5		145,6 ± 27,1		145,6 ± 27,1
56		150,5 ± 30,9		167,2 ± 38,2	167,2 ± 38,2
57	131,0 ± 20,5	121,4 ± 27,5	145,6 ± 27,1	134,8 ± 33,4	140,2 ± 43,0
58		126,2 ± 26,7		140,2 ± 32,8	140,2 ± 32,8
59	97,0 ± 18,5	145,6 ± 30,2	107,9 ± 23,2	161,8 ± 37,3	134,8 ± 43,9
60		179,6 ± 31,1		199,6 ± 39,9	199,6 ± 39,9
61	131,0 ± 20,5	111,7 ± 24,3	145,6 ± 27,1	124,1 ± 29,7	134,8 ± 40,2
62	101,9 ± 20,2		145,6 ± 32,4		145,6 ± 32,4
63	179,6 ± 18,0	158,9 ± 20,3	199,6 ± 28,3	176,6 ± 28,6	188,1 ± 40,2
64		145,6 ± 20,4		134,8 ± 23,2	134,8 ± 23,2
65	135,9 ± 20,5	97,1 ± 19,8	151,0 ± 27,4	107,9 ± 24,5	129,4 ± 36,8
66	155,3 ± 21,3	145,6 ± 24,8	143,8 ± 24,4	134,8 ± 26,6	139,3 ± 36,1
67	145,6 ± 24,8		134,8 ± 26,7		134,8 ± 26,7
68		135,9 ± 21,1		151,0 ± 27,9	151,0 ± 27,9
69	121,3 ± 28,4		134,8 ± 34,4		134,8 ± 34,4
70	101,9 ± 20,2	111,7 ± 21,0	145,6 ± 32,4	159,5 ± 34,0	152,6 ± 47,0
71	111,6 ± 18,5	179,6 ± 30,3	103,4 ± 20,0	166,3 ± 32,6	134,8 ± 38,2
77		145,6 ± 36,9		182,0 ± 49,6	182,0 ± 49,6
78	126,2 ± 19,2	145,6 ± 24,8	140,2 ± 25,5	161,8 ± 32,0	151,0 ± 40,9
79	126,2 ± 20,4	121,4 ± 23,7	140,2 ± 26,7	134,8 ± 29,5	137,5 ± 39,8
80	121,3 ± 17,6	160,2 ± 23,2	134,8 ± 23,8	178,0 ± 31,4	156,4 ± 39,4
81	116,5 ± 30,8	82,5 ± 23,9	166,4 ± 47,1	117,9 ± 36,1	142,2 ± 59,3
82	160,1 ± 25,3	145,6 ± 31,8	148,3 ± 27,8	134,8 ± 32,4	141,6 ± 42,7
83	126,2 ± 25,8	174,8 ± 31,4	116,9 ± 26,6	161,8 ± 33,3	139,3 ± 42,6
84	116,5 ± 15,9	160,2 ± 28,1	129,4 ± 22,0	178,0 ± 35,9	153,7 ± 42,1
85		131,1 ± 20,5		145,6 ± 27,0	145,6 ± 27,0
86	126,2 ± 21,6	184,5 ± 29,0	140,2 ± 27,8	205,0 ± 38,2	172,6 ± 47,3
87	140,7 ± 22,8	174,8 ± 32,2	156,4 ± 29,8	194,2 ± 40,7	175,3 ± 50,5
88	150,4 ± 33,2		167,2 ± 40,6		167,2 ± 40,6
89	126,2 ± 19,2	126,2 ± 29,4	140,2 ± 25,5	140,2 ± 35,5	140,2 ± 43,8
90		87,4 ± 17,3		124,8 ± 27,6	124,8 ± 27,6

4.3.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.6 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación estándar geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total de 34 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.6: Estadísticos tercer periodo en Bq/m^3

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
151	199.6	124.8	145.6	150.1	1.1

En la Figura 4.16 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón, donde se puede apreciar que la curva que describe la distribución Log-normal tiene una forma que corresponde a una DEG cercana al valor de 1,2 como se puede ver en la figura 3.11.

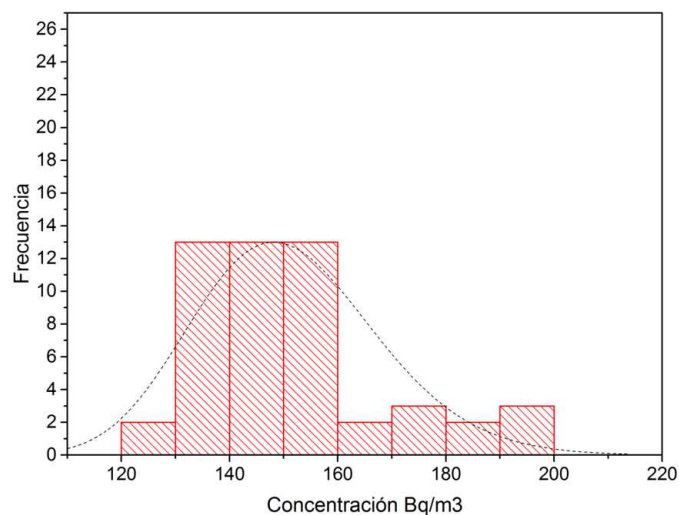


Figura 4.16: Histograma de los valores de Radón medidos en el tercer periodo

Partiendo de la hipótesis que las concentraciones medidas siguen una distribución lognormal, se puede evaluar mediante la transformación de los valores medidos a sus logaritmos y evaluar ahora su normalidad mediante las pruebas de bondad de ajuste de Anderson - Darling y Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

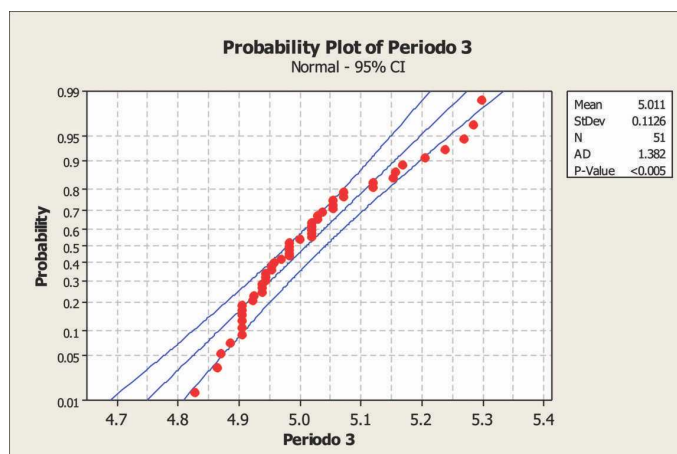


Figura 4.17: Prueba de Anderson - Darling para el tercer periodo.

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.17 se puede observar el P-Value < a 0,005. Por tanto se rechaza la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Al aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk, se verificó que también rechazan la hipótesis nula de normalidad de la distribución. Por tanto se concluye que los resultados obtenidos en este periodo no siguen una Log-normal, por ello en este periodo no se presentan prone-areas (áreas de riesgo) debido que al aplicar el cálculo de probabilidad a una distribución que no cumple con la normalidad daría un resultado poco confiable.

4.3.3. Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas

Los detectores en el interior de las viviendas para el tercer periodo se dividen en: 30 en salas, 38 en dormitorios, 11 en cocinas y 4 en otros ambientes como baños, y cocheras.

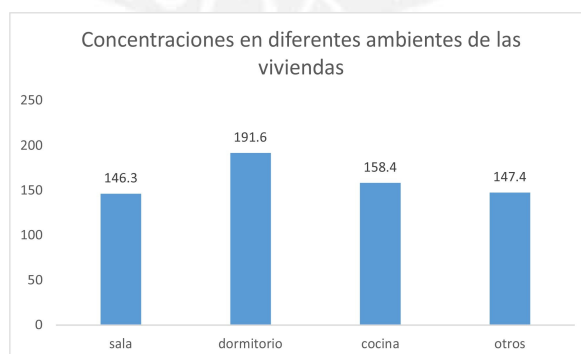


Figura 4.18: Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de las viviendas en el tercer periodo

Del gráfico de barras para las concentraciones de Radón en los ambientes de las viviendas, se puede observar que los valores más altos están presentes en los dormitorios, seguido de las cocinas. En el caso de las cocinas, se verificó de acuerdo a la encuesta que llenan los participantes una poca ventilación y paredes sin acabados en dos puntos de medición, la misma situación está presente en los dormitorios. Por otro lado los valores más bajos están en las salas, donde la ventilación es mayor comparada con los demás ambientes de las viviendas.

4.3.4. Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo

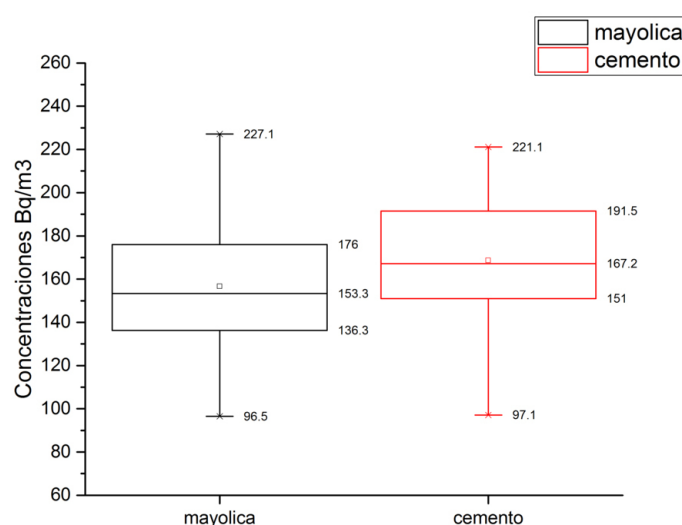


Figura 4.19: Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el tercer periodo

Del gráfico de cajas se puede observar una mayor dispersión de las concentraciones medidas en suelos con acabados de mayólica; sin embargo las medianas difieren en 14 Bq/m^3 . En este caso es importante verificar como los demás factores pueden influir en las concentraciones medidas en estos ambientes. Uno de los factores que se verifica como determinante a lo largo de este estudio es la ventilación; sin embargo se sabe de la emisión de partículas alfa de los cerámicos [62], lo cual podría influir en los valores reportados.

4.4. Análisis estadístico del cuarto periodo

Al igual que en el segundo y tercer periodo se trabajó con colegios para entregar detectores a los alumnos. En el mapa los puntos de medición se indican de tres colores, azul, verde y rojo para participantes de diferentes colegios.

Las mediciones en el cuarto periodo se llevaron a cabo en los meses de Agosto y Septiembre del 2016 en los que se reportó una temperatura promedio de $16,5$

°C, humedad relativa de 86,6 % y presión atmosférica de 98KPa. Estos parámetros ambientales se reflejan en la densidad de aire $\rho_{aire} = 1,171541 \text{ Kg/m}^3$ (ver Apéndice C).

En el cuarto periodo se repartieron detectores para 76 puntos de medición, de los cuales se consiguió recuperar un total de 73 pares de detectores, lo que representa el 96.1 % de la muestra tomada inicialmente; sin embargo en el proceso de grabado por efectos químicos sobre detectores que se vieron afectados por el UV ambiental se perdieron algunos detectores, reduciendo la estadística a sólo 72 puntos de medición. La ubicación de los puntos de medición (que corresponden a los detectores recuperados y procesados) en el distrito se muestra en el siguiente mapa.

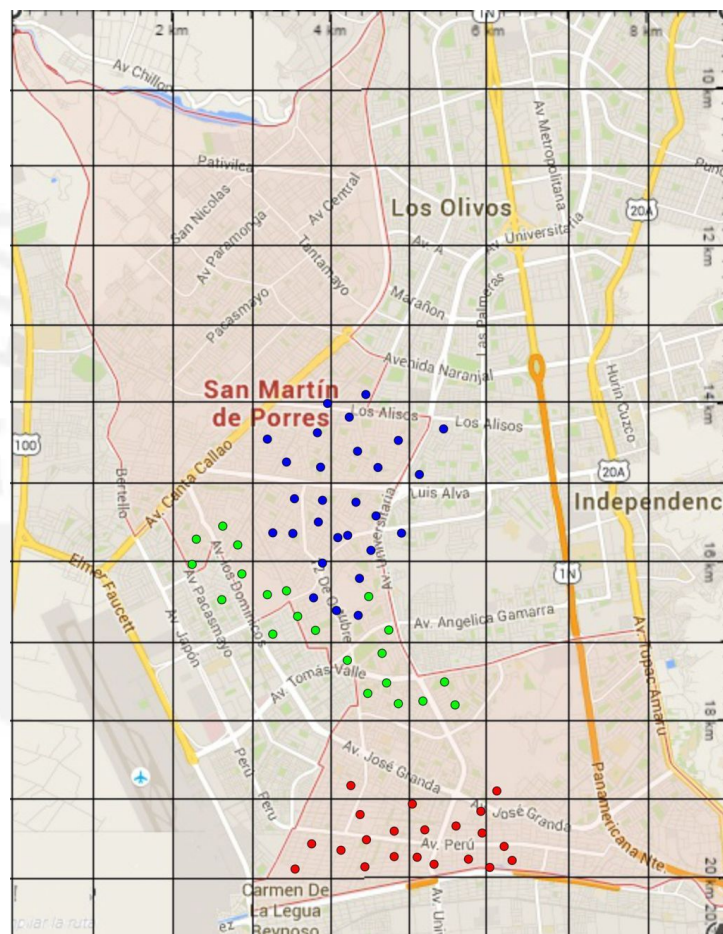


Figura 4.20: Puntos de medición en el cuarto periodo.

4.4.1. Cálculo de la densidad de trazas y concentración

En la siguiente tabla se muestra la densidad de trazas registradas en cada uno de los detectores para los diferentes ambientes de medición en las viviendas (A, B), sus concentraciones equivalentes y su concentración promedio por vivienda en Bq/m^3 en un tiempo promedio de 45 días.

Tabla 4.7: Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el cuarto periodo.

	Densidad de trazas (Tr/cm2)		Concentración (Bq/m3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m3
47	112,4 ± 19,6	140,8 ± 21,8	124,9 ± 25,1	156,4 ± 28,8	140,7 ± 38,2
48	117,5 ± 23,6	169,9 ± 27,3	130,6 ± 29,3	188,8 ± 35,7	159,7 ± 46,2
49		184,5 ± 33,8		205,0 ± 42,8	205,0 ± 42,8
50	127,7 ± 20,6	145,6 ± 22,9	141,9 ± 26,9	161,8 ± 30,2	151,9 ± 40,4
51		174,8 ± 31,3		194,2 ± 39,8	194,2 ± 39,8
52	132,9 ± 22,0	140,8 ± 25,0	147,6 ± 28,6	156,4 ± 31,8	152,0 ± 42,8
53	132,9 ± 20,8	126,2 ± 20,1	146,4 ± 27,4	140,2 ± 26,4	143,9 ± 38,1
54	132,9 ± 20,8		148,4 ± 27,4		147,6 ± 27,4
55		199,0 ± 27,8		221,1 ± 38,0	221,1 ± 38,0
56	168,6 ± 25,0	189,3 ± 34,2	187,4 ± 33,5	210,4 ± 43,5	198,9 ± 54,9
57	127,7 ± 23,0	150,5 ± 25,9	141,9 ± 29,2	167,2 ± 33,3	154,6 ± 44,3
58	153,3 ± 27,5		170,3 ± 34,9		170,3 ± 34,9
60	132,9 ± 23,2		147,6 ± 29,7		147,6 ± 29,7
61	97,1 ± 21,7	184,5 ± 29,9	107,9 ± 26,5	205,0 ± 39,0	156,4 ± 47,2
62		131,1 ± 21,5		145,6 ± 28,0	145,6 ± 28,0
63	112,4 ± 23,2	194,2 ± 30,0	124,9 ± 28,7	215,7 ± 39,7	170,3 ± 49,0
65	148,2 ± 32,7	160,2 ± 22,7	164,7 ± 39,9	178,0 ± 30,9	171,3 ± 50,4
66	148,2 ± 28,4	174,8 ± 19,6	164,7 ± 35,6	194,2 ± 29,1	179,4 ± 46,0
67		126,2 ± 17,5		140,2 ± 24,0	140,2 ± 24,0
68	189,1 ± 27,7		210,1 ± 37,2		210,1 ± 37,2
69	163,5 ± 34,1	150,5 ± 18,0	181,7 ± 42,0	167,2 ± 26,1	174,4 ± 49,4
70	107,3 ± 17,6		119,2 ± 22,9		119,2 ± 22,9
71		135,9 ± 21,7		151,0 ± 28,4	151,0 ± 28,4
77	138,0 ± 22,2	174,8 ± 20,8	153,3 ± 29,0	194,2 ± 30,2	173,7 ± 41,9
78	153,3 ± 25,5		170,3 ± 33,0		170,3 ± 33,0
79		179,6 ± 28,5		199,6 ± 37,4	199,6 ± 37,4
80	148,2 ± 23,4		164,7 ± 30,8		164,7 ± 30,8
81	132,9 ± 20,8		147,6 ± 27,4		147,6 ± 27,4
82	158,4 ± 20,8	174,8 ± 18,3	176,0 ± 29,1	194,2 ± 28,1	185,1 ± 40,4
83	148,2 ± 34,3	145,6 ± 19,4	164,7 ± 41,5	161,8 ± 26,9	163,2 ± 49,5
84		155,3 ± 30,3		172,6 ± 37,8	172,6 ± 37,8
85	189,1 ± 29,5	160,2 ± 24,8	210,1 ± 38,9	178,0 ± 32,8	194,0 ± 50,9
86		189,3 ± 25,0		210,4 ± 34,9	210,4 ± 34,9
87		87,4 ± 22,2		97,1 ± 26,5	97,1 ± 26,5
88	148,2 ± 29,3	155,3 ± 28,6	164,7 ± 36,5	172,6 ± 36,2	168,6 ± 51,4
89	122,6 ± 22,8		136,3 ± 28,7		136,3 ± 28,7
90	102,2 ± 24,6	174,8 ± 29,6	113,6 ± 29,5	194,2 ± 38,2	153,9 ± 48,3
91	102,2 ± 21,1		113,6 ± 26,1		113,6 ± 26,1
92	184,0 ± 29,8		204,4 ± 39,0		204,4 ± 39,0
93	112,4 ± 19,6	145,6 ± 27,8	124,9 ± 25,1	161,8 ± 34,9	143,4 ± 42,9
94	122,6 ± 21,6		136,3 ± 27,6		136,3 ± 27,6
95	132,9 ± 26,4	140,8 ± 26,9	147,6 ± 32,8	156,4 ± 33,7	152,0 ± 47,0
96		160,2 ± 24,8		178,0 ± 32,8	178,0 ± 32,8
97	168,6 ± 21,6		187,4 ± 30,5		187,4 ± 30,5
98	158,4 ± 30,1	160,2 ± 26,7	176,0 ± 37,8	178,0 ± 34,6	177,0 ± 51,2
99		140,8 ± 20,6		156,4 ± 27,7	156,4 ± 27,7
100	204,4 ± 32,4		227,1 ± 42,6		227,1 ± 42,6
101	143,1 ± 18,4	135,9 ± 21,7	159,0 ± 25,9	151,0 ± 28,4	155,0 ± 38,4
102	138,0 ± 21,0	150,5 ± 20,6	153,3 ± 27,9	167,2 ± 28,4	160,3 ± 39,8

	Densidad de trazas (Tr/cm2)		Concentración (Bq/m3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m3
103	163,5 ± 25,2	145,6 ± 22,9	181,7 ± 33,4	161,8 ± 30,2	171,7 ± 45,0
104	138,0 ± 26,5	106,8 ± 18,6	153,3 ± 33,2	118,7 ± 23,8	136,0 ± 40,8
105		97,1 ± 21,2		107,9 ± 25,9	107,9 ± 25,9
106	127,7 ± 25,2		141,9 ± 31,4		141,9 ± 31,4
107	158,4 ± 25,4		176,0 ± 33,2		176,0 ± 33,2
108	189,1 ± 26,7	165,0 ± 31,7	210,1 ± 36,3	183,4 ± 39,7	196,7 ± 53,8
109	107,3 ± 21,6	174,8 ± 27,0	119,2 ± 26,8	194,2 ± 35,8	156,7 ± 44,7
110	158,4 ± 25,4	131,1 ± 21,5	176,0 ± 33,2	145,6 ± 28,0	160,8 ± 43,5
111		126,2 ± 17,5		140,2 ± 24,0	140,2 ± 24,0
112	107,3 ± 21,6	150,5 ± 27,8	119,2 ± 26,8	167,2 ± 35,1	143,2 ± 44,2
113	173,7 ± 33,7	131,1 ± 21,5	193,0 ± 42,1	145,6 ± 28,0	169,3 ± 50,6
114	148,2 ± 19,7	165,0 ± 24,6	164,7 ± 27,4	183,4 ± 32,9	174,0 ± 42,8
115		106,8 ± 22,2		118,7 ± 27,4	118,7 ± 27,4
116	86,9 ± 21,6		96,5 ± 25,9		96,5 ± 25,9
117	138,0 ± 19,7	160,2 ± 22,7	153,3 ± 26,7	178,0 ± 30,9	165,6 ± 40,8
118	112,4 ± 23,2		124,9 ± 28,7		124,9 ± 28,7
119	122,6 ± 20,3	160,2 ± 27,6	136,3 ± 26,4	178,0 ± 35,5	157,1 ± 44,2
120	173,7 ± 25,8		193,0 ± 34,5		193,0 ± 34,5
121		169,9 ± 21,1		188,8 ± 30,1	188,8 ± 30,1
122	143,1 ± 16,9	121,4 ± 22,2	159,0 ± 24,6	134,8 ± 28,1	146,9 ± 37,3
123	148,2 ± 23,4		164,7 ± 30,8		164,7 ± 30,8
124	143,1 ± 19,7	131,1 ± 24,7	159,0 ± 27,1	145,6 ± 31,1	152,3 ± 41,3
125		140,8 ± 20,6		156,4 ± 27,7	156,4 ± 27,7

4.4.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.8 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total de 72 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.8: Estadísticos cuarto periodo en Bq/m^3

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
162.1	227.1	96.5	159.9	159.8	1.2

En la Figura 4.21 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón, donde se puede apreciar que la curva que describe la distribución Log-normal tiene una forma que corresponde a una DEG con un valor de 1,2 como se puede ver en la figura 3.11.

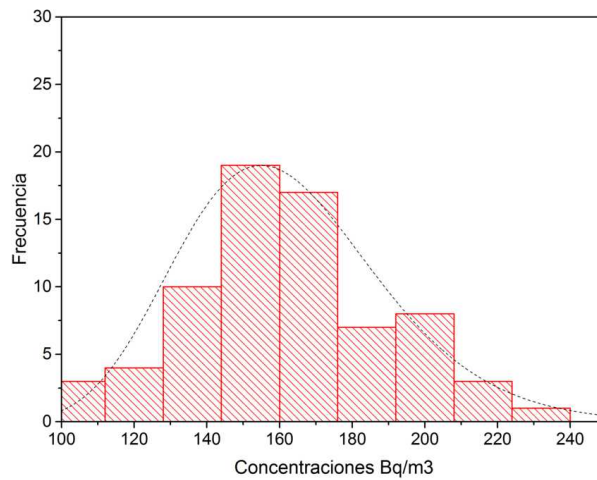


Figura 4.21: Histograma de los valores de Radón medidos en el cuarto periodo

Partiendo de la hipótesis que las concentraciones medidas siguen una distribución lognormal, se puede evaluar mediante la transformación de los valores medidos a sus logaritmos y evaluar ahora su normalidad mediante las pruebas de bondad de ajuste de Anderson - Darling y Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

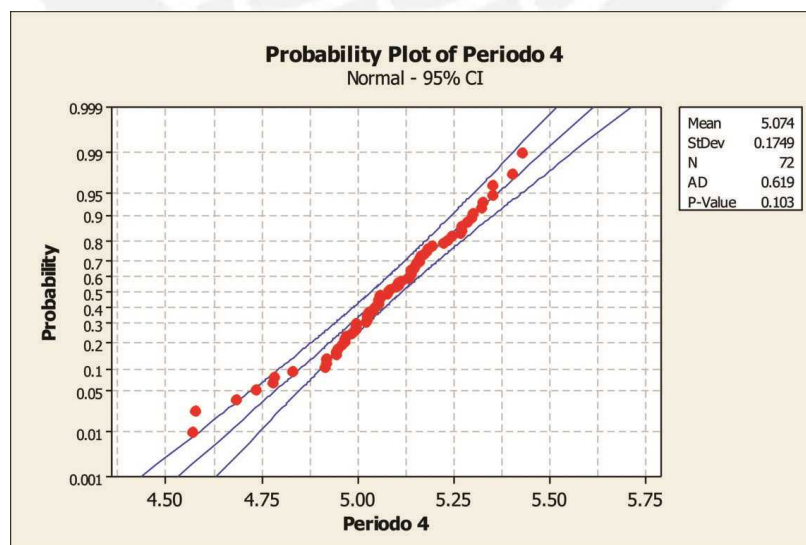


Figura 4.22: Prueba de Anderson - Darling para el cuarto periodo.

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.22 se puede observar el P-Value igual a 0.103, valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la prueba KS el estadístico D se contrasta entre el observado (D_{obs}) y el teórico (D_{tab}). El valor D_{tab} se puede ver en el apéndice D. La hipótesis nula se aceptará cuando:

$$D_{tab} > D_{obs}$$

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

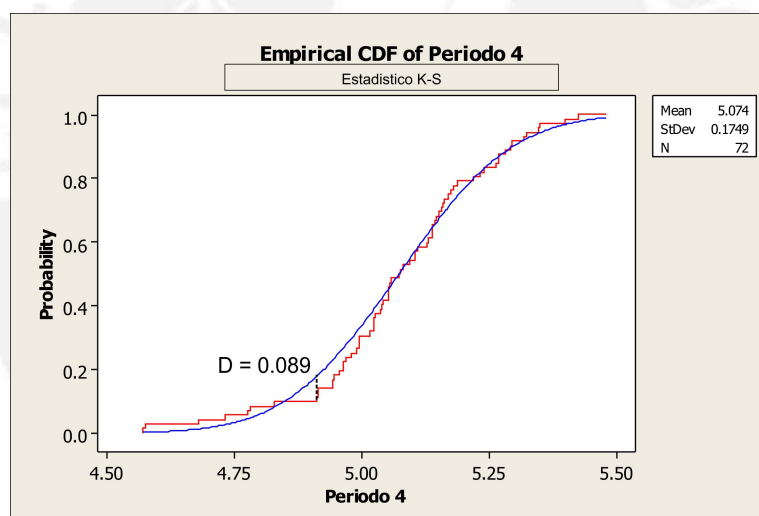


Figura 4.23: Estadístico Kolmogorov Smirnov para el cuarto periodo.

Para un total de 72 datos con un nivel de confianza del 95% el valor D_{obs} es igual a 0,089, mientras que el D_{tab} es igual a 0,160 ($P > 0,15$), con lo cual se puede concluir que la distribución cumple una normal.

Prone areas (Áreas de riesgo)

Para calcular la probabilidad de superar el nivel de referencia de $200Bq/m^3$ se trabaja de manera análoga al primer periodo a partir de la ecuación 4.4. Con una $MG = 159,8$; $DEG = 1,2$ y un NR de $200Bq/m^3$ se obtiene:

$$P[Z > 1,23] = 1 - P[Z \leq 1,23] \quad (4.9)$$

Valor que de acuerdo a la tabla de distribución normal, queda:

$$P[Z > 1,23] = 1 - 0,89065 = 0,109 \quad (4.10)$$

Lo cual indica que existe un 10,9% de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los 200 Bq/m^3 .

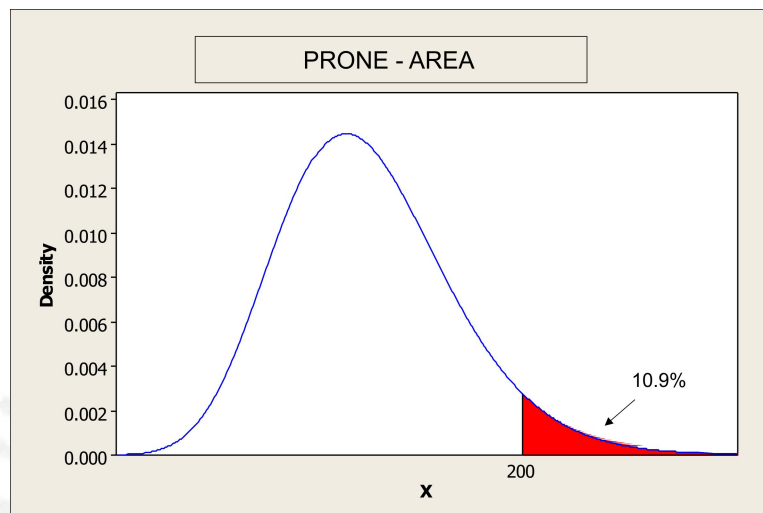


Figura 4.24: Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 en el cuarto periodo.

4.4.3. Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas

Los detectores en el interior de las viviendas para el cuarto periodo se dividen en: 48 en salas, 53 en dormitorios, 4 en cocinas y 2 en otros ambientes como baños, y cocheras.

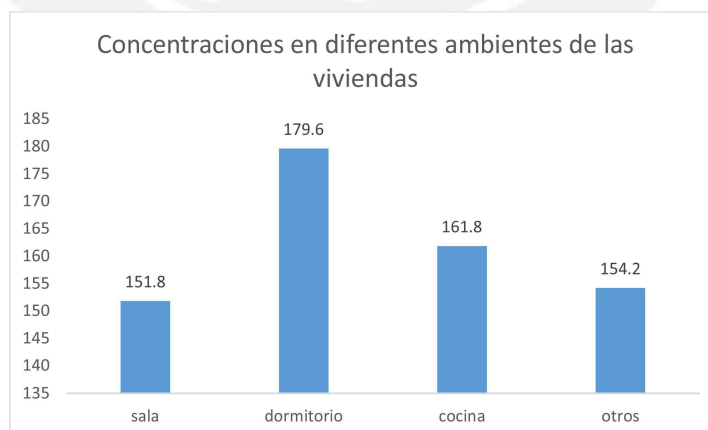


Figura 4.25: Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el cuarto periodo

Del gráfico de barras para las concentraciones de Radón en los ambientes de las viviendas, se puede observar que los valores más altos están presentes en los dormitorios, seguido nuevamente de las cocinas. En el caso de las cocinas, se verificó de acuerdo a la encuesta que llenan los participantes que las paredes de los cuatro puntos de medición no presentaban acabados, mientras que en los dormitorios se reporta una poca ventilación. Por otro lado los valores más bajos están en las salas, donde la ventilación es mayor comparada con los demás ambientes de las viviendas.

4.4.4. Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo

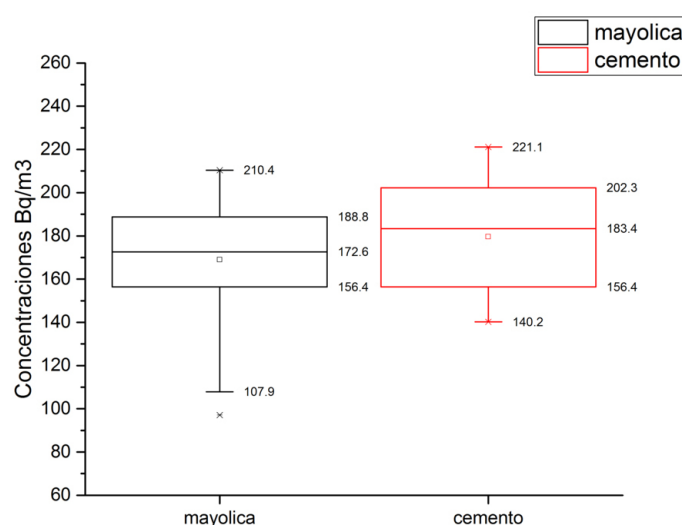


Figura 4.26: Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el cuarto periodo

Del gráfico de cajas se puede observar una mayor dispersión de las concentraciones medidas en suelos con acabados de mayólica con un valor atípico por debajo del mínimo; sin embargo las medianas difieren en $10,8 \text{ Bq/m}^3$, y se observa además que los valores más altos se encuentran en los ambientes con acabados de cemento que en los pisos con mayólica. En este periodo de medición se verificó una marcada diferencia en cuanto al material de construcción de las viviendas y de los hábitos de las personas por tener ambientes ventilados, donde en casas con mejores acabados tienden a tener sistemas de ventilación y múltiples ventanas lo cual favorece a la ventilación.

4.5. Análisis estadístico del quinto periodo

Las mediciones en el quinto periodo se llevaron a cabo en los meses de Octubre y Noviembre del 2016 en los que se reportó una temperatura promedio de $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad relativa de $81,1\%$ y presión atmosférica de 98KPa . Estos parámetros

ambientales se reflejan en la densidad de aire $\rho_{aire} = 1,162581 \text{ Kg/m}^3$ (ver Apéndice C).

En el quinto periodo se repartieron detectores para 41 puntos de medición, de los cuales se consiguió recuperar un total de 36 pares de detectores, lo que representa el 87,8% de la muestra tomada inicialmente; sin embargo en el proceso de grabado por efectos químicos sobre detectores que se vieron afectados por el UV ambiental se perdieron algunos detectores, reduciendo la estadística a sólo 35 puntos de medición. La ubicación de los puntos de medición (que corresponden a los detectores recuperados y procesados) en el distrito se muestra en el siguiente mapa, donde los puntos de medición de color verde y rojo son los únicos que se mantienen del periodo anterior.

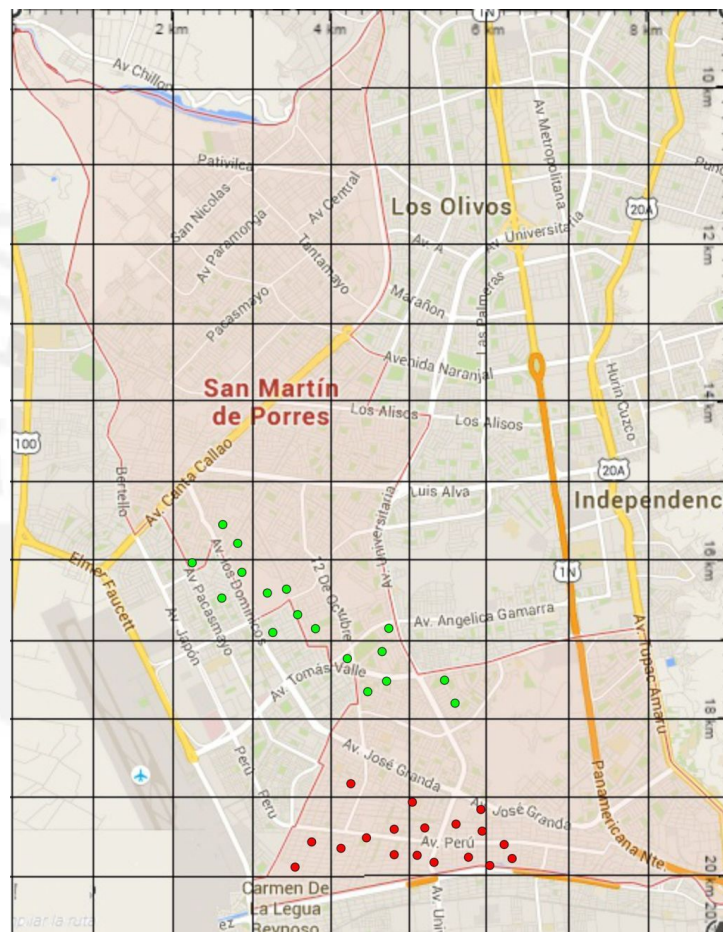


Figura 4.27: Puntos de medición en el quinto periodo.

4.5.1. Cálculo de la densidad de trazas y concentración

En la siguiente tabla se muestra la densidad de trazas registradas en cada uno de los detectores para los diferentes ambientes de medición en las viviendas (A, B), sus concentraciones equivalentes y su concentración promedio por vivienda en Bq/m^3 en un tiempo promedio de 45 días.

Tabla 4.9: Densidad de trazas y concentración en Bq/m^3 para el quinto periodo.

	Densidad de trazas (Tr/cm2)		Concentración (Bq/m3)		Promedio
	A	B	A	B	Bq/m3
91	111,7 ± 21,6	145,6 ± 23,3	124,1 ± 27,1	161,8 ± 30,5	142,9 ± 40,8
92		116,5 ± 22,9		129,4 ± 28,5	129,4 ± 28,5
93	101,9 ± 17,5	169,9 ± 28,3	113,3 ± 22,5	188,8 ± 36,6	151,0 ± 43,0
94	101,9 ± 20,1	140,8 ± 26,5	113,3 ± 25,0	156,4 ± 33,4	134,8 ± 41,7
95	126,2 ± 24,9	160,2 ± 24,4	140,2 ± 31,1	178,0 ± 32,4	159,1 ± 44,9
96		121,4 ± 29,5		134,8 ± 35,5	134,8 ± 35,5
97		106,8 ± 19,1		118,7 ± 24,3	118,7 ± 24,3
98	97,1 ± 19,8	111,7 ± 23,8	107,9 ± 24,5	124,1 ± 29,2	116,0 ± 38,2
99	121,4 ± 20,6	111,7 ± 22,8	134,8 ± 26,6	124,1 ± 28,2	129,4 ± 38,7
100	116,5 ± 23,9	155,3 ± 22,7	129,4 ± 29,6	172,6 ± 30,5	151,0 ± 42,5
101	116,5 ± 16,6	101,9 ± 23,5	129,4 ± 22,5	113,3 ± 28,5	121,4 ± 36,3
102		145,6 ± 22,2		161,8 ± 29,5	161,8 ± 29,5
103		131,1 ± 31,1		145,6 ± 37,5	145,6 ± 37,5
104	106,8 ± 20,3		118,7 ± 25,5		118,7 ± 25,5
105	111,7 ± 21,6	111,7 ± 22,8	124,1 ± 27,1	124,1 ± 28,2	124,1 ± 39,1
106	116,5 ± 19,3	87,4 ± 22,6	129,4 ± 25,1	97,1 ± 26,9	113,3 ± 36,8
107	131,1 ± 21,7	135,9 ± 25,7	145,6 ± 28,1	151,0 ± 32,3	148,3 ± 42,9
108		101,9 ± 27,4		113,3 ± 32,5	113,3 ± 32,5
109	68,0 ± 19,3	116,5 ± 18,0	75,5 ± 22,7	129,4 ± 23,8	102,5 ± 32,9
110	121,4 ± 25,0	145,6 ± 18,6	134,8 ± 30,8	161,8 ± 26,2	148,3 ± 40,5
111	169,9 ± 27,4	140,8 ± 32,4	188,8 ± 35,8	156,4 ± 39,3	172,6 ± 53,1
112	87,4 ± 19,0		97,1 ± 23,3		97,1 ± 23,3
113		126,2 ± 29,5		140,2 ± 35,6	140,2 ± 35,6
114	87,4 ± 22,6	160,2 ± 26,4	97,1 ± 26,9	178,0 ± 34,3	137,5 ± 43,6
115		145,6 ± 26,3		161,8 ± 33,4	80,9 ± 33,4
116	126,2 ± 19,3	140,8 ± 18,9	140,2 ± 25,7	156,4 ± 26,2	148,3 ± 36,6
117		97,1 ± 25,3		107,9 ± 30,1	107,9 ± 30,1
118	92,2 ± 24,0		102,5 ± 28,6		102,5 ± 28,6
119	92,2 ± 20,7		102,5 ± 25,2		102,5 ± 25,2
120	106,8 ± 25,7	106,8 ± 23,7	118,7 ± 30,9	118,7 ± 28,9	118,7 ± 42,3
121		150,5 ± 19,5		167,2 ± 27,4	167,2 ± 27,4
122	131,1 ± 21,7	101,9 ± 22,4	145,6 ± 28,1	113,3 ± 27,4	129,4 ± 39,3
123	140,8 ± 18,9	121,4 ± 27,8	156,4 ± 26,2	134,8 ± 33,7	145,6 ± 42,6
124	155,3 ± 25,7		172,6 ± 33,4		172,6 ± 33,4
125		121,4 ± 21,8		134,8 ± 27,7	134,8 ± 27,7

4.5.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.10 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total de 35 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.10: Estadísticos quinto periodo

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
132,1	172,6	80,91	134,8	130,2	1,2

De acuerdo a la tabla 4.10 se observa que el valor máximo de las concentraciones reportadas es 172,6; por lo tanto al no superar el nivel de referencia planteado de 200 Bq/m^3 no es necesario hacer el cálculo de prone-areas.

En la Figura 4.28 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón, donde se puede apreciar que la curva que describe la distribución Log-normal tiene una forma que corresponde a una DEG con un valor de 1,2 como se puede ver en la figura 3.11.

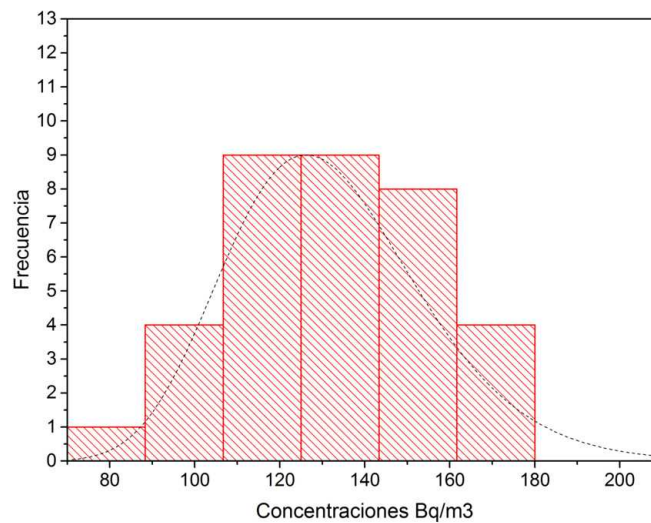


Figura 4.28: Histograma de los valores de Radón medidos en el quinto periodo

Partiendo de la hipótesis que las concentraciones medidas siguen una distribución lognormal, se puede evaluar mediante la transformación de los valores medidos a sus logaritmos y evaluar ahora su normalidad mediante las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Anderson - Darling.

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

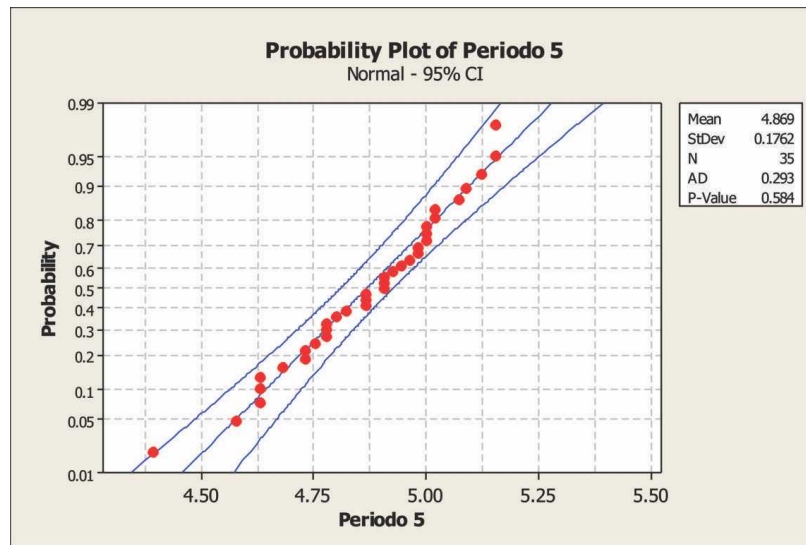


Figura 4.29: Prueba de Anderson - Darling para el quinto periodo.

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.29 se puede observar el P-Value igual a 0,584, valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la prueba KS el estadístico D se contrasta entre el observado (D_{obs}) y el teórico (D_{tab}). El valor D_{tab} se puede ver en el apéndice D. La hipótesis nula se aceptará cuando:

$$D_{tab} > D_{obs}$$

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

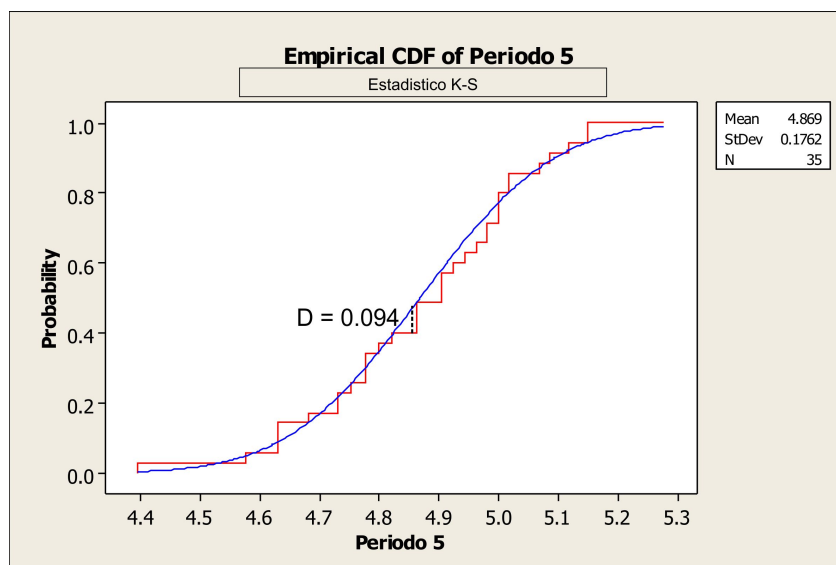


Figura 4.30: Estadístico Kolmogorov Smirnov para el quinto periodo.

Para un total de 35 datos con un nivel de confianza del 95 % el valor D_{obs} es igual a 0,094, mientras que el D_{tab} es igual a 0,230 ($P > 0,15$), con lo cual se puede concluir que la distribución cumple una normal.

4.5.3. Concentración de Radón en diferentes ambientes de las viviendas

Los detectores en el interior de las viviendas para el quinto periodo se dividen en: 21 en salas, 30 en dormitorios, 4 en cocinas.

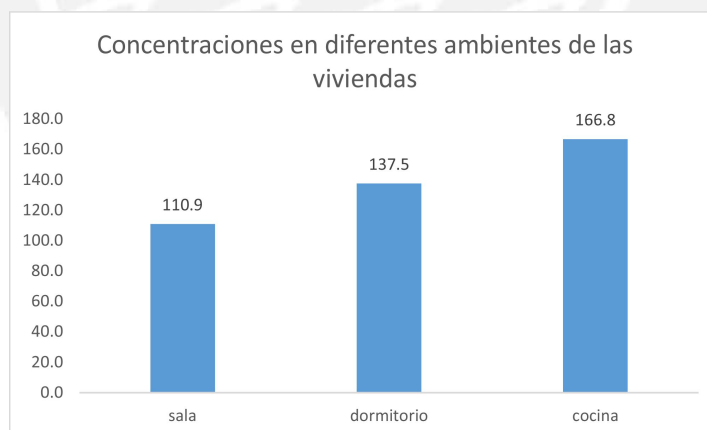


Figura 4.31: Concentraciones en Bq/m^3 en diferentes ambientes de la viviendas en el quinto periodo

Del gráfico de barras para las concentraciones de Radón en los ambientes de las viviendas, se puede observar que los valores más altos están presentes en las cocinas, seguido de los dormitorios. En el caso de las cocinas, se verificó de acuerdo a la encuesta que llenan los participantes poca ventilación y las paredes en uno de los

puntos de medición no presentaba acabados. En el caso de los dormitorios respecto al periodo anterior se nota una disminución en las concentraciones reportadas, esto debido a que en los puntos que se repitieron las mediciones presentaban condiciones que favorecían una buena ventilación. Por otro lado los valores más bajos están en las salas, donde la ventilación es mayor comparada con los demás ambientes de las viviendas que es recurrente en todos los periodos de medición.

4.5.4. Variación de las concentraciones de Radón según el tipo de recubrimiento de suelo

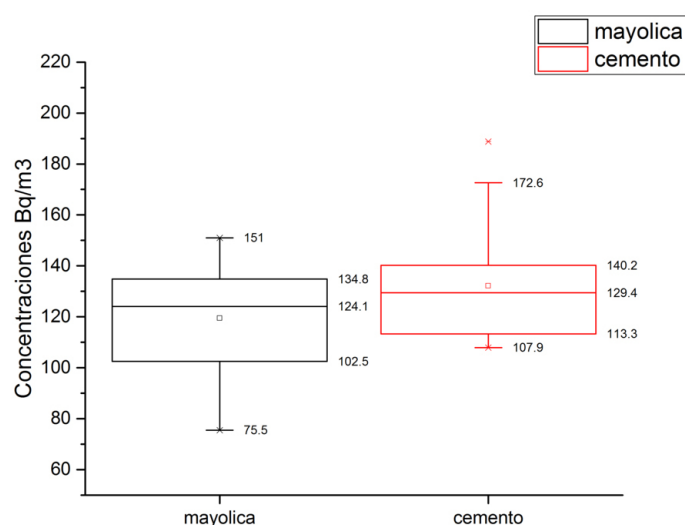


Figura 4.32: Gráfico de cajas para recubrimientos del suelo en el quinto periodo

Del gráfico de cajas se puede observar una mayor dispersión de las concentraciones medidas en suelos con acabados de mayólica, observando un valor atípico en los valores medidos en acabados de cemento; sin embargo las medianas difieren en $5,3 \text{ Bq/m}^3$, lo cual no permite observar una marcada diferencia entre el tipo de recubrimiento del suelo y los niveles de Radón reportados en el quinto periodo.

4.6. Análisis comparativo entre periodos

4.6.1. Análisis entre el segundo y tercer periodo

En el segundo y tercer periodo se repiten 37 puntos de medición en los cuales se busca ver como varían estas concentraciones de un periodo a otro, para lo cual se utiliza el análisis de varianza (ANOVA) entre ellos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Las medias de las concentraciones son iguales

H_1 = Las medias de concentraciones no son iguales.

Tabla 4.11: Resumen: Anova entre el segundo y tercer periodo

ANOVA				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Periodo II	37	6027,52	162,91	209,52
Periodo III	37	5572,4	150,61	345,99

Tabla 4.12: Análisis de varianza entre el segundo y tercer periodo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Prom. de cuadrados	F	P-value	V. crítico para F
Entre grupos	2799,111	1	2799,111	10,078	0,002	3,974
Dentro de grupos	19998,550	72	277,758			
Total	22797,661	73				

De la tabla 4.12 se observa el P-value es igual a 0,002, para un nivel de confianza de 95 % ($\alpha = 0,05$). La hipótesis nula se acepta cuando:

$$P\text{-Value} > \alpha$$

Por lo tanto a un nivel 0,05 se concluye que las medias son significativamente diferentes. En la figura 4.33 se observa su distribución mediante un gráfico de cajas.

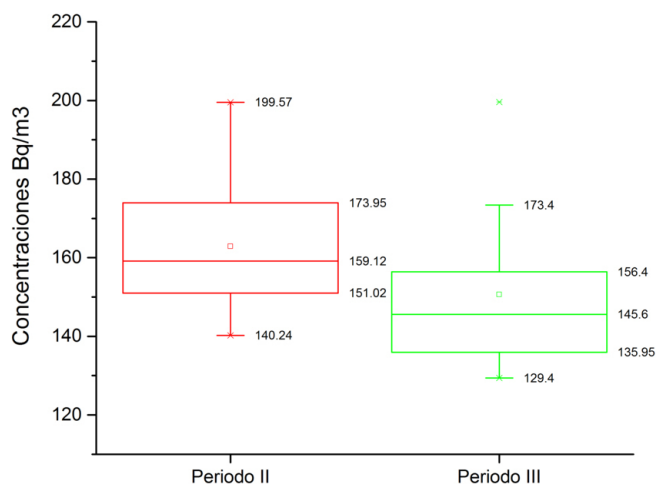


Figura 4.33: Variaciones entre concentraciones en el segundo y tercer periodo

4.6.2. Análisis entre el cuarto y quinto periodo

En el cuarto y quinto periodo se repiten 35 puntos de medición en los cuales se busca ver como varían estas concentraciones de un periodo a otro, para lo cual se

utiliza el análisis de varianza (ANOVA) entre ellos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Las medias de las concentraciones son iguales

H_1 = Las medias de concentraciones no son iguales.

Tabla 4.13: Resumen: Anova entre el cuarto y quinto periodo

ANOVA				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
cuarto	35	5530,29	158,01	774,17
quinto	35	4622,44	132,07	500,34

Tabla 4.14: Análisis de varianza entre el cuarto y quinto periodo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Prom. de cuadrados	F	P-value	V. crítico para F
Entre grupos	11774,222	1	11774,222	18,476	5,62E-05	3,982
Dentro de grupos	43333,516	68	637,258			
Total	55107,738	69				

De la tabla 4.14 se observa el P-value es igual a 5,62E-05, para un nivel de confianza de 95 % ($\alpha = 0,05$). La hipótesis nula se acepta cuando:

$$P\text{-Value} > \alpha$$

Por lo tanto a un nivel 0,05 se concluye que las medias son significativamente diferentes. En la figura 4.34 se observa su distribución mediante un gráfico de cajas.

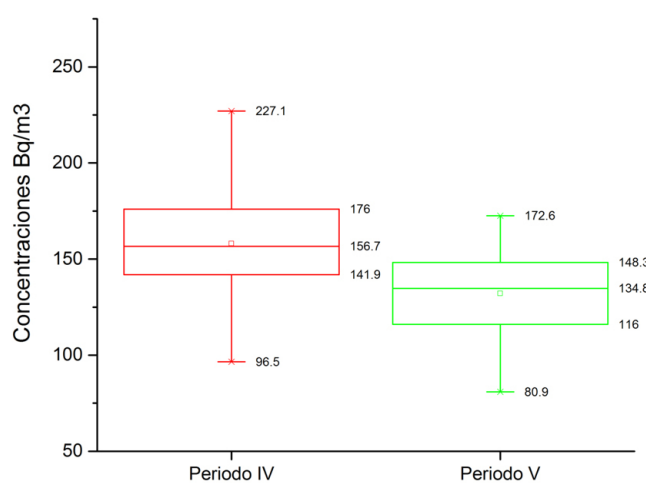


Figura 4.34: Variaciones entre concentraciones en el cuarto y quinto periodo

4.7. Análisis del promedio de las concentraciones en los cinco periodos

4.7.1. Evolución de las concentraciones en los periodos de medición

Para analizar la variación de los niveles de Radón encontrados en los cinco periodos de medición se puede ver la Figura 4.39. En el caso del primer periodo la distribución de los detectores abarcó una mayor área en el distrito, a partir del segundo hasta el quinto periodo se centro el reparto de detectores en colegios, lo cual permitía un mayor control de los detectores, además de conocer los niveles de ventilación con mayor detalle y el nivel de luz solar que llegaba al interior de los ambientes donde se encontraban los detectores. En el caso de la disminución del promedio de los niveles de Radón del segundo al tercer periodo se verificó un aumento en las tasas de ventilación de las viviendas. En el cuarto periodo se vuelve a ver un incremento de los niveles de Radón, esto se debe al ingreso de nuevos participantes en las mediciones que aumentaron el promedio de las concentraciones, finalmente se puede observar una nueva disminución de los niveles de Radón del cuarto al quinto periodo, donde nuevamente se verificó un aumento en la tasa de ventilación en la mayoría de los casos. En el tercer y cuarto periodo se puede observar puntos que escapan al gráfico de cajas, los cuales son conocidos como valores atípicos, es importante remarcar que estos puntos fueron exceptuados, debido que impedían el ajuste de la muestra a una distribución log-normal.

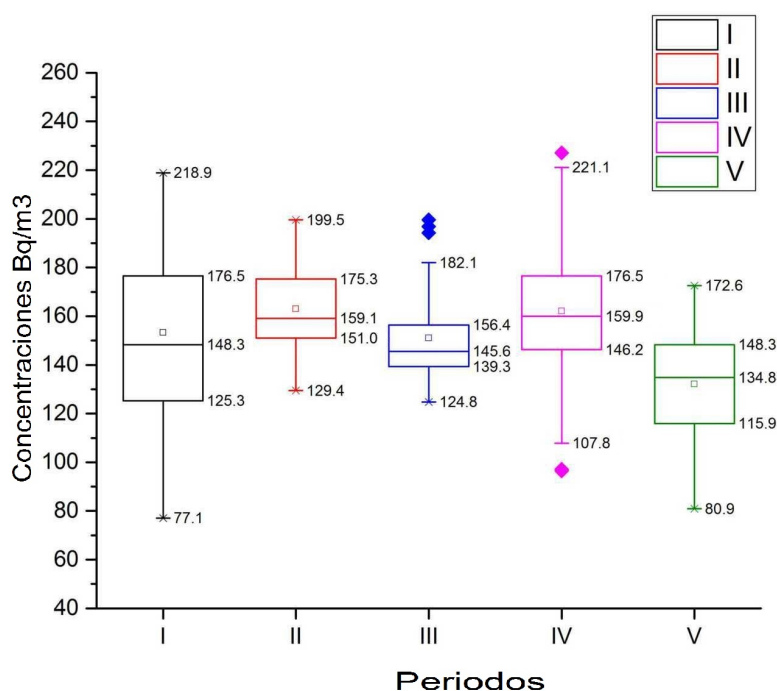


Figura 4.35: Concentraciones promedio registradas en los cinco periodos de medición.

4.7.2. Distribución Log-normal

En la tabla 4.15 se presentan los valores de la media aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana, media geométrica (MG) y desviación geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m^3 , para un total de 125 viviendas monitoreadas.

Tabla 4.15: Estadísticos de los cinco periodo en Bq/m^3

PROMEDIO	MAX.	MIN.	MEDIANA	MG	DEG
155,6	218,9	103,0	155,1	154,1	1,2

En la Figura 4.36 se presenta el histograma de los valores de concentración de Radón

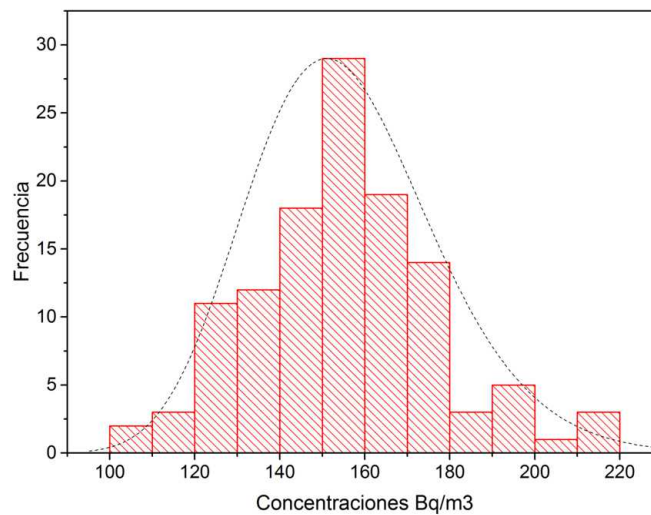


Figura 4.36: Histograma de los valores de Radón medidos en los cinco periodos

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráficos probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos.

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

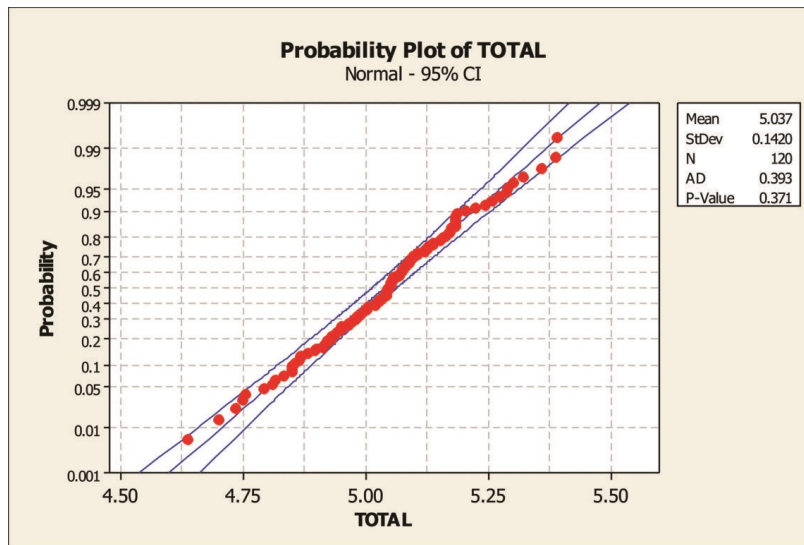


Figura 4.37: Prueba de Anderson - Darling para las concentraciones de los cinco periodos

Con un nivel de confianza del 95% para la prueba de bondad de ajuste de Anderson -Darling, la hipótesis nula se acepta bajo la siguiente condición:

$$P\text{-Value} \geq 0,05$$

De la figura 4.37 se puede observar el P-Value igual a 0,371, valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que señala que cumple una distribución normal.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la prueba KS el estadístico D se contrasta entre el observado (D_{obs}) y el teórico (D_{tab}). El valor D_{tab} se puede ver en el apéndice D. La hipótesis nula se aceptará cuando:

$$D_{tab} > D_{obs}$$

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

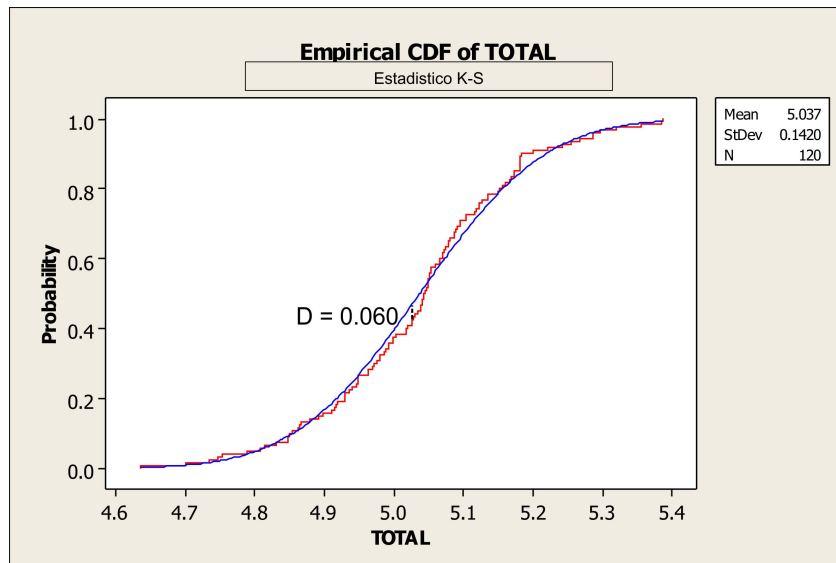


Figura 4.38: Estadístico Kolmogorov Smirnov para las concentraciones de los cinco periodos

Para un total de 35 datos con un nivel de confianza del 95% el valor D_{obs} es igual a 0.060, mientras que el D_{tab} es igual a 0.124 ($P > 0.15$), con lo cual se puede concluir que la distribución cumple una normal.

4.7.3. Prone-areas (Áreas de riesgo)

Para calcular la probabilidad de superar el nivel de referencia de $200 Bq/m^3$ se trabaja de manera análoga al primer periodo a partir de la ecuación 4.6. Con una $MG = 154,1$; $DEG = 1,2$ y un NR de $200 Bq/m^3$ se obtiene:

$$P[Z > 1,43] = 1 - P[Z \leq 1,43] \quad (4.11)$$

Valor que de acuerdo a la tabla de distribución normal, queda:

$$P[Z > 1,43] = 1 - 0,9236 = 0,0764 \quad (4.12)$$

Lo cual indica que existe un 7,64% de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los $200 Bq/m^3$.

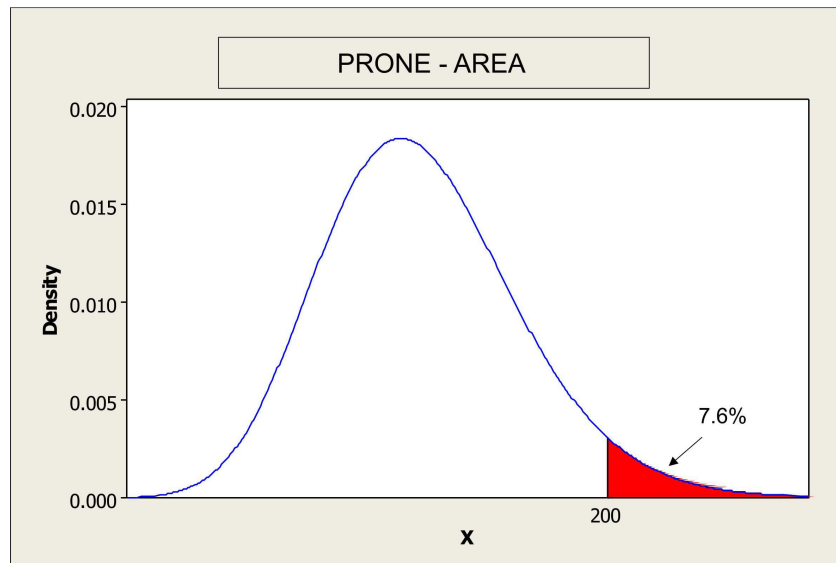


Figura 4.39: Probabilidad de encontrar puntos de medición con más de 200 Bq/m^3 durante todo el monitorio.

Capítulo 5

Conclusiones

1. La concentración promedio de Radón en los cinco periodos de medición en el interior de las viviendas monitoreadas es de $155,6 \text{ Bq/m}^3$ con una mediana que marca el 50 % de las concentraciones registrada igual a $155,1 \text{ Bq/m}^3$. Para la prone area se determinó que existe un 7,6 % de probabilidad de encontrar concentraciones superiores a 200 Bq/m^3 , y además se observó que el tercer periodo no cumple una distribución Log-normal, resultado que es de esperar con el estudio realizado por P. Bossew, L.C.S. Gundersen y R.R. Schumann para zonas pequeñas de medición es posible que la distribución de datos no se ajuste a una Log-normal.
2. Las concentraciones de Radón en interiores tomando como parámetro el recubrimiento de suelo no representa una diferencia significativa entre el uso de cemento o mayólica, lo que demuestra que la presencia de Radón está más relacionada con otros parámetros. Esto es debido a que el distrito de San Martín de Porres no presenta grandes variaciones en cuanto a la distribución del suelo, es de esperar encontrar niveles de Radón casi homogéneos en la zona de estudio.
3. En las viviendas donde el recubrimiento de las paredes es pintura, no se ha podido determinar una relación con las diferencias de los niveles de Radón y el tipo de pintura; sin embargo, sí se ha podido encontrar que en cuatro puntos de medición donde las paredes no presentan acabados las concentraciones superan los 200 Bq/m^3 . Este resultado respalda la importancia de las capas de pintura como un blindaje contra el Radón que proviene de los materiales de construcción.
4. En los periodos de medición se observa poca variabilidad de los parámetros ambientales. En los puntos de medición que repiten de un periodo a otro se observa una disminución en los niveles de Radón, se verificó en la mayoría de los casos un aumento en las tasas de ventilación de un periodo a otro, es de esperar entonces que el principal factor que afecta los niveles de las concentraciones de Radón es la ventilación.
5. Se encontró que las mayores concentraciones se registran en los dormitorios seguido de los niveles encontrados de las cocinas, esto se puede atribuir al uso de gas, en específico al uso del gas natural y al Radón liberado del agua. Por

otro lado, los niveles encontrados en las salas son menores en la mayoría de los casos, esto se debe a que son los ambientes que mayor ventilación presentan en las viviendas.



Bibliografía

- [1] <http://www.srim.org>.
- [2] By helmut paul - own work, public domain. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=770220>.
- [3] Ntp 140: Estadística y mediciones ambientales. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/-NTP/Ficheros/101a200/ntp_140.pdf.
- [4] Contaminación de interiores. <http://www.molesybits.es/2013/03/contaminacion-de-interiores.html>, Ene. 2017.
- [5] El radón y sus efectos en la salud. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>, Ene. 2017.
- [6] Elementos básicos de física nuclear. <http://www.escriitoscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu04.htm>, Ene. 2017.
- [7] Transferencia lineal de energía. <http://www.biocancer.com/journal/560/12-transferencia-lineal-de-energia>, Ene. 2017.
- [8] Comportamiento de radon y sus productos de decaimiento en medios físicos. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/060/37-060694.pdf, Feb. 2017.
- [9] Microzonificación sísmica de Lima. http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis32_p.pdf, Feb. 2017.
- [10] Reglamento de seguridad radiológica. http://www.ipen.gob.pe/transparencia/regulacion/normatividad/ds009_97em.pdf, Feb. 2017.
- [11] Valores de d en tests de kolmogorov-smirnov. <https://www.uv.es/ceaces/scrips/tablas/taKS.htm>, Feb. 2017.
- [12] Olav Axelson. Cancer risks from exposure to radon in homes. *Environmental health perspectives*, 103(Suppl 2):37, 1995.
- [13] CJ Barton, RE Moore, and PS Rohwer. Contribution of radon in natural gas to the dose from airborne radon-daughters in homes. Technical report, 1973.
- [14] Harry Bateman. The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. In *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, volume 15, pages 423–427, 1910.

- [15] VI Beir. Health effects of exposure to radon. *Committee on health risks of exposure to radon, Board on radiation effects research, Commission on life sciences, National Research Council*, 1999.
- [16] EV Benton and WD Nix. The restricted energy loss criterion for registration of charged particles in plastics. *Nuclear Instruments and Methods*, 67(2):343–347, 1969.
- [17] A.H. Biermann and S.R. Sawyer. *Attachment of radon progeny to cigarette-smoke aerosols*. May 1995.
- [18] DAC Binns, N Figueiredo, VP Melo, and VA Gouvea. Radon-222 measurements in a uranium-prospecting area in brazil. *Journal of environmental radioactivity*, 38(2):249–254, 1998.
- [19] P Bossew. Radon: exploring the log-normal mystery. *Journal of environmental radioactivity*, 101(10):826–834, 2010.
- [20] Antonio Brosed and Sociedad Española de Física Médica. *Fundamentos de física médica*. Sociedad Española de Física Médica, 2011.
- [21] WE Burcham. *Física nuclear*. Reverté, 1974.
- [22] AM Chirkov. Radon as a possible criterion for predicting eruptions as observed at karymsky volcano. *Bulletin Volcanologique*, 39(1):126–131, 1975.
- [23] S Darby and et al Hill. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 european case-control studies. *BMJ*, 330(7485):223, 2005.
- [24] Sociedad Argentina de Radioprotección. *Managing patient dose in digital radiology*. 2014.
- [25] Municipalidad de San Martín de Porres. *Plan de desarrollo concertado del distrito de san martín de porres al 2021*. Lima-Perú, Diciembre 2011.
- [26] Saeed A Durrani and Radomir Ilic. *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. world scientific, 1997.
- [27] G Espinosa. *Trazas nucleares en sólidos*, instituto de física, universidad nacional autónoma de méxico. Technical report, ISBN-968-36-4219-5, 1994.
- [28] Robley D Evans. Engineers' guide to the elementary behavior of radon daughters. *Health Physics*, 17(2):229–252, 1969.
- [29] Ervin J Fenyves and Otto Haiman. *The physical principles of nuclear radiation measurement*. 1969.
- [30] Robert L Fleischer and Larry G Turner. Correlations of radon and carbon isotopic measurements with petroleum and natural gas at cement, oklahoma. *Geophysics*, 49(6):810–817, 1984.

- [31] Robert Louis Fleischer, Paul Buford Price, and Robert M Walker. *Nuclear tracks in solids: principles and applications*. Univ of California Press, 1975.
- [32] Linda CS Gundersen and R Randall Schumann. Mapping the radon potential of the united states: examples from the appalachians. *Environment International*, 22:829–837, 1996.
- [33] W. Hofmann, H.S. Arvela, N.H. Harley, J.W. Marsh, J. McLaughlin, A. Röttger, and S. Tokonami. Preface. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 12(2):1, 2012.
- [34] NM Ibrahim, B El Ezaby, N Nada, TM Abd El-Makasoud, and SN Abd El Azem. Radioactivity concentration in some industrial ores and their waste products by gamma spectrometry. In *The 7th Conference of Nuclear Physics and Application, Cairo*, pages 6–10, 2000.
- [35] INEI. Perú: Estimaciones y proyecciones de población por sexo, según departamento, provincia y distrito, 2000-2015. Boletín especial N 18. Lima. Diciembre 2008.
- [36] Raymond H Johnson Jr, David E Bernhardt, Neal S Nelson, and HW Calley Jr. Assessment of potential radiological health effects from radon in natural gas. Technical report, Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA). Office of Radiation Programs, 1973.
- [37] Irving Kaplan. Nuclear physics. 1963.
- [38] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [39] EJ Kobetich and Robert Katz. Energy deposition by electron beams and δ rays. *Physical Review*, 170(2):391, 1968.
- [40] KODAK. Kodalpha radon-dosimeters and lr155 ssntd specifications.
- [41] Michael F L'Annunziata. *Handbook of radioactivity analysis*. Academic Press, 2012.
- [42] MA Misdag, H Khajmi, F Aitnouh, S Berrazzouk, and W Bourzik. A new method for evaluating uranium and thorium contents in different natural material samples by calculating the cr-39 and lr-115 type ii ssntd detection efficiencies for the emitted α -particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 171(3):350–359, 2000.
- [43] Niren Laxmichand Nagda. *Radon: prevalence, measurements, health risks, and control*. ASTM, 1994.
- [44] William W Nazaroff. Radon transport from soil to air. *Reviews of geophysics*, 30(2):137–160, 1992.
- [45] D Nikezic and KN Yu. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 46(3):51–123, 2004.

- [46] Dragoslav Nikezic and KN Yu. Long-term determination of airborne concentrations of unattached and attached radon progeny using stacked Ir 115 detector with multi-step etching. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 613(2):245–250, 2010.
- [47] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. Sources and effects of ionizing radiation. unsear 1993 report to the general assembly, with scientific annexes. 1993.
- [48] P Pereyra, ME López, and L Vilcapoma. Concentration measurements of radon 222 indoors in lima–peru. *International Journal of Physics*, 3(4):165–169, 2015.
- [49] BA Pérez and ME López. Evaluación de contaminación del aire debido a elementos radiactivos naturales.
- [50] Josip Planinić, Vanja Radolić, and Branko Vuković. Radon as an earthquake precursor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 530(3):568–574, 2004.
- [51] J Porstendörfer. Behaviour of radon daughter products in indoor air. *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4):107–113, 1984.
- [52] J Porstendörfer. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25(2):219–263, 1994.
- [53] UNA PERSPECTIVA DE SALUD PÚBLICA. Manual de la oms sobre el radón en interiores. 2015.
- [54] LS Quindós, J Soto, and J Peña. Radón, principal fuente de radiación natural.
- [55] LS Quindós, J Soto, and E Villar. La relación bi-214/pb-214 como trazador en los procesos de difusión atmosférica. *Tiempo y Clima*, 3(1), 2014.
- [56] TV Ramachandran, KP Eappen, RN Nair, YS Mayya, and S Sadasivan. Radon-thoron levels and inhalation dose distribution patterns in india dwellings. Technical report, Bhabha Atomic Research Centre, 2003.
- [57] JJ Rojas, BA Pérez, PE Pereyra, ME López, and LP Vilcampoma. Medición de la concentración de rn 222 en sótanos del nuevo pabellón de ingeniería de la pucp.
- [58] Henry Semat. *Introduction to atomic and nuclear physics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [59] Harmanjit Singh, Joga Singh, Surinder Singh, and BS Bajwa. Regional variations pattern of indoor radon levels in some areas of punjab and haryana. *Radiation protection dosimetry*, 130(2):257–263, 2008.
- [60] Antonio Ferrer Soria. *Física nuclear y de partículas*. Universitat de València, 2011.

- [61] Informe técnico. Estudio de suelos con fines de cimentación del edificio residencial machupicchu, asociación de vivienda residencial santa rosa manzana “b” lote n 8 distrito de san martin de porres, lima. 2016.
- [62] Şeref Turhan, İH Arıkan, H Demirel, and N Güngör. Radiometric analysis of raw materials and end products in the turkish ceramics industry. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(5):620–625, 2011.
- [63] C Valenzuela. Química general, introducción a la química teórica. *Salamanca: Universidad de Salamanca*, 1995.
- [64] Eyvind H Wichmann. *Física cuántica*, volume 4. Reverté, 1996.
- [65] KN Yu and D Nikezic. Long-term measurements of radon progeny concentrations with solid state nuclear track detectors. *Methods*, 214:214.
- [66] Michael Zhukovsky, Alexandra Onischenko, and Vladislav Batrikov. Radon measurements—discussion of error estimates for selected methods. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(4):816–820, 2010.



Apéndice A

Macro usado en el software ImageJ

```
//getappropriatedirectoriesfromuser
dir1 = getDirectory("ChooseSourceDirectory");
dir2 = getDirectory("ChooseDestinationdirectory");
list = getFileList(dir1);
setBatchMode(true);
for(i = 0; i < list.length; i++){
//print(list[i]);
open(dir1 + list[i]);
name = File.nameWithoutExtension;
//Preparetheimagebyremovinganyscaleandmaking8-bit
run("SetMeasurements...", "areacentroidcenterperimeterfitshapeferet'slimitdisplayredirect =
Nonedecimal = 3");
run("8-bit");
run("EnhanceContrast...", "saturated = 0,5");
saveAs("jpg", dir2 + i + "Original" + name);
run("RemoveOutliers...", "radius = 3threshold = 1which = Dark");
run("RemoveOutliers...", "radius = 3threshold = 1which = Bright");
run("Median...", "radius = 2");
setAutoThreshold("Intermodesdark");
//run("Threshold...");
setThreshold(166, 255);
setOption("BlackBackground", false);
run("ConverttoMask");
run("FillHoles");
run("Dilate");
run("Watershed");
run("RemoveOutliers...", "radius = 2threshold = 1which = Dark");
run("SetScale...", "distance = 1known = 0,0002864070unit = μmglobal");
run("AnalyzeParticles...", "size = 0,02 - Infinitycircularity = 0,7 - 1,00show =
Outlinesdisplayexcludclearsummarize");
//Savethemasksfile
saveAs("jpg", dir2 + i + "CountMask1" + name);
```



```
close();  
//Savethethresholdedimage  
saveAs("jpg", dir2 + i + "Thresholded1" + name);  
selectWindow("Results");  
saveAs("Results", dir2 + i + name + "Results.xls");  
}  
selectWindow("Summary");  
saveAs("Text", dir2 + i + name + "Summary.txt");  
run("Close");  
run("Close");  
run("Close");  
run("Close");  
run("Close");
```



Apéndice B

Ubicación GPS de las viviendas monitoreadas

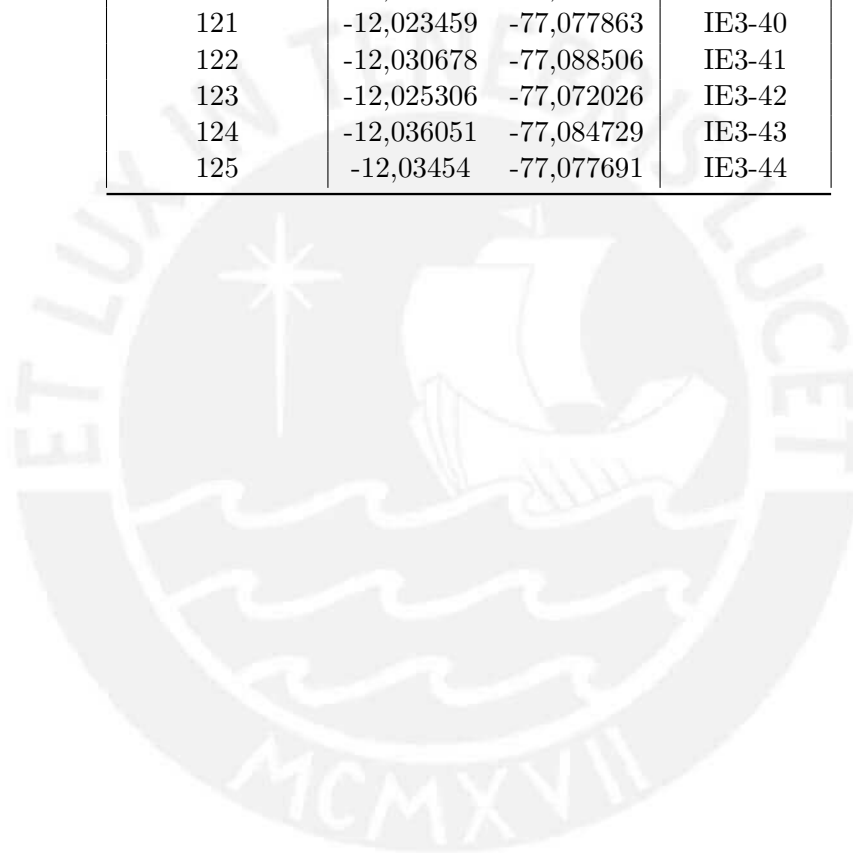
Tabla B.1: Código de casas y coordenadas GPS

N DE CASA	COORDENADAS	CÓDIGO
1	-12,022624 -77,075787	N5-01
2	-12,024324 -77,088705	N5-03
3	-11,971663 -77,090808	N5-04
4	-11,978801 -77,088147	N5-05
5	-12,031422 -77,086995	N5-06
6	-11,987293 -77,086626	N5-07
7	-11,983837 -77,088061	N5-08
8	-11,983837 -77,088061	N5-10
9	-12,030158 -77,072697	N5-11
10	-11,990986 -77,104650	N5-12
11	-11,960684 -77,096558	N5-13
12	-11,989767 -77,107364	N5-14
13	-11,963814 -77,089788	N5-17
14	-12,011023 -77,084116	N5-20
15	-11,990370 -77,087500	N5-21
16	-12,005162 -77,086430	N5-22
17	-11,963791 -77,089477	N5-23
18	-12,019770 -77,076989	N5-29
19	-11,986839 -77,109981	N5-31
20	-12,014682 -77,068823	N5-33
21	-12,018225 -77,075210	N5-37
22	-12,011374 -77,082747	N5-38
23	-12,013948 -77,071691	N5-40
24	-11,968979 -77,095358	N5-44
25	-11,975599 -77,071329	N5-48
26	-11,990164 -77,102861	N5-53

N DE CASA	COORDENADAS	CÓDIGO
27	-11,966896 -77,113962	N5-55
28	-11,961953 -77,095919	N5-56
29	-12,000609 -77,09824	N5-60
30	-11,991038 -77,113518	N5-63
31	-11,991374 -77,096867	N5-65
32	-12,027137 -77,086396	N5-69
33	-12,007157 -77,087082	N5-70
34	-12,017567 -77,082619	N5-72
35	-11,989854 -77,088277	IE1-01
36	-11,990407 -77,087017	IE1-02
37	-11,989917 -77,087311	IE1-03
38	-11,993088 -77,087361	IE1-04
39	-11,996595 -77,103666	IE1-05
40	-11,990868 -77,085655	IE1-06
41	-11,989345 -77,093594	IE1-08
42	-11,994144 -77,084022	IE1-09
43	-11,996437 -77,077826	IE1-10
44	-11,994416 -77,097507	IE1-11
45	-11,995892 -77,087530	IE1-12
46	-12,000713 -77,089010	IE1-13
47	-11,995307 -77,085253	IE1-10
48	-11,997235 -77,086285	IE1-16
49	-11,987715 -77,094397	IE1-17
50	-11,989436 -77,087693	IE1-18
51	-11,990396 -77,085752	IE1-19
52	-12,007597 -77,091156	IE1-20
53	-12,022624 -77,075787	IE1-23
54	-11,987293 -77,086626	IE1-20
55	-11,990986 -77,104650	IE1-25
56	-12,012298 -77,066947	IE1-26
57	-12,024324 -77,088705	IE1-28
58	-11,995782 -77,071791	IE1-29
59	-12,000301 -77,087745	IE1-30
60	-11,975269 -77,088678	IE1-32
61	-11,979467 -77,08945	IE1-30
62	-11,983917 -77,079665	IE1-35
63	-11,986366 -77,090118	IE1-37
64	-11,991571 -77,091963	IE1-38
65	-11,996608 -77,089474	IE2-01
66	-11,995181 -77,086985	IE2-02
67	-11,997616 -77,085869	IE2-03
68	-11,999127 -77,088959	IE2-00

N DE CASA	COORDENADAS	CÓDIGO
69	-12,002322 -77,089994	IE2-05
70	-12,007607 -77,084331	IE2-06
71	-12,01006 -77,085152	IE2-07
72	-12,011709 -77,088265	IE2-09
73	-12,012258 -77,083294	IE2-10
74	-12,013104 -77,085628	IE2-11
75	-12,014288 -77,082645	IE2-12
76	-12,004775 -77,096261	IE2-13
77	-12,003379 -77,098336	IE2-14
78	-12,007861 -77,093625	IE2-16
79	-11,999532 -77,097601	IE2-17
80	-12,001646 -77,094576	IE2-18
81	-12,001646 -77,107317	IE2-19
82	-11,980628 -77,105171	IE2-20
83	-11,980292 -77,100879	IE2-21
84	-11,979201 -77,113582	IE2-22
85	-11,974919 -77,112037	IE2-23
86	-11,974499 -77,1159	IE2-21
87	-11,972484 -77,101309	IE3-02
88	-11,972148 -77,105171	IE3-03
89	-11,976598 -77,106373	IE3-01
90	-11,984658 -77,094576	IE3-05
91	-12,015763 -77,079593	IE3-06
92	-12,014756 -77,082512	IE3-07
93	-12,018953 -77,088348	IE3-08
94	-12,009215 -77,089378	IE3-09
95	-12,004934 -77,09058	IE3-11
96	-11,991165 -77,089636	IE3-12
97	-11,989822 -77,092039	IE3-13
98	-11,991081 -77,097017	IE3-14
99	-11,992424 -77,094614	IE3-15
100	-11,997126 -77,095386	IE3-17
101	-11,99595 -77,088177	IE3-18
102	-11,992592 -77,086031	IE3-19
103	-11,98873 -77,082254	IE3-20
104	-11,988142 -77,079593	IE3-21
105	-11,985288 -77,09058	IE3-23
106	-11,984952 -77,095386	IE3-24
107	-12,034239 -77,07733	IE3-25
108	-12,032176 -77,079568	IE3-26
109	-12,032676 -77,07733	IE3-27
110	-12,0313 -77,075668	IE3-28

N DE CASA	COORDENADAS	CÓDIGO
111	-12,033301 -77,063969	IE3-29
112	-12,032014 -77,067442	IE3-31
113	-12,02829 -77,065243	IE3-32
114	-12,030756 -77,069775	IE3-33
115	-12,034876 -77,08164	IE3-34
116	-12,033029 -77,089364	IE3-35
117	-12,032861 -77,077348	IE3-36
118	-12,030626 -77,073915	IE3-37
119	-12,027321 -77,083699	IE3-38
120	-12,024802 -77,090738	IE3-39
121	-12,023459 -77,077863	IE3-40
122	-12,030678 -77,088506	IE3-41
123	-12,025306 -77,072026	IE3-42
124	-12,036051 -77,084729	IE3-43
125	-12,03454 -77,077691	IE3-44



Apéndice C

Parámetros ambientales durante las mediciones de Radón 222 y su influencia en la densidad de aire

Tabla C.1: Parámetros ambientales y sus variaciones durante la medición de Radón 222

MES	TEMP. (C)	H. R. (%)	PRESIÓN (Pa)	ρ AIRE (Kg/m^3)
Nov-15	18,9	83,2	98000	1,161245
Dic-15	20,5	83,4	98000	1,154031
Ene-16	23,3	78,7	98000	1,142036
Feb-16	24,8	77,4	98000	1,135516
Mar-16	24,3	78,6	98000	1,137584
Abr-16	22,2	81,6	98000	1,146603
May-16	19,6	84,2	98000	1,157996
Jun-16	17,1	87,5	98000	1,168969
Jul-16	16,9	85,9	98000	1,170013
Ago-16	16,4	86,8	98000	1,172198
Set-16	16,7	86,3	98000	1,170883
Oct-16	18,0	81,8	98000	1,165425
Nov-16	19,3	80,3	98000	1,159738
Dic-16	20,9	81,4	98000	1,152453

Tabla C.2: Valores de temperatura, humedad relativa, presión y densidad de aire para los diferentes periodos de medición.

	MES	TEMP, (C)	H, R, (%)	PRESIÓN (Pa)	ρ AIRE (Kg/m^3)
PRIMER PERIODO	Nov-15	18,9	83,2	98000	1,161245
	Dic-15	20,5	83,4	98000	1,154031
	PROMEDIO	19,7	83,3	98000	1,157638
SEGUNDO PERIODO	May-16	19,6	84,2	98000	1,157996
	Jun-16	17,1	87,5	98000	1,168969
	PROMEDIO	18,4	85,8	98000	1,163482
TERCER PERIODO	Jul-16	16,9	85,9	98000	1,170013
	Ago-16	16,4	86,8	98000	1,172198
	PROMEDIO	16,6	86,4	98000	1,171106
CUARTO PERIODO	Ago-16	16,4	86,8	98000	1,172198
	Set-16	16,7	86,3	98000	1,170883
	PROMEDIO	16,5	86,6	98000	1,171541
QUINTO PERIODO	Oct-16	18,0	81,8	98000	1,165425
	Nov-16	19,3	80,3	98000	1,159738
	PROMEDIO	18,7	81,1	98000	1,162581

Los parámetros ambientales tienen una influencia directa en la densidad del aire, y por lo tanto afecta el alcance de las partículas alfas en este medio.

En la siguiente figura se analiza las variaciones de los alcances de las partículas alfa en el aire para las diferentes densidad de aire durante los diferentes periodos de medición.

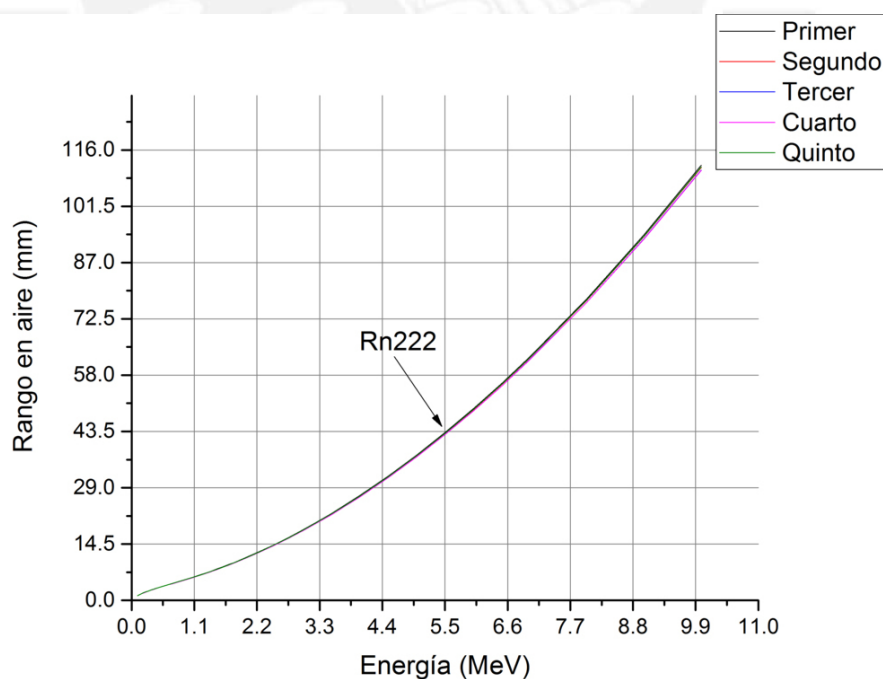


Figura C.1: Rango en aire de partícula alfa de Radón

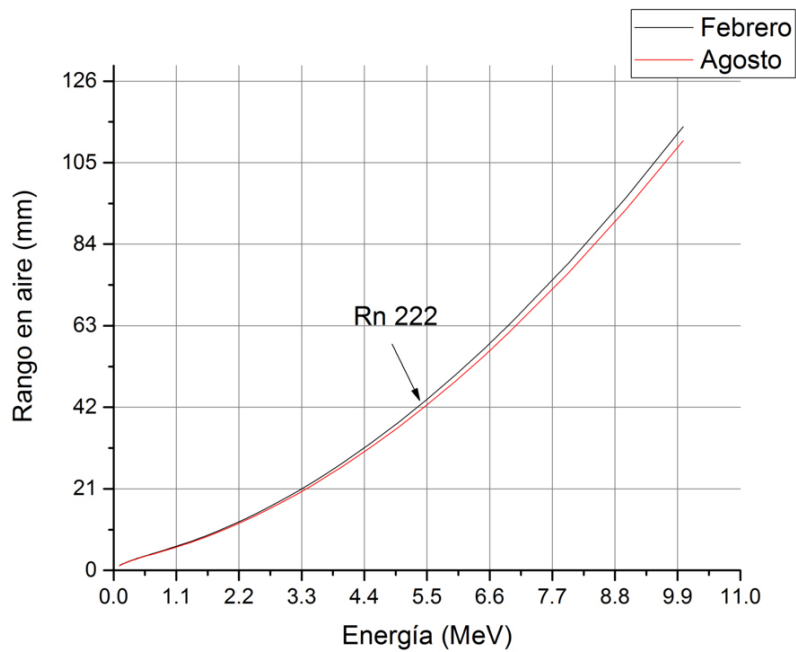
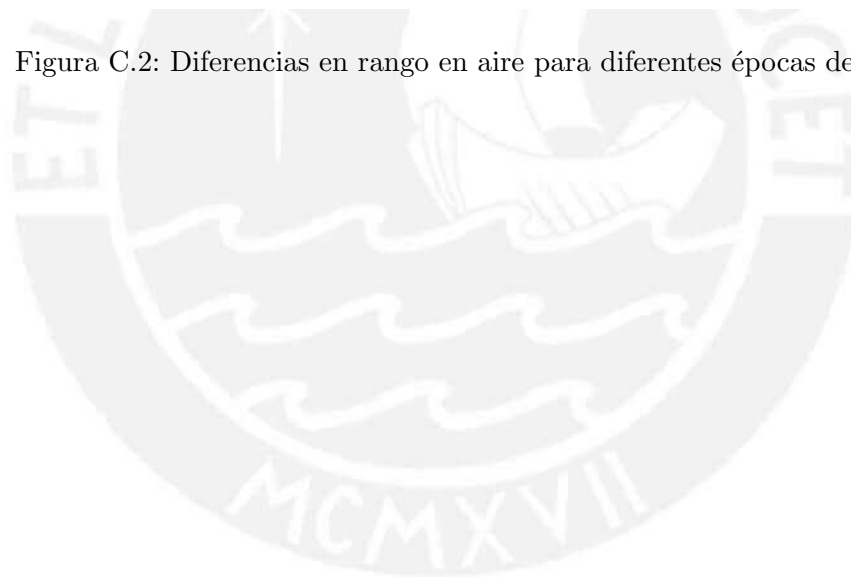


Figura C.2: Diferencias en rango en aire para diferentes épocas del año



Apéndice D

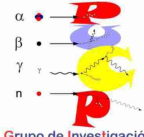
Tabla de valores K-S

Tabla D.1: Valores de D en tests de Kolmogorov-Smirnov [11]

g. libertad	a=0,01	a=0,05	a=0,1	a=0,15	a=0,2
1	0,995	0,975	0,95	0,925	0,9
2	0,929	0,842	0,776	0,726	0,684
3	0,828	0,708	0,642	0,597	0,265
4	0,733	0,624	0,564	0,525	0,494
5	0,669	0,565	0,51	0,474	0,446
6	0,618	0,521	0,47	0,436	0,41
7	0,577	0,486	0,438	0,405	0,381
8	0,543	0,457	0,411	0,381	0,358
9	0,514	0,432	0,388	0,36	0,339
10	0,49	0,401	0,368	0,342	0,322
11	0,468	0,391	0,352	0,326	0,306
12	0,45	0,375	0,338	0,313	0,295
13	0,433	0,361	0,325	0,302	0,284
14	0,418	0,349	0,314	0,292	0,274
15	0,404	0,338	0,304	0,283	0,266
16	0,392	0,328	0,295	0,274	0,258
17	0,382	0,318	0,286	0,266	0,25
18	0,371	0,309	0,278	0,259	0,244
19	0,363	0,301	0,272	0,252	0,237
20	0,356	0,295	0,264	0,265	0,231
25	0,32	0,27	0,24	0,22	0,21
30	0,29	0,24	0,22	0,2	0,19
35	0,27	0,23	0,21	0,19	0,18
40	0,25	0,21	0,19	0,18	0,17
45	0,24	0,2	0,18	0,17	0,16
50	0,23	0,19	0,17	0,16	0,15
mayor que 50	$1,63/\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,22/\sqrt{n}$	$1,14/\sqrt{n}$	$1,07/\sqrt{n}$

Apéndice E

Ficha de datos para la ubicación de los detectores



**Ficha de Ubicación
Detector de Rn 222**

Grupo de Investigación de Huellas Nucleares

Responsable:

Código de los detectores

--	--

Datos Generales:

Dirección				
Distrito			Teléfono	
Edad aprox. de la construcción (años)		Número Habitantes	Número Fumadores:	
La casa está en:	avenida	calle	Interior o pasaje	
El tráfico es:	intenso	medio	bajo	
Transitan mayormente:	Pesados (ómnibus y camiones)		Livianos (autos)	
En los alrededores hay:	Fábricas con emisión de gases	Fábrica sin emisión de gases	Cables de alta tensión	aeropuerto

Características del lugar de monitoreo

sala	cocina		dormitorio	baño	Garaie
Sótano	semisótano		Primer piso	Segundo piso	otro
¿Fuman en la habitación?				si	no
¿Tiene ventana(s)?				si	no
¿Quedan abiertas?	siempre	nunca	En el día	Por la noche	Por horas
¿Otro sistema?	Ventilador de techo	Aire acondicionado	Extractor de aire	otro	Nada
El sistema adicional está prendido	siempre	nunca	Solo de día	Solo de noche	Por momentos
Material de construcción			ladrillos	adobe	drywall otros
Recubrimiento	pintura	madera	papel	mayólica	otros

Figura E.1: Ficha de ubicación de los detectores (Parte I)

Si el recubrimiento es pintura:

Tiempo aproximado		Mas de 5 años		Menos de 5 años		
¿Tiene fisuras?		si			No	
Tipo:	látex	Al agua	Base imprimante	esmalte	otro	No recuerda

Otras características

En forma general puede decir que la habitación tiene buena ventilación.			si	no	
La luz solar le da	Por la mañana		Por la tarde	nunca	
El piso es de	cemento	mayólica	madera	tapiz	Otro:

Observaciones (colocar cualquier otra característica que pueda ser de interés en la ubicación)

Muchas gracias por su participación.

Contacto: Laboratorio de Huellas Nucleares (3er. Piso Física)

Patrizia Pereyra

Oficina 626 2000

ANEXOS 4112 / 4111 / 4127

Correo: grupo.githunu@pucp.pe

Figura E.2: Ficha de ubicación de los detectores (Parte II)