

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**Monitoreo de la concentración de la actividad
de Rn-222 en el distrito de San Luis-Lima
durante los años 2015-2016**

Tesis para Optar el Grado de:
MAGÍSTER EN FÍSICA

Presentada por:
Lic. Bedher Omar Vega Cabrera

Asesor:
Dra. María Elena López Herrera

Miembros del Jurado:
Dr. Hernán Castillo Egoavil
Dra. María Elena López Herrera
Mg. Patrizia Pereyra Anaya

Lima-Perú
San Miguel, Abril 2017



Dedicatoria

A mis padres:
Nora y Héctor

A mis hermanos:
Nathalí, Magali y Marvuin

A mi novia:
Maite

En memoria de mis profesores:
Lic. Fís. Santos Cayetano Villanueva
(UNPRG - Lambayeque) y
Dra. Mariella Berrocal Tito
(UNMSM - Lima).



Agradecimientos

A mi asesor de tesis, Dra. María Elena López Herrera, docente de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por su amistad, colaboración, consejos y paciencia, sin las cuales este trabajo no se hubiera elaborado.

A mi profesora Mg. Patrizia Pereyra Anaya, por sus sinceros consejos y preocupación hacia mi persona. A mis compañeros de maestría y doctorado que trabajan incansablemente en el Grupo de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU - PUCP), por su colaboración, apoyo y consejos. El trabajo en camaradería ayudó enormemente a la realización y culminación del trabajo.

Mi admiración y mis respetos al PhD. Daniel Palacios Fernández, profesor titular del Departamento de Física de la Universidad Simón Bolívar en Caracas - Venezuela, por su notable apoyo en conocimientos científicos, que de alguna manera ayudaron a direccionar el enfoque del trabajo. ¡Muchas gracias de verdad!

Un especial agradecimiento al programa de becas de maestría del estado peruano, que a través de “CienciActiva de Concytec” pude empezar y finalizar con éxito mis estudios, así mismo desarrollar el presente trabajo de investigación.

A todos los pobladores que apoyaron de inicio a fin en cada periodo de monitoreo, respetando las pautas indicadas previamente.

Y a todos aquellos que han colaborado de algún modo en la elaboración de este trabajo, amigos, familiares y sobre todo mis padres por brindarme esas fuerzas para seguir sembrando y cosechando éxitos con humildad.

RESUMEN

Detectores de trazas nucleares de estado sólido (LR-115 Tipo 2) en modo descubierto fueron usados para monitorear la concentración de la actividad del Rn-222 en 84 viviendas en el distrito de San Luis - Lima (Perú), desde Setiembre del 2015 hasta Enero del 2017. Debido a que no se ha evidenciado estudio alguno de la proporción de U-238/Th-232 en nuestro país, se procedió a plantear dos hipótesis, en la primera se consideró la presencia de Rn-222 y su progenie, y en la segunda la presencia mixta de Rn-222 y Rn-220 con sus respectivas progenies; usando factores de equilibrio “F” y de calibración “k” tomados de la literatura especializada. Usando una metodología de grillado en el distrito y considerando una extensión de 1 km²/grilla, se determinó el promedio ponderado de las concentraciones durante todo el proceso de monitoreo. Los valores de concentración de la actividad del Rn-222 encontrados fueron de (68±21) Bq/m³ y (54±16) Bq/m³ para ambas hipótesis respectivamente. Durante el estudio, se identificaron 2 viviendas que tuvieron un alto índice de concentración de Rn-222 con respecto a las demás, superando los valores referenciales proporcionados por la EPA (148 Bq/m³) y NRPB (200 Bq/m³). Estos valores encontrados fueron de (199±40)Bq/m³ y (257±44)Bq/m³ para la hipótesis 1 y de (205±35)Bq/m³, y (159±32)Bq/m³ para la hipótesis 2 respectivamente. En esta investigación se tuvo en cuenta las velocidades de desgaste superficial de los detectores a partir de los espesores reducidos. Por otro lado, se correlacionaron variables atmosféricas y de vivienda con los valores de las concentraciones, permitiendo conocer el grado de influencia de cada una de ellas sobre el resultado. Se evidencia que los factores atmosféricos, ventilación, ubicación de las habitaciones (primer y segundo piso), tipo de habitaciones (dormitorios y salas), tipo de paredes (ladrillo con pintura y ladrillo sin pintura), tipos de piso (cemento, recubiertos con mayólica y de tierra), ausencia de fumadores, tipo de tránsito vehicular (medio) y tipo de zonificación (residencias de densidad media), influenciaron significativamente en los resultados de las concentraciones de la actividad del Rn-222.

Índice general

Dedicatoria	VI
Agradecimientos	VI
RESUMEN	VI
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	X
INTRODUCCIÓN	XIII
1. FÍSICA DEL RADÓN	1
1.1. Radiactividad natural y cadenas de desintegración.	1
1.2. Distribución U/Th en la tierra.	4
1.3. Partícula α y su interacción con la materia	5
1.3.1. Decaimiento α	5
1.3.2. Energía liberada y transferida	6
1.3.3. Poder de frenado	8
1.3.4. Fórmula de Bethe-Bloch	8
1.3.5. Curva de Bragg	9
1.3.6. Rango o Alcance	9
1.4. Isótopos del radón: Rn-222 y Rn-220	10
1.4.1. Orígenes	10
1.4.2. Propiedades físicas.	11
1.4.3. Importancia de los descendientes.	12
1.4.4. Fuentes, emanación y mecanismos de transporte del radón	13
1.4.5. Fuentes	13
1.4.6. Emanación	13
1.4.7. Transporte del radón: difusión y convección	14
1.4.8. Modelo de transporte del radón	15
1.4.9. Riesgos debido a la presencia del radón en interiores	18
1.5. Antecedentes y niveles de acción adoptados a nivel mundial	19
2. TÉCNICA DE HUELLAS NUCLEARES	23
2.1. Formación de trazas en medios dieléctricos	23
2.2. Grabado químico y geometría de la traza	25
2.3. Técnica de conteo de trazas	28

2.3.1.	Cálculo de densidad de trazas	29
2.3.2.	Estadística de conteo	29
2.3.3.	Número de campos ópticos	29
2.4.	Detector LR 115 Tipo 2	29
2.4.1.	Efectos de sensibilidad	31
2.4.2.	Efectos de saturación	33
2.4.3.	Efecto Plate-Out	34
2.4.4.	Incertidumbres de medida	34
2.4.5.	Factor de Equilibrio	35
2.5.	Factor de calibración y cálculo de la concentración de la actividad del radón	36
3.	METODOLOGÍA	38
3.1.	Descripción del distrito de San Luis - Lima	38
3.1.1.	Geografía	38
3.1.2.	Litología	39
3.1.3.	Geotecnia	40
3.2.	Metodología de campo	41
3.2.1.	Criterio de muestreo	42
3.2.2.	Encuesta	43
3.2.3.	Periodos de muestreo y variables meteorológicas	43
3.2.4.	Viviendas identificadas	45
3.3.	Metodología de laboratorio	45
3.3.1.	Preparación de la solución NaOH	45
3.3.2.	Grabado químico de detectores	46
3.3.3.	Procedimiento de lectura	47
3.3.4.	Medición del “fondo” en el detector usado	49
3.3.5.	Detectores envejecidos o descoloridos	49
3.3.6.	Factor de calibración para un detector descubierto	49
3.4.	Metodología de análisis de datos	51
3.4.1.	Propagación de incertidumbres	51
3.4.2.	Distribución Log-normal	52
3.4.3.	Promedio ponderado de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del grillado	53
4.	RESULTADOS	54
4.1.	Viviendas monitoreadas respecto a identificadas	54
4.2.	Primer periodo	55
4.3.	Segundo periodo	61
4.4.	Tercer periodo	70
4.5.	Cuarto periodo	77
4.6.	Quinto periodo	86
4.7.	Análisis de las medias y varianzas de las concentraciones obtenidas durante los cinco periodos	93
4.7.1.	Varianzas	95
4.7.2.	Medias	95
4.8.	Resultados generales en función al tiempo efectivo de monitoreo	96

4.9. Promedio ponderado de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del grillado	99
4.10. Mapa del Rn-222 del distrito de San Luis	101
4.11. Factores que influyen en la concentración de la actividad del Rn-222 . .	102
4.11.1. Variables meteorológicas	103
4.11.2. Ubicación de la habitación	104
4.11.3. Tipo habitación	105
4.11.4. Tipo de ventilación	107
4.11.5. Material de las paredes	108
4.11.6. Tipo de recubrimiento del piso	110
4.11.7. Antigüedad de la vivienda	111
4.11.8. Presencia de fumadores	112
4.11.9. Tipo de tránsito vehicular	113
4.11.10. Tipo de zonificación distrital	115
5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	117
5.1. Conclusiones	117
5.2. Perspectivas	118
A. Transformaciones cinéticas	126
A.1. Periodo de semidesintegración	126
A.2. Media Vida	126
A.3. Actividad	126
A.4. Equilibrios Radiactivos	126
A.4.1. Equilibrio Secular: $t_{1/2madre} \gg t_{1/2hija}$	127
A.4.2. Equilibrio Transitorio: $t_{1/2madre} > t_{1/2hija}$	127
B. Zonificación del distrito de San Luis	128
C. Mapa geológico de la ciudad de Lima	130
D. Características de las viviendas monitoreadas	132
E. Ficha de registro	136
F. Variación del espesor residual en los detectores LR-115 Tipo 2	139
G. Experiencias en campo	141

Índice de figuras

1.1. Cadenas de Desintegración Radiactiva Natural ^[44]	3
1.2. Distribución mundial de U/Th en suelo ^[57]	4
1.3. Barrera de potencial y la vecindad de un núcleo ^[22]	5
1.4. Esquema de decaimiento del Ra-226 ^[22]	6
1.5. Poder de frenado de las partículas α en aire ^[17]	8
1.6. Curva de Bragg para una partícula α con $E_k=5,49$ MeV en el aire. ^[67] .	9
1.7. Rango o Alcance de las partículas α en el aire obtenido por el software SRIM ^[79]	10
1.8. Principios de emanación del radón ^[32]	14
1.9. Fuente y mecanismo de transporte del radón ^[29]	15
1.10. Corte transversal del modelo teórico propuesto ^[42]	16
1.11. Radón: Segunda causa de cáncer de pulmón - OMS ^[62]	18
1.12. Rutas de acceso del radón en interiores ^[58]	19
2.1. Formación de la huella latente en polímeros ^[18]	25
2.2. Variación entre espesor removido (μm) y tiempo de grabado químico bajo diferentes normalidades en detectores de nitrocelulosa. ^[74]	26
2.3. Modelo de formación de la huella (adaptada de Durrani, 1997 ^[32] y Barrillon, 1997 ^[15]).	27
2.4. Simulación de perfiles de trazas grabadas inducidas por una partícula α en incidencia normal ^[15]	28
2.5. Técnica de conteo en un microscopio óptico ^[32]	28
2.6. Estructura química del nitrato de celulosa a partir de la celulosa. ^[72] . .	30
2.7. Sensibilidad del detector LR-115 tipo II ^[3]	31
2.8. Distancias mínimas y máximas de detección en LR-115 Tipo 2, para el Rn-222, Rn-220 y sus respectivas progenies (elaboración propia).	32
2.9. Respuesta del detector LR-115 tipo 2 al radón (a) y torón (b) con sus respectivos descendientes ^[63]	34
2.10. Factor de equilibrio $F=0.4$ ^[3]	36
3.1. Límites distritales de San Luis ^[2]	39
3.2. Ubicación de pozos en el distrito de San Luis ^[21]	39
3.3. Ubicación de la estación meteorológica del Campo de Marte-SENAMHI ^[9]	44
3.4. Temperatura Promedio ($^{\circ}\text{C}$) y Humedad Relativa (%) mensual (Set. 2015- En. 2017) ^[9]	45
3.5. Estabilización de la temperatura en el sistema termostático: $60\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$	47
3.6. Posicionamiento del calibrador GRATICULES LTD. en el centro del objetivo del microscopio.	48

3.7. Medición del diámetro del campo de visión en el microscopio LEICA, DM LM.	48
4.1. Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el primer periodo.	56
4.2. Ubicación de las viviendas monitoreadas (n=22) en el distrito de San Luis durante el primer periodo.	57
4.3. Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada.	59
4.4. Distribución de frecuencias de para las C_{Rn-222} determinadas en el primer periodo.	60
4.5. Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el segundo periodo.	64
4.6. Ubicación de las viviendas monitoreadas (n=61) en el distrito de San Luis durante el segundo periodo.	65
4.7. Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (2do periodo).	68
4.8. Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el segundo periodo.	69
4.9. Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el tercer periodo.	72
4.10. Ubicación de las viviendas monitoreadas (n=54) en el distrito durante el tercer periodo.	73
4.11. Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (3er periodo).	76
4.12. Distribución de frecuencias para los logaritmos de las C_{Rn-222} determinadas en el tercer periodo.	76
4.13. Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el cuarto periodo.	80
4.14. Ubicación de las viviendas monitoreadas en el distrito durante el cuarto periodo.	81
4.15. Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (4to periodo).	84
4.16. Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el cuarto periodo.	85
4.17. Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el quinto periodo.	88
4.18. Ubicación de las viviendas monitoreadas en el distrito durante el quinto periodo.	89
4.19. Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (5to periodo).	91
4.20. Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el 5to periodo.	92
4.21. Valores promedio y de desviación estándar aritmética($MA\pm DSA$) de la concentraciones de la actividad del Rn-222 por periodo.	94
4.22. Enumeración del grillado y distribución de las viviendas monitoreadas (Set. 2015-Ene.2017).	100

4.23. Mapa del Rn-222 (Hipótesis 1).	101
4.24. Mapa del Rn-222 (Hipótesis 2).	102
4.25. Valores de las concentraciones(Bq/m^3), temperatura ($^{\circ}C$) y humedad relativa (% promedio para cada periodo de monitoreo.	103
B.1. Zonificación del distrito de San Luis ^[10]	129
C.1. Tipos de suelos en la región Lima ^[21]	131
F.1. Ajuste lineal entre los espesores residuales y tiempo de grabado químico. 140	



Índice de tablas

1.1.	Exposición pública a la radiación natural ^[57]	2
1.2.	Valores de algunas constantes usadas. ^[22]	7
1.3.	Propiedades físicas del radón ^[24]	11
1.4.	Energías y Rangos del Rn-222, Rn-220 y descendientes respectivamente.	12
1.5.	Concentración típica de Rn-222 ^[32]	13
1.6.	Valores promedios experimentales de los coeficientes y longitudes de difusión del Rn-222 en algunos materiales ^[43]	17
1.7.	Distancias de difusión del Rn-222 y Rn-220 en diferentes medios ^[32]	17
1.8.	Concentraciones de la actividad de radón en interiores en países de la OCDE ^[62]	19
1.9.	Niveles de progenie entre Rn-220/Rn-222 en diferentes lugares ^[2]	20
1.10.	Lista de instituciones participantes ^[20]	21
1.11.	Niveles de acción adoptados por instituciones internacionales ^[65]	22
2.1.	Distancias mínimas y máximas de detección en un detector LR-115 Tipo 2.	32
2.2.	Incertidumbre de medición en detectores LR-115 Tipo 2(Kodalpha-Radon) con [Bq/m ³] y [± %] a 2σ de nivel de confianza ^[3]	35
2.3.	Factores de calibración calculados a diferentes valores de exposición ^[25]	37
3.1.	Principales vías limítrofes del distrito de San Luis ^[21]	38
3.2.	Litología de pozos en el distrito de San Luis ^[21]	40
3.3.	Tipos de suelos en la ciudad de Lima ^[21]	41
3.4.	Consideraciones de muestreo: N° viviendas a monitorear por km ²	42
3.5.	Cantidad mínima de viviendas a monitorear en la ciudad de Lima-Centro.	42
3.6.	Variables consideradas en el monitoreo.	43
3.7.	Periodos de muestreo, estacionales y algunas variables metereológicas.	44
3.8.	Estación Meteorológica: Campo de Marte-112181 ^[9]	44
3.9.	Comparación entre una distribución normal y Log-normal.	53
4.1.	Identificación del total de viviendas-detectores entregados y recolectados por periodo.	54
4.2.	Seguimiento de las viviendas monitoreadas durante los 5 periodos	54
4.3.	Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 1er periodo.	55
4.4.	Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el primer periodo.	55
4.5.	Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (1er periodo).	58

4.6. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (1er periodo).	58
4.7. Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (1er periodo).	59
4.8. Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=22 (1er periodo).	60
4.9. Probabilidades acumuladas para una distribución normal (1er periodo).	61
4.10. Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 2do periodo.	61
4.11. Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el segundo periodo.	62
4.12. Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (2do periodo).	65
4.13. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (2do periodo).	67
4.14. Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (2do periodo).	68
4.15. Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=58 (2do periodo).	69
4.16. Probabilidades acumuladas para una distribución normal (2do periodo).	70
4.17. Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 3er periodo.	70
4.18. Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el tercer periodo.	71
4.19. Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (3er periodo).	74
4.20. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (3er periodo).	75
4.21. Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (3er periodo).	75
4.22. Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=54 (3er periodo).	77
4.23. Probabilidades acumuladas para una distribución normal (3er periodo).	77
4.24. Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 4to periodo.	78
4.25. Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el cuarto periodo.	78
4.26. Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (4to periodo).	81
4.27. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (4to periodo).	83
4.28. Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (4to periodo).	84
4.29. Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=50 (4to periodo).	85
4.30. Probabilidades acumuladas para una distribución normal (4to periodo).	86
4.31. Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 5to periodo.	86
4.32. Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el quinto periodo.	87
4.33. Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (5to periodo).	89
4.34. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (5to periodo).	90
4.35. Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (5to periodo).	92

4.36. Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para $n=36$ (5to periodo).	93
4.37. Probabilidades acumuladas para una distribución normal (5to periodo).	93
4.38. Resumen de las concentraciones de la actividad del Rn-222 durante los cinco periodos de monitoreo.	94
4.39. Contraste de hipótesis de varianzas (Test-F) para concentraciones de la actividad del Rn-222 para cada par de muestras independientes (Criterio 1).	95
4.40. Contraste de hipótesis de medias (Test-T Student) para concentraciones de la actividad del Rn-222 para cada par de muestras independientes por periodo y entre criterios adoptados.	96
4.41. Resultado general de las C_{Rn-222} promedio de las 84 viviendas monitoreadas (Set. 2015 - Ene. 2017).	97
4.42. Valores de la C_{Rn-222} por grilla y promedio ponderado por población.	100
4.43. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de las variables meteorológicas por periodo de monitoreo.	103
4.44. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y las variables meteorológicas.	104
4.45. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación de las habitaciones por periodo de monitoreo.	104
4.46. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la ubicación de la habitación.	105
4.47. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función del tipo de habitación monitoreada durante los cinco periodos de estudio.	106
4.48. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de habitación monitoreada.	106
4.49. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función del tipo del tipo de ventilación de las habitaciones durante los cinco periodos de estudio.	108
4.50. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de ventilación de la habitación monitoreada.	108
4.51. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al material de las paredes	109
4.52. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de material de la pared de las habitaciones monitoreadas.	109
4.53. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas.	110
4.54. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas.	110
4.55. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función a la edad de la vivienda monitoreada.	112
4.56. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la edad de las viviendas monitoreadas.	112
4.57. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función a la presencia de fumadores en las viviendas monitoreadas.	113

4.58. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la presencia de fumadores en las viviendas monitoreadas.	113
4.59. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de tránsito vehicular.	114
4.60. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función al tipo de tránsito vehicular.	114
4.61. Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de zonificación distrital.	115
4.62. Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función al tipo de zonificación distrital.	115
D.1. Características de las viviendas monitoreadas.	133
F.1. Espesores residuales de detectores LR-115 Tipo 2 (sin exposición) a diferentes tiempos de grabado químico (min)	139



INTRODUCCIÓN

El Comité Científico de las Naciones Unidas en los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR en inglés) en el reporte general del año 2008^[57] detalla que la radiación estimada recibida por una persona en un año como promedio mundial es de 3,01 mSv de las cuales 2,42 mSv (80.40 %) corresponden a radiación natural. En efecto, una de las principales fuentes de radiación natural para los seres vivos es del gas Rn-222 vía inhalación con un promedio de 1,15 mSv de dosis efectiva anual que representa el 47,52 % de la radiación natural total.

Estudios epidemiológicos muestran que tanto la relación dosis-respuesta con el riesgo de cáncer de pulmón a exposiciones anuales relativamente bajas no sólo se deben al radón sino también a su progenie^[71]. El riesgo asociado del gas radón y su progenie está en dos órdenes de magnitud más alto que el correspondiente riesgo producido solo por el gas radón^[56].

Existen recomendaciones con respecto a los niveles de acción de la concentración de la actividad al Rn-222, como la del ICRP 1994^[40], donde menciona que la ingeniería civil estándar para construcciones de nuevos departamentos y casas es de 100 Bq/m³ como nivel promedio anual, 200 Bq/m³ para la recomendación medidas de descontaminación de alto costo y 600 Bq/m³ para la recomendación de medidas de descontaminación de bajo costo.

La población desconoce este riesgo, y más aún en nuestro país, donde no se ha realizado un monitoreo a gran escala. Este desconocimiento es debido básicamente a que el Rn-222 es un gas insípido, incoloro e inodoro, siendo imperceptible por nuestros sentidos. El mayor problema se da cuando las viviendas no poseen buena ventilación, motivo por el cual estas concentraciones aumentan y por consiguiente crece el riesgo probabilístico de cáncer de pulmón. No se descarta la influencia de otras variables que afectan a la concentración de la actividad de Rn-222 en viviendas, tales como: tipo de material de construcción, de piso, ubicación de la vivienda, fábricas con emisión de gases cerca de la vivienda, entre otros.

Al tener en cuenta esta problemática, el grupo de investigación de huellas nucleares (GITHUNU-PUCP) desde el 2015 ha implementado el proyecto denominado (120-PNICP-PIAP-2015) “Desarrollo de un sistema de monitoreo de Rn-222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares en la ciudad de Lima - Perú”, financiado por el Fondo de Investigación de Ciencia y Tecnología del Perú (FINCyT). Este proyecto involucra al distrito de San Luis, donde se ha realizado esta investigación. Considerando la densidad poblacional del distrito, se pudo aplicar el criterio de relevamiento

que permitió determinar la concentración de la actividad del Rn-222 a lo largo y ancho del distrito. Los valores de concentraciones encontrados, ayudaron a describir el riesgo potencial a los que están sometidos los individuos en sus viviendas. Sin duda alguna, este trabajo de investigación nos permite contrastar nuestras medidas con los valores referenciales proporcionados en la normativa del Reglamento de Seguridad Radiológica D.S 009-97 EM, dados por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)^[37] y los más importante, proporcionar datos locales para establecer una normativa más realista en nuestro país.

Se ha demostrado que el empleo de detectores pasivos como el LR-115 Tipo 2 son de gran ayuda cuando los monitoreos de la concentración de la actividad de radón en interiores son a largo plazo, permitiendo identificar la interacción de las partículas α con la materia y evaluar el riesgo debido a la presencia de éstas partículas en ambientes habitados como así mismo su mecanismo de transporte. Por ello, el trabajo consistió en tres partes, el de campo, el de laboratorio y el de análisis estadístico. El trabajo de campo estuvo basado en la recopilación de datos, acerca de las viviendas a monitorear a través de una encuesta, así como en el reparto y recojo de detectores diseñado por el grupo de investigación GITHUNU-PUCP. Además, se detalló los periodos de muestreo considerando las diversas variables que influyen en el trabajo de recolección de datos. Se realizó una descripción general del distrito de San Luis, detallando su geografía, geotecnia y litología. El trabajo de laboratorio consistió en el grabado químico y posterior lectura de los detectores empleando un microscopio óptico. Finalmente, el trabajo de análisis estadístico, consistió en evaluar las diferencias significativas de las concentraciones determinadas en cada periodo de monitoreo.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Monitorear la concentración de la actividad de Rn-222 en viviendas en el distrito de San Luis-Lima durante los años 2015-2016.

Objetivos específicos:

1. Calcular la densidad de las partículas alfas del Rn-222 usando el detector LR-115 tipo 2.
2. Elaborar el mapa de Rn-222 propio del distrito de San Luis-Lima durante los periodos de medición.
3. Correlacionar los factores ambientales y características de la vivienda que afectan a la concentración de la actividad de Rn-222 en viviendas.
4. Contribuir con la data histórica nacional del monitoreo en el distrito e identificar los posibles casos de exposición crónica de Rn-222.
5. Incentivar una cultura de protección radiológica en la población.

Capítulo 1

FÍSICA DEL RADÓN

1.1. Radiactividad natural y cadenas de desintegración.

La transformación nuclear espontánea de un átomo inestable que resulta en la formación de nuevos átomos en la naturaleza sin intervención del hombre es denominada *radiactividad natural*. Cada transformación responde a uno de los diversos mecanismos de emisión que depende específicamente de la energía disponible para la transición tales como: decaimiento alfa, decaimiento beta, conversiones internas, transiciones isoméricas y captura de electrón orbital. Algunos de estas emisiones puede o no estar acompañada de emisión de radiación gamma^{[22], [38]}.

Estos átomos inestables presentes en la naturaleza pueden ser originados de diversas maneras. Aquellos que son generados a partir de las interacciones entre los rayos cósmicos y los núcleos atómicos presentes en la Tierra son denominados *radionucleidos cosmogénicos* mientras aquellos átomos inestables que han existido desde el origen de la Tierra y por ende presentan largo periodo de semidesintegración son llamados *radionucleidos primordiales*.

Los procesos y ciclos que siguen los radionucleidos naturales aún son de complejo entendimiento, pero de acuerdo con las leyes cuánticas “ciclo de Bethe” estas se producen en el seno de las estrellas y que ayudan a determinar las distintas concentraciones de radionucleidos en la faz de nuestro planeta^[37].

Uno de los principales radionucleidos primordiales de especial interés para nuestro estudio está relacionado con las series o cadenas de desintegración del Th-232(4n), Np-237(4n+1), U-238(4n+2) y U-235(4n+3), aunque la serie (4n+1) es considerada por algunos autores desaparecida por tener una vida media muchas veces menor que el de la tierra^[22].

El *Comité Científico de las Naciones Unidas en los Efectos de la Radiación Atómica* (UNSCEAR) en el reporte general del año 2008 reportado en la *tabla 1.1*^[57] detalla que la radiación estimada recibida por una persona en un año como promedio mundial

es de 3,01 mSv de las cuales 2,42 mSv (80,40 %) corresponden a radiación natural. En efecto, una de las principales fuentes de radiación natural es el gas radón: Rn-222 vía *inhalación* con un promedio de 1,15 mSv de dosis efectiva anual que representa el 47,52 % de la radiación natural total.

Tabla 1.1: Exposición pública a la radiación natural^[57].

Fuente de Radiación		Dosis Efectiva Anual (mSv)	
		Promedio	Rango Típico
Radiación cósmica	Directamente ionizante y fotón	0,28	
	Neutrón	0,10	
	Radionucleidos cosmogénicos	0,01	
	Radiación cósmica y cosmogénico total	0,39	0,3 – 1,0 ^a
Radiación terrestre externa	Exteriores	0,07	
	Interiores	0,41	
	Radiación terrestre externa total	0,48	0,3 – 1,0 ^b
Inhalación	Series del Uranio y Torio	0,006	
	Radón: Rn-222	1,15	
	Thoron: Th-220	0,10	
	Exposición Total por Inhalación	1,26	0,2 – 10 ^c
Ingestión	Potasio: K-40	0,17	
	Series de Uranio y Torio	0,12	
	Exposición Total por Ingestión	0,29	0,2 – 1,0 ^d
Total		2,42	1,0-13

^aRango desde el nivel del mar hacia altos niveles de elevación del suelo.

^bDependiendo de la composición del radionucleido en suelos y materiales de construcción.

^cDependiendo de la acumulación del gas radón en interiores.

^dDependiendo de la composición del radionucleido de los alimentos y agua potable.

La *figura 1.1* representa las series de desintegración para el U-238, Th-232 y del U-235, con sus productos de decaimiento Rn-222, Rn-220 y Rn-219 respectivamente (en color amarillo).

Figura 1.1: Cadenas de Desintegración Radiactiva Natural^[44].

	Serie del U-238 (4n+2)		Serie del Th-232 (4n)		Serie del U-235 (4n+3)	
Np						
U	U-238 (4.49*10 ⁹ a, 4.27MeV)	U-234 (2.48*10 ⁵ a, 4.86MeV)			U-235 (7.15*10 ⁸ a, 5.24MeV)	
Pa	Pa-234 (1.18m, 2.19MeV)	Pa-231 (3.43*10 ⁴ a, 5.15MeV)				
Th	Th-234 (24.1d, 0.27MeV)	Th-230 (7.52*10 ⁴ a, 4.77MeV)	Th-232 (1.38*10 ¹⁰ a, 4.08MeV)	Th-228 (1.90a, 5.52MeV)	Th-227 (18.6d, 6.15MeV)	
Ac			Ac-228 (6.13h, 2.12MeV)	Ac-228 (6.13h, 2.12MeV)	Ac-227 (22.0a, 0.05MeV)	
Ra		Ra-226 (1622a, 4.87MeV)	Ra-226 (1622a, 4.87MeV)	Ra-224 (3.64d, 5.79MeV)	Ra-223 (11.4d, 5.97MeV)	
Fr						
Rn		Rn-222 (3.82d, 5.49MeV)	Rn-222 (3.82d, 5.49MeV)	Rn-220 (54.5s, 6.40MeV)	Rn-219 (392s, 6.95MeV)	
At						
Po	Po-218 (3.05m, 6.115MeV)	Po-214 (1.6*10 ⁻⁴ s, 7.83MeV)	Po-210 (138d, 5.41MeV)	Po-216 (0.16s, 6.91MeV)	Po-215 (1.8*10 ⁻³ s, 7.53MeV)	
Bi	Bi-214 (19.7m, 3.27MeV)	Bi-214 (5.0d, 1.43MeV)	Bi-210 (5.0d, 1.43MeV)	Bi-212 (60.5m, 2.25-6.2MeV)	Bi-211 (2.16m, 6.75MeV)	
Pb	Pb-214 (26.8m, 1.02MeV)	Pb-210 (22.2a, 0.08MeV)	Pb-206 (Estable)	Pb-212 (10.6h, 0.57MeV)	Pb-211 (36.1m, 1.37MeV)	Pb-207 (Estable)
Tl				Tl-208 (3.1m, 4.99MeV)	Tl-207 (4.79m, 1.42MeV)	

1.2. Distribución U/Th en la tierra.

El reporte de la UNSCEAR-Vol I (2008) detalla los valores promedios y máximos para concentraciones de radiación natural en suelo, entre ellos U-238 y Th-232 a través de un monitoreo global de exposición realizado en 58 países tanto en África (Argelia, Egipto, Libia y Mauricio), América del Norte (México y Estados Unidos), América Central (Costa Rica y Cuba), América del Sur (Argentina), Este Asiático (Bangladesh, China, Hong Kong, Taiwan, India, Japón, Kazajistán, Indonesia, Filipinas, Malasia, Corea del Sur y Tailandia), Oeste Asiático (Armenia, Azerbaiyán, Irán, Iraq, Kuwait y Siria), Norte de Europa (Dinamarca, Estonia, Finlandia, Islandia, Lituania, Noruega y Suecia), Oeste de Europa (Bélgica, Alemania, Irlanda, Luxemburgo, Holanda, Portugal, España, Suiza y Reino Unido) Este de Europa (Bulgaria, República Checa, Hungría, Polonia, Rumanía, Rusia, Eslovaquia y Eslovenia), Sur de Europa (Albania, Croacia, Chipre, Grecia, Montenegro y Macedonia) y en Oceanía (Nueva Zelanda). Las concentraciones promedio tanto en U-238 y Th-232 fueron de 33 Bq/Kg y 45 Bq/Kg respectivamente. Aunque los valores de concentraciones son bajos, para evaluar la dosis global colectiva se requiere de la distribución de la población por cada país monitoreado.

De acuerdo al mapa mundial de exposición *figura 1.2*, muestra que hay más presencia de Th que U en suelo, pero esto es variable en diferentes regiones, según la leyenda mostrada. Como se puede apreciar, este estudio no involucra a América del Sur.

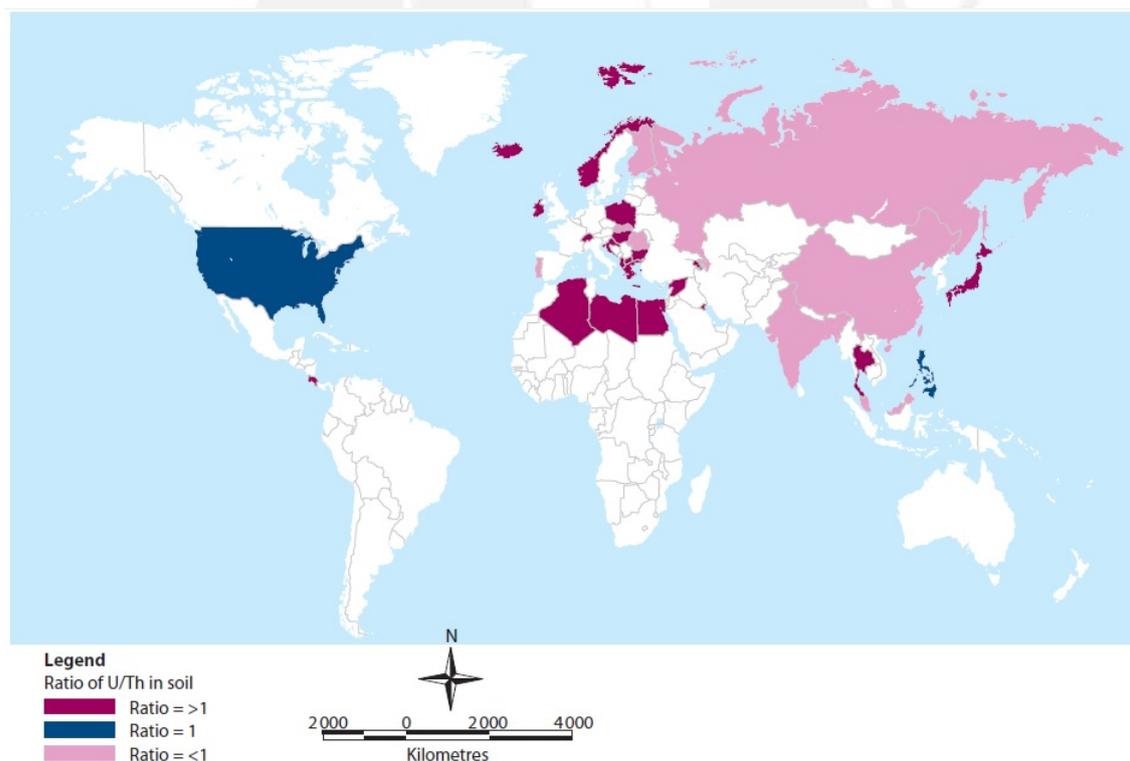


Figura 1.2: Distribución mundial de U/Th en suelo^[57].

1.3. Partícula α y su interacción con la materia

1.3.1. Decaimiento α

Es un tipo de transformación radiactiva, basado en la emisión de una partícula α (núcleo de helio altamente energético) desde un núcleo de un átomo inestable donde la fracción neutrón-protón es más baja con respecto del descendiente. Dicha partícula masiva cargada positivamente consiste en un ensamble de dos protones y dos neutrones. Para poder entender la fracción anteriormente mencionado, se muestra la siguiente reacción:



En este ejemplo, ${}^{222}\text{Rn}$ tiene una fracción neutrón-protón de 136:86 o 1,58:1. Después de decaer por emisión alfa, la fracción neutrón-protón del descendiente ${}^{218}\text{Po}$ es de 134:84 o 1,60:1. La explicación para esta teoría es doble:

1ero. En efecto, la fuerza electrostática repulsiva en núcleos pesados por acción de los protones crece más rápido que la fuerza nuclear de cohesión o de ligadura.

2do. Es concerniente al hecho que la partícula emitida debe tener suficiente energía para vencer la alta barrera de potencial en la superficie del núcleo. Consideraciones teóricas demanda que una partícula α tiene una energía cinética mayor que 3.8 MeV. La barrera de potencial es mostrada en la *figura 1.3*.

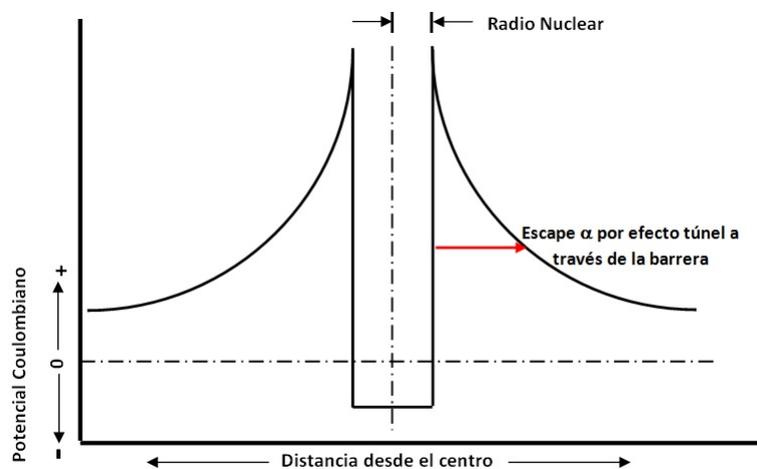


Figura 1.3: Barrera de potencial y la vecindad de un núcleo^[22].

La interacción nuclear fuerte dentro del contexto del modelo estándar es la responsable de mantener unidos a los nucleones (protones y neutrones). El modelo nuclear de la gota líquida propuesto por Bohr y Wheeler, permite calcular la masa atómica de los nucleidos que son difíciles de medir experimentalmente correspondiente a sus energías de ligadura siendo equivalentes a sus defectos de masa. Las constantes de la ecuación fueron ajustadas a través de datos experimentales relacionados a la masa nuclear, en unidades de masa atómica (uma) con A y Z ^[22]:

$$M = 0,99389A - 0,00081Z + 0,41A^{2/3} + 0,083\frac{(A/2 - Z)^2}{A} + 0,00062\frac{Z^2}{A^{1/3}} + \delta \quad (1.2)$$

donde:

$$\begin{aligned} \delta &= 0 && \text{para } A \text{ impar,} \\ \delta &= \frac{-0,036}{A^{3/4}} && \text{para } A \text{ y } Z \text{ par,} \\ \delta &= \frac{+0,036}{A^{3/4}} && \text{para } A \text{ par y } Z \text{ impar,} \end{aligned}$$

La interpretación física de estos ajustes se explican a continuación término a término:

1. La energía de ligadura debido a A.
2. La energía de ligadura debido a Z. Junto al primer término, son llamados también término de energía volumétrica, debido a que la energía nuclear es proporcional al volumen.
3. Término de energía superficial, que es una corrección del primer término.
4. Término de asimetría que permite identificar valores distintos entre neutrones y protones.
5. La repulsión electrostática mutua entre protones.
6. Término de paridad, por la tendencia que poseen los neutrones y protones de estar apareados dos a dos.

El Ra-226 con $t_{1/2}=1602$ años, emite un complejo espectro antes de decaer en Rn-222. En efecto, el Ra-226 emite dos partículas α , el 94,3 % con energía cinética de 4,777 MeV y el 5,7 % con energía cinética de 4,591 MeV. En este proceso, el núcleo descendiente (Rn-222) es dejado en estado excitado, emitiendo un fotón γ cuya energía es igual a la diferencia entre las dos energías cinéticas de las partículas α emitidas: $4,777 - 4,591 = 0,186 \text{ MeV}$ (35 % de estos rayos γ son por conversión interna). En la *figura 1.4* se muestra la transformación energética del Ra-226.

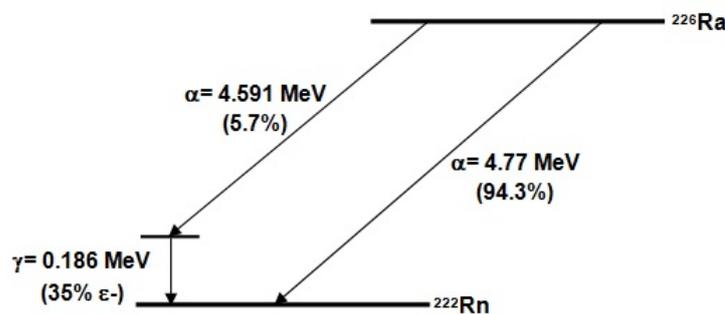


Figura 1.4: Esquema de decaimiento del Ra-226[22].

1.3.2. Energía liberada y transferida

La energía liberada en el decaimiento radiactivo proviene de las diferencias entre la masa del átomo padre con respecto con el átomo de la progenie (a través de la ecuación:

$$E = mc^2.$$

En el proceso de emisión de la partícula alfa donde la energía total Q es liberada, el número y la masa atómica son conservadas. La ecuación de conservación debe de satisfacer lo siguiente:

$$Q = M_p - M_h - M_\alpha - 2M_e \quad (1.3)$$

donde M_p, M_h, M_α y $2M_e$ son respectivamente igual a la masa del padre, la hija, la partícula alfa emitida y de los dos electrones orbitales que son calculados desde la (ec. 1.2). En la *tabla 1.2* se detallan los valores de la masa del protón, neutrón, electrón y la energía equivalente a 1 unidad de masa atómica (uma).

Tabla 1.2: Valores de algunas constantes usadas.^[22]

m_p	m_n	m_e	1 uma
1,007276 uma	1,008665 uma	0,000548 uma	931 MeV

Es preciso mencionar que esta energía liberada es debido a la contribución de la energía cinética de la partícula α y del núcleo de la hija en retroceso que puede ser calculada aplicando las leyes de conservación de energía y momento.

Bajo este criterio, si se considera tanto a (M y m) como a (V y v) las masas y velocidades respectivamente del núcleo en retroceso y la partícula α , por conservación de la energía tenemos:

$$Q = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.4)$$

y de acuerdo a la conservación del momento:

$$MV = mv \quad (1.5)$$

Sustituyendo la ecuación (1.5) en (1.4) se tiene:

$$Q = \frac{1}{2}M \frac{m^2v^2}{M^2} + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.6)$$

Donde la energía cinética de la partícula α : $\frac{1}{2}mv^2$ puede ser denotada por E_k . Entonces la ecuación (1.6) es reescrita de la siguiente manera:

$$E_k = \frac{Q}{1 + m/M} \quad (1.7)$$

Un ejemplo en el proceso de desintegración α para el ^{222}Rn , $Q=5,59$ MeV^[16] es producto a la desintegración del núcleo en mención, 5,49 MeV de energía cinética de la partícula α y 0,1 MeV correspondiente a la energía cinética del núcleo de la hija en retroceso ^{218}Po , denominado en ambos casos como energía transferida.

1.3.3. Poder de frenado

Cuando la partícula α viaja a través de un material (aire, o cualquier otro medio), esta excita y arranca electrones atómicos, perdiendo energía. La energía perdida por unidad de distancia recorrida, $S = -dE/dx$, es llamada alternativamente como poder de frenado (stopping power) o transferencia lineal de energía (LET).^{[78],[59]}

Desde un punto de vista energético, las partículas α pierden su energía provocando excitaciones y/o ionizaciones en los átomos del medio (colisiones inelásticas, C.I.) y emitiendo fotones (colisiones radiativas, C.R.). Por tanto, la pérdida total de energía por unidad de recorrido se expresa como^[70]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{total} \approx \left(\frac{dE}{dx}\right)_{C.I.} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{C.R.} \quad (1.8)$$

Aunque, S es expresado en unidades de MeV/cm, usualmente se usa el poder de frenado másico ($S/\rho = MeV cm^2/g$). El software ASTAR proporcionado por el National Institute of Standards and Technology (NIST), calcula y mapea los valores de poder de frenado (coulombiano, nuclear y total) para la partícula α en varios materiales desde energías de 0,001 MeV a 1000 MeV. La *figura 1.5*, muestra estas pérdidas de energías en aire seco como medio (composición de acuerdo al ICRU-104).

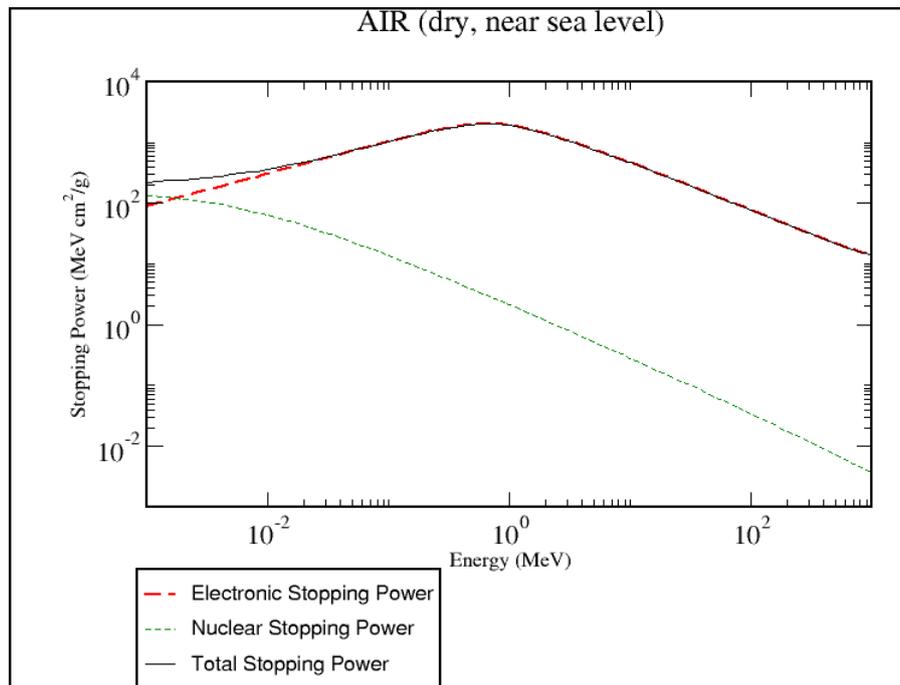


Figura 1.5: Poder de frenado de las partículas α en aire^[17].

1.3.4. Fórmula de Bethe-Bloch

Las energías perdidas de las partículas α incidentes, son el resultado de interacciones con electrones y núcleos del medio. Esto es, que para iones con energías más

grandes que 1 MeV, la energía perdida por interacciones nucleares son más pequeñas que las electrónicas. Estas interacciones son descritas en la fórmula Bethe-Bloch^[22]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \frac{C_1 Z^{*2}}{\beta^2} \left[\ln\left(\frac{W_{max}^2}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad (1.9)$$

Donde, $C_1 = 2\pi n_e e^4 / mc^2$, n_e : concentración electrónica, m : masa del electrón, W_{max} : energía transferida máxima, $\beta = v/c$: velocidad del ión, I : Potencial de ionización media, δ : corrección por efecto de polarización del medio para velocidad relativista, U : corrección para velocidades pequeñas.

1.3.5. Curva de Bragg

Es la curva que representa la pérdida de energía de la partícula α cuando penetran en un medio material. El ión en cuestión, va transfiriendo energía en su camino, alcanzando a un valor máximo conocido como “*pico de Bragg*” donde el ión está ya muy ralentizado (frenado), por lo que empieza a recoger carga y la curva decae. Esta caída puede ser más o menos abrupta. Un ejemplo de la representación de la pérdida de energía se muestra en la *figura 1.6*, para una partícula α de $E_{k,\alpha} = 5,49 \text{ MeV}$ en aire donde el valor máximo se presenta a una distancia de 3,7 cm^[35].

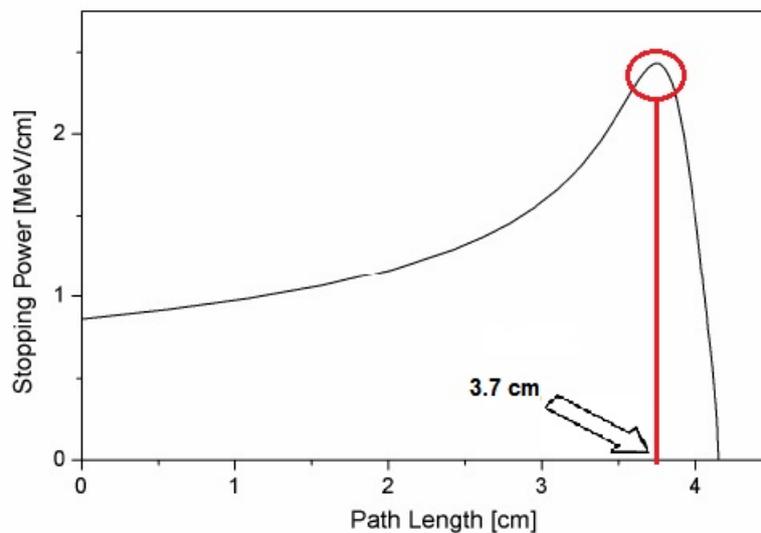


Figura 1.6: Curva de Bragg para una partícula α con $E_k=5,49 \text{ MeV}$ en el aire.^[67]

1.3.6. Rango o Alcance

El rango se define como la penetración máxima de una partícula con energía determinada en un medio. En general, es inversamente proporcional al poder de frenado. La interacción electromagnética que se produce con cada núcleo causa una dispersión de Rutherford y se observa un pequeño cambio despreciable en su dirección. La interacción con los electrones son mucho más frecuente y origina que pierda su energía cinética^[13]. Desde el punto de vista teórico, el rango de una partícula con energía E_{k_0} , se puede

calcular como:

$$R(E_{k_0}) = \int_0^{E_{k_0}} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad (1.10)$$

La ecuación polinómica que describe un buen ajuste para el cálculo del rango proyectado de la partícula α en aire con densidad $\rho = 1,12g/cm^3$ de acuerdo a la data proporcionada por SRIM (Stopping and Range of Ion in Matter) para energías comprendidas entre 1 MeV a 10 MeV, a partir de la *figura 1.7*, sería según nuestros cálculos:

$$R(mm) = (1,321 \pm 0,086) + (3,218 \pm 0,044)[E(MeV)] + (0,764 \pm 0,004)[E(MeV)]^2 \quad (1.11)$$

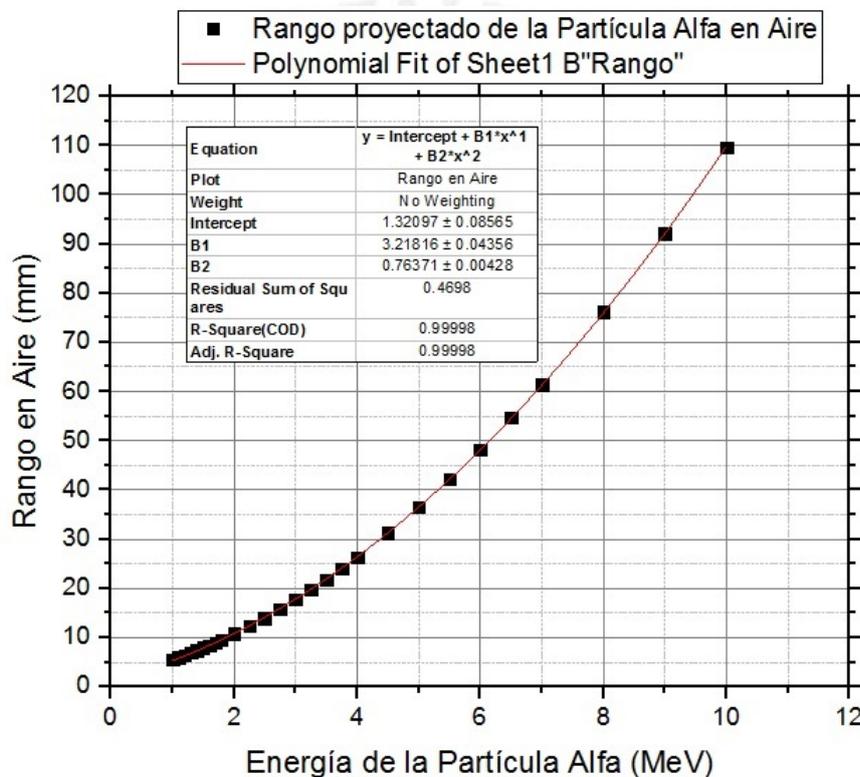


Figura 1.7: Rango o Alcance de las partículas α en el aire obtenido por el software SRIM^[79].

1.4. Isótopos del radón: Rn-222 y Rn-220

1.4.1. Orígenes

Cuatro años después del descubrimiento de la radiactividad del uranio por Becquerel, y dos años después del descubrimiento de la radiactividad del torio y de los elementos como el radio y polonio por los Curie y Schmidt, en 1900 fueron descubiertos dos isótopos del radón, esto fue debido a la emanación en las series tanto del U-238 y Th-232 respectivamente. Uno de ellos llamado *radón* (identificado como Rn-222) por

F.E. Dorn y *torón* (reconocido como Rn-220) por R.B. Owens y E. Rutherford. En 1901, tanto Rutherford y Brooks demostraron que el radón es un gas radiactivo^{[23],[24]}.

Aunque existen tres isótopos naturales del radón incluyendo al Rn-219 proveniente de la serie del U-235, éste presenta un periodo de semidesintegración de $t_{1/2}=3,96$ s (media vida de $\tau=5,71$ s), por debajo del Rn-222 con $t_{1/2}=3,82$ d ($\tau=5,51$ d) y del Rn-220 con $t_{1/2}=55,6$ s ($\tau=80,2$ s).

Tanto el Rn-222 y el Rn-219 son producidos desde el uranio y aún con la corta vida media del Rn-219, ésta es producida en pequeñas cantidades en contraste al Rn-222, debido a que la proporción de U-235/U-238 es de 0,00719. He aquí, que la contribución del tercer isótopo del radón Rn-219 a la concentración de la actividad de radón es largamente discriminado^[32].

1.4.2. Propiedades físicas.

Una de las propiedades más interesantes del radón, desde el punto de vista de la determinación de su concentración en aire, es la facilidad con que es adsorbido por ciertos sólidos (aerosoles). Esta adsorción depende de la temperatura y la presencia de otros gases fácilmente condensables, como el vapor de agua en la atmósfera. Asimismo, el radón posee una densidad 7,5 veces mayor que la del aire, puede disolverse en agua y es fácilmente transportado por difusión^[36].

En efecto, el radón es el único elemento radiactivo natural en estado gaseoso a temperatura ambiente, uno de los elementos nobles más pesados, sin sabor, sin olor e incoloro al mismo tiempo^[14]. Algunas de sus propiedades se detallan en la *tabla 1.3*.

Tabla 1.3: Propiedades físicas del radón^[24].

Propiedad	Valor
Punto de Ebullición	-61.8 °C
Punto de Fusión	-71 °C
Temperatura Crítica	104 °C
Presión Crítica	62 atmósferas
Densidad a T° y P ctte.	9,96kgm ⁻³
Volumen de 27.03 pCi a T° y P ctte.	1,6x10 ⁻²⁰ m ³
Valor de Presión a:	
-144.0 °C	0.13 kPa
-126.3 °C	1.3 kPa
-111.3 °C	5.3 kPa
-99.0 °C	13 kPa
-71.0 °C	53 kPa
-61.8 °C	100 kPa
$C_S^{(a)}$ a P_{atm} en agua a:	
0 °C	0.507
10 °C	0.340
20 °C	0.250

(continuación tabla 1.3)

Propiedad (cont.)	Valor (cont.)
30 °C	0.195
37 °C	0.167
50 °C	0.138
75 °C	0.114
100 °C	0.106

^(a)Coefficiente de solubilidad o coeficiente de partición en agua es definido como la fracción entre C_w/C_a , donde C_w and C_a son las concentraciones en agua y aire, respectivamente.

1.4.3. Importancia de los descendientes.

Estudios epidemiológicos muestran que tanto la relación dosis-respuesta con el riesgo de cáncer de pulmón a exposiciones anuales relativamente bajas no sólo se deben al radón sino también a su progenie^[71]. Por lo tanto, el riesgo asociado al gas radón y su progenie está en dos órdenes de magnitud más alto que el correspondiente riesgo producido solamente por el gas radón.^[56]

Los descendientes del Rn-222 (iones más energéticos y destructivos) son los isótopos del Po (Po-218 y Po-214). Aunque existe un tercer isótopo (Po-210) también emisor α que contribuye relativamente poco a la medida del radón, debido a que su predecesor Pb-210 necesita un tiempo de decaimiento de 22 años para emitir la mitad de sus núcleos hasta llegar al Po-210 (isótopo de larga vida). Un análisis distinto es para el Rn-220, debido a que sus descendientes poseen un corto periodo de semidesintegración. El primer descendiente (Po-216) con una media de vida de $\tau=0,22$ s. Posteriormente, le sigue (Bi-212) y (Po-212) con vidas medias suficiente para que sean transportadas desde los compartimientos bronquiales de los pulmones^[32]. En la *tabla 1.4* se detalla las características básicas del radón, thoron y su progenie (Energía y Rango).

Tabla 1.4: Energías y Rangos del Rn-222, Rn-220 y descendientes respectivamente.

Serie	Ión	Energía Alfa (MeV)	Rango(mm) ^a	Rango(mm) ^b
	<i>Rn</i> – 222	5,49	42,00 ± 0,44	41,42
<i>U</i> – 238	<i>Po</i> – 218	6,00	48,12 ± 0,49	47,32
	<i>Po</i> – 214	7,69	71,24 ± 0,66	68,67
	<i>Rn</i> – 220	6,29	51,78 ± 0,52	50,80
<i>Th</i> – 232	<i>Po</i> – 216	6,49	58,38 ± 0,57	56,97
	<i>Po</i> – 212(64%)	8,78	88,46 ± 0,78	—
	<i>Bi</i> – 212(36%)	6,05	48,74 ± 0,50	47,92

^aRango obtenido desde el software SRIM para una densidad del aire $\rho = 1,12g/cm^3$ (ICRU-104), ec. (1.11)^[79].

^bRango: $R_\alpha = 0,322E^{3/2}$ a 0°C y 760 mmHg de presión para energías entre 2 MeV y 8 MeV, pag.(161)^[22].

1.4.4. Fuentes, emanación y mecanismos de transporte del radón

1.4.5. Fuentes

Suelos y rocas son las principales fuentes de exposición de Rn-222 a la que la población está expuesta^[41], además del aporte significativo de los materiales de construcción, que pueden ser una fuente importante de radón en edificios elevados, conociendo la permeabilidad k (en cm^2s^{-1}) que determina la efectividad de la barrera (paredes). El agua también contribuye a través de la fracción entre Ra-226/Rn-222 presentes en ella, que pueden ser aguas superficiales (lagos, ríos), aguas profundas (pozos, manantiales), que contribuyen por agitación y/o temperatura^[66].

Si bien ya se mencionó acerca del origen del radón, es necesario entender el mecanismo de liberación y cómo es transportado. Generalmente, los isótopos del radón: Rn-222 y Rn-220 son producidos en minerales por el decaimiento del Ra-226 y Ra-224 respectivamente. La producción de radón varía ampliamente y esto depende a los contenidos de uranio presentes en los minerales, variando desde el cuarzo (SiO_2) con menos del $3 \cdot 10^{-12}$ de la fracción del peso del uranio^[34] a dióxido de uranio (UO_2) con 0.88. La *tabla 1.5*, representa los valores de concentración de radón en varias locaciones de Estados Unidos.

Tabla 1.5: Concentración típica de Rn-222^[32].

Locación	Concentración (átomos/cm ³)
Aire sobre océanos	0.04
Aire cerca de la superficie de la tierra	4
Casa típica en USA	20
Gas de suelo	20 000
Interior de mineral típico	500 000

1.4.6. Emanación

Existen tres teorías diferentes sobre cómo la emanación tanto del radón y torón ocurren desde el interior del mineral o molécula en cuál el átomo de radón o torón es formado. Estos procesos ocurren similarmente en ambos isótopos y son mostrados en la *figura 1.8*.

Caso 1. Cuando el radio decae, un átomo de radón y una partícula alfa son formados. El átomo de radón es movido dentro de un cristal adyacente por un efecto de retroceso desde que la partícula alfa es eyectada (por conservación del momentum).

Caso 2. El átomo de radón es transportado a través del cristal.

Caso 3. El átomo de radón es transportado desde el cristal a través una micro-fisura o el aire en un poro adyacente. Asumiendo que el transporte a partir de ello es por difusión.

El radón proveniente del radio presente en materiales de construcción contribuye también a la concentración de la actividad de radón en interiores. Estudios demuestran, que la contribución relativa desde materiales de construcción es generalmente más importante donde la concentración de radón en interiores es baja, y que raramente constituye una contribución dominante cuando estas concentraciones son altas^[58].

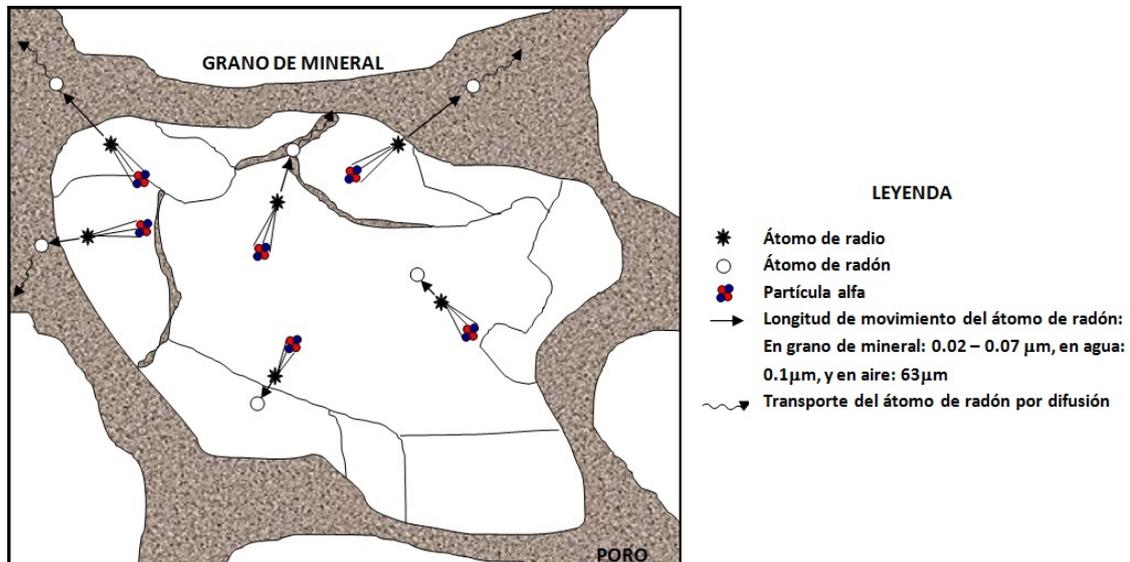


Figura 1.8: Principios de emanación del radón^[32]

1.4.7. Transporte del radón: difusión y convección

Los mecanismos de transporte del radón desde el subsuelo hacia el medio ambiente básicamente son por difusión y convección.

La *difusión* es el movimiento relativo del gas en el seno del material que lo contiene, está dado por diferencias de concentración^[29]. Una alta porosidad permite ser más extensivo este tipo de transporte provenientes desde suelos y rocas. Las rocas pueden variar desde entre agrietadas y sin porosidad a altamente fracturadas^[32]. Inevitablemente esto ocurre, aunque su grado puede ser limitado. La humedad y tamaño del grano presente son también considerados en este mecanismo. Un parámetro importante para este tipo de transporte es la determinación del coeficiente de difusión D (en cm^2s^{-1}) para diferentes tipos de suelos y rocas.

Con respecto al proceso por *convección*, éste depende del gradiente de presión y de temperatura, donde el fluido que contiene al radón actúa como vehículo de transporte^[29]. Estos flujos causados en espacios intersticiales de la tierra, dependen de la permeabilidad hidráulica K (en cm^2).

La *figura 1.9*, resume ambos procesos y detalla los parámetros que influyen en el mecanismo de transporte del radón.

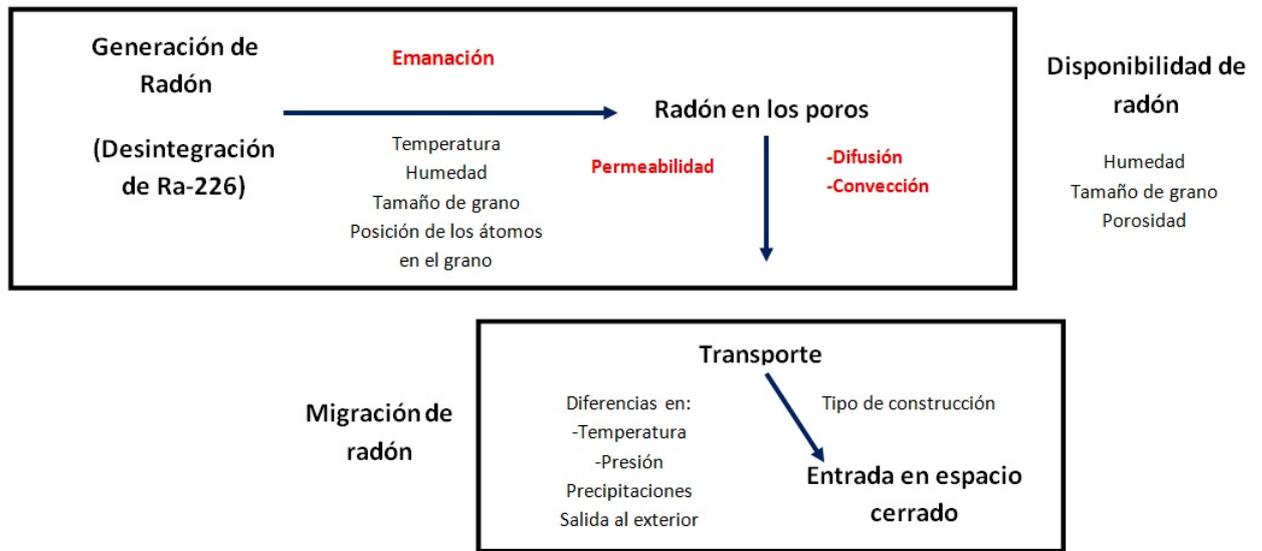


Figura 1.9: Fuente y mecanismo de transporte del radón^[29]

1.4.8. Modelo de transporte del radón

Previamente se mencionaron tres parámetros: permeabilidad k , coeficiente de difusión D y permeabilidad hidráulica K . Este último parámetro se define como:

$$K = \eta \left(\frac{dV}{dt} \right) / A \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad (1.12)$$

donde, η es la viscosidad, (dV/dt) es el volumen que se desplaza por unidad de tiempo y por unidad de área A , y (dP/dz) el gradiente de presión. k usualmente se expresa en darcys (10^{-8}cm^2)^[32].

El modelo matemático que describe la generación y transporte de radón está basado en la ecuación diferencial parcial para un estado estacionario en un medio poroso es la siguiente:

$$D_e \nabla^2 C + \frac{k}{\varepsilon \cdot \mu} \vec{\nabla} p \cdot \vec{\nabla} C + G - \lambda C = 0 \quad (1.13)$$

donde, D_e es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s), C es la concentración de la actividad de radón (Bq/m^3), k es la permeabilidad del suelo, ε es la porosidad del suelo, μ es la viscosidad dinámica del suelo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), p es la presión relativa del suelo (Pa), λ es la constante de decaimiento (s^{-1}) y G la fracción de generación ($\text{Bq}/\text{m}^3\cdot\text{s}$).

El primer término de la ecuación (1.13) representa el transporte del radón debido a difusión, el segundo término representa el transporte del radón debido a convección, el tercer término expresa la fracción de generación de radón y el último término representa el paso de la concentración de radón debido a su decaimiento radiactivo^[42].

Existen numerosos trabajos basados al cálculo de los coeficientes de difusión, empleando cámaras, muestras de cualquier tipo de suelos con diferentes técnicas de registro del radón. El trabajo realizado por Martín Jiránek^[42] emplea un modelo físico teórico que considera la contribución de ambas componentes (difusión y convección) basado

al flujo del radón en suelos a través de grietas, siendo transportado hasta una casa familiar típica, como se muestra en la *figura 1.10*.

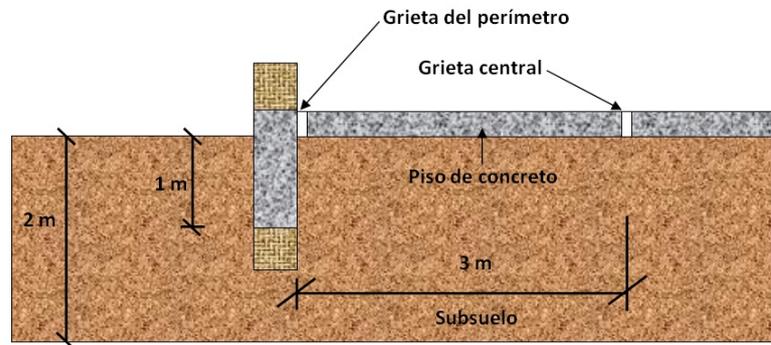


Figura 1.10: Corte transversal del modelo teórico propuesto^[42].

Jiráněk tomó las siguientes consideraciones en el modelo:

1. Cada elemento es homogéneo (permeabilidad, porosidad, y el coeficiente de difusión del radón son constantes con cada elemento),
2. el fluido del suelo (gas) es incompresible, $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$,
3. el flujo del fluido del suelo (gas) es lineal de acuerdo a la Ley de Darcy: $\vec{v} = -k/u \vec{\nabla} p$,
4. la distribución de presión es gobernada por la Ecuación de Laplace: $\nabla^2 p = 0$,

Jiráněk además consideró que el suelo ubicado debajo del piso de concreto tenga una fracción de generación de radón de $G=0,12 \text{ Bq/m}^3\text{s}$ y que la concentración de la actividad del radón en la profundidad del suelo asumida como valor constante fue de $(G/\lambda)=57,2 \text{ kBq/m}^3$, en el interior de la vivienda de 60 Bq/m^3 y en exterior fue determinado en 5 Bq/m^3 . El modelo consta de dos grietas en el suelo, uno denominado “grieta del perímetro” debido que se encuentra entre la juntura del piso de concreto y en la base del perímetro de la pared. Mientras que la segunda grieta, llamada “grieta central” está localizada en el centro del piso a una distancia de 3 m desde el perímetro de la pared. El aporte de la difusión del radón a través del piso de concreto es insignificante, sólo es considerado el aporte a través de las grietas mencionadas. El flujo de la densidad del radón son influenciados principalmente por variaciones en la permeabilidad hidráulica del suelo, posición y diámetro de las grietas.

Él encuentra que para permeabilidades hidráulicas por debajo de 10^{-12} m^2 predomina el transporte por difusión, lo cual es casi invariante con la permeabilidad hidráulica del suelo. Para permeabilidades hidráulicas entre 10^{-12} y 10^{-11} m^2 la difusión y convección son iguales y sobre 10^{-11} m^2 predomina el transporte por convección que es directamente dependiente de la permeabilidad hidráulica del suelo.

Por otro lado, el trabajo presentado por G. Keller y B. Hoffmann en el Instituto de Biofísica de la Universidad de Saarland (Alemania)^[43] muestra resultados experimentales tanto de los coeficientes como de las distancias de difusión para diferentes tipos de materiales, empleando restricciones desde la ecuación (1.13). Los materiales aislantes muestran un diferente comportamiento. Los coeficientes de difusión son más pequeños

que $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, siendo la longitud de difusión menores que 2 mm. La *tabla 1.6* resume los valores experimentales encontrados.

Tabla 1.6: Valores promedios experimentales de los coeficientes y longitudes de difusión del Rn-222 en algunos materiales^[43].

Material	Espesor (10^{-3} m)	Coefficiente de difusión ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	Longitud de difusión (10^{-3} m)	Valoración
Yeso	100	2,35	1100	Permeable
Ladrillo	150	0,35	400	Permeable
Hormigón	100	1,30	800	Permeable
Concreto pesado	100	0,007	60	Permeable
Concreto del polímero PCC	40	$<10^{-6}$	7	Impermeable
Granito	30	0,053	160	Permeable
Placas de vidrio	70	$<10^{-6}$	$<0,7$	Impermeable
Lámina de plomo	0,1	$<10^{-6}$	$<0,7$	Impermeable
Lámina de plástico	3	$<10^{-6}$	$<0,7$	Impermeable
Resina epoxy	3	$<10^{-6}$	$<0,7$	Impermeable

Es importante conocer que los mecanismos de difusión en aire y agua son bastante diferentes. En la *tabla 1.7*, muestran las distancias promedio de movimiento de los dos isótopos del radón: Rn-222 y Rn-220 en diferentes medios antes de que estos desaparezcan por decaimiento $\sqrt{D \cdot \tau}$, donde D es la constante de difusión y τ es la media vida del isótopo. Estas distancias promedio de difusión son importantes en establecer límites en el movimiento efectivo del radón y torón en la ausencia de mecanismos especiales de transporte.

Tabla 1.7: Distancias de difusión del Rn-222 y Rn-220 en diferentes medios^[32].

Medio	Distancia Promedio de Difusión $\sqrt{D \cdot \tau}$		Constante de Difusión (D) ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)
	Rn-222 (cm)	Rn-220 (cm)	
Aire	220	2,85	10^{-1}
Suelo poroso	155	2,0	5×10^{-2}
Agua	2,2	0,0285	10^{-5}
Suelo poroso saturado	1,55	0,020	5×10^{-6}

En la tabla se puede apreciar, que todos los parámetros del Rn-222 son superiores en todos los casos al del Rn-220.

1.4.9. Riesgos debido a la presencia del radón en interiores

El enfoque de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es proporcionar información con evidencias estadística, epidemiológica y científica sobre los riesgos del radón para la salud, con énfasis en el cáncer de pulmón y del tracto respiratorio en la población en general. La OMS estima una variación entre un 3 % y un 14 % de la proporción de casos de cáncer de pulmón asociados al radón con respecto al total, dependiendo de la concentración media de la actividad de radón en el país y del método de cálculo empleado.

Bajas concentraciones de actividad suponen baja dosis ambiental y por ende menor dosis equivalente y/o efectiva en la población. Aunque no se conozca un valor umbral por debajo del cual la exposición al radón suponga ningún riesgo, es necesario no ignorar los efectos estocásticos a lo que estamos sometidos. Los estudios demuestran que en la mayoría de los casos de cáncer de pulmón inducidos por el radón están provocados por concentraciones de la actividad de radón bajas o moderadas continuas^[62]. La mayor parte de esta exposición se da en interiores en contraste a centros de trabajo de acuerdo al reporte de la UNSCEAR en el 2000^[73].

En términos generales la dosis colectiva analizada en la población aportará un mayor espectro del riesgo potencial del radón a la salud.

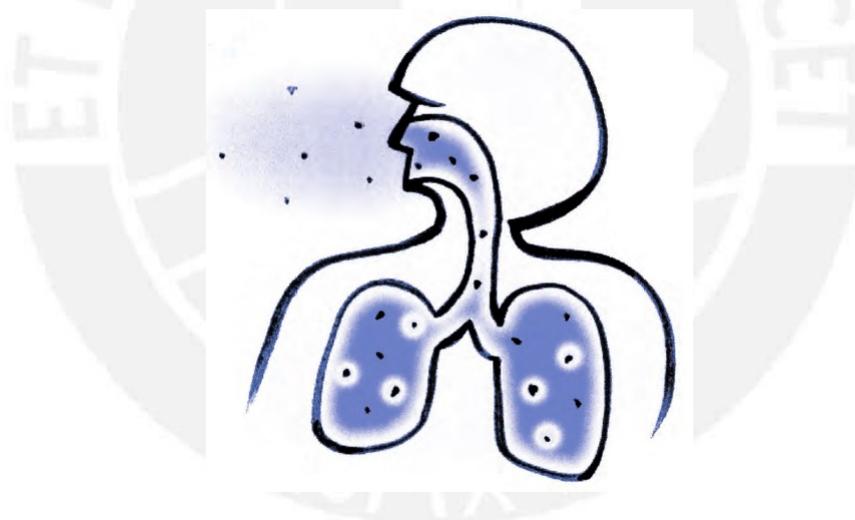


Figura 1.11: Radón: Segunda causa de cáncer de pulmón - OMS^[62].

El Rn-222 en contraste al Rn-220 es potencialmente la fuente por exposición a la radiación más significativa en interiores, su largo periodo de semidesintegración le permite acumularse en ellos. La *figura 1.12* permite conocer las diferentes rutas de acceso del radón hacia el interior de una vivienda familiar.

Donde:

1. A través de grietas en pisos, 2. a través de juntas en la construcción, 3. a través de grietas en paredes debajo del nivel del suelo, 4. a través de espacios de pisos suspendidos, 5. a través de grietas en paredes, 6. a través de espacios alrededor de tuberías de servicio, y 7. a través de cavidades en paredes.

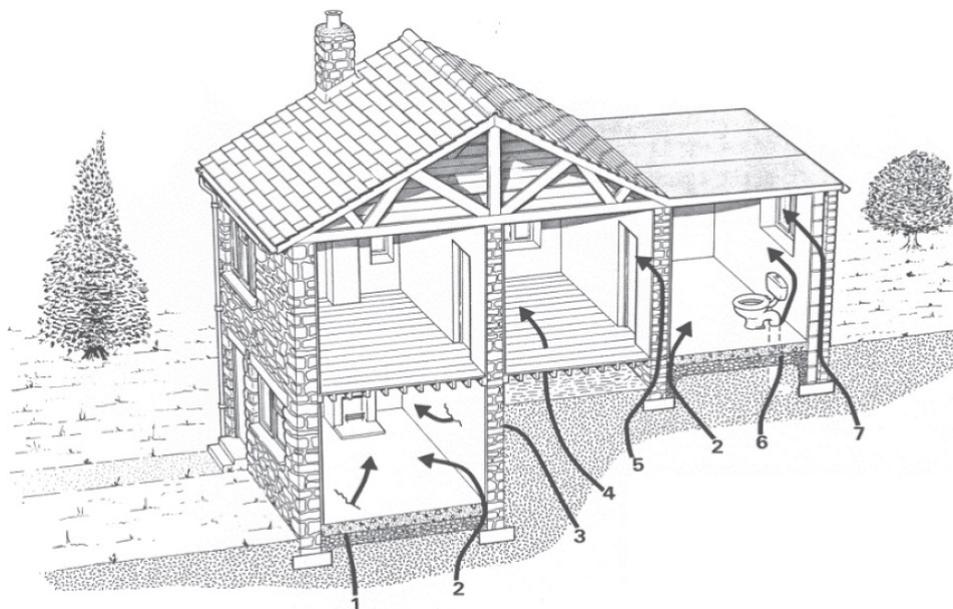


Figura 1.12: Rutas de acceso del radón en interiores^[58].

1.5. Antecedentes y niveles de acción adoptados a nivel mundial

Los estudios epidemiológicos demuestran con claridad que la exposición al radón es una causa firmemente demostrada de cáncer de pulmón en la población en general. La proporción de los casos anuales de cáncer de pulmón debida al radón se verá determinada fundamentalmente por las concentraciones de radón interior en un país. Se estima que la concentración media de la actividad de radón en interiores a nivel mundial es de 39 Bq/m^3 ^[58] (ver *tabla 1.8*). Este valor fue adoptado después de llevar a cabo estudios de medición para determinar la distribución de las concentraciones residencial de radón en la mayoría de los 30 países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE)^[62].

Tabla 1.8: Concentraciones de la actividad de radón en interiores en países de la OCDE^[62].

País	Niveles de Radón en interiores (Bq/m^3)		
	Media Aritmética	Media Geométrica	Desviación Típica Geométrica
Alemania	49	37	2,0
Australia	11	8	2,1
Austria	91	15	N.D.
Bélgica	48	38	2,0
Canadá	28	11	3,9
Dinamarca	59	39	2,2
Eslovaquia	87	N.D.	N.D.
España	90	46	2,9

Tabla 1.8 (continuación)

País	Niveles de Radón en interiores (Bq/m ³)		
	Media	Media	Desviación Típica
	Aritmética	Geométrica	Geométrica
Estados Unidos	46	25	3,1
Finlandia	120	84	2,1
Francia	89	53	2,0
Grecia	55	44	2,4
Hungría	82	62	2,1
Irlanda	89	57	2,4
Islanda	10	N.D.	N.D.
Italia	70	52	2,1
Japón	16	13	1,8
Luxemburgo	110	70	2,0
México	140	90	N.D.
Noruega	89	40	N.D.
Nueva Zelanda	22	20	N.D.
Países Bajos	23	18	1,6
Polonia	49	31	2,3
Portugal	62	45	2,2
Reino Unido	20	14	3,2
República de Corea	53	43	1,8
República Checa	140	44	2,1
Suecia	108	56	N.D.
Suiza	78	51	1,8
Media mundial	39		

N.D.: No disponible.

Existe además información sobre las mediciones de Rn-220 en interiores, pero la mayoría de investigadores han reportado ambas concentraciones de la actividad de Rn-222 y Rn-220 en equilibrio equivalente “EEC”(que es el producto de la concentración Rn-222/Rn-220 y el factor de equilibrio entre el Rn-222/Rn-220 y sus productos de decaimiento)^[68]. En otras palabras, basados a las características físicas de ambos y el modelo de transporte en viviendas, la (ICRP,1987) estimó que las concentraciones de la actividad en interiores son de 2 a 50 Bq.m⁻³ para el Rn-222 y 0,04 a 2 Bq.m⁻³ para el Rn-220. Precisamente en la *tabla 1.9* se da a conocer los valores promedios de la fracción de la concentración de la energía potencial α de las progenies del Rn-220 con respecto al Rn-222 para varios lugares^[7].

Tabla 1.9: Niveles de progenie entre Rn-220/Rn-222 en diferentes lugares^[7].

Lugar	Progenie Rn-220/Rn-222	Comentarios
Italia (Lazio)	1,3	Anómalo (área volcánica), 50 viviendas de pobre ventilación
Canadá (Isla Elliot)	0,3	Muestras de 95 viviendas, U-238/Th-232~1

(continuación tabla 1.9)

Lugar	Progenie Rn-220/Rn-222	Comentarios
Hungría	0,5	22 viviendas
Noruega	0,5	22 viviendas, U-238/Th-232~1
FRG (Oeste)	0,5	150 mediciones realizadas en un año
FRG (Sur-Oeste)	0,8	95 viviendas
China (Provincia Hubei)	0,4	37 mediciones, U-238/Th-232~0,6
Francia (Finistere)	0,3	219 mediciones
Hong Kong	0,8	10 viviendas
Austria	0,7	8 viviendas
Reino Unido	0,14	8 viviendas
Estados Unidos	0,3	53 mediciones en 8 ciudades del sureste
India	0,53	1800 viviendas

Países latinoamericanos tales como: Argentina, Brasil, Ecuador, México, Perú y Venezuela tomaron en cuenta la necesidad de evaluar y conocer los niveles de radón en interiores apoyándose de las recomendaciones internacionales. Este estudio en conjunto muestra que la metodología de medición está basado al uso de detectores de trazas nucleares, siendo uno de los métodos más generalizados en latinoamérica como medida a largo plazo. De los 9 laboratorios participantes, el 33 % de ellos usaron LR-115, el 56 % CR-39 mientras que el 11 % emplearon hojas de Makrofol^[20],^[19]. En la *tabla 1.10*, se detalla los nombres de las instituciones participantes en el trabajo de investigación por país, como así mismo de los valores promedios de los niveles de radón.

Tabla 1.10: Lista de instituciones participantes^[20].

Ref. N°	País	Nombre de la Institución	Clasificación de la Institución	Nivel Radón Promedio(Bq/m ³)
1	Argentina	ARN	Lab. Nacional	36,96
2	Brasil	UNICAMP	Universidad	81,95
3	Brasil	UNESP	Universidad	79,92
4	Ecuador	CEEA	Lab. Nacional	94,30
5	México	UNAM*	Universidad	83,25
6	México	UNAM**	Universidad	88,00
7	México	ININ	Lab. Nacional	30,62
8	Perú	PUCP	Universidad	32,29
9	Venezuela	USB	Universidad	52,50

ARN: Autoridad Reguladora Nuclear.

UNICAMP: Universidad Estadual de Campinas - Instituto de Física.

UNESP: Universidad Estadual Paulista.

CEEA: Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica.

UNAM: Universidad Autónoma de México. (*) Instituto de Física. (**) Facultad de Química.

ININ: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú.

USB: Universidad Simón Bolívar.

Existen recomendaciones con respecto a los niveles de acción de la concentración de la actividad del radón, como la del ICRP 1994^[40], donde menciona que la ingeniería civil estándar para construcciones de nuevos departamentos y casas es de 100 Bq/m^3 como nivel promedio anual, 200 Bq/m^3 para la recomendación medidas de descontaminación de alto costo y 600 Bq/m^3 para la recomendación de medidas de descontaminación de bajo costo.

Si en casas y apartamentos exceden los valores recomendados los propietarios de estos inmuebles deberían de adaptar las recomendaciones y sugerencias técnicas para la reducción de concentración de radón en ambientes cerrados (mejor ventilación, pavimentación del piso y reforzamiento de la construcción del piso, utilización de materiales aislantes^[36]).

Con respecto a la ventilación, el objetivo es evitar la acumulación del radón en interiores, como también lo es en minas de uranio, u otros ambientes con escasa ventilación. Los organismos internacionales últimamente le han prestado mayor atención a las mediciones de radón en los hogares, siendo de gran preocupación por los riesgos asociados a la salud^[48].

Ante ello, existen diversos organismos que han establecido valores umbrales de exposición frente al radón y su progenie para adoptar medidas precautorias^[65]. De acuerdo a la *tabla 1.11*, se deben de tomar medidas correctivas si el aire en los hogares exceden los siguientes valores umbrales.

Tabla 1.11: Niveles de acción adoptados por instituciones internacionales^[65].

Organismo- Internacional	Nivel de acción
Agencia de Protección Ambiental Norteamericana (EPA-1986)	$\geq 148 \text{ Bq/m}^3$
Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña (NRPB)	$\geq 200 \text{ Bq/m}^3$
Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP 39 y 65)	$\geq 400 \text{ Bq/m}^3$ y $\geq 200 \text{ Bq/m}^3$ para futuras construcciones

En nuestro país, de acuerdo Capítulo VI Exposición Crónica Art. 62. del Reglamento de Seguridad Radiológica del Instituto Peruano de Energía Nuclear^[28] el nivel de actuación para una exposición crónica de radón en viviendas es a partir de una concentración media anual de 200 a 600 Bq/m^3 de Rn-222 en el aire y que el nivel de actuación para una acción reparadora en la exposición crónica a radón en puestos de trabajo es de una concentración media anual de 1000 Bq/m^3 de Rn-222 en el aire.

Capítulo 2

TÉCNICA DE HUELLAS NUCLEARES

El origen de la detección de trazas nucleares en materiales de estado sólido (SSNTD en inglés) se remonta desde el año de 1958 cuando las primeras observaciones fueron reportadas por D. A. Young trabajando en el Establecimiento de Investigación de Energía Atómica en Harwell-Inglaterra^[76] descubrió que cristales de LiF en contacto con una hoja de uranio e irradiados con neutrones térmicos revelaban un cierto número de trazas después de un tratamiento con un reactivo químico^[31]; y al extensivo desarrollo de la técnica de grabado por Fleisher. Ellos aplicaron el método en mica y en otros materiales como minerales, plásticos y vidrio^[54].

Los estudios realizados mostraron que estas trazas registradas fueron:

- (1) producidas únicamente por partículas pesadas ionizantes, α en el caso de plásticos y fragmentos de fisión en el caso de cristales, ambos indispensables en termocronología^[61],
- (2) producidas únicamente por aislantes eléctricos y algunos semiconductores,
- (3) estables aún cuando son sometidos a la luz o a dosis altas de rayos X, partículas β , radiación ultravioleta, entre otros.

En el caso de la medida de la radiación in situ se requiere el empleo de detectores, estos deben ser colocados en el lugar y dejados por un lapso de tiempo suficiente. Las medidas pueden ser continuas o discretas en cualquier análisis de muestras. Estas pueden ser pasivas cuando la concentración de la actividad del radón es medida bajo condiciones naturales, donde el volumen de detección del radón entrante se da principalmente por difusión. Por otro lado, pueden además ser activas, las cuales involucran el bombeo del gas por dentro o a través de instrumento de detección^[32].

2.1. Formación de trazas en medios dieléctricos

Cada partícula α produce en el SSNTD un solo rastro de daño (huella latente), la cual después de un tratamiento químico, se convierte en una traza visible bajo el microscopio. Existen diferentes tipos de detectores SSNTD que corresponden a diferentes materiales y por ende con diferentes sensibilidades: algunos de ellos son sensibles a las

partículas α en el rango de energías de las partículas emitidas por el radón. Mayormente estos detectores son de ésteres de celulosa (nitrato y acetato) como el LR-115, CN-85 y policarbonatos como el Lexan, Makrofol y CR-39. Estos pueden ser usados en distintos modos, tales como descubiertos o cubiertos por algún material, en cámaras con filtros, entre otros.

La formación de trazas en medios dieléctricos depende principalmente de^[32]:

1. Las partículas cargadas pesadas a partir de protones en adelante, sobre todo partículas α pueden dejar huellas latentes en medios dieléctricos, produciendo ruptura de cadenas moleculares, radicales libres, etc. Estos daños quedan registrados hasta altas temperaturas, dependiendo del medio y la intensidad de ionización (en especial la densidad lineal de desplazamiento de electrones), lo cual se ve reflejada en la forma de la curva de bragg por acción de la trayectoria de la partícula. Aunque solo pueden ser visualizadas por un Microscopio de Transmisión Electrónico (TEM) debido a que el orden en el diámetro de las huellas latentes están en nanómetros o menor.
2. Las trazas latentes puede ser grabadas con ayuda de un agente conveniente (alcalino o ácido, NaOH o KOH; HF o HNO₃) fijándose en ellas y haciéndolas permanente, pero sobre todo agrandándolas suficientemente (por factores de 10^2 - 10^3) hasta convertirlas en trazas visibles a través de un microscopio óptico con diámetros de $1\mu\text{m}$ a $15\mu\text{m}$.
3. Diferentes dieléctricos tienen diferentes “umbrales de registros”, tal que solo registran aquellas partículas que reducen su velocidad en una parte de su trayectoria al interior del material, tienen una fracción lineal de energía perdida ($J = dE/dx$) (ecuac. 1.9), o fracción de ionización primaria J sobre un valor crítico J_c o umbral.

La cantidad de daño de la traza grabada, depende de la fracción de la transferencia lineal de energía (LET) de la partícula cargada sobre su trayectoria causando ionización y excitación, conduciendo a la ruptura de cadenas en el caso de los polímeros.

La *figura 2.1*, precisamente muestra un diagrama de la ruptura de la cadena en un polímero causado por el paso de una partícula cargada pesada.

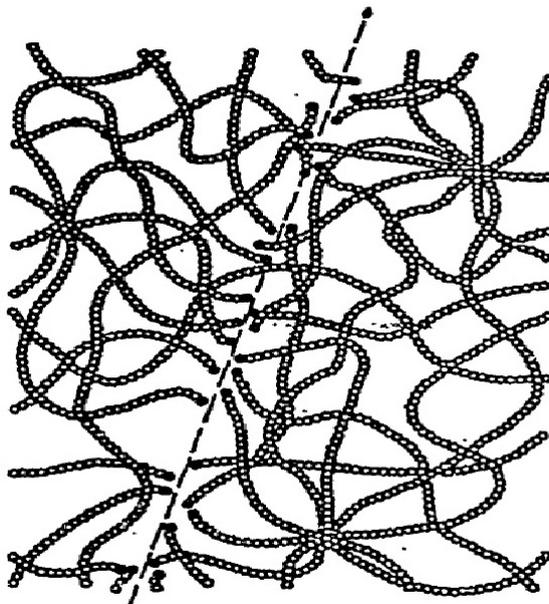


Figura 2.1: Formación de la huella latente en polímeros^[18].

2.2. Grabado químico y geometría de la traza

Los rastros de daño representan regiones realizadas por productos del grabado químico a lo largo de la trayectoria de la partícula comparados con las regiones periféricas no dañadas por ésta. En el caso de los polímeros se debe a su estructura desordenada. Obviamente, la reacción del agente empleado en el grabado del detector es un proceso heterogéneo^[18]. La forma y el diámetro (también llamado eje mayor/eje menor) de la traza generada después del grabado químico depende básicamente de dos parámetros:

1. Las características de grabado del detector, que determinan la “velocidad superficial de grabado” (bulk etching velocity: V_B), dependen del agente químico usado bajo las condiciones de grabado, tales como: el tipo de solución, molaridad y la temperatura de grabado, y
2. Las características de interacción de la partícula cargada con el detector, que determinan la “velocidad de la partícula grabada” (track etching velocity: V_T) a lo largo de su trayectoria.

La fracción $V = V_T/V_B$ es un parámetro importante para la determinación del registro de las trazas en el detector SSNTD. Además, se pueden determinar otros parámetros tales como: “eficiencia de grabado”, “ángulo crítico (θ_c)”, entre otros.

Un ejemplo de grabado químico en un detector de nitrocelulosa es usualmente realizado en un baño termostáticamente controlado a temperaturas en el rango de 40 °C a 70 °C (excepcionalmente hasta ≈ 90 °C) y los agentes más comunes (NaOH o KOH) a una normalidad desde 2 a 6 N, con un tiempo típico de grabado entre 1 a 6 horas.

La figura 2.2 representa las medidas del espesor removido (μm) en detectores LR-115 Tipo 2 (tamaño $2 \times 2 \text{ cm}^2$) después del grabado químico a diferentes normalidades 1N, 1.5N, 2N, 2.5N y 3N, en soluciones de NaOH y KOH (500 ml de volumen en cada caso) a una temperatura de $60 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ [74].

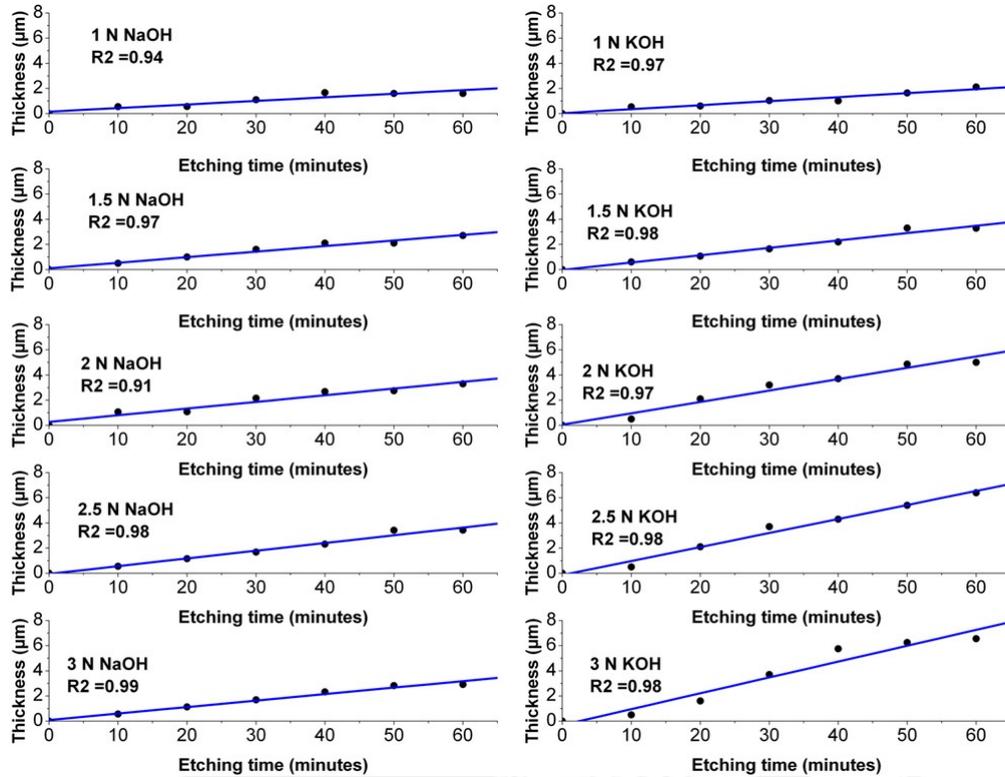


Figura 2.2: Variación entre espesor removido (μm) y tiempo de grabado químico bajo diferentes normalidades en detectores de nitrocelulosa[74].

La figura 2.3 hace referencia al ángulo crítico de grabado θ_c , cuando el detector irradiado es tratado con un apropiado agente y la V_T es mayor que la V_B . De la figura 2.3, se puede ver que el $\triangle MNP$ es un triángulo rectángulo, donde:

$$\sin(\theta_c) = V_B \cdot t / V_T \cdot t \quad (2.1)$$

despejando el argumento de la función:

$$\theta_c = \arcsin(V_B / V_T) \quad (2.2)$$

Considerando el caso de incidencia normal $\angle P=90^\circ$, V_T constante, y h el espesor removido del detector producto del grabado químico, \overline{PM} físicamente representa el rango de la partícula α en el detector, entrando por el punto P y frenado en M. La traza visible formada después del grabado químico presenta dos componentes (eje menor: d y el eje mayor dado por $\overline{EG}=D$)^[53]. Además de ello las consideraciones de los $\angle MPR$ y $\angle MFG = 90^\circ$.

1. Por Ley de Senos en los $\triangle EMG$ y $\triangle MFG$ se obtiene:

$$\frac{\overline{EM}}{\sin(90 - \theta_c)} = \frac{\overline{EG}}{\sin 2\theta_c}$$

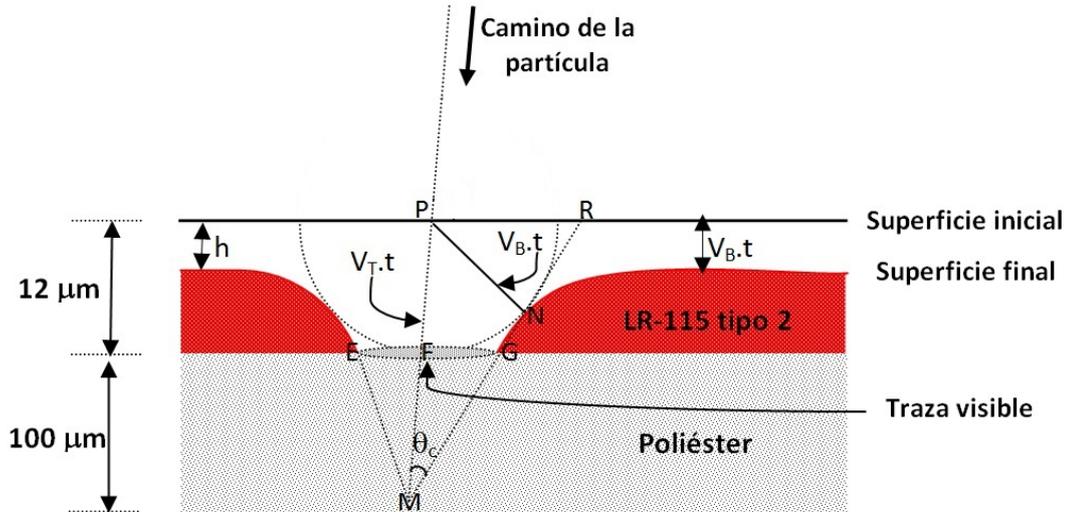


Figura 2.3: Modelo de formación de la huella (adaptada de Durrani, 1997^[32] y Barillon, 1997^[15]).

$$\frac{\sqrt{D/2^2 + (V_T - V_B)^2 \cdot t^2}}{\cos \theta_c} = \frac{D}{2 \sin \theta_c \cos \theta_c}$$

$$\csc(\theta_c) = 2 \frac{\sqrt{D/2^2 + (V_T - V_B)^2 \cdot t^2}}{D} \quad (2.3)$$

2. De la consideración $\angle P=90^\circ$ los $\triangle MPR$ y $\triangle MFG$ son triángulos rectángulos, de los cuales:

$$\tan \theta_c = \frac{PR}{PM} = \frac{FG}{FM}$$

$$= \frac{D/2 + V_B \cdot t \tan \theta_c}{V_T \cdot t} = \frac{D/2}{(V_T - V_B)t}$$

$$D = 2t \tan \theta_c (V_T - V_B) \quad (2.4)$$

Desde la ecuación (2.1) se deduce que:

$$\tan \theta_c = \frac{V_B}{\sqrt{V_T^2 - V_B^2}} \quad (2.5)$$

Reemplazando la ecuación (2.5) en (2.4), se obtiene que:

$$D = 2V_B \cdot t \sqrt{\frac{V_T - V_B}{V_T + V_B}}$$

Considerando la fracción $V = V_T/V_B$ y el espesor removido desde la figura 2.2; $h = V_B \cdot t$, la ecuación (2.5) finalmente toma la siguiente expresión:

$$D = 2h \sqrt{\frac{V - 1}{V + 1}} \quad (2.6)$$

Precisamente “D” corresponde al diámetro de la huella grabada por incidencia normal de la partícula α en el detector (\overline{EG}).

La *figura 2.4* muestra los perfiles simulados de trazas grabadas por una partícula α en incidencia normal, con energías en el rango de 1 a 5 MeV. Las trazas grabadas inducidas por energías por debajo de 1.4 MeV y por encima de 4.7 MeV existen, pero no perforan el detector^[15].

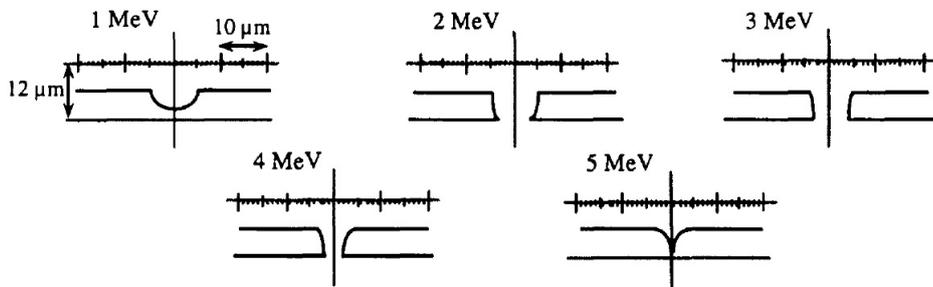


Figura 2.4: Simulación de perfiles de trazas grabadas inducidas por una partícula α en incidencia normal^[15].

2.3. Técnica de conteo de trazas

Existen diversas técnicas de conteo de trazas: manual (microscopio óptico) y automático, basado en las mismas consideraciones de la técnica manual, donde los sistemas realizan el barrido completo del detector para reconocimiento de las trazas, sumado a ello el análisis de background a través del análisis de niveles de grises, número de frames, píxeles, entre otros.

La *figura 2.5* muestra la técnica de conteo en un microscopio óptico, donde la selección del número de campos óptimos de visión (FOV en inglés) influye en el análisis estadístico. La secuencia de identificación de los FOV's depende del usuario, pero lo recomendable es emplear un criterio de selección consecutiva (según las flechas) para evitar solapamiento de los campos a analizar.

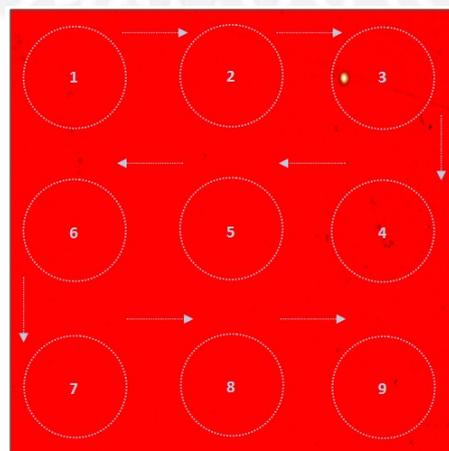


Figura 2.5: Técnica de conteo en un microscopio óptico^[32].

2.3.1. Cálculo de densidad de trazas

La tasa de densidad de trazas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho' = \frac{\Sigma N}{n.A.t} \quad (2.7)$$

donde: ρ' = Tasa de la densidad de trazas nucleares (trazas.cm⁻²día⁻¹)

ΣN = Suma total del número de trazas analizados en todos los campos ópticos de visión.

n = Cantidad de campos ópticos analizados.

A = Área del campo óptico (cm⁻²).

t = Tiempo de exposición del detector (días).

2.3.2. Estadística de conteo

La estadística de Poisson es empleada para el conteo de trazas, donde el error está dado por la raíz cuadrada de los eventos que realmente se cuentan. Esto es debido a que de un gran número de átomos disponibles, sólo una fracción muy pequeña experimenta alguna reacción observable)^[32]. Por lo tanto la densidad de trazas ρ está dado por:

$$\rho = \frac{\Sigma N + \sqrt{\Sigma N}}{n.A} \quad (2.8)$$

El promedio de la densidad de trazas provenientes de las partículas α del Rn-222 en interiores de acuerdo a la literatura son bajas, por ello uno debe de contar trazas en un gran número de campos de visión con el fin de reunir resultados estadísticamente confiables.

2.3.3. Número de campos ópticos

El error relativo para el conteo de trazas siguiendo la estadística de Poisson es la siguiente:

$$\varepsilon_r = \frac{\sqrt{\Sigma N}}{\Sigma N} = \frac{1}{\sqrt{\Sigma N}} \quad (2.9)$$

Si se analizan “n” campos de visión en el detector, entonces la ecuación 2.9 quedaría:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\sqrt{n.\bar{N}}} \quad (2.10)$$

donde \bar{N} representa el número promedio de trazas en la superficie analizada del detector. Despejando n de la ecuación (2.10) se obtiene:

$$n = \frac{1}{\varepsilon_r^2.\bar{N}} \quad (2.11)$$

2.4. Detector LR 115 Tipo 2

El detector LR-115 Tipo 2 está basado especialmente de una capa activa de nitrocelulosa (éster de celulosa), donde el grupo hidroxilo OH⁻ es reemplazado por el grupo

nitrate NO_3^- or ONO_2 , through the reaction of cellulose with percentages of nitric acid ($\% \text{HNO}_3$), sulfuric acid ($\% \text{H}_2\text{SO}_4$) and water ($\% \text{H}_2\text{O}$) that allows obtaining different degrees of nitration. Figure 2.6 shows the obtaining of the structure of cellulose nitrate from the structure of cellulose.

The chemical reaction in this obtaining is the following^[27]:

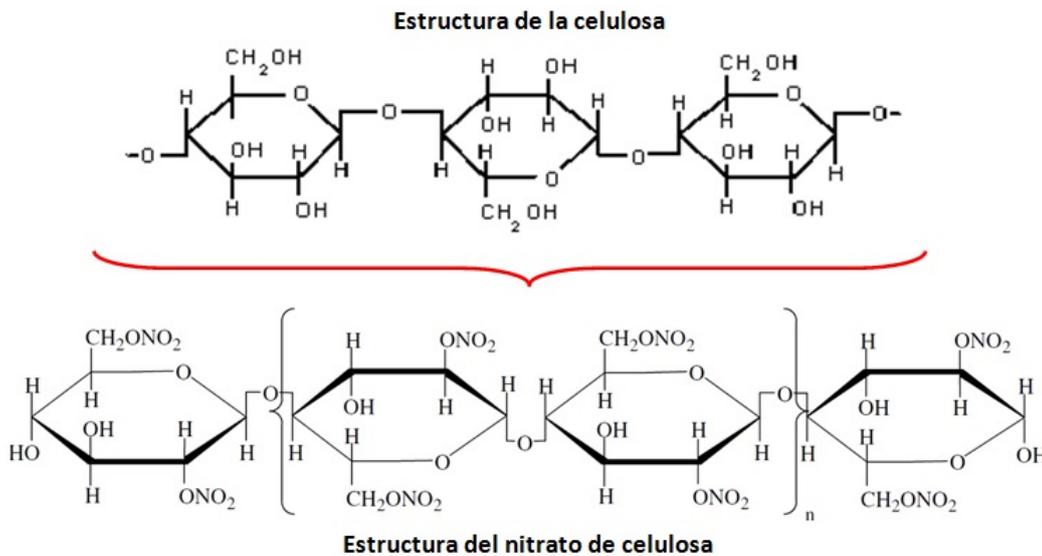
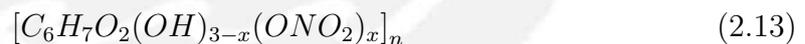


Figura 2.6: Estructura química del nitrato de celulosa a partir de la celulosa^[72].

Además la fórmula química del nitrato de celulosa es^[49]:



Donde “x” es el número de grupos hidroxilos sustituidos por grupos nitratos.

Precisamente el grado de sustitución (DS) dependerá del contenido de nitrógeno en el polímero, donde el ión nitrorio (NO_2^+) ataca a la celulosa y es el responsable de la nitración. El DS puede ser calculado de acuerdo a^[8]:

$$D.S. = \frac{3,6 \times \text{nitrógeno}(\%)}{31,13 - \text{nitrógeno}(\%)} \quad (2.14)$$

Valores de DS(1.9-2.1): nitrocelulosa bajamente nitrada es soluble en alcoholes, ésteres, ketones y éteres glycol, mientras valores de DS(2.1-2.4): nitrocelulosa altamente nitrada es insoluble en alcoholes, aunque puede ser disuelta en ésteres, ketones y éteres glycol^[27].

La capa activa (sensible a las partículas α) se encuentra sobre una base de poliéster con espesores de $12\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$ respectivamente^[72],^[3].

2.4.1. Efectos de sensibilidad

La distancia con que viaja las partículas α en el aire es dependiente de sus energías y los rangos usualmente son a unos pocos centímetros. En otras palabras, estas partículas pueden únicamente ser detectadas si ellas son emitidas desde el decaimiento de la fuente con cierta distancia a la superficie del LR-115 Tipo 2. En el caso de energías muy grandes ($>4,5$ MeV) y que sean generadas muy cerca de la superficie del detector no pueden ser detectadas por el film del LR-115, pasando a través de la capa ($12 \mu\text{m}$) del nitrato de celulosa sin causar interacciones y saliendo de ésta sin dejar trazas, de acuerdo a la *figura 2.7*. Por consiguiente, para lograr la detección, una mínima y máxima distancia son necesarias entre el film y la fuente de las partículas α [3].

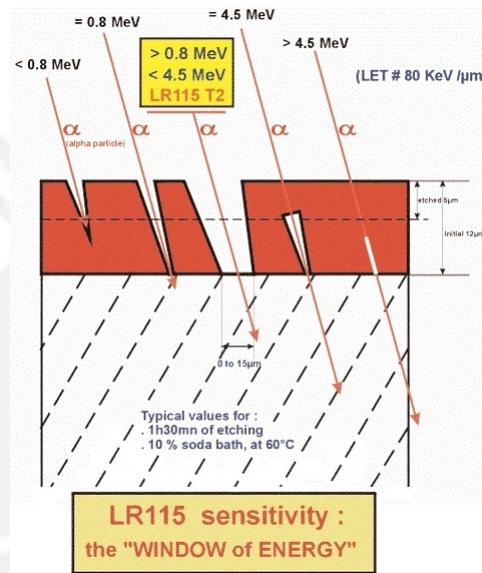


Figura 2.7: Sensibilidad del detector LR-115 tipo II [3].

La ecuación 1.11 hace referencia al rango proyectado de la partícula α en aire de acuerdo al ICRU-104. Para determinar las distancias mínimas y máximas de detección en el detector LR-115 es necesario realizar el cálculo siguiente:

$$R(\text{mm}) - X = (1,321 \pm 0,086) + (3,218 \pm 0,044)[E'(\text{MeV})] + (0,764 \pm 0,004)[E'(\text{MeV})]^2 \quad (2.15)$$

Donde: X es la distancia la mínima y/o máxima de detección y E' (MeV) es la energía de la partícula α del Rn-222, Rn-220 y sus descendientes respectivamente evaluada a la distancia X (mm) desde el detector LR-115. La ecuación 2.1 es cuadrática cuya solución es como sigue:

$$Y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.16)$$

donde:

$$\begin{aligned} Y &= E'(\text{MeV}), \\ a &= (0.764 \pm 0.004), \\ b &= (3.218 \pm 0.044) \text{ y} \\ c &= [(1.321 \pm 0.086) - R(\text{mm}) + X] \end{aligned}$$

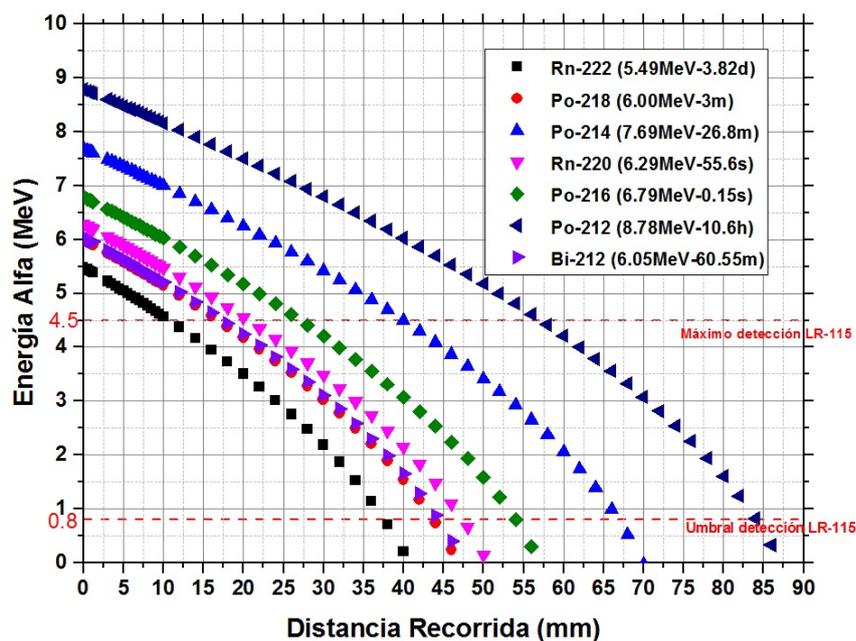


Figura 2.8: Distancias mínimas y máximas de detección en LR-115 Tipo 2, para el Rn-222, Rn-220 y sus respectivas progenies (elaboración propia).

La *figura 2.8* representa los valores tabulados desde la ecuación (2.16) a partir de distintos valores que toma X (mm). Además de acuerdo a la especificaciones técnicas de Kodakalpha requiere que para que las partículas α sean detectadas, éstas deben de estar en una ventana de energía [0,8 - 4,5]MeV.

La *tabla 2.1* detalla los valores de las distancias mínimas y máximas reportadas en la literatura y las calculadas a través de la ecuación (2.15) para el radón, torón y sus descendientes.

Tabla 2.1: Distancias mínimas y máximas de detección en un detector LR-115 Tipo 2.

Referencia	Nucleido	Energía Alfa (MeV)	X(mín) (mm)	X(máx) (mm)	X(máx)-X(mín) (mm)
SRIM ^a	Rn-222	5,49	10,74	37,63	26,89
	Po-218	6,00	16,86	43,75	26,89
	Po-214	7,69	39,97	66,86	26,89
	Rn-220	6,29	20,52	47,40	26,89
	Po-216	6,49	27,12	54,01	26,89
	Po-212 (64%)	8,78	57,20	84,09	26,89
	Bi-212 (36%)	6,05	17,48	44,37	26,89
Kodalpa	Rn-222	5,59	5	35	30
Radon-Dosimeters ^b	Po-214	7,83	30	60	30

(continuación tabla 2.1)

Referencia	Nucleido	Energía	X(mín)	X(máx)	X(máx)-X(mín)
		Alfa (MeV)	(mm)	(mm)	(mm)
K.N. Yu	Rn-222	5,49	1,5	3,25	17,5
and D.	Po-218	6,00	2,1	3,82	17,2
Nikezic ^c	Po-214	7,69	4.2	5,95	17,5

^aRango de sensibilidad de detección [0,8-4,5] MeV, densidad del aire $\rho = 1,12g/cm^3$ (SRIM-ICRU-104), ec. (1.11)^[79].

^bEspecificaciones Técnicas: Rango de sensibilidad de detección [0,8-4,5] MeV^[3].

^cRango de sensibilidad de detección considerado [1,25-3,9] MeV^[77].

Con respecto a la densidad de trazas, la sensibilidad del detector es alrededor de 1,5 - 2,4 trazas/cm² para una exposición total de radón de 1 kBq.h/m³. La mínima exposición, significativamente el umbral menor de detección es de 2 kBq.h/m³.

La relación entre la sensibilidad del detector y el espesor removido está relacionado a la función V. Diversos autores han publicado diversas funciones de V que describe el registro de las partículas α en el detector LR-115 Tipo 2, dependiendo de constantes y de R' (rango residual)^[55]:

1. Durrani y Green, 1984^[30]:

$$V = 1 + (a_1 e^{a_2 R'} + a_3 e^{a_4 R'}) (1 - e^{-R'}) \quad (2.17)$$

con constantes $a_1=100$, $a_2=0,446$, $a_3=5$ y $a_4=0,107$.

2. Yip et al., 2006^[75]: la misma forma como en la ecuación 2.18, pero con constantes $a_1=2,14$, $a_2=0,12$, $a_3=2,7$ y $a_4=0,135$.

3. Leung et al., 2006-a^[45]: la misma forma como en la ecuación 2.18, pero con constantes $a_1=14,50$, $a_2=0,5$, $a_3=3,9$ y $a_4=0,066$.

3. Leung et al., 2006-b^[46]: la misma forma como en la ecuación 2.18, pero con constantes $a_1=14,23$, $a_2=0,48$, $a_3=5,9$ y $a_4=0,077$.

4. Barillon et al., 2007^[47]:

$$V_T = V_B + \frac{1}{a_1^2 + \left[a_2 R' - \frac{1}{a_3 R'} \right]^2} \quad (2.18)$$

con constantes $a_1=0,23$, $a_2=0,032$, $a_3=3,8$.

2.4.2. Efectos de saturación

El típico nivel de saturación del detector LR-115 es aproximadamente 600 trazas/mm² para un diámetro de trazas (1-15 μ m) comparado a 50-400 trazas/mm² de otros tipos de detectores de diferentes materiales para un diámetro de trazas (5-80 μ m).

La máxima exposición (nivel de saturación) del detector LR-115 Tipo 2 se está en el rango de de 70 MBq.h/m³.

2.4.3. Efecto Plate-Out

El efecto Plate-Out describe la deposición de los productos de decaimiento del radón en la superficie sensible del detector. Este efecto tiene una influencia adversa en la precisión de la medida del radón como de las partículas emitidas desde los productos de decaimiento que serán también detectados. Estos últimos no pueden ser diferenciados desde las partículas α del radón conllevando a que el resultado final sea más elevado.

Por esta razón, los detectores LR-115 tipo 2 son insensibles a esta deposición provenientes desde el Po-218 y el Po-214. Este tipo de detector no es influenciado por este efecto a diferencia del CR-39 y Makrofol, por lo tanto no serán detectados debido a sus altas energías (>4,5 MeV: máxima energía de detección).

La *figura 2.9* muestra los volúmenes efectivos (espacio geométrico en la cual una partícula α confinada en ella, tiene una probabilidad no nula de ser registrada en el detector) para cada isótopo.

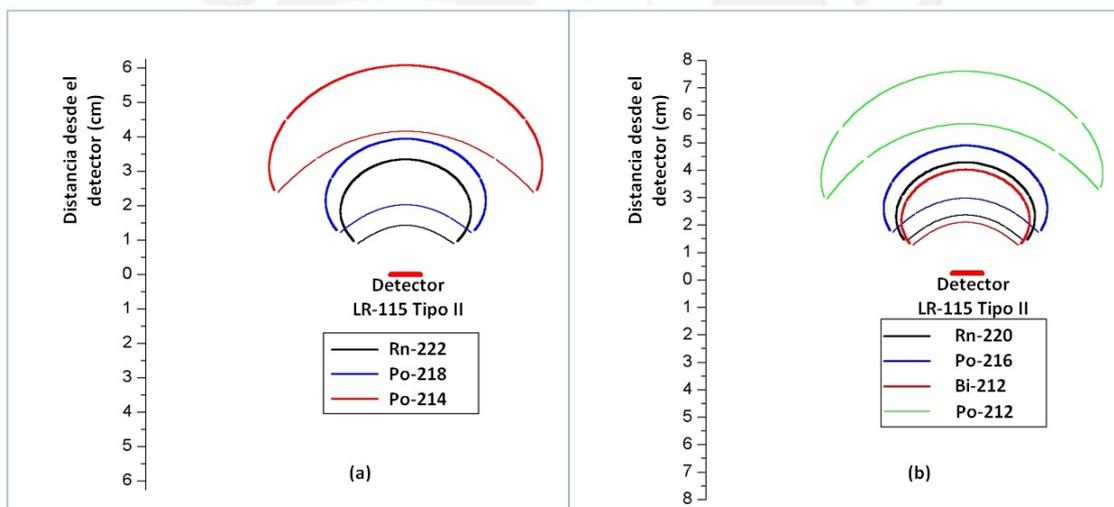


Figura 2.9: Respuesta del detector LR-115 tipo 2 al radón (a) y torón (b) con sus respectivos descendientes^[63].

2.4.4. Incertidumbres de medida

La *tabla 2.2* indica los valores típicos para las incertidumbres de las medidas de los dosímetros Kodalpha Radon a un nivel de confianza de 2σ . Las incertidumbres de las medidas en “%” y “Bq/m³” están correlacionados a diferentes tiempos de exposición y concentraciones de radón. Estos valores dependerán de la producción del film (exactitud del espesor de la capa sensible) y de la temperatura de grabado^[3].

Tabla 2.2: Incertidumbre de medición en detectores LR-115 Tipo 2(Kodalpha-Radon) con [Bq/m³] y [± %] a 2σ de nivel de confianza^[3].

Exposición (días)	±	±	±	±	±	±
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 9 % – 12 %	58-73 8 % – 9 %	82-104 10 % – 13 %	92-116 4 % – 5 %	113-142 3 % – 4 %
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/m³	100 Bq/m³	400 Bq/m³	800 Bq/m³	1000 Bq/m³	1500 Bq/m³

Nota: De acuerdo a estándares y normas internacionales, las medidas de incertidumbres de dispositivos de radón debería ser menor que ±20%

2.4.5. Factor de Equilibrio

El uso de detectores LR-115 Tipo 2 expuestos directamente a la atmósfera en el lugar de medida (interiores) implica que tanto Rn-222, Rn-220 y sus descendientes respectivamente puedan ser detectados. El factor de equilibrio “F” es la fracción entre el radón y su progenie en un volumen de aire dado, que depende de la ventilación, de la humedad, de la concentración de las partículas suspendidas^[12]. Este factor en interiores varía entre 0 y 1, siendo 0,6 para exteriores y de 0,4 para interiores para el Rn-222^{[3], [6]} y de 0,01 para exteriores y 0,03 para interiores para el Rn-220^[68]. Estos valores son tomados para un factor de ocupación de 0,8 para interiores.

La *figura 2.10* muestra los resultados teóricos de un dosímetro tipo-cerrado, un dosímetro tipo-abierto (expuesto libremente) y un medidor de working level (WLM) para la medición de los productos de decaimientos del radón, a niveles constantes de éste, pero diferentes factores de equilibrio F.

Modelos teóricos para el cálculo del factor de equilibrio se encuentran en la literatura. Uno de ellos el de Jacobi, 1972 y de Swedjemark, 1983, definieron los factores de equilibrio entre el radón, torón y sus descendientes respectivamente de la siguiente manera^[51]:

$$F^{222} = [f(^{218}Po)C(^{218}Po) + f(^{214}Pb)C(^{214}Pb) + f(^{214}Bi)C(^{214}Bi) + f(^{214}Po)C(^{214}Po)]/C(^{222}Rn) \quad (2.19)$$

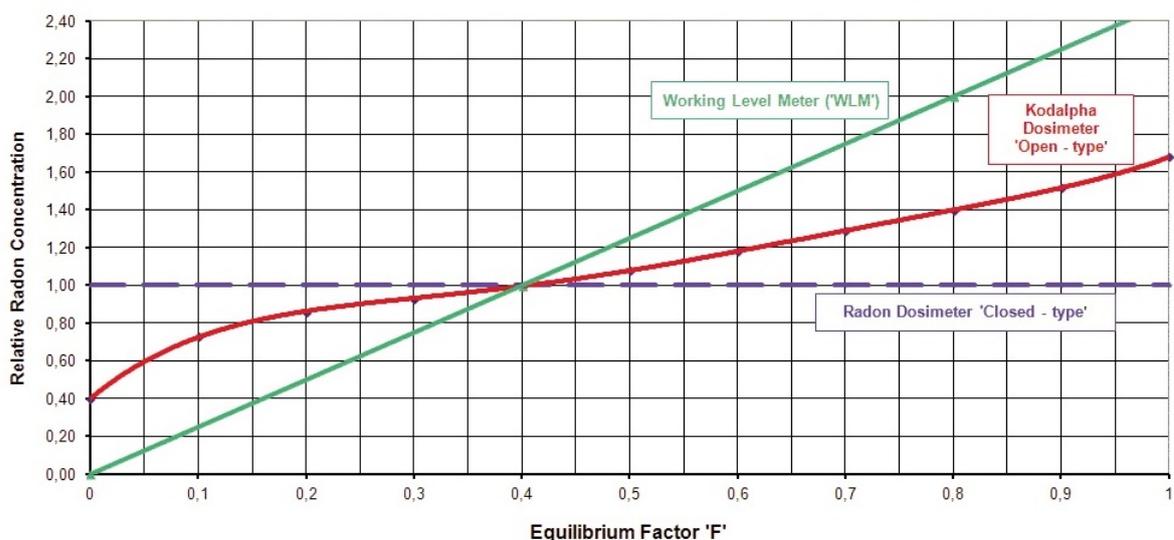


Figura 2.10: Factor de equilibrio $F=0.4$ [3]

$$F^{220} = [f(^{216}Po)C(^{216}Po) + f(^{212}Pb)C(^{212}Pb) + f(^{212}Bi)C(^{212}Bi) + f(^{212}Po)C(^{212}Po)]/C(^{220}Rn) \quad (2.20)$$

Donde la ecuación (2.17) y (2.18) son los factores de equilibrio para el Rn-222 y Rn-220 respectivamente, donde $f(Po-218) = 0,105$, $f(Pb-214) = 0,516$, $f(Bi-214) = 0,38$, $f(Po-214) = 5,25 \times 10^{-8}$; $f(Po-216) = 2,09 \times 10^{-4}$, $f(Pb-212) = 0,91$, $f(Bi-212) = 0,087$ y $f(Po-212) = 5,24 \times 10^{-12}$.

2.5. Factor de calibración y cálculo de la concentración de la actividad del radón

Los factores de calibración han sido determinados especialmente por instituciones acreditadas e investigadores de diferentes países que han seguido procedimientos rigurosos han obtenido factores experimentales, teóricos y/o semi-empíricos, que se pueden encontrar en la literatura especializada. Generalmente el factor de calibración es obtenido a través de experimentos controlados y/o empleando cámaras especiales. Los parámetros controlados son: el factor de exposición (kBq.h.m^{-3}) y la cantidad de partículas suspendidas dentro de una cámara, que determina el factor de equilibrio.

El factor de calibración “k” se expresa en $(\text{trazas.cm}^{-2}/\text{Bq.h.m}^{-3})$ [7].

En la *tabla 2.3* se detalla los factores de calibración calculados a diferentes valores de exposición, donde la incertidumbre de los valores de exposición tanto del BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) en Berlín como del INMRI (Instituto Nacional de Metrología de Radioización Ionizante) del ENEA-Casaccia en Roma fueron del 7% y 5% respectivamente[25].

Tabla 2.3: Factores de calibración calculados a diferentes valores de exposición^[25]

Laboratorio de Referencia-Año de Medida	Exposición de Referencia (kBqm ⁻³ h)	Densidad de Trazas (cm ⁻²)	Factor de Calibración × 10 ⁻⁴ (Bq ⁻¹ m ³ h ⁻¹ cm ⁻²)
BfS-2009	269	204± 21	7,6± 0,9
INMRI-2010	1025	615± 42	6,0± 0,6
BfS-2010	1224	832± 98	6,8± 0,9
BfS-2010	1330	838± 77	6,3± 0,7
BfS-2009	1677	1057± 116	6,3± 0,8
BfS-2009	1741	1097± 100	6,3± 0,7
INMRI-2010	2088	1211± 84	5,8± 0,5
BfS-2009	2692	1723± 151	6,4± 0,7
BfS-2010	3023	1784± 151	5,9± 0,6
INMRI-2010	7574	3408± 190	4,5± 0,4
INMRI-2010	12680	4945± 442	3,9± 0,4

La concentración de la actividad del radón (denominada además actividad radiactiva específica del gas radón) se mide por unidad de volumen (en Bq/m³ ó pCi/L), donde:

$$1pCi/l = 37Bq/m^3 \quad (2.21)$$

En este caso la equivalencia de la concentración de la actividad de radón está regida por la siguiente expresión:

$$C = \frac{\rho(trazas)}{k.t} \quad (2.22)$$

Donde:

C: Concentración de la actividad de radón (en Bq/m³),

ρ_{trazas} : Número total de trazas en el detector analizado o densidad de trazas (en N^o trazas/cm²),

k: factor de calibración (en $\frac{N^{\circ}trazas/cm^2}{Bq/m^3.día}$) y

t: tiempo de exposición de los detectores en las viviendas (usualmente en días).

Los estudios realizados para ver el efecto de otras partículas depositadas (aerosoles, moléculas de agua, etc.) en el detector en modo descubierto han revelado que la medición de la recolección de partículas están en el orden de hasta 0,3 mg.cm⁻² para el periodo de 90 días no afectan el registro de trazas en el detector^[7].

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1. Descripción del distrito de San Luis - Lima

3.1.1. Geografía

El Distrito de San Luis se encuentra ubicado en la zona urbana consolidada de Lima Metropolitana a 175 msnm y cuenta con un área de $3,49\text{km}^2$. Es la intersección geográfica de las vías troncales nacionales que son la Panamericana Sur y la carretera Central. Como características generales del distrito se tiene que la población censada por el INEI-2014 (Instituto Nacional de Estadística e Investigación)^[26] fue de 57 530 habitantes donde sus límites distritales se muestran en la siguiente *tabla 3.1*.

Tabla 3.1: Principales vías limítrofes del distrito de San Luis^[21].

Distrito limítrofe	Principales Vías
El Agustino	Jr. Garcilazo de La Vega - Jr. Ollanta
San Borja	Av. Canadá - Jr. Urduzola - Jr. Gualgayoc
Ate Vitarte	Av. Nicolás Ayllón - Av. Las Torres - Av. Circunvalación
La Victoria	Av. Nicolás Arriola - Av. Aviación - Av. Circunvalación
Lima	Ca. El Timón

En la *figura 3.1* se muestra la ubicación geográfica del distrito de San Luis, extraído desde Google Maps.

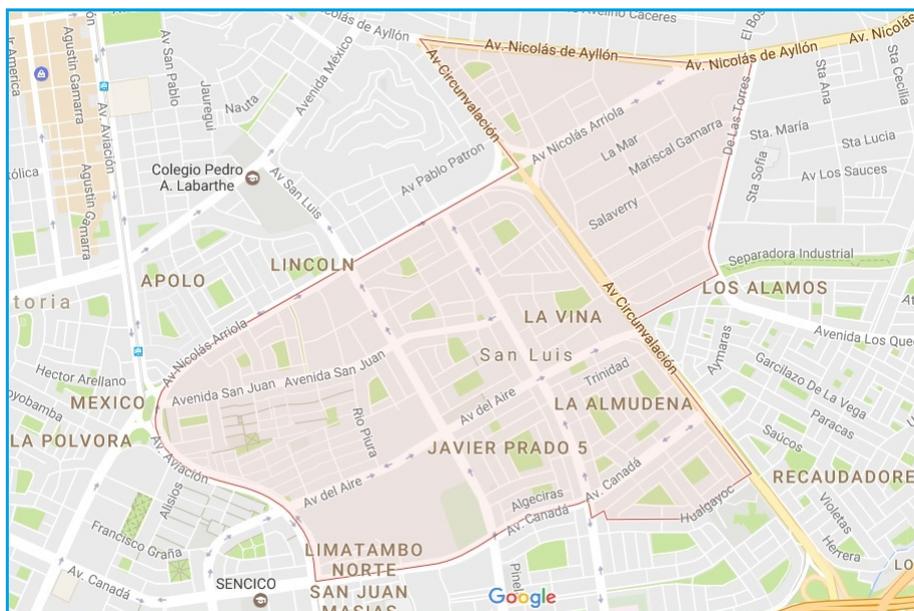


Figura 3.1: Límites distritales de San Luis^[2].

3.1.2. Litología

En Lima existen más de 300 pozos litológicos de los cuales 4 se encuentran en el distrito de San Luis y estos pozos se han utilizado para la explotación de agua subterránea, en la *figura 3.2* se muestran las ubicaciones de los pozos.



Figura 3.2: Ubicación de pozos en el distrito de San Luis^[21].

A continuación en el *tabla 3.2* se presenta el perfil litológico de los 4 pozos que se encuentran en el distrito.

Tabla 3.2: Litología de pozos en el distrito de San Luis^[21].

N° 53: San Luis	N° 93: Repartición	N° 306: Torre de San Borja	N° 75: Apolo
Jr. Augusto Durand Cdra. 29 h=130 m	Jr. Mscal. Oscar R. Benavides cdra. 2 h=140 m	Esq. Av. Canadá con Av. San Luis h=140.35 m	Av. Nicolás Arriola cdra. 17 h=130 m
0.00-1.00 m: Tierra de cultivo.	0.00-1.00 m: Tierra de cultivo.	0.00-1.00 m: Tierra de cultivo.	0.00-1.00 m: Tierra de cultivo.
1.00-15.00 m: Canto rodado	1.00 - 30.00 m: Canto rodado grande con cascajo suelto	1.00 - 15.00 m: Canto rodado grande con grande con cascajo	1.00 - 15.00 m: Canto rodado regular con arena
Litología cascajo			
15.00-30.00 m: Canto rodado grande con arena	30.00 - 61.50 m: Canto rodado grande y chico con cascajo	15.00 - 30.00 m: Canto rodado grande con arena	15.00 - 30.00 m: Canto rodado grande con cascajo
30.00-38.50 m: Canto rodado regular con arena	61.50 - 96.00 m: Canto rodado grande con cascajo	30.00 - 75.50 m: Canto rodado regular con arena	30.00 - 37.00 m: Canto rodado chico con arena
38.50-70.00 m: Canto rodado con arena fina y cascajo	96.00 - 99.00 m: Arena y cascajo	75.50 - 100.00 m: Canto rodado grande con arena regular y cascajo	37.50 - 50.00 m: Canto rodado cascajo y arena
70.00-81.00 m: Canto rodado con arena gruesa y cascajo	99.00 - 104.00 m: Canto rodado grande con cascajo y arena	100.00 - 130.00 m: Canto rodado con cascajo	50.00 - 57.00 m: Arena con poca arcilla
81.00-130.00 m: Canto rodado con arena gruesa, fina	104.00 - 114.00 m: Canto rodado grande con cascajo y poca arcilla	130.00 - 140.35 m: Rocas y arcilla compactada y material muy duro	57.00 - 75.00 m: Canto rodado chico con arena y cascajo
	114.00 - 118.00 m: Cascajo con arcilla		75.00 - 84.00 m: Canto rodado mediano con arena gruesa
	118.00 - 121.00 m: Canto rodado mediano con cascajo		84.00 - 94.00 m: Canto rodado chico con arena y cascajo
	121.00 - 127.00 m: Cascajo y arcilla		94.00 - 110.00 m: Canto rodado mediano con arena y poca arcilla
	127.00 - 131.00 m: Canto rodado mediano con cascajo		110.00 - 115.00 m: Arcilla
	131.00 - 135.00 m: Canto rodado mediano con arcilla		115.00 - 125.00 m: Canto rodado grande con arcilla arena
	135.00 - 140.00 m: Canto rodado grande con cascajo		125.00 - 135.00 m: Arcilla y poca arena

3.1.3. Geotecnia

El mapa geológico de la ciudad de Lima (apéndice C) fue realizado por el INGEMMET (Instituto Nacional de Geología, Minería y Metalurgia-Perú).

La ciudad de Lima se ubica dentro de los límites de influencia del cono de deyección del río Rímac, este cono consiste de material aluvial de estructura lentiforme donde se superponen depósitos de cantos rodados, arena, arcilla y limo, sin orden ni arreglo.

El distrito de San Luis se ubica en la Era Cuaternario-Pleistoceno, presenta depósitos aluviales, que están constituidos por materiales acarreados por los ríos que bajan de la vertiente occidental andina cortando a las rocas terciarias, mesozoicas y Batolito Costanero. San Luis ocupa un área perteneciente a depósitos aluviales pleistocénicos, es decir los depósitos aluviales más antiguos.

En la *tabla 3.3* se detalla las características predominantes de los suelos de Lima y en especial el distrito bajo estudio.

Tabla 3.3: Tipos de suelos en la ciudad de Lima^[21].

Distritos	Constitución del suelo
Lince, Breña, Jesús María, La Victoria (zona sur), Magdalena del Mar y Miraflores (zona oeste)	Presentan gravas empacadas en arenas formando un conglomerado compacto, cuya capacidad portante puede ser de 2.5 hasta 4.0 kg/cm^2 .
Ate, Lima (zona este), Surco (zona norte), La Victoria (zona norte) y San Luis	Presentan gravas con buena graduación, pocos finos y una capacidad admisible entre 4.0 y 5.0 kg/cm^2 .
En algunas partes de San Miguel, San Isidro, Miraflores y Magdalena	Se presentan suelos finos, limo-arcillosos y lentes arenosas intercaladas y una capacidad de 0.5 carga admisible de kg/cm^2 .

De acuerdo a las características geotécnicas sísmicas del terreno de cimentación existen 5 categorías. El distrito de San Luis se ubica en la categoría o zona 1, debido a que la zona incluye afloramientos rocosos, estratos potentes de grava que conforman los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón y los estratos de grava coluvial y aluvial de los pies de las laderas. Comportamiento rígido, con periodos de vibración natural entre 0,1 y 0,3 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es $S = 1,0$ y el periodo natural del suelo es $T_p = 0,4$ segundos, correspondiendo a un suelo tipo 1 de la norma sismorresistente peruana (apta para la edificación).

3.2. Metodología de campo

El trabajo resume parte de la labor de investigación que se viene desarrollando dentro del marco del proyecto (120-PNIPC-PIAP-2015) “Desarrollo de un sistema de monitoreo de Rn-222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares en ciudad de Lima - Perú” como parte del Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (PNIPC)-Innovate Perú 2015.

El Grupo de Investigación de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU) ya ha desa-

rollado una metodología de monitoreo ambiental a pequeña escala, por ello se plantea ampliar el monitoreo en nuestra ciudad y, a futuro, en otras ciudades del país.

3.2.1. Criterio de muestreo

La cantidad mínima de viviendas a monitorear en el distrito de San Luis están basados en el área de la grilla establecida por el proyecto, siendo ésta de 1 km^2 . La densidad poblacional del distrito es de aproximadamente $16\ 484 \text{ hab}/\text{km}^2$ ^{[4],[5]} perteneciendo al rango del tipo D (4 puntos de medida/ km^2), haciendo un total de 16 puntos de medida como mínimo. De acuerdo a lo establecido, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de monitoreo en el proyecto, según *tabla 3.4*:

Tabla 3.4: Consideraciones de muestreo: N° viviendas a monitorear por km^2

Criterio	N° hab/ km^2	Consideraciones: N° viviendas/ km^2
Tipo A	< 1000	Si es posible monitorear 1 vivienda
Tipo B	<1000, 5000>	Monitorear 1 vivienda
Tipo C	<5000,10000>	Monitorear 2 viviendas
Tipo D	<10000, 20000>	Monitorear 4 viviendas
Tipo E	> 20000	Monitorear 5 o 6 viviendas

En la *tabla 3.5*, se muestra el cálculo realizado para el distrito monitoreado. Además, se compara a través de la misma metodología con los diferentes distritos considerados en la zona central de la provincia de Lima.

Tabla 3.5: Cantidad mínima de viviendas a monitorear en la ciudad de Lima-Centro.

N°	Distrito	N° Hab. ^a	Extensión ^b (km^2)	Dens. Poblac. N° Hab/(km^2)	Criterio	N° viviendas
1	San Miguel	135366	10.72	12627	Tipo D	44
2	Magdalena del Mar	54566	3.61	15115	Tipo D	16
3	San Isidro	55006	11.1	4955	Tipo B	11
4	Miraflores	82805	9.62	8607	Tipo C	20
5	Barranco	30641	3.33	9201	Tipo C	6
6	Santiago de Surco	338509	34.75	9741	Tipo C	70
7	Surquillo	91686	3.46	26498	Tipo E	24
8	San Borja	111808	9.96	11225	Tipo D	40
9	San Luis	57530	3.49	16584	Tipo D	16
10	Lince	51514	3.03	16879	Tipo D	12
11	Jesús María	71514	4.57	15648	Tipo D	20
12	Pueblo Libre	76437	4.38	17451	Tipo D	16
13	Breña	77116	3.22	23949	Tipo E	18
14	Cercado de Lima	276857	21.98	12595	Tipo D	88
15	La Victoria	175372	8.74	20065	Tipo E	54
16	Rímac	167286	11.87	14093	Tipo D	48

^ahttps://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1157/libro.pdf

^b<http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/L1b0002/cap0104.htm>

3.2.2. Encuesta

En el apéndice E se muestra el formato de la encuesta, de ella se obtienen los datos característicos de las viviendas y que permitió desarrollar el análisis estadístico de las variables cualitativas que influyen en las concentraciones de la actividad del Rn-222 en las viviendas, de acuerdo a lo descrito en la sección 1.5 del capítulo 1 del presente trabajo de investigación. En la *tabla 3.6* se resumen las variables consideradas en el trabajo de campo.

Tabla 3.6: Variables consideradas en el monitoreo.

Variable	Descripción
Tiempo de monitoreo	Mínimo 2 meses.
Ubicación de los detectores	Aproximadamente a una altura de 1.60 m.
Ubicación de la vivienda	Mediante coordenadas GPS conocer si se encuentra ubicada en avenida, calle, jirón, interior o pasaje. Si el tráfico es intenso, medio o bajo y el tipo de vehículos que mayormente circulan.
Número de habitantes	Presencia de fumadores en la vivienda y/o habitación a monitorear.
Antigüedad de la vivienda	Conocer la condición de ésta y el tipo de material con que fue construida: ladrillo, adobe, drywall, entre otros.
Paredes y pisos	Conocer si las paredes cuenta con recubrimiento de pintura: al agua, base imprimante, esmalte, entre otros y los pisos son de cemento, mayólica, madera, tapiz, parquet, u otros. Si poseen fisuras.
Habitación	Tipo de habitación dentro la vivienda a muestrear, ésta pueden ser baño, garaje, cocina, de preferencia sala y dormitorio. Determinar si se encuentran en el primer, segundo piso u en otra ubicación. Tipo de ventilación ya sea natural u otro sistema adicional.
Fábricas con emisiones de gases	Partículas suspendidas en el aire (polvo, humedad, aerosoles, etc)

3.2.3. Periodos de muestreo y variables meteorológicas

El monitoreo de la concentración de la actividad del Rn-222, se realizó durante 5 periodos, abarcando un total de 16 meses, desde setiembre del 2015 hasta enero del 2017. Considerando las variaciones de la concentración de la actividad del radón con las estaciones del año, la elección de cortos periodos es recomendable para establecer valores promedios anuales^[39]. La *tabla 3.7* muestra los meses y estaciones comprendidas por periodos de muestreo.

Tabla 3.7: Periodos de muestreo, estacionales y algunas variables meteorológicas.

Descripción	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Meses comprendidos	Set. 2015- Dic. 2015	Dic. 2015- Marzo 2016	Abril 2016- Junio 2016	Junio 2016- Set. 2016	Oct. 2016- Enero 2017
Estación	Primavera -Verano	Verano- Otoño	Otoño- Invierno	Invierno- Primavera	Primavera -Verano
Temperatura Promedio (°C)^(a)	19,01 ± 1,28	23,28± 1,75	19,65 ± 2,56	16,77± 0,34	20,58± 2,63
H.R. (%) Promedio^(a)	84,04± 0,45	79,95± 2,34	84,49± 2,83	86,63± 0,68	80,33 1,56

^a Datos recopilados del SENAMHI^[9].

Además de los valores promedios de temperatura y humedad relativa proporcionada través de los datos históricos de la estación meteorológica del Campo de Marte-112181 del SENAMHI^[9] (ver *tabla 3.8*).

Tabla 3.8: Estación Meteorológica: Campo de Marte-112181^[9]

Descripción	
Tipo	Automática-Sutron, Meteorológica 2
Latitud	77.22' 35.3"
Departamento	Lima
Provincia	Lima
Distrito	Jesús María

El SENAMHI cuenta con diversas estaciones meteorológicas ubicadas en distintos puntos de la región de Lima. Por tanto, la recolección de los datos históricos de la estación meteorológica del Campo de Marte es debido a la cercanía al distrito de San Luis y sobre todo que ha estado operativa durante el tiempo de monitoreo. La *figura 3.3* muestra la ubicación de la estación meteorológica con respecto al distrito.

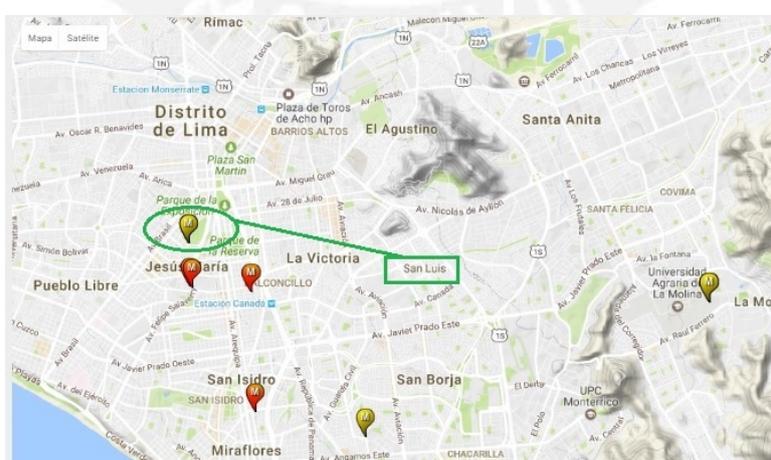


Figura 3.3: Ubicación de la estación meteorológica del Campo de Marte-SENAMHI^[9].

Y los valores promedios tanto de temperatura (°C) y humedad relativa (%) considerados desde setiembre del 2015 hasta enero del 2017 se muestran en la *figura 3.4*.

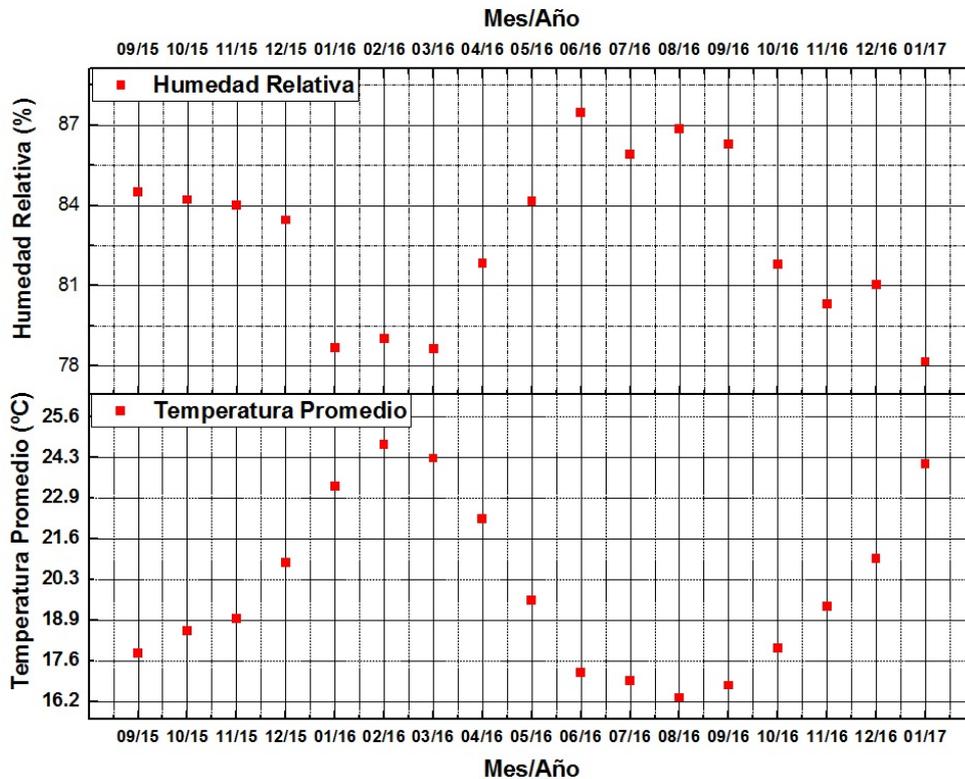


Figura 3.4: Temperatura Promedio (°C) y Humedad Relativa (%) mensual (Set. 2015-En. 2017)^[9].

3.2.4. Viviendas identificadas

Se estableció que en cada vivienda se colocaría dos detectores para el respectivo monitoreo de aproximadamente 60 días (2 meses), con la finalidad de poder estimar el promedio de de las concentraciones de la actividad del radón en dos habitaciones distintas para una misma vivienda. Estas habitaciones fueron: sala, dormitorio, comedor, cocina, entre otros.

Se registraron 26, 74, 76, 72 y 68 viviendas en los cinco periodo de monitoreo respectivamente, distribuidos en todo el distrito.

3.3. Metodología de laboratorio

3.3.1. Preparación de la solución NaOH

El agente alcalino NaOH es un producto químico peligroso, que cuando se disuelve en agua libera una gran cantidad de calor, siendo muy corrosivo, por lo que no debe ser manipulado directamente con las manos. Los elementos de protección personal

(EPP) obligatoriamente usados en el laboratorio fueron:

1. Lente de seguridad debido a que es un agente volátil desde su preparación.
2. Guantes de seguridad.
3. Mandil sintético.
4. Mascarilla.

Y los equipos y materiales para su preparación fueron:

1. Balanza digital.
2. Vasos de precipitado de vidrio de 1 L, varillas de vidrio.
3. Agua destilada.
4. Hidróxido de Sodio.
5. Botellas de vidrio.

Para la obtención de la solución de NaOH a una normalidad de 2.5 (o 10 % de éste), se vertió 1 L de agua destilada en un vaso de precipitado de vidrio, luego se añadió 100 g de NaOH, moviéndose la solución hasta obtener un fluido transparente, tratando de evitar su deposición en el fondo del vaso. Después de ello, se almacenó en botellas de vidrio debidamente etiquetadas y selladas para su posterior uso.

Este proceso es de vital importancia, debido que variaciones de esta normalidad afectan fuertemente los resultados obtenidos.

3.3.2. Grabado químico de detectores

Al tener la solución de NaOH a 2.5 N, el procedimiento del tratamiento químico de los detectores LR-115 tipo 2 siguiendo las recomendaciones del fabricante; Laboratorio DOSIRAD^[1] fue:

1. Debido a que el sistema de baño es un sistema abierto, se normalizó la temperatura del ambiente donde está ubicado dicho sistema a 25 °C, teniendo puertas y ventanas cerradas, evitando así la existencia de factores externos que perturben la temperatura durante el proceso de grabado.
2. Se vertió 200 ml de agua de caño en un vaso de vidrio PYREX de 500 ml y dentro de él, un vaso de vidrio pequeño PYREX de 150 ml con 110 ml de la solución de NaOH preparada anteriormente.
3. Luego de haber encendido el sistema y puesto a una potencia del 40 %, se colocó el termómetro dentro del vaso de vidrio de 500 ml, con la finalidad de programar en el sistema la temperatura de 60 °C (temperatura de grabado). Este propósito conllevó a esperar aproximadamente 1 hora para que la temperatura se estabilice en un rango de $60 \pm 0,5$ °C^[1], de acuerdo a la *figura 3.5*.
4. Por la cantidad de detectores recolectados (409 en total) se utilizaron las 6 unidades de baño con el que cuenta el sistema termostático. Los detectores fueron preparados y codificados ordenadamente.
5. Después de 90 min de grabado, los detectores fueron retirados y se apagó el sistema de calentamiento.

6. Los detectores retirados, fueron colocados en los envases de plástico Corning de 600 ml con agua de grifo de tal manera de realizar el proceso de neutralización de la solución alcalina sobre los detectores y eliminar productos que hayan quedado depositados en los estos, durante el proceso de grabado. Este proceso duró aproximadamente 20 min.

7. Luego, los detectores se enjuagaron finalmente con agua destilada en otros envases plásticos Corning de 600 ml, eliminando de esta manera residuos e impurezas que hayan quedado desde el primer enjuague. Este proceso duró aproximadamente 30 min.

8. Posteriormente se dejaron secar los detectores por un periodo de 24 horas.

9. Y con respecto al desecho del NaOH después del proceso de grabado, éste se diluyó con bastante agua de grifo, permitiendo neutralizar la solución, haciendo que este tipo de desecho sea completamente inocuo.



Figura 3.5: Estabilización de la temperatura en el sistema termostático: $60 \pm 0,5$ °C.

3.3.3. Procedimiento de lectura

El sistema de conteo de las trazas fue a través de un microscopio óptico marca LEICA modelo DM LM que proporciona alcances de 5X, 10X y 20X.

Este sistema tiene incorporado una cámara con dimensiones conocidas del campo óptico de visión, facilitando al usuario contabilizar y adoptar criterios de aceptación de las huellas visibles desde un monitor. Para el enfoque de 10X las dimensiones del campo de visión a través de la cámara fue de $1,17 \text{ mm} \times 0,88 \text{ mm}$, que a través de herramientas de realce propios del software (brillo, contraste, niveles de exposición, saturación, entre otros filtros), permitió homogeneizar la imagen en pantalla.

Las trazas fueron contabilizadas desde los oculares del microscopio a un alcance de 10X y contrastadas con las obtenidas desde el campo de visión desde la cámara. Para ello, se calculó el área del campo de visión midiendo primero su diámetro con ayuda del calibrador GRATICULES LTD. Ese calibrador permitió el centrado de éste con respecto al campo de visión, como se muestra en la *figura 3.6*.

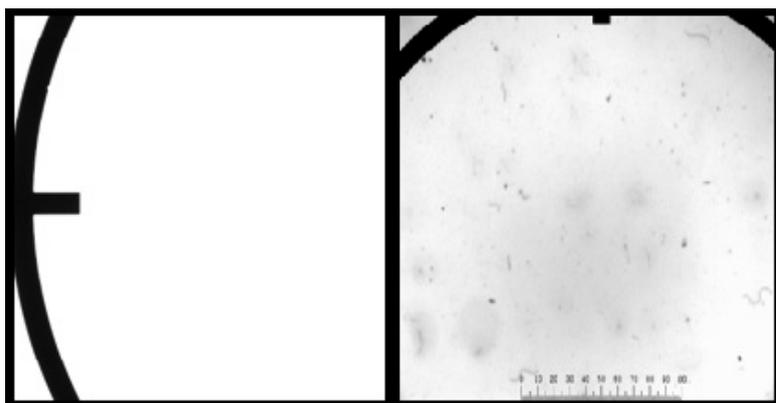


Figura 3.6: Posicionamiento del calibrador GRATICULES LTD. en el centro del objetivo del microscopio.

Desplazando el micrómetro incluido en el microscopio óptico (parte inferior de la *figura 3.7*) cuya resolución es de resolución 0,1 mm de manera horizontal se pudo medir el diámetro del campo de visión a través de la misma metodología empleado por (B. Pérez, 2015) en nuestro laboratorio.



Figura 3.7: Medición del diámetro del campo de visión en el microscopio LEICA, DM LM.

El diámetro medido fue de $(2,14 \pm 0,08)$ mm, y el área circular calculada fue de $(3,60 \pm 0,26)$ mm².

Durante las estaciones de otoño y primavera (8 semanas) en el año 2014^[60] se realizó un monitoreo piloto de Rn-222 en la ciudad de Lima, correspondiente a 97 viviendas en 30 distritos, clasificados en 4 zonas (central, cono sur, cono norte y cono este). El distrito de San Luis (centro) no participó en el monitoreo, pero los 4 distritos limítrofes (San Borja, Lima, El Agustino y La Victoria) si fueron incluidos. Esto permitió que a partir de los valores de la concentración de la actividad del Rn-222 mínima y máxima registradas en los distritos en mención, se logre estimar el número de trazas promedio posibles en el detector LR-115 tipo 2 para nuestro trabajo. El rango de concentraciones monitoreadas en 14 viviendas dentro de los 4 distritos antes mencionados, tuvo una variación entre $[61-658]$ Bq/m⁻³ correspondiente a $[7-69]$ trazas promedio visibles en el detector.

Como el número promedio de trazas por detector puede estar en el rango mencionado y garantizando que el error estadístico no supere el orden del 10 %, desde la ecuación 2.11, se pudo estimar que el número mínimo de campos de visión no debe ser menor a 15. Para este trabajo, se procedió a la elección de 25 campos de visión, a fin de mejorar la estadística de datos, obteniendo un error no mayor del 7.56 %, siendo bastante aceptable.

3.3.4. Medición del “fondo” en el detector usado

La medición del “fondo” (trazas registradas antes de la exposición) en el detector depende de la producción y de las condiciones de almacenamiento, y estos pueden ser bastante diferentes para detectores de diferentes lotes. Una variación entre el [2-15]trazas/cm² en fondo para un almacenamiento de 2 años han sido observados experimentalmente por TV Ramachandran et al., 2011^[64]. Por ello, se realizó la medición de fondo empleando tres detectores para cada lote, cuyas dimensiones fueron las mismas usadas en el monitoreo de viviendas (2 cm × 2 cm). Un lote de detectores consiste en un empaque que contiene 10 planchas de detectores LR-115 tipo 2 de 12 cm x 9 cm, haciendo un total 240 detectores útiles para el monitoreo por periodo.

3.3.5. Detectores envejecidos o descoloridos

Detectores envejecidos y/o descoloridos obtenidos después del grabado químico resultan en un desconocimiento de la verdadera exposición. Estos efectos dependen de las condiciones ambientales, tales como radiación ultravioleta, humedad, temperatura.

Para ello, se procedió a medir el espesor de capa removida de los detector, con la finalidad de conocer cuáles de estos se encuentran dentro del rango de [5-8μm]^[25] (mayor efectividad de trazas contadas) y así mismo calcular las velocidades de desgaste superficial de los detectores (V_B).

3.3.6. Factor de calibración para un detector descubierto

El uso de detectores LR-115 tipo 2 en modo descubierto, registra información de las partículas α emitidas por todos los radionucleidos presentes en el aire del interior de la vivienda (radón, torón y sus respectivos descendientes). Estos detectores no cuentan con filtros o barreras para los productos de decaimiento del radón^[39]. Aunque el registro de las trazas serán distintas para diferentes valores de equilibrio en este modo, la información obtenida bajo este criterio (radón, torón y sus progenies) son las más importantes contribuciones a la exposición humana desde fuentes naturales^[69].

En este caso, las trazas son formadas desde una combinación de cada una de las especies α emitidas presentes en un campo de exposición mixto de radón-torón. Por lo tanto el factor de calibración para un detector descubierto (Bare:B) k_B a partir de la (ecuación 2.21) sería:

$$k_B = \frac{\sum_i \rho_{B_i} - \sum_i \rho_{B_{fondo}}}{\sum_i C_i \cdot t} \quad (3.1)$$

Donde, C_i ($i=1-3$ para el radón y su progenie e $i=4-6$ para el torón y su progenie) denota la concentración de la actividad de la especie i th, ρ_{B_i} es la densidad de trazas atribuible a estas especies y $\rho_{B_{fondo}}$ es la densidad de trazas atribuible al fondo para un tiempo de exposición t .

El factor de calibración fue determinado experimentalmente por (K. P. Eappen et al, India- 2001)^[33] tanto para Rn-222 y Rn-220 independientemente del factor de equilibrio F , obteniendo valores de $(0,0200 \pm 0,0017)$ y $(0,0196 \pm 0,0015)$ trazas $\text{cm}^{-2}/\text{Bq m}^{-3}\text{día}$ respectivamente, sin diferencia significativa. Pero el factor de calibración de los descendientes tanto del Rn-222 como del Rn-220 varía ampliamente con el factor de equilibrio F .

La ecuación (3.1) toma la siguiente forma al reemplazar los C_i descritos:

$$K_B = \frac{\rho^{(total-fondo)}}{(C_{Rn-222} + C_{Po-218} + C_{Po-214} + C_{Rn-220} + C_{Rn-216} + C_{Rn-212})t}$$

$$K_B = \frac{\rho^{(total-fondo)}}{[C_{Rn-222}(1 + \frac{C_{Po-218}}{C_{Rn-222}} + \frac{C_{Po-214}}{C_{Rn-222}}) + C_{Rn-220}(1 + \frac{C_{Po-216}}{C_{Rn-220}} + \frac{C_{Po-212}}{C_{Rn-220}})]t} \quad (3.2)$$

Donde:

$$2F_{Rn-222} = \frac{C_{Po-218}}{C_{Rn-222}} + \frac{C_{Po-214}}{C_{Rn-222}};$$

$$2F_{Rn-220} = \frac{C_{Po-216}}{C_{Rn-220}} + \frac{C_{Po-212}}{C_{Rn-220}}$$

La ecuación (3.2) se transforma entonces en:

$$K_B = \frac{\rho^{(total-fondo)}}{[C_{Rn-222}(1 + 2F_{Rn-222}) + C_{Rn-220}(1 + 2F_{Rn-220})]t} \quad (3.3)$$

Y en términos de concentración de la actividad en:

$$[C_{Rn-222}(1 + 2F_{Rn-222}) + C_{Rn-220}(1 + 2F_{Rn-220})] = \frac{\rho^{(total-fondo)}}{K_B t} \quad (3.4)$$

Para determinar la concentración de la actividad del Rn-222, es necesario conocer cuantitativamente el aporte de la concentración de la actividad del Rn-220 del total calculado.

Para este trabajo planteamos las siguientes hipótesis:

1. Presencia de Rn-222 y su progenie

La contribución del gas Rn-220 es despreciable debido a que la altura de ubicación de los detectores en la vivienda fue de 1,60 m de altura sobre el piso, considerando la longitud de difusión del Rn-220 mucho menor a la del Rn-222 tanto en aire como en suelo (desde tabla 1.7). Por otro lado, el soporte de mica donde estuvo adherido el detector, actuó como un blindaje de las partículas α provenientes desde la pared. Por lo tanto, la ecuación 3.4, tomaría la siguiente expresión:

$$[C_{Rn-222}(1 + 2F_{Rn-222})] = \frac{\rho_{(total-fondo)}}{K_B t}$$

$$C_{Rn-222} = \frac{\rho_{(total-fondo)}}{K_B t(1 + 2F_{Rn-222})} \quad (3.5)$$

2. Presencia mixta de Rn-222 y Rn-220 y sus progenies

La contribución del gas Rn-220 ya no se considera despreciable, pero en este caso es necesario conocer cuál es la distribución de U-238/Th-232 en el suelo donde están construidas las viviendas. Diversos autores ante esta dificultad, han optado por establecer la fracción de la concentración existente entre estos isótopos predecesores como iguales (U-238/Th-232~1) en el suelo (ver tabla 1.9), aunque hay un desconocimiento de esta relación en la mayoría de países de América del Sur (ver figura 1.2), permitiendo conocer que la contribución de la concentración de la actividad del Rn-220 y de su progenie con respecto al total no sea mayor del 30 %^[64]. Por ende, la ecuación 3.4 sería:

$$[0,7C_{total}(1 + 2F_{Rn-222}) + 0,3C_{total}(1 + 2F_{Rn-220})] = \frac{\rho_{(total-fondo)}}{K_B t}$$

donde:

$C_{Rn-222} = 0,7C_{total}$ y $C_{Rn-220} = 0,3C_{total}$, por lo tanto, desde la ecuación 3.6:

$$C_{total}[0,7(1 + 2F_{Rn-222}) + 0,3(1 + 2F_{Rn-220})] = \frac{\rho_{(total-fondo)}}{K_B t}$$

$$C_{Rn-222} = 0,7 \frac{\rho_{B_{total}}}{K_B \cdot t [0,7(1 + 2F_{Rn-222}) + 0,3(1 + 2F_{Rn-220})]} \quad (3.6)$$

Considerando estos dos planteamientos, la concentración promedio de la actividad del Rn-222 en el distrito de San Luis se encuentra comprendida dentro del intervalo dado por las ecuaciones 3.6 y 3.5 (mínimo valor y máximo valor respectivamente).

Como se mencionó anteriormente, los investigadores (Mayya et al., India-1998 y Eap-pen et al., India-2001) obtuvieron el factor de calibración experimental y teórico para detectores LR-115 Tipo 2 en modo descubierto. Ellos emplearon el mismo tipo de solución química NaOH (Hidróxido de Sodio), la misma condición de normalidad (2,5 N), la misma temperatura y tiempo de grabado químico (60 °C y 90 min) respectivamente^[63], siendo los mismos criterios metodológicos empleados en el Laboratorio de Técnicas de Huellas Nucleares y que GITHUNU ha asumido para el proyecto.

Por consiguiente, el factor de calibración empleado para este trabajo fue el siguiente:

$$k_B = (0,0200 \pm 0,0017)(tr.cm^{-2}/Bq.m^{-3}.día) \quad (3.7)$$

3.4. Metodología de análisis de datos

3.4.1. Propagación de incertidumbres

La incertidumbre asociada en la concentración de la actividad del Rn-222 está determinado a través de la ecuación 3.8 (incertidumbre combinada), basado en la definición establecida desde la ecuación 3.5 y/o 3.6:

$$\begin{aligned}
(\Delta C_{Rn-222})^2 &= \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial T_{total}} \Delta T_{total}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial T_{fondo}} \Delta T_{fondo}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial A} \Delta A\right)^2 \\
&+ \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial k_{bare}} \Delta k_{bare}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial F_{Rn-222}} \Delta F_{Rn-222}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial F_{Rn-220}} \Delta F_{Rn-220}\right)^2
\end{aligned} \tag{3.8}$$

donde:

ΔT_{total} : incertidumbre asociada a las trazas totales en el detector.

ΔT_{fondo} : incertidumbre asociada a las trazas de fondo en el detector.

ΔA : incertidumbre asociada al campo de visión del microscopio.

Δk_{bare} : incertidumbre asociada al factor de calibración determinado en el detector en modo desnudo.

Δt : incertidumbre asociada al tiempo de exposición.

ΔF_{Rn-222} : incertidumbre asociada al factor de equilibrio para el Rn-222.

ΔF_{Rn-220} : incertidumbre asociada al factor de equilibrio para el Rn-220.

Cabe precisar, que los errores de tiempo de exposición como así mismo de los factores de equilibrio del Rn-222 y del Rn-220 son despreciables, debido a que se asumieron constantes.

La ecuación 3.8 quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
(\Delta C_{Rn-222})^2 &= \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial T_{total}} \Delta T_{total}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial T_{fondo}} \Delta T_{fondo}\right)^2 + \\
&\left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial A} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Rn-222}}{\partial k_{bare}} \Delta k_{bare}\right)^2
\end{aligned} \tag{3.9}$$

3.4.2. Distribución Log-normal

La distribución de frecuencias de la concentración de la actividad del radón tiende a tener una forma Log-normal, donde el logaritmo de las medidas tiende a ser una distribución normal. Esto es debido a la combinación multiplicativa de los diferentes parámetros que afectan las concentraciones de la actividad de radón en interiores^[52], siendo útil para estimar los parámetros describiendo una distribución Log-normal^[50].

Bajo esta premisa, los parámetros que describen este tipo de distribución son la media geométrica (GM) y la desviación estándar geométrica (GSD), definidas por:

$$GM = e^{\mu_y}; \quad GSD = e^{\sigma_y} \tag{3.10}$$

donde $y = \ln(x)$ es el logaritmo natural de la concentración de la actividad de radón x , μ_y y σ_y es la media aritmética y la desviación estándar de los valores de “y” respectivamente.

En la *tabla 3.9* detallamos la relación existente entre la función de distribución y los valores esperados entre una distribución normal y Log-normal.

Tabla 3.9: Comparación entre una distribución normal y Log-normal.

Parámetros	Dist. Normal	Dist. Log-normal
Función de distribución	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2}$	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2}$
Medida de tendencia central de los datos	Media Aritmética (MA) μ_x	Media geométrica (MG) e^{μ_x}
Medida de dispersión de los datos	Desviación estándar (DE) σ_x	Desvío Estándar Geométrico (DEG) e^{σ_x}
Equivalencia	$MA = e^{\ln(MG) + \frac{\ln(DEG)^2}{2}}$	$\implies MA = e^{\mu_x + \frac{\sigma_x^2}{2}}$

Las propiedades de la distribución Log-normal permiten estimar la proporción de viviendas que están por encima de un umbral crítico (nivel de acción), incluso cuando son insuficientes los datos para calcular la proporción directamente (Miles 1998)^[65].

Además conociendo MG y DEG, el porcentaje de viviendas que exceden cualquier nivel de referencia (NR) mencionados en la (tabla 1.11), puede ser fácilmente estimado usando tablas estadísticas para calcular el área bajo la curva normal estandarizada, con Z dado por^[39]:

$$Z = \frac{\ln(NR) - \ln(MG)}{\ln(DEG)} \quad (3.11)$$

En este trabajo fue también importante efectuar la comprobación de la distribución de los resultados, empleando el test de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov.

3.4.3. Promedio ponderado de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del grillado

De acuerdo al criterio establecido en el monitoreo del distrito (grillado de 1km²), el promedio ponderado de la concentración del Rn-222 sería:

$$PP_{C_{(Rn-222)}} = \frac{\sum_i P_i \times C_{(Rn-222)_i}}{P_{total}} \quad (3.12)$$

donde:

$PP_{C_{(Rn-222)}}$: Promedio ponderado de la concentración de Rn-222 por población.

P_i : Población en cada grilla subdividida del distrito monitoreado.

$C_{(Rn-222)_i}$: Concentración de la actividad del Rn-222 promedio en cada grilla del distrito monitoreado. P_{total} : Población total del distrito monitoreado.

Estos cálculos permitieron analizar las variaciones de éstas con respecto a los periodos de muestreo bajo estudio.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1. Viviendas monitoreadas respecto a identificadas

A continuación en la *tabla 4.1* se detalla el número total de viviendas monitoreadas (correspondiente a los detectores recolectados y analizados) con respecto al total de viviendas identificadas (correspondiente a los detectores entregados). De las 106 viviendas identificadas en los 5 periodos, fueron monitoreadas 84 en total. El 84,62 % de éstas participaron en el primer periodo, el 82,43 % durante el segundo, el 71,05 % durante el tercero, el 69,44 % durante cuatro y el 52,94 % en el quinto periodo. Se llegaron a entregar 632 detectores de los cuales se recolectaron 409, representando el 64,72 % del total.

Tabla 4.1: Identificación del total de viviendas-detectores entregados y recolectados por periodo.

N° total de viviendas-detectores	Periodos				
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Viviendas identificadas	26	74	76	72	68
Detectores entregados	52	148	152	144	136
Viviendas monitoreadas	22	61	54	50	36
Detectores recolectados	40	110	104	90	65

En la *tabla 4.2*, se detalla las veces de monitoreo de las viviendas que participaron desde el primer hasta el quinto periodo, representado por P_i , donde i varía desde 1 a 5.

Tabla 4.2: Seguimiento de las viviendas monitoreadas durante los 5 periodos

	P_1	P_1, P_2	P_1, P_2, P_3	P_1, P_2, P_3, P_4	P_1, P_2, P_3, P_4, P_5
N° viv.	22	14	25	23	2
(%)	(25.58 %)	(16.28 %)	(29.07 %)	(26.74 %)	(2.33 %)

4.2. Primer periodo

El primer periodo de muestreo se llevó a cabo desde setiembre hasta diciembre del 2015, durante las estaciones de primavera-verano. La temperatura promedio fue de $(19,01 \pm 1,28)$ °C y la humedad relativa de $(84,04 \pm 0,45)$ %. La *tabla 4.3* es un indicador del número de habitaciones monitoreadas en función del tipo y ubicación.

Tabla 4.3: Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 1er periodo.

Tipo de habitación	Codificación	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Total de habitaciones
Sala	S	4	5	2	—	1	12
Dormitorio	D	5	7	6	1	1	20
Cocina	C	2	—	1	—	—	3
Comedor	Co	1	1	—	—	—	2
Baño	B	—	—	1	—	—	1
Salón de Belleza	SB	2	—	—	—	—	2
Total:		14	13	10	1	2	40

El mayor tipo de habitación monitoreada fueron en dormitorios (50,0 %, seguidamente de salas (30,0 %). Con respecto a la ubicación, el 35,0 % y el 32,5 % del total fueron en el primer y segundo piso respectivamente.

En la *tabla 4.4* se muestra los cálculos realizados para la determinación de los espesores reducidos de los detectores LR-115 Tipo 2, como así mismo de la velocidad de desgaste superficial para un tiempo de grabado de 1.5 h (90 min). Se realizó en primer lugar la medición de los espesores de 3 detectores escogidos al azar del lote empleado para el monitoreo del primer periodo, cuyo valor fue de: $(111,9 \pm 0,1) \mu\text{m}$.

Tabla 4.4: Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el primer periodo.

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_A (μm)	h_B (μm)	A ($\mu\text{m}/\text{h}$)	B ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-3	$5,5 \pm 0,1$	$7,1 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,1$
C13-4	$6,2 \pm 0,1$	—	$4,1 \pm 0,1$	—
C13-5	$7,2 \pm 0,1$	$6,9 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,1$
C13-6	$6,5 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,2$
C13-7	$5,0 \pm 0,2$	$7,9 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$	$5,2 \pm 0,1$
C13-9	$5,8 \pm 0,1$	$6,7 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,1$
C13-10	$5,0 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$
C13-11	—	$6,2 \pm 0,1$	—	$4,1 \pm 0,1$
C13-13	$6,7 \pm 0,1$	$6,9 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,1$
C13-14	$6,6 \pm 0,2$	$6,9 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,1$
C13-15	$5,4 \pm 0,2$	$7,6 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$
C13-16	$5,2 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,1$
C13-17	$5,9 \pm 0,2$	$5,2 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$

(continuación tabla 4.4)

Código del Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_A (μm)	h_B (μm)	A ($\mu\text{m}/\text{h}$)	B ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-18	5,3±0,1	6,8±0,2	3,5±0,1	4,6±0,1
C13-19	5,0±0,1	6,2±0,1	3,4±0,1	4,1±0,1
C13-20	5,3±0,1	5,1±0,1	3,5±0,1	3,4±0,1
C13-21	7,2±0,1	5,6±0,1	4,8±0,1	3,7±0,1
C13-22	6,4±0,2	5,8±0,2	4,3±0,1	3,9±0,2
C13-23	—	6,6±0,1	—	4,4±0,1
C13-24	—	4,8±0,2	—	3,2±0,1
C13-25	7,3±0,2	5,0±0,1	4,9±0,1	3,4±0,1
C13-26	6,5±0,1	6,4±0,1	4,4±0,1	4,3±0,1

—: Detector perdido.

h_A , h_B : Espesores reducidos en los detectores A y B respectivamente después del grabado químico.

V_B : Velocidad de desgaste superficial del detector.

Relaciona el espesor reducido entre el tiempo de grabado de los detectores (en horas).

La figura 4.1 muestra las variaciones de las velocidades de desgaste superficial de los detectores expuestos durante el primer periodo de monitoreo a partir de los datos obtenidos desde la tabla 4.4, comparadas con el rango $[2.7-4.7]\mu\text{m}/\text{h}$ para un detector con espesor residual entre $[5-8]\mu\text{m}$ ^[25].

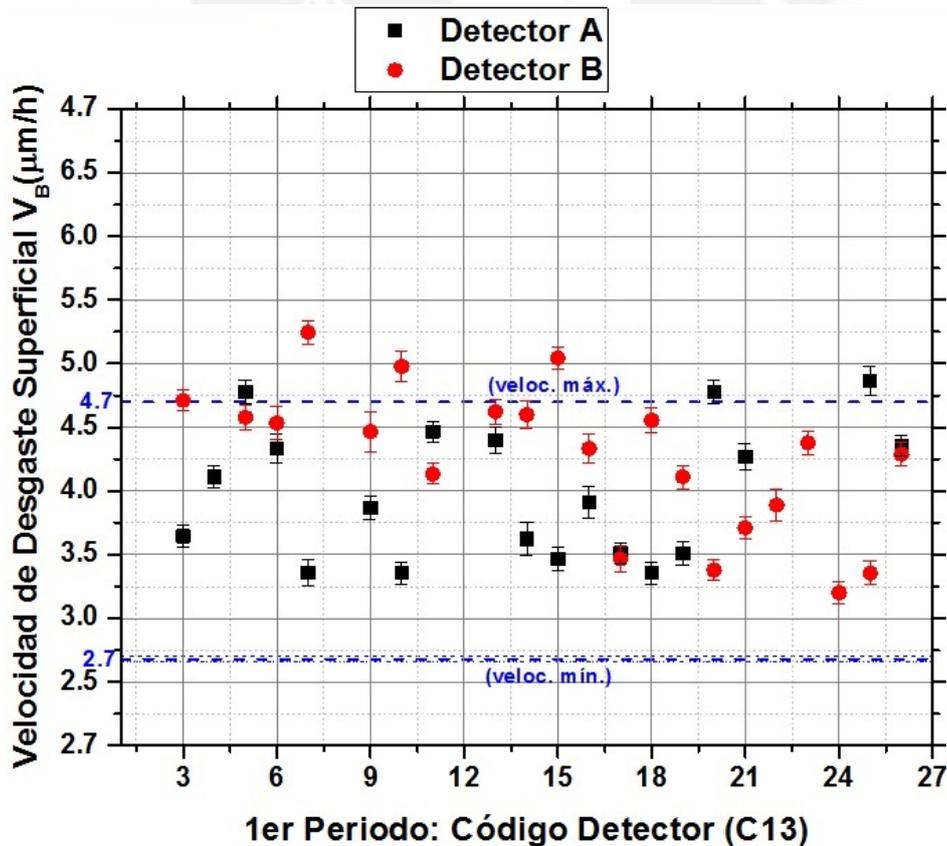


Figura 4.1: Variación de la velocidad de desgaste superficial (V_B ($\mu\text{m}/\text{h}$)) de los detectores analizados durante el primer periodo.

De los 40 detectores analizados, el 10% (4 detectores) se encontraron fuera del rango

óptimo de velocidades de desgaste superficial (V_B). Estas variaciones de las velocidades que dependen de los espesores reducidos medidos anteriormente varían de acuerdo a factores ambientales, de la ubicación y del tipo de habitaciones. La desviación máxima de la velocidad de desgaste superficial con respecto al valor superior ($4,7 \mu\text{m}/\text{h}$) de referencia fue de 10,64% correspondiente a la vivienda C13-7 de longitud y latitud (-12,0771;-76,9982), ubicado en la sala del quinto piso (S_5).

La *figura 4.2* refleja la ubicación de los puntos (viviendas, $n=22$) monitoreadas en el distrito bajo estudio durante el primer periodo.



Figura 4.2: Ubicación de las viviendas monitoreadas ($n=22$) en el distrito de San Luis durante el primer periodo.

La grilla central de la *figura 4.2* concentra el mayor número de viviendas monitoreadas (17 en total). El resto de las viviendas se distribuyen en las grillas vecinas. Cabe precisar que en este último caso no se logró cubrir con los puntos mínimos requeridos de monitoreo (4 puntos/grilla) de acuerdo a la metodología planteada, pero esto fue compensado debido a que la mayoría de las grillas no cubre en su totalidad el área de extensión del distrito, siendo su densidad poblacional menor que en la grilla central.

En la *tabla 4.5* se muestra los cálculos obtenidos de las densidades de trazas y de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las 22 viviendas monitoreadas, empleando las dos hipótesis planteadas anteriormente, que son: presencia de Rn-222 con su progenie y de la presencia mixta de Rn-222 y Rn-220 con su respectiva progenie.

Tabla 4.5: Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (1er periodo).

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_A	ρ_B	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				A	B	Prom.	A	B	Prom.
C13-3	76	209±21	219±22	76±11	80±11	78±16	61±9	64±9	62±13
C13-4	60	57±9	—	26±5	—	26±5	21±4	—	21±4
C13-5	64	121±28	312±29	133±18	142±19	137±6	106±15	114±16	110±5
C13-6	61	291±28	312±29	133±18	142±19	137±6	106±15	114±16	110±5
C13-7	60	69±10	61±9	32±6	28±5	30±3	25±5	23±4	24±2
C13-9	60	141±16	172±19	65±10	80±12	73±8	52±8	64±9	58±6
C13-10	60	80±11	100±13	37±6	46±8	42±5	30±5	37±6	33±4
C13-11	61	—	140±16	—	64±10	64±10	—	51±8	51±8
C13-13	68	120±14	84±11	49±8	34±6	42±8	39±6	28±5	33±6
C13-14	63	377±34	342±31	166±22	151±21	158±9	133±18	120±16	127±7
C13-15	62	334±31	366±33	150±20	164±22	157±8	120±16	131±18	125±7
C13-16	68	243±24	301±28	99±14	123±17	111±12	79 ±11	98±14	89±10
C13-17	65	78±11	42±7	33±6	18±4	26±8	27±5	14±3	20±6
C13-18	65	152±17	104±13	65±10	45±7	55±11	52±8	36±6	44±8
C13-19	66	196±20	219±22	82±12	92±13	87±6	66±10	74±10	70±5
C13-20	63	223±23	238±24	98±14	105±15	102±5	79±11	84±12	81±4
C13-21	61	49±8	79±11	22±4	36±6	29±7	18±3	29±5	23±6
C13-22	61	172±19	88±12	78±12	40±7	59±19	63±9	32±5	47±16
C13-23	61	—	61±9	—	28±5	28±5	—	22±4	22±4
C13-24	62	—	148±17	—	66±10	66±10	—	53±8	53±8
C13-25	65	108±13	130±15	46±7	56±9	51±5	37±6	44±7	41±4
C13-26	62	182±19	149±17	82±12	67±10	74±8	65±10	53±8	59±6

t_{exp} : tiempo de exposición.

—: Detector perdido.

Hipótesis 1. Criterio basado sólo a la presencia del gas Rn-222 y progenitores en interiores.

Hipótesis 2. Criterio basado a presencia tanto de Rn-222 y Rn-220 con sus respectivos progenitores en interiores.

La *tabla 4.6* muestra los valores promedios e incertidumbres ($MA + \sigma$) de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del tipo y ubicación de las habitaciones para ambas hipótesis planteadas.

Tabla 4.6: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (1er periodo).

Tipo de Hab	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	$MA + \sigma$
Sala (S)	1	99±21	73±9	37±15	—	28±5	60±18
	2	79±17	49±7	30±12	—	23±4	45±14
Dormitorio (D)	1	109±23	73±8	57±8	28±5	32±6	60±16
	2	104±19	58±6	39±7	22±4	25±5	50±16
Cocina (C)	1	147±15	—	—	45±7	—	96±52
	2	117±12	—	—	36±6	—	76±41
Comedor (Co)	1	26±5	67±10	—	—	—	46±21
	2	21±4	53±8	—	—	—	37±17
Baño (B)	1	—	—	92±13	—	—	92±13
	2	—	—	74±10	—	—	74±10
Salón de Belleza (SB)	1	38±4	—	—	—	—	38±4
	2	30±3	—	—	—	—	30±3
$MA + \sigma$	1	84±24	71±6	58±13	28±5	30±4	
	2	70±20	53±20	45±11	22±4	24±3	

Además la *figura 4.3* muestra que la concentración promedio de la actividad del Rn-222 fue mayor en el primer piso con valores de (84 ± 24) Bq/m³ y (70 ± 20) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás pisos, como se predice en la teoría. Con respecto al tipo de habitación, el mayor valor se registró en cocinas (n=3) de (96 ± 52) Bq/m³ y (76 ± 41) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás tipos de habitaciones. Habitaciones como baños y salas junto

a dormitorios registraron el segundo y tercer mayor valor respectivamente.

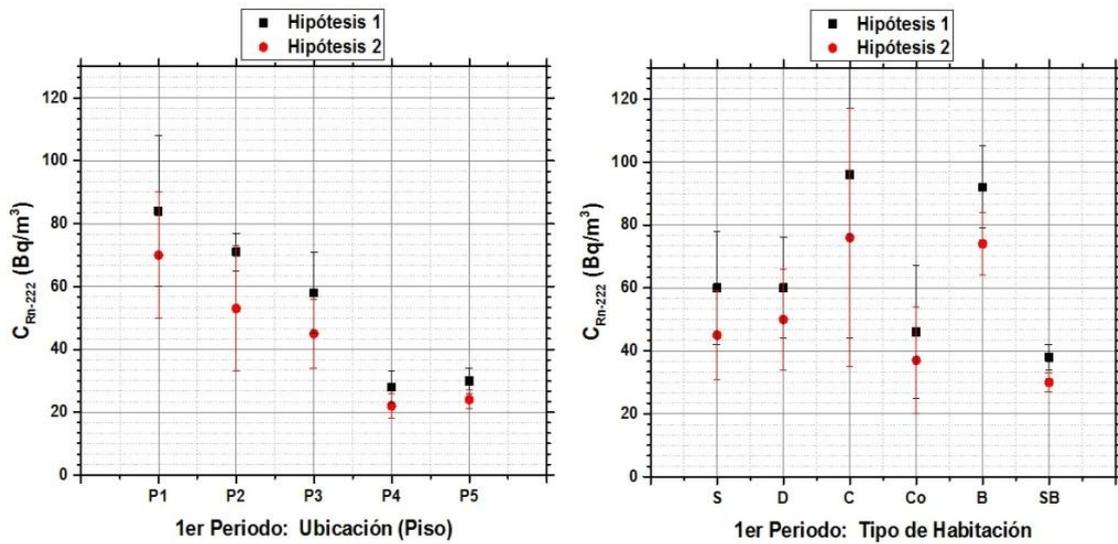


Figura 4.3: Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada.

Los valores estadísticos obtenidos desde la *tabla 4.5* se resumen en la *tabla 4.7* a través de la media aritmética (MA) e incertidumbre (σ) de (72 ± 8) Bq/m³ y (57 ± 7) Bq/m³, media geométrica (MG) de 62 Bq/m³ y 50 Bq/m³, desviación estándar geométrica (DEG) de 2 Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Los valores mínimos y máximos de la concentración de la actividad de Rn-222 fueron de [26-158] Bq/m³ y [21-127] Bq/m³ para ambas hipótesis.

Tabla 4.7: Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (1er periodo).

Pts. De Medición	Hipótesis	C_{Rn-222} (Bq/m ³)				
		MA $\pm \sigma$	MG	DEG	Valor Inf.	Valor Sup.
n = 22	1	72 \pm 8	62	2	26	158
	2	57 \pm 7	50	2	21	127

Los parámetros calculados (MG y DEG) desde la *tabla 4.7* son obtenidos a partir de la distribución de frecuencias representado por el número de viviendas en función concentraciones de la actividad del Rn-222 durante el primer periodo de monitoreo, que es representado en la *figura 4.4*.

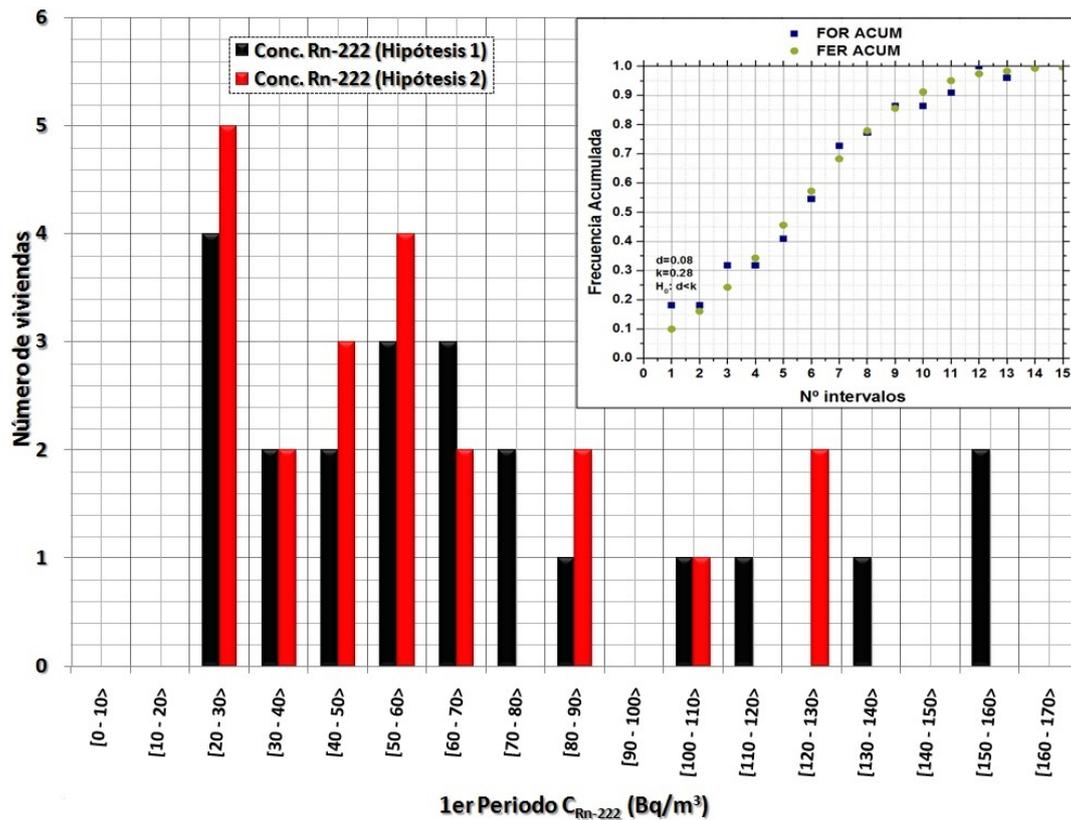


Figura 4.4: Distribución de frecuencias de para las C_{Rn-222} determinadas en el primer periodo.

Estas distribuciones de frecuencias tienden a una distribución Log-normal. Por lo tanto, si esta hipótesis es cierta, los logaritmos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Normal. Este proceso fue contrastado a través del test estadístico Kolmogorov-Smirnov. Los resultados obtenidos de acuerdo a la imagen superior de la *figura 4.4* se detalla en la *tabla 4.8*.

Tabla 4.8: Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para $n=22$ (1er periodo).

Pts. de Medición	d ABS(FOR _{acum} -FER _{acum})	k (tabla)	D<k H ₀	Curtosis	Asimetría
n=22	0,08 intervalo 1	0,28	0,08<0,28 VERDADERO	-0,82	0,07

El valor $k=0,28$ es obtenido desde tablas estadísticas para el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para un conjunto de datos $n=22$, con $p\text{-value}=1$ (para ambas hipótesis), para un nivel de significancia $\alpha=0,05$.
 FOR_{acum}: Frecuencia Observada Relativa Acumulada.
 FER_{acum}: Frecuencia Esperada Relativa Acumulada.
 H₀: Hipótesis nula (cumple una distribución normal).

El parámetro estadístico “d” obtenido desde la diferencia máxima positiva entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas relativas acumuladas (FOR) y (FER) respectivamente fue de 0,08 en el intervalo 1 (de tamaño 0,16 y rango [3,27-5,07]) de la imagen superior de la *figura 4.4*, que de acuerdo al contraste de hipótesis ($0,08<0,28$) la hipótesis nula no se puede rechazar. Los valores de curtosis y asimetría reflejan la forma y orientación de la distribución normal de los logaritmos de las concentraciones. Con

respecto a la curtosis el valor fue de -0,82 (platicúrtica) y el coeficiente de asimetría de 0,07 (orientación hacia la derecha).

La *tabla 4.9* refiere a la probabilidad acumulada de que las viviendas superen ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia fueron (≥ 100 , ≥ 148 y ≥ 200) Bq/m³.

Tabla 4.9: Probabilidades acumuladas para una distribución normal (1er periodo).

Parámetro	Criterio	P[Z ≤ ln(C _{Rn-222})](Bq/m ³)		
		≥100	EPA (≥148)*	NRPB(≥200)**
Probabilidad (%)	Hipótesis 1	19,22 % (Z=0,87)	5,71 % (Z=1,58)	1,66 % (Z=2,13)
$Z = \frac{\ln(NR) - \ln(MG)}{\ln(DEG)}$	Hipótesis 2	10,03 % (Z=1,28)	2,33 % (Z=1,99)	0,55 % (Z=2,54)

EPA*: Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.

NRPB**: Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña. Este mismo valor también fue adoptado por el Organismo Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

De acuerdo a la *tabla 4.9* bajo la hipótesis 1, la probabilidad de que las casas monitoreadas durante el primer periodo superen los niveles de referencia de la EPA y del NRPB son del 5,71 % y del 1,66 % respectivamente, mientras la probabilidad bajo la hipótesis 2, son de 2,33 % y 0,55 % respectivamente.

4.3. Segundo periodo

El segundo periodo de muestreo se llevó a cabo desde diciembre del 2015 hasta marzo del 2016, durante las estaciones verano-otoño. La temperatura promedio fue de (23,28±1,75) °C y la humedad relativa de (79,95±2,34) %. La *tabla 4.10* es un indicador del número de habitaciones monitoreadas en función del tipo y ubicación.

Tabla 4.10: Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 2do periodo.

Tipo de habitación	Codificación	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Total de habitaciones
Sala	S	14	8	5	2	1	30
Dormitorio	D	17	16	14	2	1	50
Cocina	C	8	—	2	1	—	11
Comedor	Co	1	—	—	—	—	1
Baño	B	—	—	1	—	—	1
Hall	H	1	—	—	—	—	1
Oficina	O	—	—	1	—	—	1
Almacén	A	2	—	—	—	—	2
Entrada	E	5	—	—	—	—	5
Pasadizo	P	—	2	—	—	—	2
Salón de Belleza	SB	2	—	—	—	—	2
Sastrería	St	2	—	—	—	—	2
Taller	T	2	—	—	—	—	2
Total:		54	26	23	5	2	110

El mayor tipo de habitación monitoreada fueron en dormitorios 45,5 %, seguidamente de salas (27,3 %). Con respecto a la ubicación, el 49,1 % y el 23,6 % del total fueron en el primer y segundo piso respectivamente.

En la *tabla 4.11* se muestra los cálculos realizados para la determinación de los espesores reducidos de los detectores LR-115 Tipo 2, como así mismo de la velocidad de desgaste superficial para un tiempo de grabado de 1.5 h (90 min). Se realizó en primer lugar la medición de los espesores de 3 detectores escogidos al azar del lote empleado para el monitoreo del segundo periodo, cuyo valor fue de: $(111,8 \pm 0,1) \mu\text{m}$. La

Tabla 4.11: Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el segundo periodo.

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_C (μm)	h_D (μm)	C ($\mu\text{m}/\text{h}$)	D ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-5	7,1±0,1	5,1±0,1	4,7±0,1	3,4±0,1
C13-7	5,1±0,1	7,7±0,1	3,4±0,1	5,1±0,1
C13-8	—	6,2±0,1	—	4,2±0,1
C13-11	5,3±0,1	7,0±0,1	3,5±0,1	4,7±0,1
C13-12	—	6,7±0,2	—	4,5±0,1
C13-13	—	6,4±0,2	—	4,3±0,1
C13-14	6,1±0,1	6,9±0,1	4,1±0,1	4,6±0,1
C13-17	6,3±0,1	5,6±0,1	4,2±0,1	3,8±0,1
C13-18	11,6±0,1	10,9±0,1	7,8±0,1	7,2±0,1
C13-19	5,7±0,1	6,0±0,1	3,8±0,1	4,0±0,1
C13-20	7,1±0,1	7,0±0,1	4,8±0,1	4,7±0,1
C13-21	6,2±0,1	5,4±0,1	4,1±0,1	3,6±0,1
C13-22	5,4±0,1	4,6±0,1	3,6±0,1	3,1±0,1
C13-23	10,9±0,1	6,3±0,1	7,3±0,1	4,2±0,1
C13-24	6,6±0,1	7,1±0,1	4,4±0,1	4,7±0,1
C13-28	6,1±0,1	5,8±0,1	4,1±0,1	3,9±0,1
C13-29	5,9±0,1	6,6±0,1	3,9±0,1	4,4±0,1
C13-31	7,0±0,1	6,3±0,2	4,7±0,1	4,2±0,1
C13-33	11,7±0,1	11,7±0,1	7,8±0,1	7,8±0,1
C13-35	6,6±0,1	6,6±0,1	4,4±0,1	4,4±0,1
C13-36	11,0±0,1	10,9±0,1	7,3±0,1	7,3±0,1
C13-37	4,9±0,1	4,6±0,1	3,3±0,1	3,1±0,1
C13-38	10,9±0,1	6,3±0,1	7,3±0,1	4,2±0,1
C13-39	7,1±0,1	7,0±0,1	4,7±0,1	4,7±0,1
C13-40	6,2±0,1	7,1±0,1	4,1±0,1	4,7±0,1
C13-41	6,6±0,1	6,6±0,1	4,4±0,1	4,4±0,1
C13-42	6,8±0,1	6,1±0,1	4,6±0,1	4,0±0,1
C13-43	7,6±0,1	6,2±0,1	5,0±0,1	4,1±0,1
C13-44	5,0±0,1	—	3,3±0,1	—
C13-45	4,7±0,1	7,0±0,1	3,1±0,1	4,7±0,1
C13-46	6,3±0,1	6,1±0,2	4,2±0,1	4,1±0,1
C13-47	7,1±0,1	—	4,7±0,1	—
C13-48	6,5±0,2	6,6±0,1	4,3±0,1	4,4±0,1
C13-49	6,7±0,1	—	4,5±0,1	—
C13-50	6,1±0,1	6,5±0,2	4,1±0,1	4,4±0,1
C13-51	7,0±0,1	6,8±0,2	4,7±0,1	4,5±0,1
C13-52	—	7,4±0,1	—	4,9±0,1
C13-54	5,6±0,1	5,1±0,1	3,7±0,1	3,4±0,1
C13-55	6,5±0,2	6,9±0,1	4,4±0,2	4,6±0,1
C13-56	5,8±0,1	6,4±0,2	3,9±0,1	4,3±0,1

(continuación tabla 4.12)

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_C (μm)	h_D (μm)	C ($\mu\text{m}/\text{h}$)	D ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-57	7,0±0,1	6,9±0,1	4,7±0,1	4,6±0,1
C13-58	—	7,8±0,1	—	5,2±0,1
C13-60	5,4±0,1	6,5±0,1	3,6±0,1	4,4±0,1
C13-61	5,5±0,2	7,5±0,2	3,7±0,1	5,0±0,1
C13-62	6,1±0,2	6,7±0,2	4,1±0,1	4,4±0,1
C13-64	7,1±0,1	6,4±0,2	4,7±0,1	4,3±0,1
C13-66	5,8±0,1	6,6±0,2	3,9±0,1	4,4±0,1
C13-67	—	6,4±0,2	—	4,3±0,1
C13-68	5,8±0,1	—	3,8±0,1	—
C13-69	6,6±0,1	6,6±0,3	4,4±0,1	4,4±0,2
C13-70	6,5±0,2	6,2±0,1	4,3±0,1	4,1±0,1
C13-71	5,1±0,1	5,1±0,1	3,4±0,1	3,4±0,1
C13-72	7,0±0,1	5,6±0,1	4,7±0,1	3,8±0,1
C13-73	7,3±0,2	—	4,9±0,1	—
C13-74	6,2±0,1	6,4±0,1	4,2±0,1	4,3±0,1
C13-75	5,6±0,1	6,6±0,3	3,8±0,1	4,4±0,2
C13-76	6,3±0,3	6,0±0,1	4,2±0,2	4,0±0,1
C13-77	6,6±0,1	6,0±0,1	4,4±0,1	4,0±0,1
C13-78	6,8±0,1	6,5±0,2	4,6±0,1	4,3±0,1
C13-79	4,8±0,1	7,2±0,1	3,2±0,1	4,8±0,1
C13-80	—	5,6±0,1	—	3,8±0,1

—: Detector perdido.

h_C , h_D : Espesores reducidos en los detectores C y D respectivamente después del grabado químico.

V_B : Velocidad de desgaste superficial del detector.

Relaciona el espesor reducido entre el tiempo de grabado de los detectores (en horas).

figura 4.5 muestra las variaciones de las velocidades de desgaste superficial de los detectores expuestos durante el segundo periodo de monitoreo, comparadas con el rango $[2.7-4.7]\mu\text{m}/\text{h}$ para un detector con espesor residual entre $[5-8]\mu\text{m}$ ^[25].

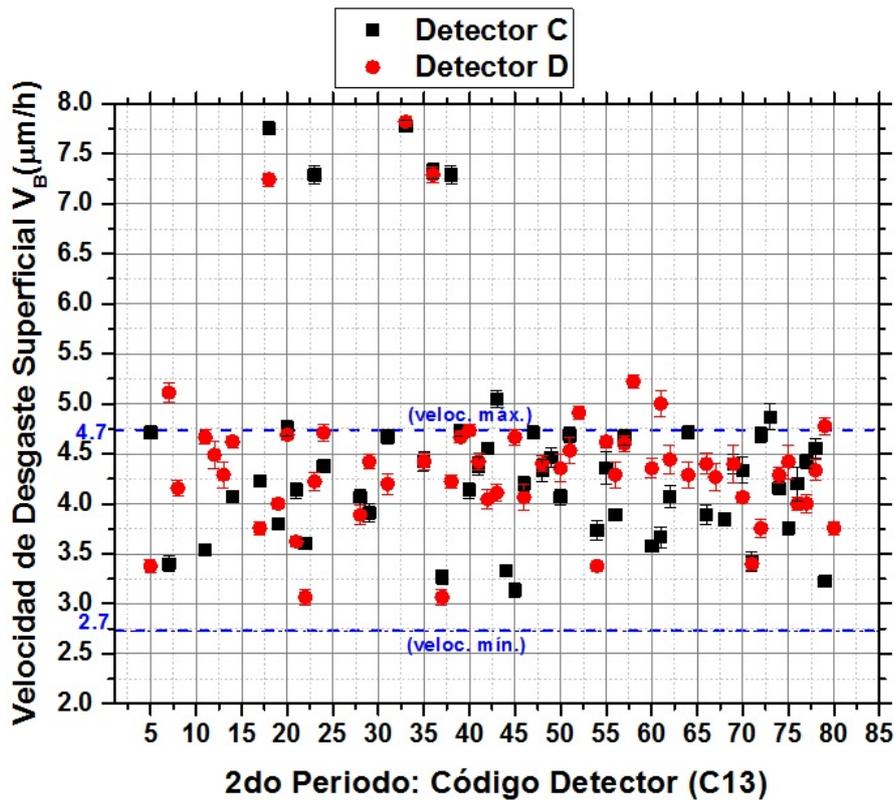


Figura 4.5: Variación de la velocidad de desgaste superficial (V_B ($\mu\text{m}/\text{h}$)) de los detectores analizados durante el segundo periodo.

De los 110 detectores analizados, el 12,72 % (14 detectores) se encontraron fuera del rango óptimo de velocidades de desgaste superficial (V_B). Aunque estas variaciones de las velocidades varían de acuerdo a factores ambientales, de la ubicación y del tipo de habitaciones, un grupo de detectores presentaron una desviación máxima de la velocidad de desgaste superficial mayor al 55,56 % con respecto del valor de referencia $4,7 \mu\text{m}/\text{h}$. La explicación a ello se debe a que se identificaron que este grupo de detectores presentó espesores iniciales menores de $12 \mu\text{m}$ y se contrastó con los detectores de otros lotes, siendo estos espesores no mayor de $6 \mu\text{m}$ (falla del lote). Descartando este grupo de detectores, la desviación máxima de la velocidad de desgaste superficial con respecto al valor superior ($4,7 \mu\text{m}/\text{h}$) de referencia fue de 10,63 % correspondiente a la vivienda C13-58 de longitud y latitud (-12,0787, -77,0082), ubicado en la entrada del lugar de trabajo del primer piso (E_1).

La *figura 4.6* refleja la ubicación de los puntos (viviendas, $n=61$) monitoreadas en el distrito bajo estudio durante el segundo periodo.



Figura 4.6: Ubicación de las viviendas monitoreadas ($n=61$) en el distrito de San Luis durante el segundo periodo.

Las grillas de 1 km^2 central y laterales de la *figura 4.6* concentra el mayor número de viviendas monitoreadas. Cabe precisar que se logró cubrir con los puntos mínimos requeridos de monitoreo (4 puntos/grilla) de acuerdo a la metodología planteada. Aunque dos grillas fueron la excepción, éstas no cubrieron en su totalidad el área de extensión del distrito, siendo su densidad poblacional menor que en la grilla central y laterales.

En la *tabla 4.12* se muestra los cálculos obtenidos de las densidades de trazas y de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las 61 viviendas monitoreadas, empleando las dos hipótesis planteadas anteriormente.

Tabla 4.12: Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (2do periodo).

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_C	ρ_D	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				C	D	Prom.	C	D	Prom.
C13-5	66	80±11	108±13	34±6	45±7	40±6	27±5	36±6	32±5
C13-7	66	60±9	51±8	25±5	22±4	23±3	20±4	17±3	19±2
C13-8	65	—	152±17	—	65±10	65±10	—	52±8	52±8
C13-11	68	87±12	136±16	35±6	55±8	45±10	28±5	44±7	36±8
C13-12	41	—	196±20	—	132±19	132±19	—	106±15	106±15
C13-13	65	—	96±12	—	41±7	41±7	—	33±5	33±5
C13-14	62	299±28	263±26	134±18	118±16	126±9	107±15	94±13	101±7
C13-17	58	73±10	82±11	35±6	39±7	37±3	28±5	31±5	30±3
C13-18	61	S.T.	S.T.	—	—	—	—	—	—

(continuación tabla 4.12)

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_C	ρ_D	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				C	D	Prom.	C	D	Prom.
C13-19	65	186±20	196±20	79±12	84±12	81±4	63±9	67±10	65±3
C13-20	65	208±21	219±22	89±13	94±13	91±4	71±10	75±11	73±3
C13-21	64	49±8	124±15	21±4	54±8	38±17	17±3	43±7	30±13
C13-22	64	148±17	153±17	64±10	67±10	65±3	51±8	53±8	52±3
C13-23	70	S.T.	37±6		37±6	29±5		29±5	29±2
C13-24	68	260±25	143±16	106±15	59±9	82±24	85±12	47±7	66±19
C13-28	61	197±21	183±19	90±13	83±12	87±4	72±10	67±10	69±4
C13-29	62	296±28	268±26	132±18	120±17	126±7	106±15	96±13	101±6
C13-31	69	171±19	152±17	69±10	61±9	65±5	55±8	49±7	52±4
C13-33	66	S.T.	S.T.						
C13-35	66	72±10	119±14	30±5	50±8	40±10	24±4	40±6	32±8
C13-36	64	S.T.	S.T.						
C13-37	70	343±32	423±37	136±19	168±22	152±16	109±15	134±18	121±13
C13-38	63	S.T.	88±12		39±6	39±6		31±5	31±5
C13-39	64	99±13	124±15	43±7	54±8	48±6	34±6	43±7	39±5
C13-40	65	242±24	157±17	104±15	67±10	85±19	83±12	53±8	68±15
C13-41	62	210±22	299±28	94±13	134±18	114±20	75±11	107±15	91±16
C13-42	63	86±12	121±15	38±6	53±8	46±8	30±5	43±7	36±7
C13-43	63	91±12	100±13	40±7	44±7	42±3	32±5	35±6	34±3
C13-44	62	51±8	—	23±4	—	23±4	18±4	—	18±4
C13-45	63	120±14	143±16	53±8	63±10	58±6	42±7	50±8	46±5
C13-46	63	124±15	104±13	55±9	46±7	50±5	44±7	37±6	40±4
C13-47	63	107±13	—	47±8	—	47±8	38±6	—	38±6
C13-48	63	78±11	71±10	34±6	31±6	33±2	27±5	25±4	26±2
C13-49	63	128±15	—	56±9	—	56±9	45±7	—	45±7
C13-50	63	97±12	99±13	43±7	44±7	43±2	34±6	35±6	34±2
C13-51	65	54±9	103±13	23±4	44±7	34±11	19±4	35±6	27±9
C13-52	63	—	37±7	—	16±3	16±3	—	13±3	13±3
C13-54	66	182±19	209±21	77±11	88±13	82±6	61±9	70±10	66±5
C13-55	66	147±17	208±21	62±9	87±13	75±13	49±7	70±10	60±11
C13-56	112	101±13	118±14	25±4	29±5	27±3	20±3	23±4	22±2
C13-57	68	179±19	160±18	73±11	65±10	69±5	58±9	52±8	55±4
C13-58	65	—	46±8	—	19±4	19±4	—	16±3	16±3
C13-60	96	52±8	59±9	15±3	17±3	16±2	12±2	14±3	13±2
C13-61	68	84±11	120±14	34±6	49±8	42±8	28±5	39±6	33±6
C13-62	70	107±13	138±16	42±7	55±8	49±7	34±5	44±7	39±5
C13-64	114	160±18	132±15	39±6	32±5	36±4	31±5	26±4	28±3
C13-66	69	116±14	98±13	47±7	39±6	43±4	37±6	31±5	34±3
C13-67	112	—	959±77	—	238±30	238±15	—	190±24	190±24
C13-68	78	197±21	—	70±10	—	70±10	56±8	—	56±8
C13-69	77	102±13	84±11	37±6	30±5	34±4	29±5	24±4	27±3
C13-70	78	180±19	124±15	64±9	44±7	54±10	51±7	35±5	43±8
C13-71	78	149±17	109±14	53±8	39±6	46±7	42±6	31±5	37±6
C13-72	78	87±12	101±13	31±5	36±6	33±3	25±4	29±5	27±3
C13-73	78	71±10	—	25±4	—	25±4	20±4	—	20±4
C13-74	77	258±25	242±24	93±13	87±12	90±4	74±10	70±10	72±3
C13-75	104	180±19	198±21	48±7	53±8	50±3	38±6	42±6	40±3
C13-76	104	79±11	72±10	12±2	10±2	11±2	10±2	8±2	9±1
C13-77	105	171±19	153±17	21±4	19±3	20±2	17±3	15±3	16±2
C13-78	76	93±12	67±10	34±6	24±4	29±5	27±4	19±3	23±4
C13-79	78	118±14	103±13	42±7	37±6	39±3	33±5	29±5	31±3
C13-80	78	—	42±7	—	15±3	15±2	—	12±2	12±1

t_{exp} : tiempo de exposición.
—: Detector perdido.

Hipótesis 1. Criterio basado sólo a la presencia del gas Rn-222 y progenitores en interiores.

Hipótesis 2. Criterio basado a presencia tanto de Rn-222 y Rn-220 con sus respectivos progenitores en interiores.

Fueron 58 viviendas monitoreadas de manera efectiva, debido a que el grupo de detectores descartados para el análisis no registraron trazas por las razones explicadas anteriormente.

La tabla 4.13 muestra los valores promedios e incertidumbres ($MA + \sigma$) de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del tipo y ubicación de las habitaciones para ambas hipótesis planteadas.

Tabla 4.13: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (2do periodo).

Tipo de Hab.	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	MA+ σ
Sala (S)	1	59±10	56±9	32±4	24±4	22±4	39±9
	2	47±8	45±7	26±3	19±3	19±3	31±7
Dormitorio (D)	1	81±8	59±6	40±5	27±4	25±5	46±11
	2	65±7	49±5	32±4	21±4	20±4	37±9
Cocina (C)	1	87±28	—	—	25±4	—	56±31
	2	70±22	—	—	20±4	—	45±22
Comedor (Co)	1	104±15	—	—	—	—	104±15
	2	83±12	—	—	—	—	83±12
Baño (B)	1	—	—	84±12	—	—	84±12
	2	—	—	67±10	—	—	67±10
Hall (H)	1	34±6	—	—	—	—	34±6
	2	28±5	—	—	—	—	28±5
Oficina (O)	1	—	—	37±6	—	—	37±6
	2	—	—	29±5	—	—	29±5
Almacén (A)	1	93±28	—	—	—	—	93±28
	2	74±31	—	—	—	—	74±31
Entrada (E)	1	45±19	—	—	—	—	45±19
	2	36±15	—	—	—	—	36±15
Pasadizo (P)	1	—	66±17	—	—	—	66±17
	2	—	53±14	—	—	—	53±14
Salón de Belleza (SB)	1	37±2	—	—	—	—	37±2
	2	30±2	—	—	—	—	30±2
Sastrería (St)	1	33±3	—	—	—	—	33±3
	2	27±2	—	—	—	—	27±2
Taller (T)	1	50±2	—	—	—	—	50±2
	2	40±2	—	—	—	—	40±2
MA+ σ	1	57±10	45±6	38±12	19±3	16±4	
	2	45±8	37±5	31±10	15±2	12±3	

Además la figura 4.7 muestra que la concentración promedio de la actividad del Rn-222 fue mayor en el primer piso con valores de (57 ± 10) Bq/m³ y (45 ± 8) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás pisos, como se predice en la teoría. Con respecto al tipo de habitación, el mayor valor fue en el comedor, correspondiente un solo punto de monitoreo (n=1), cuyos valores fueron (104 ± 15) Bq/m³ y (83 ± 12) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. Este valor de concentración determinado en esta habitación representa el 22,35 % por encima del valor promedio del punto de medición, ubicado en longitud y latitud (-12;0777; -77;0006) del distrito. En este caso, de acuerdo a la característica de la vivienda (apéndice D), se constató que la habitación presentó una menor tasa de ventilación comparada con la otra habitación monitoreada (sala) en el mismo punto.

Además otro tipo de habitación donde las concentraciones fueron altas con respecto a los demás fueron en almacenes de los lugares de trabajo (n=2) de (93 ± 28) Bq/m³ y (74 ± 31) Bq/m³. Esto es debido porque se observó que en estos tipos de habitaciones tienen bajo índice de ventilación.

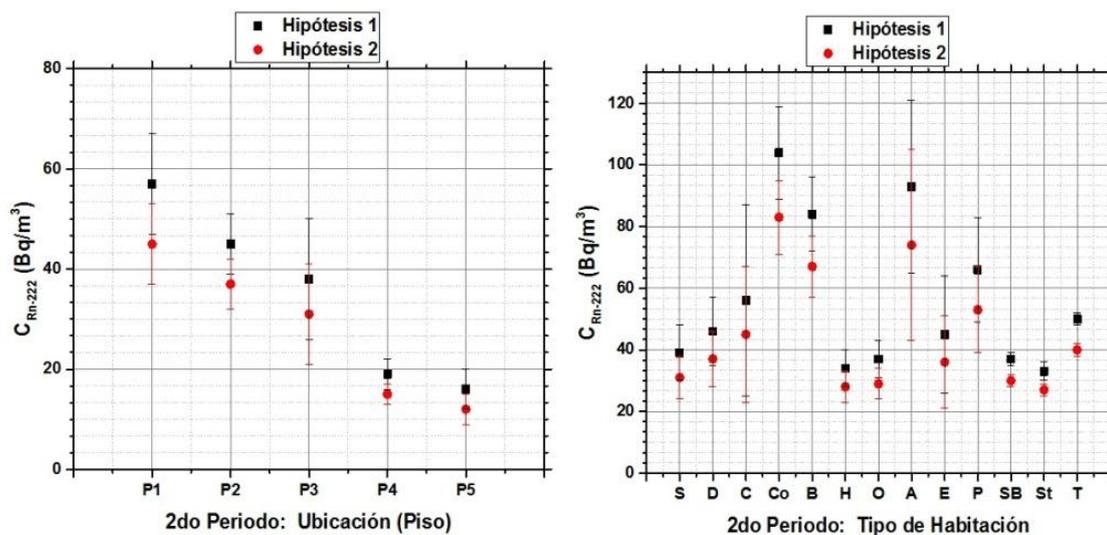


Figura 4.7: Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (2do periodo).

Los valores estadísticos obtenidos desde la *tabla 4.12* se resumen en la *tabla 4.14* a través de la media aritmética (MA) e incertidumbre (σ) de (59 ± 5) Bq/m³ y (47 ± 4) Bq/m³, media geométrica (MG) de 50 Bq/m³ y 40 Bq/m³, desviación estándar geométrica (DEG) de 2 Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Los valores mínimos y máximos de la concentración de la actividad de Rn-222 fueron de [16-238] Bq/m³ y [13-190] Bq/m³ para ambas hipótesis.

Tabla 4.14: Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (2do periodo).

Pts. De Medición	Hipótesis	(Bq/m^3)				
		MA $\pm \sigma$	MG	DEG	Valor Inf.	Valor Sup.
n = 58	1	59 \pm 5	50	2	16	238
	2	47 \pm 4	40	2	13	190

Los parámetros calculados (MG y DEG) desde la *tabla 4.14* son obtenidos a partir de la distribución de frecuencias representado por el número de viviendas en función concentraciones de la actividad del Rn-222 durante el segundo periodo de monitoreo, que es representado en la *figura 4.8*.

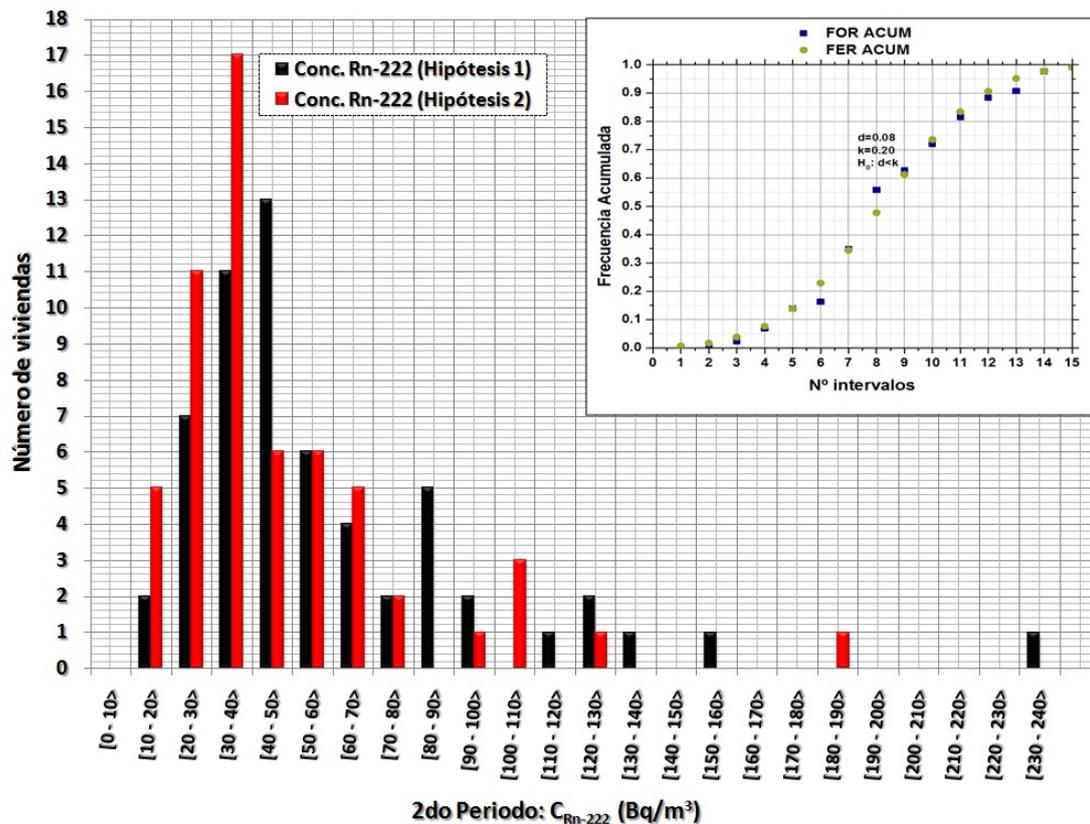


Figura 4.8: Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el segundo periodo.

De acuerdo a la teoría, estas distribuciones de frecuencias tienden a una distribución Log-normal. Por lo tanto, si esta hipótesis es cierta, los logaritmos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Normal. Este proceso fue contrastado a través del test estadístico Kolmogorov-Smirnov. Los resultados obtenidos de acuerdo a la imagen superior de la *figura 4.8* se detalla en la *tabla 4.15*.

Tabla 4.15: Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para $n=58$ (2do periodo).

Pts. de Medición	d ABS(FOR _{acum} -FER _{acum})	k (tabla)	D<k H ₀	Curtosis	Asimetría
n=58	0,08 intervalo 8	0,20	0,08<0,20 VERDADERO	0,27	0,45

El valor $k=0,20$ es obtenido desde tablas estadísticas para el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para un conjunto de datos $n=58$, con $p\text{-value}=0,61$ (para ambas hipótesis), para un nivel de significancia $\alpha=0,05$.
 FOR_{acum}: Frecuencia Observada Relativa Acumulada.
 FER_{acum}: Frecuencia Esperada Relativa Acumulada.
 H₀: Hipótesis nula (cumple una distribución normal).

El parámetro estadístico “d” obtenido desde la diferencia máxima positiva entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas relativas acumuladas (FOR) y (FER) respectivamente fue de 0,08 en el intervalo 8 (de tamaño 0,19 y rango [2,78-5,47]) de la imagen superior de la *figura 4.8*, que de acuerdo al contraste de hipótesis ($0,08<0,20$) la hipótesis nula no se puede rechazar. Los valores de curtosis y asimetría reflejan la forma y orientación de la distribución normal de los logaritmos de las concentraciones.

Con respecto a la curtosis el valor fue de 0,27 (lepticúrtica) y el coeficiente de asimetría de 0,45 (orientación hacia la derecha).

La *tabla 4.16* refiere a la probabilidad acumulada de que las viviendas superen ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia fueron (≥ 100 , ≥ 148 y ≥ 200) Bq/m³.

Tabla 4.16: Probabilidades acumuladas para una distribución normal (2do periodo).

Parámetro	Hipótesis	P[Z ≤ ln(C _{Rn-222})] (Bq/m ³)		
		≥100	EPA (≥148)*	NRPB (≥200)**
Probabilidad (%)	1	10,20 % (Z=1,27)	2,33 % (Z=1,99)	0,55 % (Z=2,54)
Z = $\frac{\ln(NR) - \ln(MG)}{\ln(DEG)}$	2	4,65 % (Z=1,68)	0,82 % (Z=2,40)	0,16 % (Z=2,95)

EPA*: Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.

NRPB**: Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña. Este mismo valor también fue adoptado por el Organismo Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

De acuerdo a la *tabla 4.16* bajo la hipótesis 1, la probabilidad de que las casas monitoreadas durante el primer periodo superen los niveles de referencia de la EPA y del NRPB son del 2,33 % y del 0,55 % respectivamente, mientras la probabilidad bajo la hipótesis 2, son de 0,82 % y 0,16 % respectivamente.

4.4. Tercer periodo

El tercer periodo de muestreo se llevó a cabo desde abril hasta junio del 2016, durante las estaciones de otoño-invierno. La temperatura promedio fue de (19,65±2,56) °C y la humedad relativa de (84,49±2,83) %. La *tabla 4.17* es un indicador del número de habitaciones monitoreadas en función del tipo y ubicación.

Tabla 4.17: Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 3er periodo.

Tipo de habitación	Codificación	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Total de habitaciones
Sala	S	12	11	5	1	3	32
Dormitorio	D	21	12	12	3	3	51
Cocina	C	3	2	2	—	—	7
Almacén	A	3	—	—	—	—	3
Entrada	E	5	—	—	—	—	5
Salón de Belleza	SB	2	—	—	—	—	2
Sastrería	St	2	—	—	—	—	2
Taller	T	2	—	—	—	—	2
Total:		50	25	19	4	6	104

El mayor tipo de habitación monitoreada fueron en dormitorios 49,0 %, seguidamente de salas (30,8 %). Con respecto a la ubicación, el 48,1 % y el 24,0 % del total fueron en el primer y segundo piso respectivamente.

En la *tabla 4.18* se muestra los cálculos realizados para la determinación de los espesores reducidos de los detectores LR-115 Tipo 2, como así mismo de la velocidad de desgaste superficial para un tiempo de grabado de 1.5 h (90 min). Se realizó en primer lugar la medición de los espesores de 3 detectores escogidos al azar del lote empleado para el monitoreo del tercer periodo, cuyo valor fue de: $(111,8\pm 0,1)\mu\text{m}$.

Tabla 4.18: Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el tercer periodo.

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_E (μm)	h_F (μm)	E ($\mu\text{m}/\text{h}$)	F ($\mu\text{m}/\text{h}$)
3	6,6±0,2	5,2±0,1	4,4±0,1	3,4±0,1
5	5,9±0,1	7,0±0,1	3,9±0,1	4,7±0,1
7	6,2±0,2	6,3±0,1	4,2±0,1	4,2±0,1
12	6,4±0,2	6,5±0,1	4,2±0,2	4,4±0,1
14	6,3±0,1	6,3±0,1	4,2±0,1	4,2±0,1
17	5,6±0,1	6,7±0,1	3,8±0,1	4,5±0,1
18	5,7±0,1	6,8±0,1	3,8±0,1	4,6±0,1
20	6,3±0,2	4,6±0,1	4,2±0,1	3,1±0,1
21	6,3±0,1	5,4±0,1	4,2±0,1	3,6±0,1
22	4,6±0,1	6,3±0,2	3,1±0,1	4,2±0,1
23	5,7±0,1	6,3±0,1	3,8±0,1	4,2±0,1
24	6,5±0,2	6,6±0,1	4,3±0,1	4,4±0,1
29	6,0±0,1	6,3±0,2	4,0±0,1	4,2±0,1
30	5,6±0,2	6,2±0,1	3,7±0,1	4,1±0,1
31	6,5±0,1	7,1±0,1	4,3±0,1	4,7±0,1
34	—	6,1±0,1	—	4,0±0,1
36	4,9±0,1	6,3±0,1	3,3±0,1	4,2±0,1
37	5,7±0,1	4,9±0,1	3,8±0,1	3,3±0,1
38	6,5±0,2	5,7±0,1	4,4±0,1	3,8±0,1
39	7,1±0,1	6,4±0,1	4,7±0,1	4,3±0,1
42	5,1±0,2	6,4±0,1	3,4±0,1	4,3±0,1
43	7,0±0,2	5,7±0,2	4,7±0,1	3,8±0,1
44	6,0±0,1	5,9±0,1	4,0±0,1	3,9±0,1
45	—	7,2±0,1	—	4,8±0,1
46	5,7±0,1	6,3±0,1	3,8±0,1	4,2±0,1
47	7,1±0,1	5,4±0,1	4,7±0,1	3,6±0,1
48	5,4±0,1	5,4±0,1	3,6±0,1	3,6±0,1
49	7,2±0,1	5,9±0,1	4,8±0,1	3,9±0,1
50	6,4±0,1	5,4±0,1	4,2±0,1	3,6±0,1
54	5,6±0,2	5,7±0,1	3,7±0,1	3,8±0,1
55	6,3±0,1	6,2±0,1	4,2±0,1	4,1±0,1
57	6,7±0,1	6,1±0,1	4,5±0,1	4,0±0,1
59	4,4±0,1	6,3±0,1	3,0±0,1	4,2±0,1
62	5,6±0,1	6,0±0,1	3,8±0,1	4,0±0,1
64	5,7±0,2	5,9±0,1	3,8±0,1	3,9±0,1
66	6,3±0,3	7,0±0,1	4,2±0,2	4,7±0,1
67	6,0±0,1	5,7±0,2	4,0±0,1	3,8±0,1
68	6,2±0,1	6,0±0,1	4,2±0,1	4,0±0,1
69	6,2±0,1	7,1±0,1	4,1±0,1	4,7±0,1
70	7,2±0,1	5,6±0,1	4,8±0,1	3,7±0,1
72	5,1±0,1	5,2±0,1	3,4±0,1	3,4±0,1
74	6,0±0,1	7,2±0,1	4,0±0,1	4,8±0,1
75	5,8±0,1	6,3±0,3	3,9±0,1	4,2±0,2
76	6,0±0,1	6,5±0,2	4,0±0,1	4,4±0,1

(continuación tabla 4.18)

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_E (μm)	h_F (μm)	E ($\mu\text{m}/\text{h}$)	F ($\mu\text{m}/\text{h}$)
77	6,0±0,2	6,3±0,1	4,0±0,1	4,2±0,1
78	5,6±0,2	6,3±0,2	3,7±0,1	4,2±0,1
79	5,0±0,2	—	—	3,4±0,1
83	7,0±0,1	6,0±0,1	4,6±0,1	4,0±0,1
84	6,1±0,1	5,9±0,1	4,0±0,1	3,9±0,1
88	6,7±0,1	6,3±0,1	4,5±0,1	4,2±0,1
89	—	6,3±0,1	—	4,2±0,1
91	6,2±0,2	5,5±0,1	4,1±0,1	3,7±0,1
92	6,9±0,2	5,4±0,1	4,6±0,1	3,6±0,1
93	4,7±0,1	5,9±0,1	3,1±0,1	4,0±0,1

—: Detector perdido.

h_E , h_F : Espesores reducidos en los detectores E y F respectivamente después del grabado químico.

V_B : Velocidad de desgaste superficial del detector.

Relaciona el espesor reducido entre el tiempo de grabado de los detectores (en horas).

La figura 4.9 muestra las variaciones de las velocidades de desgaste superficial de los detectores expuestos durante el tercer periodo de monitoreo, comparadas con el rango $[2.7-4.7]\mu\text{m}/\text{h}$ para un detector con espesor residual entre $[5-8]\mu\text{m}^{[25]}$.

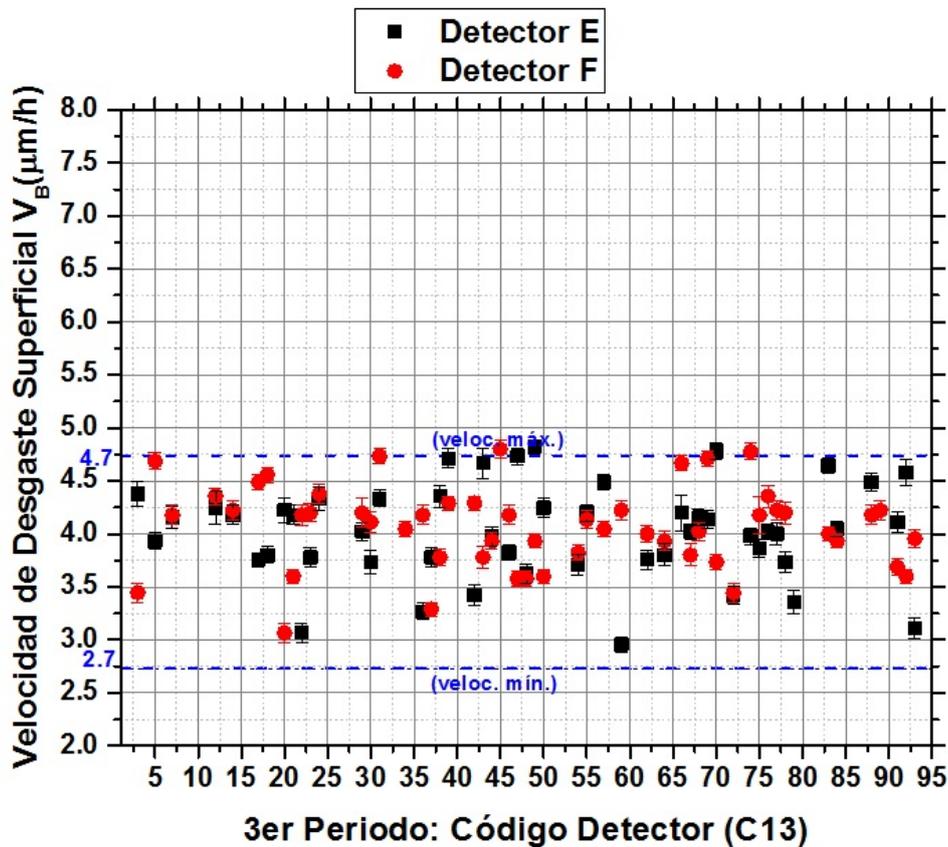


Figura 4.9: Variación de la velocidad de desgaste superficial (V_B ($\mu\text{m}/\text{h}$)) de los detectores analizados durante el tercer periodo.

Considerando los valores promedios de la velocidad del desgaste superficial (V_B) de los

104 detectores analizados, el 3,82 % (4 detectores) se encontraron parcialmente fuera del valor referencial superior. Aunque estas variaciones de las velocidades varían de acuerdo a factores ambientales, de la ubicación y del tipo de habitaciones, la desviación máxima de esta velocidad fue de 2,13 % correspondiente a las viviendas C13-45 (-12,0763; -77,0011) y C13-70 (-12,0807; -76,9882) ubicados en el dormitorio en el primer piso (D¹), C13-74 (-12,0767; -76,9939) y C13-49 (-12,0786; -77,0056) ubicados en la sala del primer piso (S₁) respectivamente.

La *figura 4.10* refleja la ubicación de los puntos (viviendas, n=54) monitoreadas en el distrito bajo estudio durante el tercer periodo.



Figura 4.10: Ubicación de las viviendas monitoreadas (n=54) en el distrito durante el tercer periodo.

Las grillas de 1 km² central y laterales de la *figura 4.10* concentra el mayor número de viviendas monitoreadas. Cabe precisar que en dos grillas no se cubrieron en su totalidad el área de extensión del distrito, esto fue debido a que la densidad poblacional en cada una de ellas fueron menores con respecto al de las grillas central y laterales.

En la *tabla 4.19* se muestra los cálculos obtenidos de las densidades de trazas y de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las 54 viviendas monitoreadas, empleando las dos consideraciones planteadas anteriormente.

Tabla 4.19: Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (3er periodo).

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_E	ρ_F	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				E	F	Prom.	E	F	Prom.
C13-3	75	249±24	307±29	92±13	114±16	103±11	74±10	91±12	82±17
C13-5	88	112±14	153±17	35±6	48±7	42±7	28±4	39±6	33±9
C13-7	95	103±13	98±13	30±5	29±5	29±2	24±4	23±4	23±3
C13-12	86	599±50	472±41	193±25	153±20	173±21	154±20	122±16	138±29
C13-14	88	452±40	232±23	143±19	73±10	108±35	114±15	59±8	86±36
C13-17	94	103±13	74±11	31±5	22±4	26±5	24±4	18±3	21±6
C13-18	94	180±19	131±15	53±8	39±6	46±8	42±6	31±5	37±10
C13-20	73	307±29	316±29	117±16	120±16	118±4	93±13	96±13	95±11
C13-21	87	101±13	156±17	32±5	50±7	41±9	26±4	40±6	33±11
C13-22	88	154±17	192±20	49±7	61±9	55±6	39±6	48±7	44±9
C13-23	89	68±10	91±12	21±4	28±5	25±4	17±3	23±4	20±5
C13-24	87	236±23	263±26	75±11	84±12	80±5	60±8	65±9	64±10
C13-29	91	568±48	529±45	173±23	161±21	167±7	138±18	129±17	134±17
C13-30	88	113±14	96±12	36±6	30±5	33±3	29±5	24±4	26±5
C13-31	117	297±28	314±29	70±10	75±10	73±3	56±8	60±8	58±7
C13-34	73	—	570±48	—	217±28	217±28	—	173±23	173±23
C13-36	95	151±17	108±13	44±7	32±5	38±7	35±5	25±4	30±8
C13-37	104	538±46	512±44	144±19	137±18	140±5	115±15	109±14	112±13
C13-38	95	318±30	182±19	93±13	53±8	73±20	74±10	43±6	58±22
C13-39	117	152±17	143±16	36±5	34±5	35±2	29±4	27±4	28±4
C13-42	90	102±13	196±20	32±5	60±9	46±15	25±4	48±7	37±16
C13-43	73	118±14	166±18	45±7	63±9	54±9	36±6	50±7	43±12
C13-44	90	88±12	114±14	27±5	35±6	31±5	22±4	28±4	25±6
C13-45	65	—	199±21	—	85±12	85±12	—	68±10	68±10
C13-46	73	162±18	116±14	62±9	44±7	53±9	49±7	35±6	42±12
C13-47	71	156±17	183±19	61±9	72±10	66±6	49±7	57±8	53±10
C13-48	117	107±13	136±16	25±4	32±5	29±4	20±3	26±4	23±5
C13-49	65	187±20	160±18	80±12	68±10	74±6	64±9	55±8	59±11
C13-50	72	147±17	112±14	57±9	43±7	50±11	45±7	35±5	40±10
C13-54	62	270±26	334±31	121±17	150±20	135±15	97±13	120±16	108±22
C13-55	72	201±21	382±34	78±11	147±20	113±35	62±9	118±16	90±37
C13-57	92	249±24	218±22	75±11	66±9	70±5	60±8	53±7	56±9
C13-59	119	451±40	547±47	105±14	128±17	116±12	84±11	102±13	93±18
C13-62	73	159±18	217±22	60±9	82±12	71±15	48±7	66±9	57±12
C13-64	104	223±23	160±18	60±8	43±6	51±9	48±7	34±5	41±11
C13-66	111	172±19	136±16	43±6	34±5	39±5	34±5	27±4	31±7
C13-67	65	530±45	718±59	226±30	307±40	267±40	181±24	245±32	213±52
C13-68	103	218±22	209±21	59±8	56±8	58±3	47±7	45±6	46±6
C13-69	70	130±15	116±14	52±8	46±7	49±4	41±6	37±6	39±11
C13-70	108	190±20	120±14	49±7	31±5	40±9	39±6	25±4	32±11
C13-72	103	103±13	153±17	28±4	41±6	35±7	22±4	33±5	28±8
C13-74	109	347±32	342±31	88±12	87±12	88±3	71±10	70±9	70±7
C13-75	93	197±21	213±22	59±8	64±9	61±4	47±7	51±7	49±7
C13-76	91	103±13	83±11	32±5	25±4	28±4	25±4	20±3	23±5
C13-77	94	218±22	191±20	64±9	56±8	60±5	51±7	45±7	48±8
C13-78	109	153±17	104±13	39±6	27±4	33±7	31±5	21±3	26±8
C13-79	112	138±16	—	34±5	—	34±5	27±4	—	27±4
C13-83	87	113±14	159±18	36±6	51±8	43±8	29±5	41±6	35±10
C13-84	94	68±10	90±12	20±4	27±4	23±4	16±3	21±4	19±5
C13-88	87	409±36	447±39	131±17	143±19	137±7	104±14	114±15	109±15
C13-89	94	—	186±20	—	55±8	55±8	—	44±6	44±6
C13-91	93	104±13	90±12	31±5	27±4	29±3	25±4	21±4	23±4
C13-92	109	180±19	159±18	46±7	40±6	43±5	37±5	32±5	34±6
C13-93	67	307±29	379±34	127±17	157±21	142±15	102±14	125±17	113±23

t_{exp} : tiempo de exposición.

—: Detector perdido.

Hipótesis 1. Criterio basado sólo a la presencia del gas Rn-222 y progenitores en interiores.

Hipótesis 2. Criterio basado a presencia tanto de Rn-222 y Rn-220 con sus respectivos progenitores en interiores.

La tabla 4.20 muestra los valores promedios de la concentración e incertidumbre (MA + σ) de la actividad del Rn-222 en función del tipo y ubicación de las habitaciones para ambas metodologías.

Tabla 4.20: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (3er periodo).

Tipo de Hab.	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	MA+ σ
Sala (S)	1	86±13	70±12	35±2	21±4	26±3	48±13
	2	69±11	56±9	28±2	17±3	21±3	38±11
Dormitorio (D)	1	106±12	63±8	45±3	29±1	31±3	55±15
	2	85±10	55±6	36±3	23±1	25±2	45±12
Cocina (C)	1	161±77	83±47	66±27	—	—	103±43
	2	103±59	67±38	53±22	—	—	74±29
Almacén (A)	1	112±41	—	—	—	—	112±41
	2	89±33	—	—	—	—	89±33
Entrada (E)	1	72±27	—	—	—	—	72±27
	2	57±21	—	—	—	—	57±21
Salon de Belleza (SB)	1	26±4	—	—	—	—	26±4
	2	21±3	—	—	—	—	21±3
Sastrería (S)	1	35±7	—	—	—	—	35±7
	2	28±5	—	—	—	—	28±5
Taller (T)	1	61±2	—	—	—	—	61±2
	2	49±2	—	—	—	—	49±2
MA+ σ	1	73±19	54±17	36±13	17±4	19±3	
	2	56±14	44±14	29±10	13±3	15±2	

Además la *figura 4.11* muestra que la concentración promedio de la actividad del Rn-222 fue mayor en el primer piso con valores de (73±19) Bq/m³ y (56±14) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás pisos, como se predice en la teoría. Con respecto al tipo de habitación, el mayor valor fue en almacenes de los lugares de trabajo (n=3) de (112±41) Bq/m³ y (89±33) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. Al igual que en el segundo periodo, esto es debido porque se observó que ambas habitaciones tienen bajo índice de ventilación. Estos valores son ligeramente mayores con respecto a los obtenidos en el segundo periodo.

En efecto, considerando las habitaciones propios de las viviendas, los mayores valores se obtuvieron en cocinas (103±43) Bq/m³ y (74±29) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente, luego le siguen dormitorios y salas.

Los valores estadísticos obtenidos desde la *tabla 4.19* se resumen en la *tabla 4.21* a través de la media aritmética (MA) e incertidumbre (σ) de (73±7) Bq/m³ y (58±6) Bq/m³, media geométrica (MG) de 60 Bq/m³ y 48 Bq/m³, desviación estándar geométrica (DEG) de 2 Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Los valores mínimos y máximos de la concentración de la actividad de Rn-222 fueron de [23-267] Bq/m³ y [19-213] Bq/m³ para ambas hipótesis.

Tabla 4.21: Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (3er periodo).

Pts. De Medición	Criterio	(Bq/m^3)				
		MA± σ	MG	DEG	Valor Inf.	Valor Sup.
n =54	Hipótesis 1	73±7	60	2	23	267
	Hipótesis 2	58±6	48	2	19	213

Los parámetros calculados (MG y DEG) desde la *tabla 4.21* son obtenidos a partir de la distribución de frecuencias representado por el número de viviendas en función concentraciones de la actividad del Rn-222 durante el tercer periodo de monitoreo, que

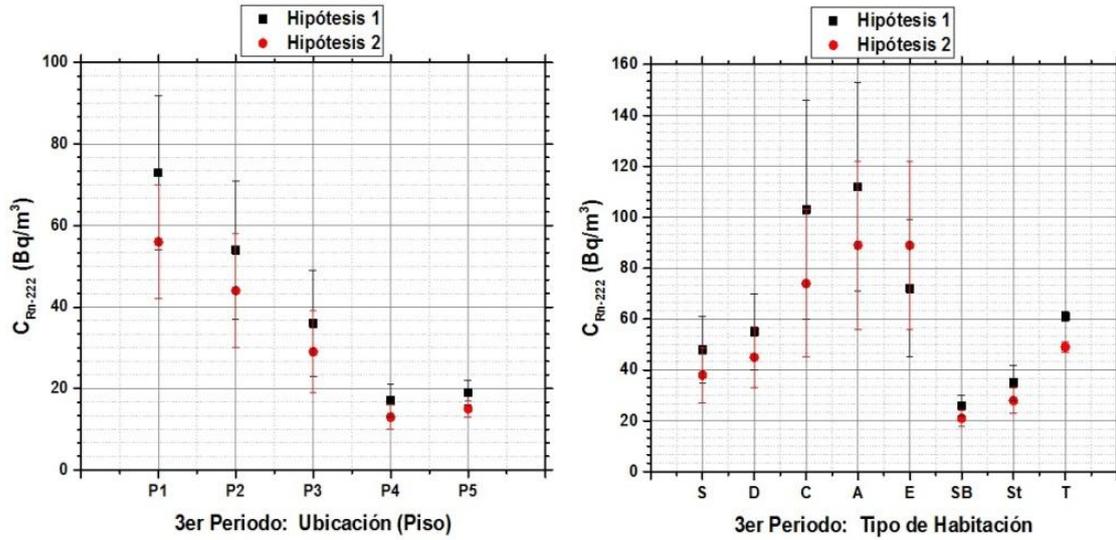


Figura 4.11: Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (3er periodo).

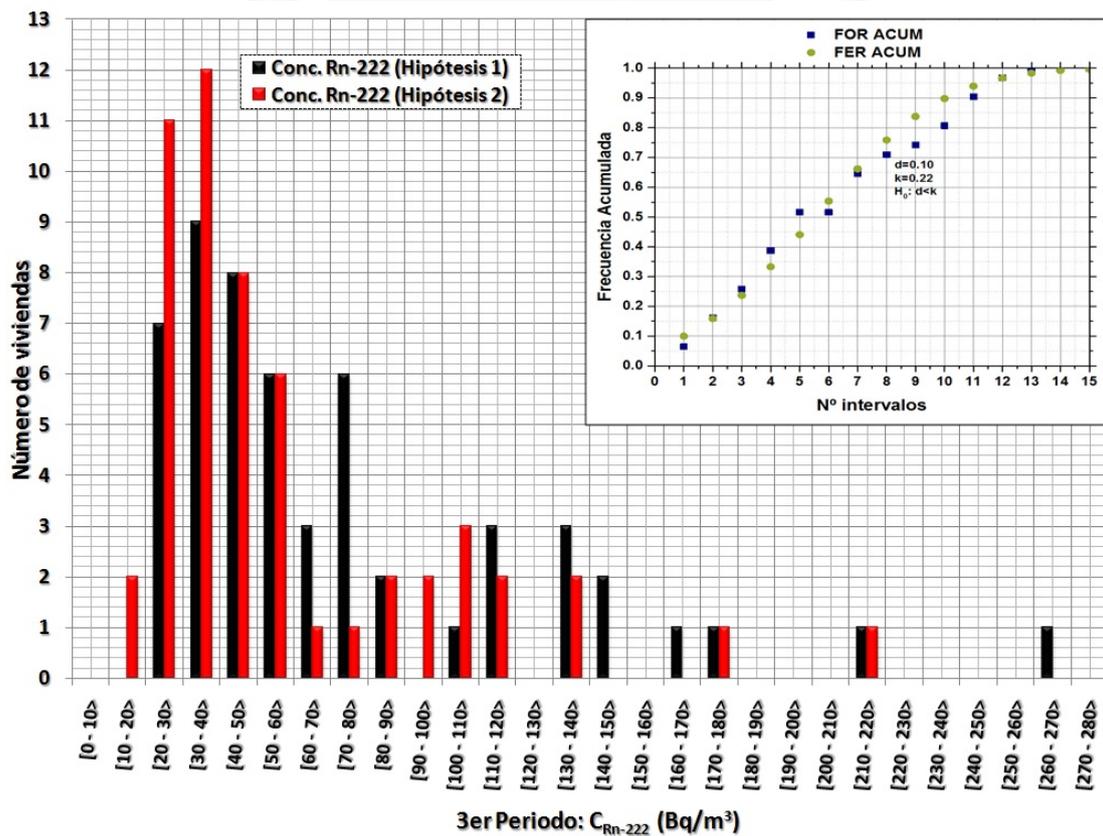


Figura 4.12: Distribución de frecuencias para los logaritmos de las C_{Rn-222} determinadas en el tercer periodo.

es representado en la *figura 4.12*.

Similarmente a las distribuciones obtenidas del primer (*figura 4.4*) y segundo periodo (*figura 4.8*), estas distribuciones de frecuencias tienden a una distribución Log-normal.

Por lo tanto, si esta hipótesis es cierta, los logaritmos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Normal. Este proceso fue contrastado a través del test estadístico Kolmogorov-Smirnov. Los resultados obtenidos de acuerdo a la imagen superior de la *figura 4.12* se detalla en la *tabla 4.22*.

Tabla 4.22: Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=54 (3er periodo).

Pts. de Medición	d ABS(FOR _{acum} -FER _{acum})	k (tabla)	D<k H ₀	Curtosis	Asimetría
n =54	0,10 intervalo 9	0,22	0,10<0,22 VERDADERO	-0,49	0,39

El valor k=0,22 es obtenido desde tablas estadísticas para el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para un conjunto de datos n=54, con p-value=0,64 (para ambas hipótesis), para un nivel de significancia $\alpha=0,64$.
 FOR_{acum}: Frecuencia Observada Relativa Acumulada.
 FER_{acum}: Frecuencia Esperada Relativa Acumulada.
 H₀: Hipótesis nula (cumple una distribución normal).

El parámetro estadístico “d” obtenido desde la diferencia máxima positiva entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas relativas acumuladas (FOR) y (FER) respectivamente fue de 0,10 en el intervalo 9 (de tamaño 0,17 y rango [3,14-5,59]) de la imagen superior de la *figura 4.12*, que de acuerdo al contraste de hipótesis (0,10<0,22) la hipótesis nula no se puede rechazar. Los valores de curtosis y asimetría reflejan la forma y orientación de la distribución normal de los logaritmos de las concentraciones. Con respecto a la curtosis el valor fue de -0,49 (platicúrtica) y el coeficiente de asimetría de 0,39 (orientación hacia la derecha).

La *tabla 4.23* refiere a la probabilidad acumulada de que las viviendas superen ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia fueron (≥ 100 , ≥ 148 y ≥ 200) Bq/m³.

Tabla 4.23: Probabilidades acumuladas para una distribución normal (3er periodo).

Parámetro	Hipótesis	P[Z ≤ ln(C _{Rn-222})] (Bq/m ³)		
		≥ 100	EPA (≥ 148)*	NRPB (≥ 200)**
Probabilidad (%)	1	20,33 % (Z=0,83)	6,94 % (Z=1,48)	2,44 % (Z=1,97)
Z = $\frac{[\ln(NR) - \ln(MG)]}{\ln(DEG)}$	2	11,12 % (Z=1,22)	3,07 % (Z=1,87)	0,91 % (Z=2,36)

EPA*: Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.
 NRPB**: Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña. Este mismo valor también fue adoptado por el Organismo Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

De acuerdo a la *tabla 4.23* bajo la hipótesis 1, la probabilidad de que las casas monitoreadas durante el primer periodo superen los niveles de referencia de la EPA y del NRPB son del 6,94 % y del 2,44 % respectivamente, mientras la probabilidad bajo la hipótesis 2, son de 3,07 % y 0,91 % respectivamente.

4.5. Cuarto periodo

El cuarto periodo de muestreo se llevó a cabo desde junio a setiembre del 2016, durante las estaciones invierno-primavera. La temperatura promedio fue de (16,77±0,34) °C y la humedad relativa de (86,63±0,68) %. La *tabla 4.24* es un indicador del número

de habitaciones monitoreadas en función del tipo y ubicación.

Tabla 4.24: Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 4to periodo.

Tipo de habitación	Codificación	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Total de habitaciones
Sala	S	9	10	2	1	1	23
Dormitorio	D	17	15	8	3	1	44
Cocina	C	4	2	1	—	—	7
Baño	B	—	—	1	—	—	1
Hall	H	1	—	—	—	—	1
Almacén	A	3	—	—	—	—	3
Entrada	E	5	—	—	—	—	5
Salón de Belleza	SB	2	—	—	—	—	2
Sastrería	St	2	—	—	—	—	2
Taller	T	2	—	—	—	—	2
Total:		45	27	12	4	2	90

El mayor tipo de habitación monitoreada fueron en dormitorios 48,9%, seguidamente de salas (25,6%). Con respecto a la ubicación, el 50,0% y el 30,0% del total fueron en el primer y segundo piso respectivamente.

En la *tabla 4.25* se muestra los cálculos realizados para la determinación de los espesores reducidos de los detectores LR-115 Tipo 2, como así mismo de la velocidad de desgaste superficial para un tiempo de grabado de 1.5 h (90 min). Se realizó en primer lugar la medición de los espesores de 3 detectores escogidos al azar del lote empleado para el monitoreo del cuarto periodo, cuyo valor fue de: $(111,9 \pm 0,1) \mu\text{m}$.

Tabla 4.25: Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el cuarto periodo.

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_G (μm)	h_H (μm)	G ($\mu\text{m}/\text{h}$)	H ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-7	$6,3 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,3$
C13-11	$6,7 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$
C13-12	$7,1 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,3$	$4,7 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,2$
C13-14	$7,4 \pm 0,1$	—	$5,0 \pm 0,1$	—
C13-17	$6,1 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,2$
C13-18	$5,6 \pm 0,1$	$6,3 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,2$
C13-19	—	$6,6 \pm 0,2$	—	$4,4 \pm 0,1$
C13-20	$6,7 \pm 0,1$	$7,2 \pm 0,4$	$4,5 \pm 0,1$	$4,8 \pm 0,2$
C13-21	$6,8 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,4$	$4,5 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,2$
C13-22	$5,3 \pm 0,1$	—	$3,5 \pm 0,1$	—
C13-29	$6,9 \pm 0,1$	$5,3 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,2$
C13-31	$6,6 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,3$	$4,4 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,2$
C13-34	$6,4 \pm 0,1$	$6,1 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,2$
C13-37	—	$5,2 \pm 0,3$	—	$3,5 \pm 0,2$
C13-39	$5,3 \pm 0,1$	$6,4 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,3$

(continuación tabla 4.25)

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_G (μm)	h_H (μm)	G ($\mu\text{m}/\text{h}$)	H ($\mu\text{m}/\text{h}$)
C13-41	7,1±0,1	6,3±0,4	4,7±0,1	4,2±0,2
C13-42	6,2±0,1	7,2±0,4	4,1±0,1	4,8±0,2
C13-43	5,7±0,1	6,0±0,3	3,8±0,1	4,0±0,2
C13-44	6,5±0,1	6,3±0,3	4,3±0,1	4,2±0,2
C13-45	5,3±0,1	5,7±0,3	3,5±0,1	3,8±0,2
C13-48	7,0±0,1	6,8±0,3	4,7±0,1	4,5±0,2
C13-49	5,7±0,1	6,0±0,4	3,8±0,1	4,0±0,2
C13-51	6,1±0,1	6,2±0,4	4,1±0,1	4,2±0,3
C13-54	5,4±0,1	4,5±0,2	3,6±0,1	3,0±0,1
C13-57	6,9±0,1	6,8±0,4	4,6±0,1	4,6±0,2
C13-59	7,2±0,1	6,4±0,3	4,8±0,1	4,3±0,2
C13-60	5,2±0,1	6,5±0,5	3,4±0,1	4,4±0,3
C13-61	6,4±0,1	5,4±0,2	4,2±0,1	3,6±0,1
C13-62	—	5,7±0,3	—	3,8±0,2
C13-64	6,8±0,1	6,1±0,3	4,5±0,1	4,1±0,2
C13-66	5,5±0,1	—	3,7±0,1	—
C13-67	7,3±0,2	5,5±0,3	4,8±0,1	3,7±0,2
C13-68	6,1±0,1	5,8±0,3	4,1±0,1	3,9±0,2
C13-70	6,9±0,1	6,3±0,3	4,6±0,1	4,2±0,2
C13-71	6,0±0,1	6,6±0,2	4,0±0,1	4,4±0,1
C13-72	5,4±0,1	5,8±0,3	3,6±0,1	3,9±0,2
C13-74	6,1±0,1	—	4,0±0,1	—
C13-75	7,3±0,1	6,2±0,2	4,9±0,1	4,1±0,1
C13-76	6,0±0,1	7,0±0,3	4,0±0,1	4,6±0,2
C13-77	6,1±0,1	6,0±0,4	4,0±0,1	4,0±0,3
C13-78	6,4±0,1	7,1±0,3	4,2±0,1	4,7±0,2
C13-83	6,4±0,1	5,9±0,3	4,3±0,1	3,9±0,2
C13-88	4,7±0,1	6,9±0,3	3,1±0,1	4,6±0,2
C13-89	7,4±0,1	—	4,9±0,1	—
C13-91	6,2±0,1	6,7±0,3	4,1±0,1	4,4±0,2
C13-93	5,9±0,2	7,3±0,3	4,0±0,1	4,8±0,2
C13-97	—	6,3±0,3	—	4,2±0,2
C13-98	7,6±0,1	4,6±0,2	5,0±0,1	3,0±0,1
C13-104	7,2±0,1	—	4,8±0,1	—
C13-106	5,2±0,1	6,6±0,2	3,4±0,1	4,4±0,1

—: Detector perdido.

h_G , h_H : Espesores reducidos en los detectores G y H respectivamente después del grabado químico.

V_B : Velocidad de desgaste superficial del detector.

Relaciona el espesor reducido entre el tiempo de grabado de los detectores (en horas).

La *figura 4.13* muestra las variaciones de las velocidades de desgaste superficial de los detectores expuestos durante el tercer periodo de monitoreo, comparadas con el rango $[2.7-4.7]\mu\text{m}/\text{h}$ para un detector con espesor residual entre $[5-8]\mu\text{m}^{[25]}$.

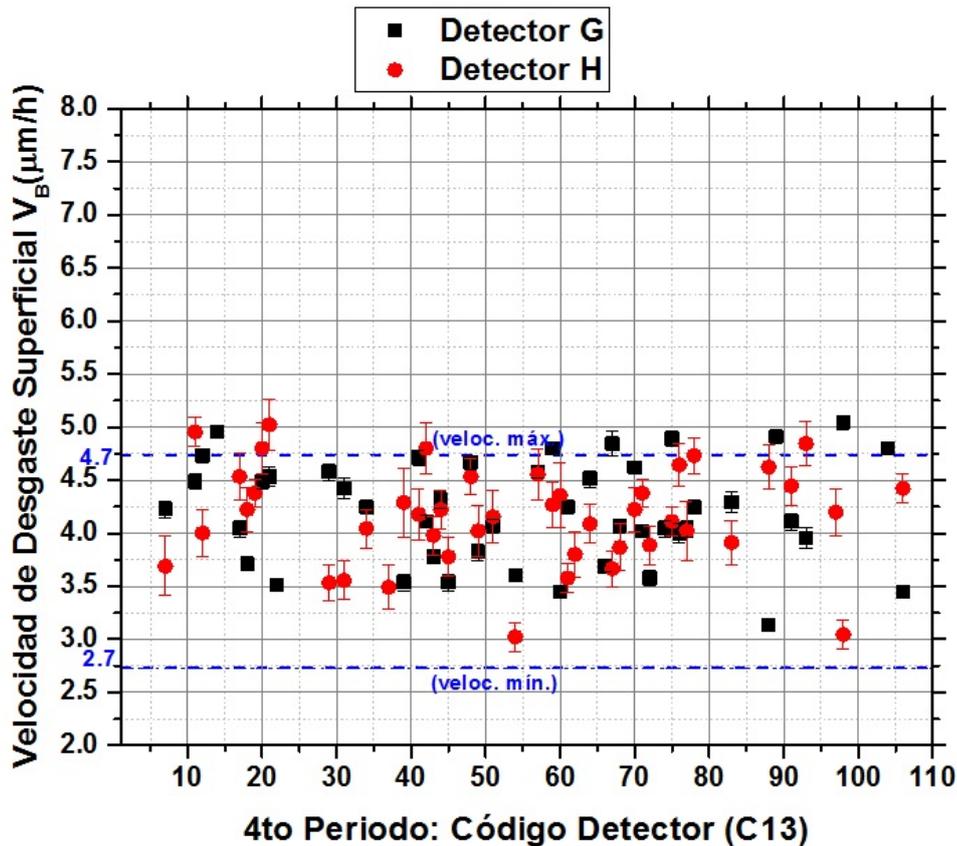


Figura 4.13: Variación de la velocidad de desgaste superficial (V_B ($\mu\text{m/h}$)) de los detectores analizados durante el cuarto periodo.

De los 90 detectores analizados, el 13,33% (12 detectores) se encontraron fuera del rango óptimo de velocidades de desgaste superficial (V_B). Aunque estas variaciones de las velocidades varían de acuerdo a factores ambientales, de la ubicación y del tipo de habitaciones, la desviación máxima de la velocidad de desgaste superficial con respecto al valor superior (4,7 $\mu\text{m/h}$) de referencia fue de 6,38% correspondiente a la vivienda C13-21 de longitud y latitud (-12,0768;-76,9995), ubicado en el dormitorio del tercer piso (D_3).

La *figura 4.14* refleja la ubicación de los puntos (viviendas, $n=50$) monitoreadas en el distrito bajo estudio durante el cuarto periodo.



Figura 4.14: Ubicación de las viviendas monitoreadas en el distrito durante el cuarto periodo.

Las grillas de 1 km² central y laterales de la *figura 4.14* concentra el mayor número de viviendas monitoreadas. Cabe precisar que al igual que en los demás periodos, se logró cubrir con los puntos mínimos requeridos de monitoreo (4 puntos/grilla) de acuerdo a la metodología planteada. Aunque dos grillas fueron la excepción, éstas no cubrieron en su totalidad el área de extensión del distrito, siendo su densidad poblacional menor que en la grilla central y laterales.

En la *tabla 4.26* se muestra los cálculos obtenidos de las densidades de trazas y de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las 50 viviendas monitoreadas, empleando las dos consideraciones planteadas anteriormente.

Tabla 4.26: Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (4to periodo).

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_G	ρ_H	Metodología 1			Metodología 2		
				G	H	Prom.	G	H	Prom.
C13-7	112	113±14	83±11	28±4	21±3	24±4	22±4	17±3	19±3
C13-11	62	160±18	196±20	72±11	88±13	80±8	57±9	70±10	64±7
C13-12	98	642±54	548±47	182±24	155±20	169±14	145±19	124±16	135±11
C13-14	108	514±44	—	132±17	—	132±17	106±14	—	106±14
C13-17	74	136±16	104±13	51±8	39±6	45±6	41±6	31±5	36±5
C13-18	72	192±20	138±16	74±11	53±8	64±11	59±9	42±6	51±9
C13-19	70	—	354±32	—	141±19	141±19	—	112±15	112±15
C13-20	98	417±37	434±38	118±16	123±16	121±4	94±13	98±13	96±4
C13-21	65	91±12	133±16	39±6	57±9	48±9	31±5	45±7	38±7
C13-22	65	119±14	—	51±8	—	51±8	41±6	—	41±6

(continuación tabla 4.26)

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_G	ρ_H	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				G	H	Prom.	G	H	Prom.
C13-29	91	518±44	271±26	158±21	83±12	120±38	126±17	66±9	96±30
C13-31	67	219±22	150±17	91±13	62±9	76±15	72±10	50±7	61±12
C13-34	69	418±37	604±51	168±22	243±32	206±38	134±18	194±25	164±30
C13-37	69	—	386±35	—	155±21	155±21	—	124±17	124±17
C13-39	93	149±17	174±19	44±7	52±8	48±4	36±5	42±6	39±4
C13-41	98	466±41	457±40	132±18	129±17	131±4	105±14	103±14	104±3
C13-42	92	138±16	221±22	42±6	67±9	54±13	33±5	53±8	43±10
C13-43	93	142±16	204±21	42±6	61±9	52±10	34±5	49±7	41±8
C13-44	104	160±18	198±21	43±6	53±8	48±6	34±5	42±6	38±4
C13-45	92	184±20	240±24	56±8	72±10	64±9	44±6	58±8	51±7
C13-48	80	133±16	148±17	46±7	51±8	49±3	37±6	41±6	39±3
C13-49	92	204±21	177±19	62±9	53±8	58±5	49±7	43±6	46±6
C13-51	70	92±12	136±16	37±6	54±8	45±9	29±5	43±7	36±7
C13-54	92	290±28	363±33	88±12	110±15	99±11	70±10	88±12	79±9
C13-57	92	262±25	237±24	79±11	71±10	75±5	63±9	57±8	60±4
C13-59	59	367±33	488±42	173±23	230±30	201±29	138±19	183±24	161±23
C13-60	65	87±12	100±13	37±6	43±7	40±4	30±5	34±6	32±3
C13-61	86	139±16	187±20	45±7	60±9	53±8	36±5	48±7	42±7
C13-62	92	—	248±24	—	75±11	75±11	—	60±8	60±8
C13-64	112	262±25	197±21	65±9	49±7	57±6	52±7	39±6	45±5
C13-66	67	167±18	—	69±10	—	69±10	55±8	—	55±8
C13-67	63	543±46	710—±58	240±31	313±41	276±37	191±25	250±32	221±30
C13-68	63	204±21	196±20	90±13	86±12	88±4	72±10	69±10	70±3
C13-70	73	180±19	123±15	68±10	47±7	58±11	55±8	37±6	46±9
C13-71	69	184±20	141±16	74±11	57±9	66±7	59±9	45±7	52±6
C13-72	65	102±13	160±18	44±7	68±10	56±13	35±6	55±8	45±10
C13-74	69	223±23	—	90±13	—	90±13	72±10	—	72±10
C13-75	93	216±22	233±23	64±9	70±10	67±4	51±7	56±8	54±3
C13-76	91	150±17	131±15	46±7	40±6	43±4	37±5	32±5	34±3
C13-77	94	227±23	238±24	67±10	70±10	69±3	53±8	56±8	55±3
C13-78	69	133±16	118±14	54±8	47±7	51±	43±7	38±6	40±3
C13-83	93	154±17	209±21	46±7	62±9	54±8	37±6	50±7	43±7
C13-88	83	380±34	479±42	127±17	160±21	144±17	102±14	128±17	115±14
C13-89	68	214±22	—	88±13	—	88±13	70±10	—	70±10
C13-91	93	142±16	113±14	42±6	34±5	38±5	34±5	27±4	30±4
C13-93	61	286±27	363±33	130±18	165±22	148±18	104±14	132±18	118±15
C13-97	68	—	196±20	—	80±12	80±12	—	64±9	64±9
C13-98	72	260±25	327±30	100±14	126±17	113±11	80±11	101±14	90±9
C13-104	63	88±12	—	39±6	—	39±3	31±5	—	31±3
C13-106	63	138±16	152±17	61±9	67±10	64±4	49±7	54±8	51±3

La tabla 4.27 muestra los valores promedios de la concentración e incertidumbre ($MA + \sigma$) de la actividad del Rn-222 en función del tipo y ubicación de las habitaciones para las hipótesis consideradas.

Tabla 4.27: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (4to periodo).

Tipo de Hab	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	MA+ σ
Sala (S)	1	118±18	80±13	44±5	37±6	21±3	60±18
	2	64±14	64±10	35±4	30±5	17±3	48±14
Dormitorio (D)	1	112±14	79±6	54±4	40±3	28±4	62±15
	2	89±11	63±5	43±3	30±1	22±4	49±12
Cocina (C)	1	113±67	87±12	27±4	—	—	75±34
	2	90±53	69±10	42±6	—	—	67±23
Baño (B)	1	—	—	141±19	—	—	141±19
	2	—	—	112±15	—	—	112±15
Hall (H)	1	45±7	—	—	—	—	45±7
	2	36±5	—	—	—	—	36±5
Almacén (A)	1	147±32	—	—	—	—	147±32
	2	117±41	—	—	—	—	117±41
Entrada (E)	1	77±25	—	—	—	—	77±25
	2	62±20	—	—	—	—	62±20
Salón de Belleza (SB)	1	45±6	—	—	—	—	45±6
	2	36±5	—	—	—	—	36±5
Sastrería (St)	1	56±12	—	—	—	—	56±12
	2	45±10	—	—	—	—	45±10
Taller (T)	1	67±3	—	—	—	—	67±3
	2	54±2	—	—	—	—	54±2
MA+ σ	1	87±15	82±7	66±26	38±4	24±5	
	2	69±13	65±5	58±19	30±3	19±4	

Además la *figura 4.15* muestra que la concentración promedio de la actividad del Rn-222 fue mayor en el primer piso con valores de (87 ± 15) Bq/m³ y (69 ± 13) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás pisos, como se predice en la teoría. Con respecto al tipo de habitación, el mayor valor fue en los almacenes de los lugares de trabajo (n=3) de (147 ± 32) Bq/m³ y (117 ± 41) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. Como en los casos anteriores, esto es debido porque las tres habitaciones tuvieron bajo índice de ventilación.

En efecto, considerando las habitaciones propios de las viviendas, los mayores valores se obtuvieron en baños (141 ± 19) Bq/m³ y (112 ± 15) Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente, luego le siguen cocinas y dormitorios.

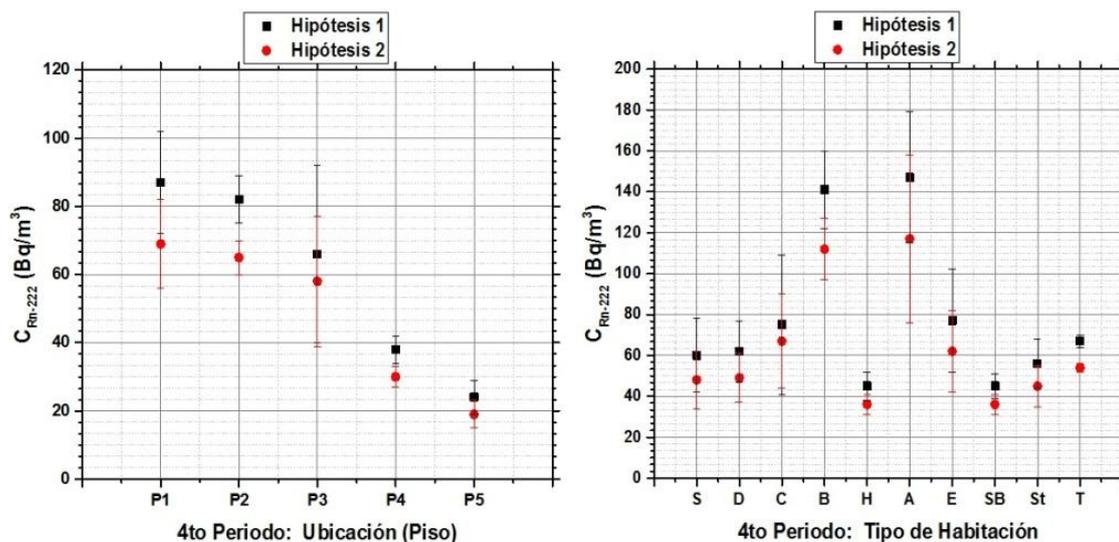


Figura 4.15: Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (4to periodo).

Los valores estadísticos obtenidos desde la *tabla 4.26* se resumen en la *tabla 4.28* a través de la media aritmética (MA) e incertidumbre (σ) de (86 ± 7) Bq/m³ y (68 ± 6) Bq/m³, media geométrica (MG) de 74 Bq/m³ y 59 Bq/m³, desviación estándar geométrica (DEG) de 2 Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Los valores mínimos y máximos de la concentración de la actividad de Rn-222 fueron de $[24-276]$ Bq/m³ y $[19-221]$ Bq/m³ para ambas hipótesis.

Tabla 4.28: Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (4to periodo).

Pts. De Medición	Hipótesis	C_{Rn-222} (Bq/m ³)				
		MA \pm σ	MG	DEG	Valor Inf.	Valor Sup.
n = 50	1	86 \pm 7	74	2	24	276
	2	68 \pm 6	59	2	19	221

Los parámetros calculados (MG y DEG) desde la *tabla 4.28* son obtenidos a partir de la distribución de frecuencias representado por el número de viviendas en función concentraciones de la actividad del Rn-222 durante el cuarto periodo de monitoreo, que es representado en la *figura 4.16*.

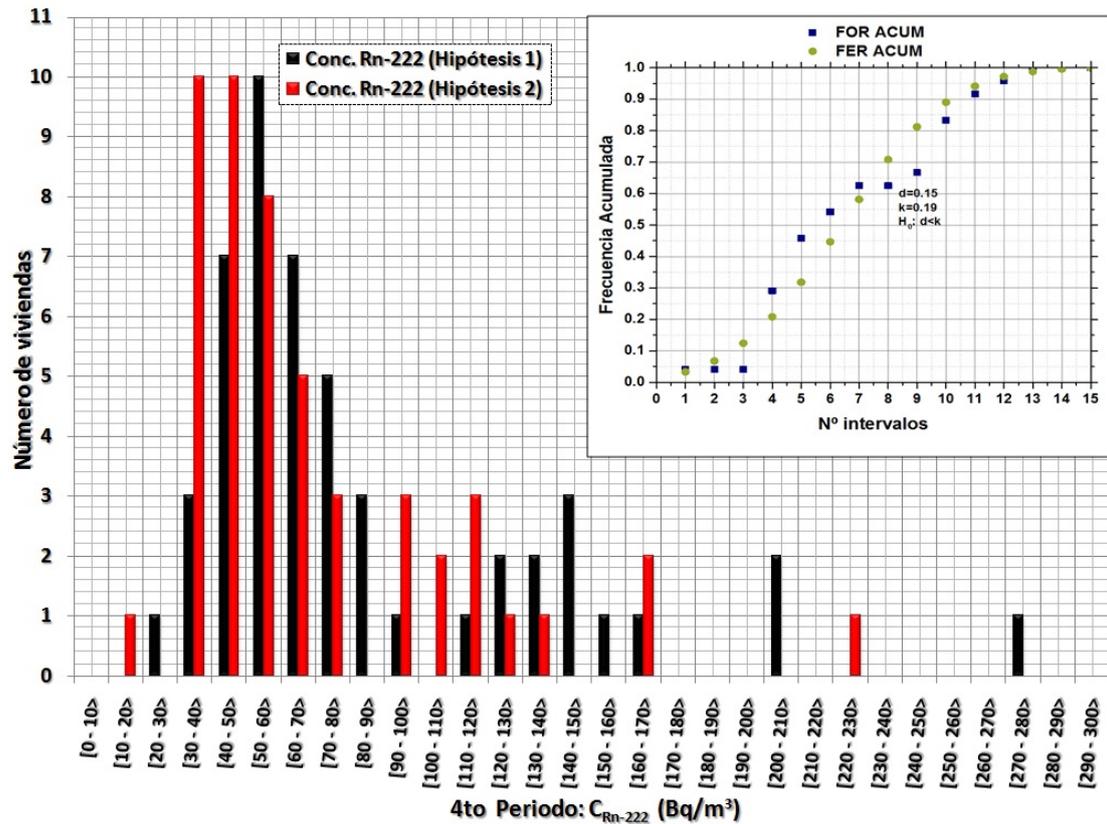


Figura 4.16: Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el cuarto periodo.

Estas distribuciones de frecuencias al igual las obtenidas en los periodos anteriores, también tienden a una distribución Log-normal. Por lo tanto, si esta hipótesis es cierta, los logaritmos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Normal. Este proceso fue contrastado a través del test estadístico Kolmogorov-Smirnov. Los resultados obtenidos de acuerdo a la imagen superior de la *figura 4.16* se detalla en la *tabla 4.29*.

Tabla 4.29: Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para $n=50$ (4to periodo).

Pts. de Medición	d ABS(FOR _{acum} -FER _{acum})	k (tabla)	D<k H ₀	Curiosis	Asimetría
n=58	0,15 intervalo 6	0,19	0,15<0,19 VERDADERO	-0,14	0,55

El valor $k=0,19$ es obtenido desde tablas estadísticas para el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para un conjunto de datos $n=50$, con $p\text{-value}=0,47$ (para ambas hipótesis), para un nivel de significancia $\alpha=0,05$.
 FOR_{acum}: Frecuencia Observada Relativa Acumulada.
 FER_{acum}: Frecuencia Esperada Relativa Acumulada.
 H₀: Hipótesis nula (cumple una distribución normal).

El parámetro estadístico “d” obtenido desde la diferencia máxima positiva entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas relativas acumuladas (FOR) y (FER) respectivamente fue de 0,15 en el intervalo 9 (de tamaño 0,17 y rango [3,19-5,62]) de la imagen superior de la *figura 4.16*, que de acuerdo al contraste de hipótesis ($0,15<0,19$) la hipótesis nula no se puede rechazar. Los valores de curiosis y asimetría reflejan la

forma y orientación de la distribución normal de los logaritmos de las concentraciones. Con respecto a la curtosis el valor fue de -0,14 (platicúrtica) y el coeficiente de asimetría de 0,55 (orientación hacia la derecha).

La *tabla 4.30* refiere a la probabilidad acumulada de que las viviendas superen ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia fueron (≥ 100 , ≥ 148 y ≥ 200) Bq/m³.

Tabla 4.30: Probabilidades acumuladas para una distribución normal (4to periodo).

Parámetro	Criterio	P[Z ≤ ln(C _{Rn-222})](Bq/m ³)		
		≥100	EPA (≥148)*	NRPB(≥200)**
Probabilidad (%) $Z = \frac{[\ln(NR) - \ln(MG)]}{\ln(DEG)}$	Hipótesis 1	28,10 % (Z=0,58)	9,01 % (Z=1,34)	2,74 % (Z=1,92)
	Hipótesis 2	15,63 % (Z=1,01)	3,75 % (Z=1,78)	0,91 % (Z=2,36)

EPA*: Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.

NRPB**: Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña. Este mismo valor también fue adoptado por el Organismo Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

De acuerdo a la *tabla 4.30* bajo la hipótesis 1, la probabilidad de que las casas monitoreadas durante el primer periodo superen los niveles de referencia de la EPA y del NRPB son del 9,01 % y del 2,74 % respectivamente, mientras la probabilidad bajo la hipótesis 2, son de 3,75 % y 0,91 % respectivamente.

4.6. Quinto periodo

El quinto periodo de muestreo se llevó a cabo desde octubre del 2016 hasta enero del 2017 durante las estaciones primavera-verano. La temperatura promedio fue de (20,58±2,63) °C y la humedad relativa de (80,33±1,56) %. La *tabla 4.31* es un indicador del número de habitaciones monitoreadas en función del tipo y ubicación.

Tabla 4.31: Habitaciones monitoreadas por tipo y ubicación durante el 5to periodo.

Tipo de habitación	Codificación	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Total de habitaciones
Sala	S	5	9	1	1	—	16
Dormitorio	D	7	12	5	3	—	27
Cocina	C	3	2	—	—	—	5
Baño	B	—	—	1	—	—	1
Hall	H	1	—	—	—	—	1
Pasadizo	O	—	1	—	—	—	1
Almacén	A	3	—	—	—	—	3
Entrada	E	5	—	—	—	—	5
Salón de Belleza	SB	2	—	—	—	—	2
Sastrería	St	2	—	—	—	—	2
Taller	T	2	—	—	—	—	2
Total:		30	24	7	4	—	65

El mayor tipo de habitación monitoreada fueron en dormitorios 41,5 %, seguidamente

de salas (24,6%). Con respecto a la ubicación, el 46,2% y el 36,9% del total fueron en el primer y segundo piso respectivamente.

En la *tabla 4.32* se muestra los cálculos realizados para la determinación de los espesores reducidos de los detectores LR-115 Tipo 2, como así mismo de la velocidad de desgaste superficial para un tiempo de grabado de 1.5 h (90 min). Se realizó en primer lugar la medición de los espesores de 3 detectores escogidos al azar del lote empleado para el monitoreo del quinto periodo, cuyo valor fue de: $(111,8 \pm 0,1) \mu\text{m}$.

Tabla 4.32: Espesores reducidos y velocidad de desgaste superficial (VDS) de los detectores LR-115 Tipo 2 durante el quinto periodo.

Código Detector	Espesor Reducido		VDS (V_B)	
	h_I (μm)	h_J (μm)	I ($\mu\text{m/h}$)	J ($\mu\text{m/h}$)
C13-3	6,1±0,1	—	4,1±0,1	—
C13-11	6,0±0,1	5,6±0,2	4,0±0,1	3,7±0,1
C13-17	6,2±0,1	6,3±0,1	4,1±0,1	4,2±0,1
C13-19	—	6,3±0,2	—	4,2±0,1
C13-21	5,4±0,1	5,5±0,1	3,6±0,1	3,6±0,1
C13-29	6,3±0,1	6,4±0,1	4,2±0,1	4,3±0,1
C13-31	7,3±0,1	8,1±0,1	4,8±0,1	5,4±0,1
C13-33	—	7,0±0,1	—	4,6±0,1
C13-39	6,4±0,1	6,8±0,1	4,3±0,1	4,5±0,1
C13-41	6,4±0,1	5,6±0,1	4,3±0,1	3,7±0,1
C13-43	5,6±0,1	6,3±0,1	3,7±0,1	4,2±0,1
C13-44	6,2±0,1	6,9±0,1	4,2±0,1	4,6±0,1
C13-46	7,0±0,2	7,1±0,1	4,7±0,1	4,7±0,1
C13-48	5,5±0,1	5,3±0,1	3,6±0,1	3,6±0,1
C13-49	5,3±0,1	5,9±0,1	3,5±0,1	3,9±0,1
C13-57	7,3±0,2	5,1±0,2	4,8±0,1	3,4±0,1
C13-59	6,5±0,1	6,2±0,1	4,4±0,1	4,1±0,1
C13-60	7,2±0,1	7,4±0,1	4,8±0,1	4,9±0,1
C13-61	7,5±0,2	7,3±0,1	5,0±0,1	4,9±0,1
C13-62	6,7±0,1	6,6±0,1	4,5±0,1	4,4±0,1
C13-67	6,5±0,1	6,7±0,1	4,4±0,1	4,4±0,1
C13-68	6,3±0,2	5,7±0,1	4,2±0,1	3,8±0,1
C13-71	6,5±0,1	7,1±0,1	4,4±0,1	4,8±0,1
C13-72	6,5±0,1	6,1±0,1	4,3±0,1	4,1±0,1
C13-74	—	7,1±0,1	—	4,7±0,1
C13-75	5,7±0,1	6,4±0,1	3,8±0,1	4,2±0,1
C13-76	5,6±0,1	7,2±0,1	3,7±0,1	4,8±0,1
C13-78	—	7,7±0,1	—	5,2±0,1
C13-83	5,7±0,1	7,1±0,1	3,8±0,1	4,7±0,1
C13-88	6,1±0,1	7,2±0,1	4,0±0,1	4,8±0,1
C13-89	7,3±0,1	5,3±0,1	4,8±0,1	3,5±0,1
C13-91	8,1±0,1	7,3±0,1	5,4±0,1	4,9±0,1
C13-93	6,6±0,1	6,5±0,1	4,4±0,1	4,4±0,1
C13-97	—	5,2±0,1	—	3,4±0,1
C13-104	7,6±0,2	—	5,1±0,1	—
C13-106	6,6±0,1	6,1±0,1	4,4±0,1	4,1±0,1

—: Detector perdido.

h_I , h_J : Espesores reducidos en los detectores I y J respectivamente después del grabado químico.

V_B : Velocidad de desgaste superficial del detector.

Relaciona el espesor reducido entre el tiempo de grabado de los detectores (en horas).

La figura 4.17 muestra las variaciones de las velocidades de desgaste superficial de los detectores expuestos durante el quinto periodo de monitoreo, comparadas con el rango $[2.7-4.7]\mu\text{m}/\text{h}$ para un detector con espesor residual entre $[5-8]\mu\text{m}$ ^[25].

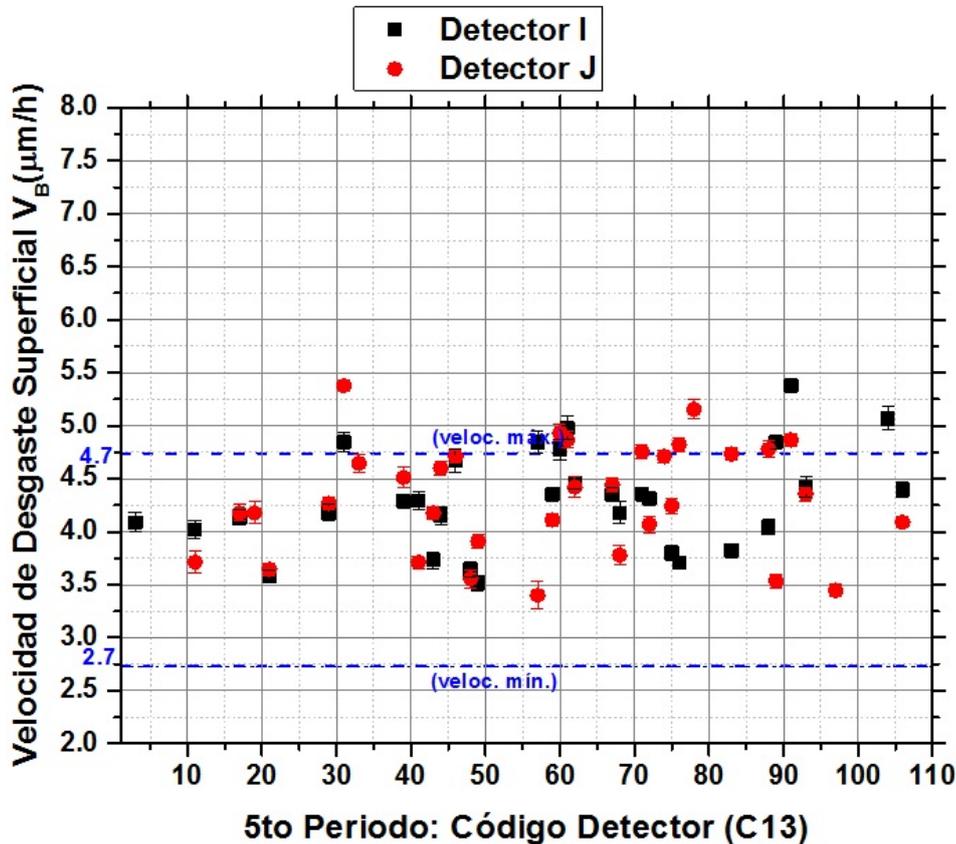


Figura 4.17: Variación de la velocidad de desgaste superficial ($V_B(\mu\text{m}/\text{h})$) de los detectores analizados durante el quinto periodo.

De los 65 detectores analizados, el 15,38% (10 detectores) y el 7,69% (5 detectores) se encontraron completa y parcialmente fuera rango óptimo de velocidades de desgaste superficial (V_B) respectivamente. Aunque estas variaciones de las velocidades varían de acuerdo a factores ambientales, de la ubicación y del tipo de habitaciones, la desviación máxima de la velocidad de desgaste superficial con respecto al valor superior ($4,7 \mu\text{m}/\text{h}$) de referencia fue de 14,89% correspondiente a las viviendas C13-31 y C13-91 ubicadas en $(-12,0788;-77,0030)$ y $(-12,0781; -77,0005)$, correspondiente a la sala del segundo piso (S_2) y a uno de los dormitorios del cuarto piso (D_4^1) respectivamente.

La figura 4.18 refleja la ubicación de los puntos (viviendas, $n=36$) monitoreadas en el distrito bajo estudio durante el quinto periodo.



Figura 4.18: Ubicación de las viviendas monitoreadas en el distrito durante el quinto periodo.

Las grillas de 1 km² central y laterales de la figura 4.18 concentra el mayor número de viviendas monitoreadas. Cabe precisar al igual que en los demás periodos a excepción del primero, que se logró cubrir con los puntos mínimos requeridos de monitoreo (4 puntos/grilla) de acuerdo a la metodología planteada. Aunque dos grillas fueron la excepción, éstas no cubrieron en su totalidad el área de extensión del distrito, siendo su densidad poblacional menor que en la grilla central y laterales.

En la tabla 4.33 se muestra los cálculos obtenidos de las densidades de trazas y de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las 36 viviendas monitoreadas, empleando las dos hipótesis planteadas anteriormente.

Tabla 4.33: Densidad de trazas y concentraciones de la actividad del Rn-222 (5to periodo).

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_C	ρ_D	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				C	D	Prom.	C	D	Prom.
C13-3	70	222±22	—	88±13	—	88±13	70±10	—	70±10
C13-11	63	141±16	166±18	62±9	73±11	68±14	50±8	58±9	54±11
C13-17	68	101±13	80±11	41±7	33±6	37±9	33±5	26±4	30±7
C13-19	65	—	304±29	—	130±18	130±8	—	104±14	104±7
C13-21	63	82±11	156±17	36±6	69±10	52±12	29±5	55±8	42±10
C13-29	71	379±34	364±33	148±20	143±19	145±28	118±16	114±15	116±22
C13-31	60	181±19	104±13	84±12	48±8	66±15	67±10	39±6	53±12
C13-33	67	—	88±12	—	36±6	36±6	—	29±5	29±5
C13-39	64	74±11	141±16	32±6	61±9	47±11	26±4	49±7	37±9
C13-41	62	276±26	244±24	123±17	110±15	116±23	99±14	87±12	93±18

(continuación tabla 4.33)

Cód. Det.	(t_{exp}) (días)	Dens. de Trazas (tr/cm ²)		C_{Rn-222} (Bq/m ³)					
		ρ_C	ρ_D	Hipótesis 1			Hipótesis 2		
				C	D	Prom.	C	D	Prom.
C13-43	66	113±14	136±16	48±8	57±9	52±12	38±6	46±7	42±9
C13-44	64	68±10	124±15	29±5	54±8	42±10	23±4	43±7	33±8
C13-46	72	131±15	106±13	51±8	41±7	46±10	40±6	33±5	36±8
C13-48	67	94±12	122±15	39±6	51±8	45±10	31±5	40±6	36±8
C13-49	62	187±20	171±19	84±12	77±11	80±17	67±10	61±9	64±13
C13-57	65	209±21	196±20	89±13	84±12	86±18	71±10	67±10	69±14
C13-59	61	339±31	458±40	154±21	208±28	181±35	123±17	166±22	145±28
C13-60	66	69±10	72±10	29±5	30±5	30±7	23±4	24±4	24±6
C13-61	63	86±12	136±16	38±6	60±9	49±11	30±5	48±7	39±9
C13-62	62	124±15	191±20	56±9	86±12	71±15	45±7	68±10	56±12
C13-67	67	516±44	710±58	214±28	294±38	254±24	171±22	235±30	203±19
C13-68	72	214±22	198±21	83±12	76±11	80±8	66±9	61±9	63±6
C13-71	68	159±18	119±14	65±10	49±8	57±12	52±8	39±6	45±10
C13-72	68	90±12	108±13	37±6	44±7	40±9	29±5	35±6	32±7
C13-74	68	—	107±13	—	44±7	44±7	—	35±6	35±6
C13-75	70	147±17	141±16	58±9	56±9	57±12	46±7	45±7	46±10
C13-76	70	81±11	78±11	32±5	31±5	32±8	26±4	25±4	25±6
C13-78	69	—	77±11	—	31±5	31±5	—	25±4	25±4
C13-83	72	102±13	160±18	39±6	62±9	51±11	31±5	49±7	40±9
C13-88	61	238±24	251±25	108±15	114±16	111±22	86±12	191±13	89±18
C13-89	65	194±20	119±14	83±12	51±8	67±14	66±10	41±6	53±12
C13-91	83	96±12	76±11	32±5	25±4	29±7	26±4	20±3	23±5
C13-93	68	269±26	352±32	110±15	144±20	127±25	88±12	115±16	101±20
C13-97	66	—	170±18	—	72±11	72±11	—	57±8	57±8
C13-104	67	69±10	—	29±5	—	29±5	—	23±4	23±4
C13-106	67	120±14	133±16	50±8	55±8	53±12	40±6	44±7	42±9

Los valores promedios de la concentración e incertidumbre ($MA+\sigma$) de la actividad del Rn-222 en función del tipo y ubicación de las habitaciones para ambas hipótesis son mostradas en la tabla *tabla 4.34*

Tabla 4.34: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación y del tipo de habitación monitoreada (5to periodo).

Tipo de Hab.	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	$MA+\sigma$
Sala (S)	1	74±12	72±10	18±3	29±5	48±15
	2	59±10	57±8	29±5	23±4	42±10
Dormitorio (D)	1	105±21	69±6	42±8	29±2	61±18
	2	84±17	55±4	34±6	23±2	49±14
Cocina (C)	1	124±85	74±34	—	—	99±52
	2	99±68	59±27	—	—	79±42
Baño (B)	1	—	—	130±18	—	130±18
	2	—	—	104±14	—	104±14
Hall (H)	1	38±6	—	—	—	38±6
	2	30±5	—	—	—	30±5
Pasadizo (P)	1	—	60±9	—	—	60±9
	2	—	48±7	—	—	48±7
Almacén (A)	1	133±49	—	—	—	133±49
	2	106±39	—	—	—	106±39
Entrada (E)	1	78±29	—	—	—	78±29
	2	63±23	—	—	—	63±23

(continuación tabla 4.34)

Tipo de Hab.	Hipótesis	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	MA+ σ
Salón de Belleza (SB)	1	37±4	—	—	—	37±4
	2	30±3	—	—	—	30±3
Sastrería (St)	1	40±4	—	—	—	40±4
	2	32±3	—	—	—	32±3
Taller (T)	1	57±1	—	—	—	57±1
	2	46±1	—	—	—	46±1
MA+ σ	1	76±17	69±10	64±35	29±5	
	2	61±14	55±8	56±25	23±4	

Además la *figura 4.19* muestra que la concentración promedio de la actividad del Rn-222 fue mayor en el primer piso con valores de (76 ± 17) Bq/m³ y (61 ± 14) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente con respecto a los demás pisos, como se predice en la teoría. Con respecto al tipo de habitación, el mayor valor fue en los almacenes de los lugares de trabajo ($n=3$) de (133 ± 49) Bq/m³ y (106 ± 39) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. Al igual que en periodos anteriores y de acuerdo a las características de la vivienda (apéndice D), esto es debido porque en estas habitaciones la tasa de ventilación es baja

En efecto, considerando las habitaciones propios de las viviendas, los mayores valores se obtuvieron en baño, correspondiente a un solo punto de medida ($n=1$), con un valor de (130 ± 18) Bq/m³ y (104 ± 14) Bq/m³ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente, siendo el mayor valor singular, luego le siguen cocinas y dormitorios.

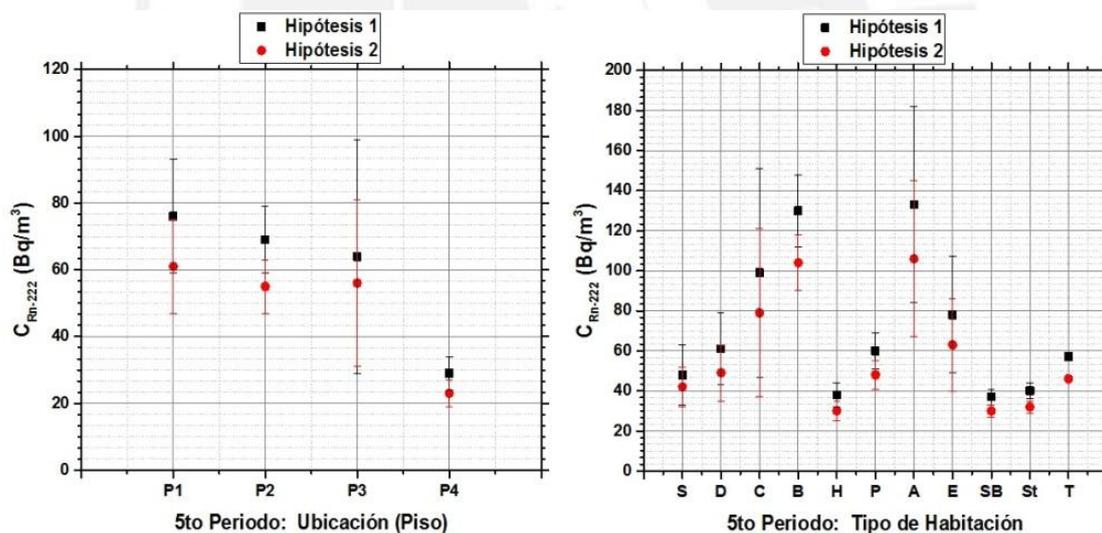


Figura 4.19: Variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 según la ubicación y el tipo de habitación monitoreada (5to periodo).

Los valores estadísticos obtenidos desde la *tabla 4.33* se resumen en la *tabla 4.35* a través de la media aritmética (MA) e incertidumbre (σ) de (72 ± 8) Bq/m³ y (57 ± 6) Bq/m³, media geométrica (MG) de 61 Bq/m³ y 48 Bq/m³, desviación estándar geométrica (DEG) de 2 Bq/m³ para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Los valores mínimos y máximos de la concentración de la actividad de Rn-222 fueron de $[29-254]$ Bq/m³ y $[23-203]$ Bq/m³ para ambas hipótesis.

Tabla 4.35: Valores estadísticos de la C_{Rn-222} (5to periodo).

Pts. De Medición	Hipótesis	(Bq/m^3)				
		MA \pm σ	MG	DEG	Valor Inf.	Valor Sup.
n	1	72 \pm 8	61	2	29	254
=36	2	57 \pm 6	49	2	23	203

Los parámetros calculados (MG y DEG) desde la *tabla 4.35* son obtenidos a partir de la distribución de frecuencias representado por el número de viviendas en función concentraciones de la actividad del Rn-222 durante el quinto periodo de monitoreo, que es representado en la *figura 4.20*.

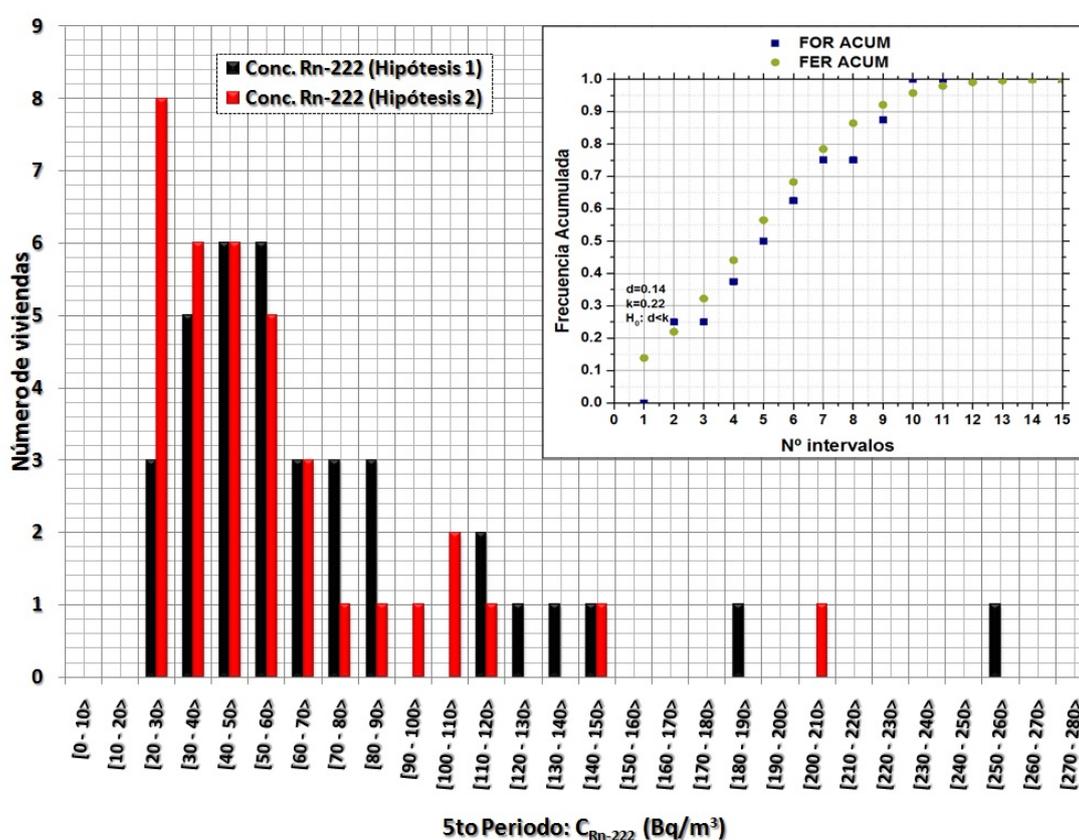


Figura 4.20: Distribución de frecuencias para las C_{Rn-222} determinadas en el 5to periodo.

Estas distribuciones de frecuencias al igual las obtenidas en los cuatro periodos anteriores también tienden a una distribución Log-normal. Por lo tanto, si esta hipótesis es cierta, los logaritmos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Normal. Este proceso fue contrastado a través del test estadístico Kolmogorov-Smirnov. Los resultados obtenidos de acuerdo a la imagen superior de la *figura 4.20* se detalla en la *tabla 4.36*.

Tabla 4.36: Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov (Test de Normalidad) para n=36 (5to periodo).

Pts. de Medición	d ABS(FOR _{acum} -FER _{acum})	k (tabla)	D<k H ₀	Curtosis	Asimetría
n =36	0,14 intervalo 1	0,22	0,14<0,22 VERDADERO	0,02	0,69

El valor k=0,22 es obtenido desde tablas estadísticas para el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para un conjunto de datos n=36, con p-value=0,77 (para ambas hipótesis), para un nivel de significación de $\alpha=0,05$.
 FOR_{acum}: Frecuencia Observada Relativa Acumulada.
 FER_{acum}: Frecuencia Esperada Relativa Acumulada.
 H₀: Hipótesis nula (cumple una distribución normal).

El parámetro estadístico “d” obtenido desde la diferencia máxima positiva entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas relativas acumuladas (FOR) y (FER) respectivamente fue de 0,14 en el intervalo 1 (de tamaño 0,17 y rango [3,35-5,54]) de la imagen superior de la *figura 4.8*, que de acuerdo al contraste de hipótesis (0,14<0,22) la hipótesis nula no se puede rechazar. Los valores de curtosis y asimetría reflejan la forma y orientación de la distribución normal de los logaritmos de las concentraciones. Con respecto a la curtosis el valor fue de 0,02 (lepticúrtica) y el coeficiente de asimetría de 0,69 (orientación hacia la derecha).

La *tabla 4.37* refiere a la probabilidad acumulada de que las viviendas superen ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia fueron (≥ 100 , ≥ 148 y ≥ 200) Bq/m³.

Tabla 4.37: Probabilidades acumuladas para una distribución normal (5to periodo).

Parámetro	Hipótesis	P[Z≤ln(C _{Rn-222})](Bq/m ³)		
		≥ 100	EPA (≥ 148)*	NRPB(≥ 200)**
Probabilidad (%)	1	18,41 % (Z=1,31)	5,26 % (Z=1,62)	1,50 % (Z=2,17)
Z= $\frac{[\ln(NR) - \ln(MG)]}{\ln(DEG)}$	2	9,51 % (Z=1,31)	2,12 % (Z=2,03)	0,49 % (Z=2,58)

EPA*: Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.
 NRPB**: Organismo Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña. Este mismo valor también fue adoptado por el Organismo Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

De acuerdo a la *tabla 4.37* bajo la hipótesis 1, la probabilidad de que las casas monitoreadas durante el primer periodo superen los niveles de referencia de la EPA y del NRPB son del 5,26 % y del 0,66 % respectivamente, mientras la probabilidad bajo la hipótesis 2, son de 2,12 % y 0,49 % respectivamente.

4.7. Análisis de las medias y varianzas de las concentraciones obtenidas durante los cinco periodos

En la *tabla 4.38* se detalla los valores promedios (MA) de la concentración de la concentración de la actividad del Rn-222, como así mismo de sus respectivas desviación estándar aritmética (DSA) y error estándar de la media (ESM).

Los periodos de monitoreo fueron desde Setiembre del 2015 hasta Enero del 2017.

Tabla 4.38: Resumen de las concentraciones de la actividad del Rn-222 durante los cinco periodos de monitoreo.

Hipótesis	Periodo de monitoreo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)				
		09/15-12/15	12/15-03/16	04/16-06/16	06/16-09/16	10/16-01/17
		P1	P2	P3	P4	P5
1	MA+DSA	74±29	58±25	72±36	85±38	73±35
	ESM	10	6	9	10	10
2	MA+DSA	59±23	46±20	57±29	68±30	58±28
	ESM	8	5	7	8	8

* MA: Media Aritmética. DSA: Desviación Estándar Aritmética. ESM: Error Estándar de la Media.

La figura 4.21 representa los valores promedios y la variación de las concentraciones de la actividad del Rn-222 obtenidos durante los cinco periodos de monitoreo.

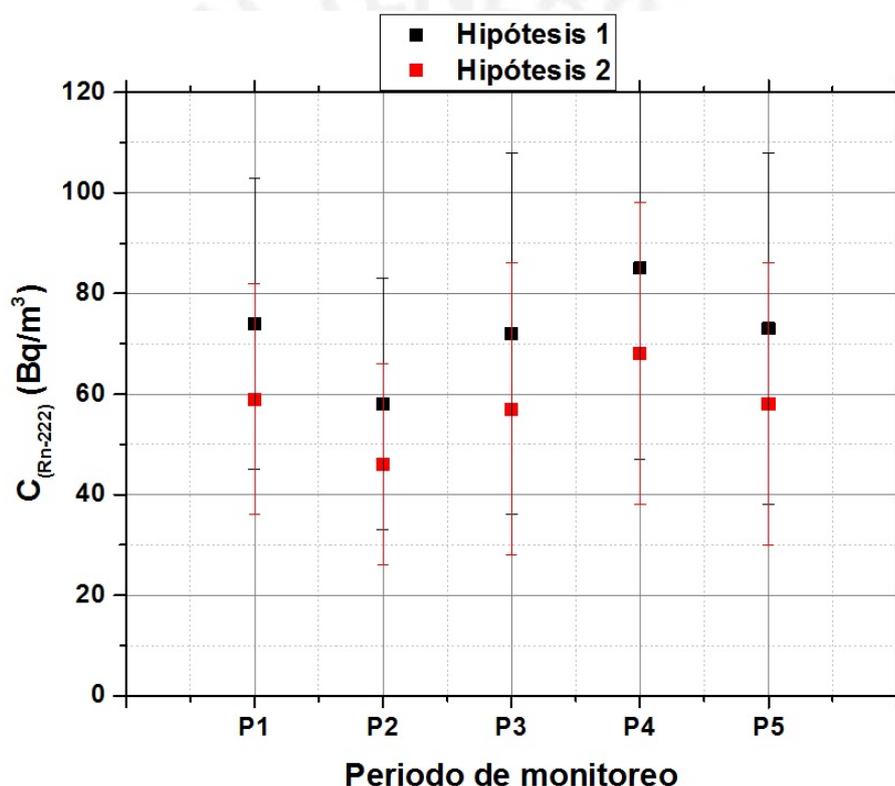


Figura 4.21: Valores promedio y de desviación estándar aritmética(MA±DSA) de las concentraciones de la actividad del Rn-222 por periodo.

Debido que las distribuciones del logaritmo de las concentraciones de la actividad del Rn-222 para ambas hipótesis siguen una distribución normal, contrastados en las *tablas 4.8, 4.15, 4.22, 4.29 y 4.36*, se procedió a analizar si existe o no, diferencia significativa entre las varianzas y medias de dichas concentraciones (Bq/m³) para cada periodo de monitoreo.

4.7.1. Varianzas

Las hipótesis estadísticas planteadas fueron:

H(0): Hipótesis nula: $\sigma_{(i)}^2/\sigma_{(j)}^2=1$; **NO EXISTE** diferencia significativa entre las varianzas de la concentración de la actividad del Rn-222 de un periodo (i) respecto a otro (j).

H(1): Hipotésis alternativa: $\sigma_{(i)}^2/\sigma_{(j)}^2 \neq 1$, **EXISTE** diferencia significativa entre las varianzas de la concentración de la actividad del Rn-222 de un periodo (i) respecto a otro (j).

La *tabla 4.39* muestra los valores estadísticos “F” para un nivel de significancia $\alpha=0,05$ y los p-value (probabilidad de compatibilidad o de aceptación) de acuerdo al criterio de hipótesis empleado. Los valores corresponden al criterio 1 (Presencia de Rn-222 y progenie).

Tabla 4.39: Contraste de hipótesis de varianzas (Test-F) para concentraciones de la actividad del Rn-222 para cada par de muestras independientes (Criterio 1).

Nº de Comb.	Periodos Pi/Pj	Grados de Libertad (n-1)		Estadístico F	p-value	H(0) p-value>0,05
		Numerador	Denominador			
1	1/2	21	57	1,01	0,93	VERDADERO
2	1/3	21	53	0,81	0,62	VERDADERO
3	1/4	21	49	1,14	0,69	VERDADERO
4	1/5	21	35	1,01	0,96	VERDADERO
5	2/3	57	53	0,80	0,42	VERDADERO
6	2/4	57	49	1,12	0,68	VERDADERO
7	2/5	57	35	0,99	0,97	VERDADERO
8	3/4	53	49	1,40	0,24	VERDADERO
9	3/5	53	35	1,24	0,51	VERDADERO
10	4/5	49	35	0,89	0,68	VERDADERO

Los resultados obtenidos reflejan que no existe diferencias significativas entre el cociente entre las varianzas de las concentraciones de la actividad del Rn-222 de un periodo con respecto a otro. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

Con respecto al criterio 2 (Presencia mixta de Rn-222 y Rn-220 con sus respectivas progenies), se obtuvieron los mismos resultados estadísticos y de probabilidad como los de la *tabla 4.39* y por ende la misma interpretación. Además se comprobó que no hubo diferencias significativas en las concentraciones del criterio 1 con respecto a la del criterio 2 para un mismo periodo. Estos valores de probabilidad siempre fueron iguales, con (p-value=1).

4.7.2. Medias

Las hipótesis estadísticas planteadas fueron:

H(0): Hipótesis nula: $\bar{X}_{(i)} - \bar{X}_{(j)}=0$; **NO EXISTE** diferencia significativa entre las medias de la concentración de la actividad del Rn-222 de un periodo (i) respecto a otro (j).

H(1): Hipotésis alternativa: $\bar{X}_{(i)} - \bar{X}_{(j)} \neq 0$, **EXISTE** diferencia significativa entre las medias de la concentración de la actividad del Rn-222 de un periodo (i) respecto a otro (j).

Ambas hipótesis fueron asumidas considerando varianzas iguales, de acuerdo a lo obtenido en el contraste de hipótesis anterior.

La *tabla 4.40* muestra los valores estadísticos “T” para un nivel de significancia $\alpha=0,05$ y los p-value (probabilidad de compatibilidad o de aceptación) de acuerdo al contraste de hipótesis empleado.

Tabla 4.40: Contraste de hipótesis de medias (Test-T Student) para concentraciones de la actividad del Rn-222 para cada par de muestras independientes por periodo y entre criterios adoptados.

Nº Comb.	Criterio	Periodos Pi/Pj	Grados de Libertad (N-2)	Estadístico T	p-value	H(0) p-value > 0,05
1	Entre periodos (hipótesis 1)	1/2	78	1,58	0,12	VERDADERO
2		1/3	74	0,21	0,84	VERDADERO
3		1/4	70	-1,33	0,19	VERDADERO
4		1/5	56	0,11	0,91	VERDADERO
5		2/3	110	-1,70	0,09	VERDADERO
6		2/4	106	-3,86	$0,02 \times 10^{-2}$	FALSO
7		2/5	92	-1,73	0,09	VERDADERO
8		3/4	102	-1,89	0,06	VERDADERO
9		3/5	88	-0,12	0,90	VERDADERO
10		4/5	84	1,69	0,09	VERDADERO
11	Entre hipótesis 1 y 2 (i/i*)	1/1*	42	1,36	0,18	VERDADERO
12		2/2*	114	2,23	0,03	FALSO
13		3/3*	106	2,03	0,04	FALSO
14		4/4*	98	2,19	0,03	FALSO
15		5/5*	70	1,17	0,08	VERDADERO

Los resultados reflejan que no existe diferencias significativas entre la diferencia de las medias de las concentraciones de la actividad del Rn-222 de un periodo con respecto a otro, excepto en los periodos 2/4, donde la probabilidad de no rechazar la hipótesis de partida (nula) es prácticamente cero. Se puede analizar que estas diferencias significativas corresponden a periodos de verano-otoño con respecto a invierno-primavera donde las concentraciones de la actividad del Rn-222 son bajas y altas, cuyos valores son de $(58 \pm 25) \text{Bq/m}^3$ y $(85 \pm 38) \text{Bq/m}^3$ respectivamente.

Con respecto a los criterios planteados, las diferencias de las medias de las concentraciones de la actividad del Rn-222 de los periodos (2/2*, 3/3* y 4/4*) son significativamente diferentes, en comparación de las concentraciones de los periodos (1/1* y 5/5*). Ante esta observación atípica y antes de cometer un error estadístico de rechazar la hipótesis nula en los tres casos, se pudo observar que disminuyendo el nivel de significación α a 0,01, permitió que en los cinco últimas combinaciones de la *tabla 4.40* no presentaran diferencias significativas y por lo tanto la hipótesis nula no se rechazó.

4.8. Resultados generales en función al tiempo efectivo de monitoreo

A continuación en la *tabla 4.41* se presenta los resultados de las concentraciones promedio de la actividad del Rn-222 de las 84 viviendas monitoreadas desde Setiembre del 2015 a Enero del 2017.

Tabla 4.41: Resultado general de las C_{Rn-222} promedio de las 84 viviendas monitoreadas (Set. 2015 - Ene. 2017).

Detector C-13	Coordenada GPS	Tiempo total de monitoreo (días)	C_{Rn-222} Promedio (Bq/m ³)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
3	-12,0715;-76,9948	221	91±22	73±17
4	-12,0760;-76,9998	60	26±3	21±3
5	-12,0768;-76,9994	218	49±19	39±16
6	-12,0768;-76,9994	61	137±23	110±18
7	-12,0771;-76,9982	333	27±5	21±4
8	-12,0752;-76,9950	65	65±7	52±6
9	-12,0767;-76,9994	60	73±15	58±12
10	-12,0769;-76,9997	60	42±9	33±8
11	-12,0754;-77,0001	254	64±21	51±17
12	-12,0753;-77,0002	225	167±24	134±19
13	-12,0788;-76,9903	133	43±10	35±7
14	-12,0754;-77,0001	321	139±20	111±17
15	-12,0752;-77,0008	62	157±26	125±21
16	-12,0778;-77,0075	68	111±22	89±17
17	-12,0786;-76,9987	359	37±10	29±8
18	-12,0742;-76,9992	292	55±14	44±11
19	-12,0672;-76,9916	266	96±28	77±23
20	-12,0754;-77,0001	299	108±17	86±13
21	-12,0768;-76,9995	340	42±17	33±13
22	-12,0768;-76,9995	278	58±17	46±13
23	-12,0768;-76,9995	220	26±7	21±6
24	-12,0716;-76,9994	217	80±24	64±19
25	-12,0734;-76,9998	65	51±11	41±8
26	-12,0757;-76,9998	62	74±15	59±12
28	-12,0762;-76,9987	61	87±15	69±12
29	-12,0766;-77,0022	315	140±35	112±28
30	-12,0768;-76,9995	88	33±7	26±6
31	-12,0788;-77,0030	313	70±15	56±12
33	-12,0768;-77,0021	133	36±4	29±3
34	-12,0790;-77,0044	142	199±40	159±32
35	-12,0746;-77,0006	66	40±13	32±10
36	-12,0767;-76,9991	159	38±9	30±8
37	-12,0768;-76,9979	243	147±15	117±12
38	-12,0777;-77,0004	158	69±27	55±22
39	-12,0770;-77,0003	338	42±10	34±8
40	-12,0777;-77,0006	65	85±24	68±19
41	-12,0753;-77,0048	222	120±20	96±16
42	-12,0768;-76,9994	245	49±14	39±11
43	-12,0760;-77,0003	295	50±10	40±8
44	-12,0760;-77,0003	320	39±14	31±11
45	-12,0763;-77,0011	220	64±13	51±11
46	-12,0772;-77,0025	208	50±8	40±6
47	-12,0787;-77,0039	134	63±15	50±12
48	-12,0786;-77,0036	327	39±12	31±10
49	-12,0786;-77,0056	282	68±15	54±12
50	-12,0743;-77,0057	135	47±11	37±8
51	-12,0770;-77,0056	135	39±14	32±11
52	-12,0780;-77,0034	63	16±2	13±2
54	-12,0780;-77,0033	220	105±34	84±27
55	-12,0765;-77,0033	138	94±44	75±35

(continuación tabla 4.41)

Detector C-13	Coordenada GPS	Tiempo total de monitoreo (días)	C_{Rn-222} Promedio (Bq/m ³)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
56	-12,0775;-77,0060	112	27±6	22±4
57	-12,0795;-77,0077	317	75±10	60±8
58	-12,0787;-77,0082	65	19±3	16±2
59	-12,0781;-77,0083	239	166±58	100±47
60	-12,0792;-77,0079	227	32±9	25±7
61	-12,0759;-77,0066	217	48±11	38±9
62	-12,0751;-77,0061	297	64±18	51±14
64	-12,0759;-77,0007	330	48±15	38±12
66	-12,0788;-77,0030	247	45±15	36±12
67	-12,0778;-76,9959	307	257±44	205±35
68	-12,0783;-76,9949	316	74±17	59±14
69	-12,0812;-76,9920	147	41±13	33±10
70	-12,0807;-76,9882	259	51±15	40±12
71	-12,0807;-76,9882	215	56±14	45±11
72	-12,0786;-76,9921	314	41±15	33±12
73	-12,0773;-76,9905	78	25±3	20±3
74	-12,0767;-76,9939	323	82±23	65±18
75	-12,0734;-76,9914	360	59±9	47±7
76	-12,0733;-76,9912	356	31±11	25±9
77	-12,0733;-76,9912	293	57±16	46±13
78	-12,0742;-76,9933	323	37±13	30±11
79	-12,0730;-76,9950	190	37±7	30±5
80	-12,0710;-76,9954	78	54±6	43±5
83	-12,0783;-76,9999	252	49±11	39±9
84	-12,0768;-76,9995	94	23±6	19±5
88	-12,0744;-76,9993	231	131±24	104±19
89	-12,0786;-77,0056	227	69±17	55±13
91	-12,0781;-77,0005	269	32±7	26±6
92	-12,0778;-77,0007	109	43±8	34±6
93	-12,0799;-77,0065	196	139±21	111±17
97	-12,0779;-76,9975	134	76±4	60±3
98	-12,0717;-76,9998	72	113±23	90±18
104	-12,0797;-77,9923	130	34±5	27±4
106	-12,0828;-77,0027	130	58±10	46±8

Los resultados muestran que el 75,0 % y 59,5 % de las viviendas fueron monitoreadas por más de 4 y 6 meses respectivamente. En un monitoreo de esta magnitud, estos indicadores son favorables, porque se pudo hacer un seguimiento de la variabilidad de las concentraciones de la actividad del Rn-222 en cada una de ellas.

Además, el 79,8 % de las viviendas monitoreadas están por debajo del 30,0 % de variabilidad de las concentraciones durante el monitoreo, mientras el 20,2 % sí llega a superarlo. Por tratarse de un monitoreo con detectores descubiertos, era de esperarse que cierto número de viviendas (17 en total) presenten variaciones mayores del 30,0 %. Siendo más exhaustivos, la vivienda que presentó el mayor grado de variabilidad de las concentraciones (47,0 %) fue la identificada como C13-55, ubicada en las coordenadas (-12.0765, -77.0033) correspondientes al 2do y 3er periodo de monitoreo (138 días), aunque es aún necesario seguir con el monitoreo para conocer si estas variaciones se mantienen constantes en el tiempo, se identificó que los dos ambientes monitoreados presentaron buena ventilación y sin fisuras en las paredes.

Por otro lado, bajo la hipótesis 1 el 6,0% y el 1,2% de las viviendas monitoreadas (5 y 1 en total) superan los valores de los niveles de acción de la EPA ($> 148 \text{ Bq/m}^3$) y NRPB ($> 200 \text{ Bq/m}^3$) respectivamente, mientras bajo la hipótesis 2, el 2,4% y el 1,2% (2 y 1 en total) superan los niveles de acción mencionados respectivamente.

Las dos viviendas en que coinciden ambas hipótesis son las identificadas como C13-34 y C13-67, ubicadas en las coordenadas (-12,0790;-77,0044) y (-12,0778;-76,9959). En la primera vivienda el valor de la concentración fue de $(199 \pm 40) \text{ Bq/m}^3$ y $(159 \pm 32) \text{ Bq/m}^3$ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. De acuerdo a los datos obtenidos desde el apéndice D, ambas habitaciones monitoreadas presentaron un bajo índice de ventilación y con fisuras. En la segunda vivienda el valor de la concentración fue de $(257 \pm 44) \text{ Bq/m}^3$ y $(205 \pm 35) \text{ Bq/m}^3$ para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. De acuerdo a los datos obtenidos en la encuesta, también ambas habitaciones monitoreadas presentaron un bajo índice de ventilación.

4.9. Promedio ponderado de la concentración de la actividad del Rn-222 en función del grillado

En esta sección se presentan los valores promedios de las concentraciones de la actividad del Rn-222 en función del grillado en el distrito de San Luis de acuerdo al criterio establecido en la metodología, la localización de las viviendas se determinó a través de las coordenadas GPS y que a su vez sirven para determinar los valores de concentración sobre el mapa del distrito.

Además, se determinó el promedio ponderado de la C_{Rn-222} por población a través de la (ecuación 3.12). Para ello se tuvo en cuenta la población total involucrada en el monitoreo de acuerdo a la encuesta (apéndice D) y de la población en cada grilla subdividida en el distrito.

La *figura 4.22* muestra la distribución y enumeración de las grillas en el distrito y la ubicación de las viviendas durante todo el tiempo de monitoreo.

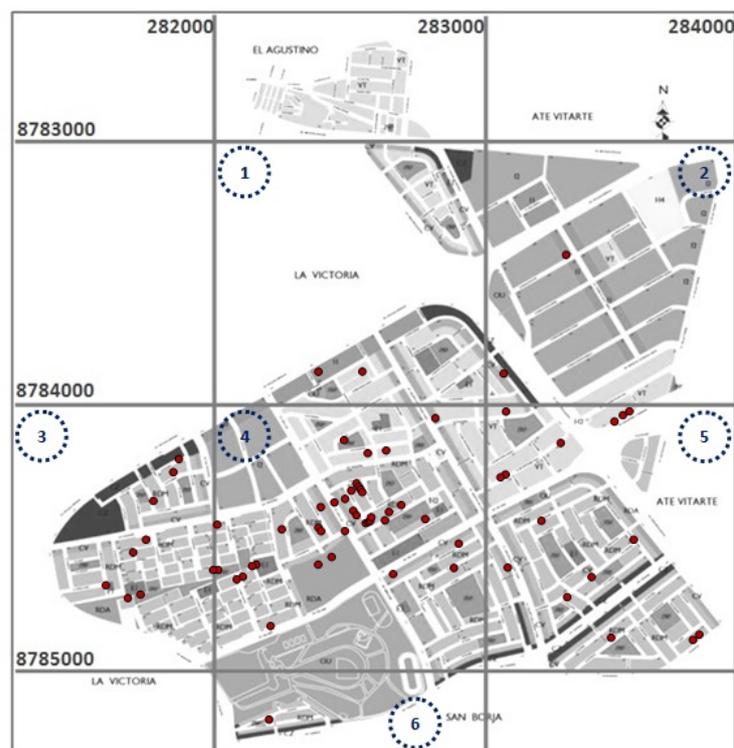


Figura 4.22: Enumeración del grillado y distribución de las viviendas monitoreadas (Set. 2015-Ene.2017).

La *tabla 4.42* muestra los resultados obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 de las 84 viviendas monitoreadas en función de las grillas y del promedio ponderado de éstas para ambas metodologías.

Tabla 4.42: Valores de la C_{Rn-222} por grilla y promedio ponderado por población.

Grilla	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m^3)						Promedio Ponderado	ESM
	1 (n=2)	2 (n=3)	3 (n=15)	4 (n=47)	5 (n=16)	6 (n=1)		
Nº viviendas	67±13	109±15	69±13	72±7	48±4	58±10	68±21	8
Hipótesis 1	67±13	109±15	69±13	72±7	48±4	58±10	68±21	8
Hipótesis 2	54±10	87±12	53±10	57±6	39±4	46±8	54±16	7
Pobl./grilla	6	11	69	177	53	4	320	Total

Los resultados obtenidos, muestran un alto índice de monitoreo en la grilla 4, correspondientes a una población de 177 personas que residen en 47 viviendas. Por consiguiente, en las grillas 1 y 2 y 6 un bajo índice de monitoreo, correspondiente a una población de 6, 4 y 11 personas que residen en 2, 1 y 3 viviendas respectivamente.

Haciendo un paréntesis en estas tres grillas (1, 2 y 6), si bien es cierto que el número de viviendas monitoreadas fueron menores a 4 (según 3.2.1. Criterio de muestreo (pag. 42)) para una densidad poblacional de 16 584 habitantes/ km^2 en el distrito de San Luis, se puede notar que la densidad poblacional en estas grillas son menores al valor establecido y siguiendo las consideraciones desde la *tabla 3.4*, esto pudo ser compensado monitoreando 1 o hasta 2 viviendas. La grilla que se encuentra arriba de la grilla 1, también pertenece al distrito de San Luis, pero no se pudo acceder a ella por cuestiones

de seguridad.

El promedio ponderado de la concentración de la actividad del Rn-222 por población fue de $(68 \pm 21) \text{Bq/m}^3$ y $(54 \pm 16) \text{Bq/m}^3$ en las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Ambos valores se encontraron por debajo de los niveles de referencia proporcionados por la EPA (148Bq/m^3) y NRPB (200Bq/m^3).

4.10. Mapa del Rn-222 del distrito de San Luis

A continuación se presenta en las *figuras 4.23 y 4.24* los mapas del Rn-222 del distrito de San Luis y la distribución de las viviendas monitoreadas en función al grillado para las hipótesis 1 y 2. Cada color representa los valores promedios de las concentraciones obtenidas desde la *tabla 4.41*.

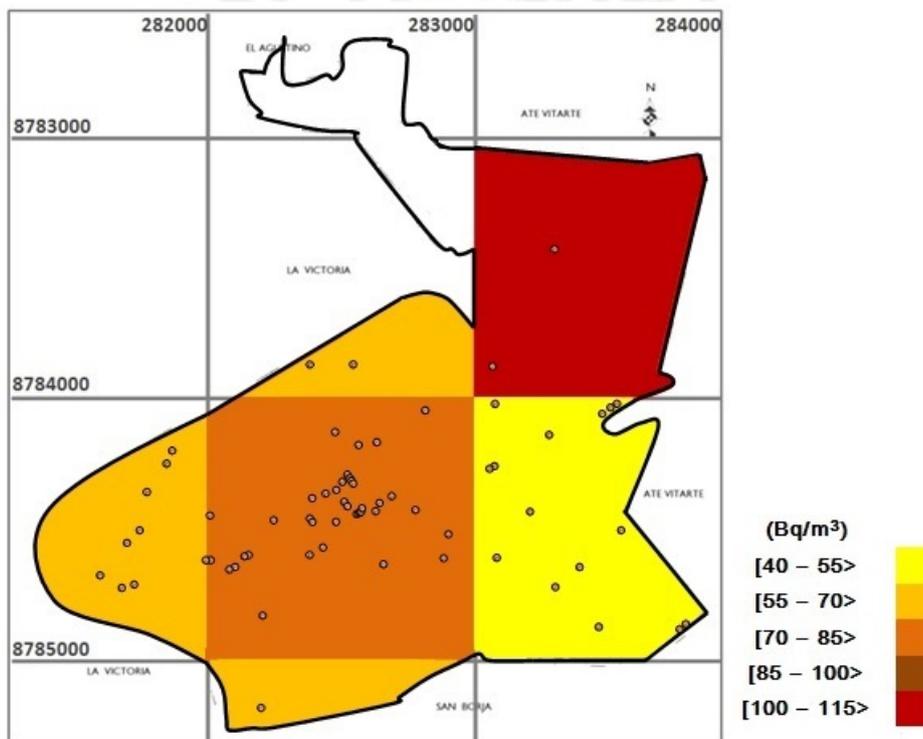


Figura 4.23: Mapa del Rn-222 (Hipótesis 1).

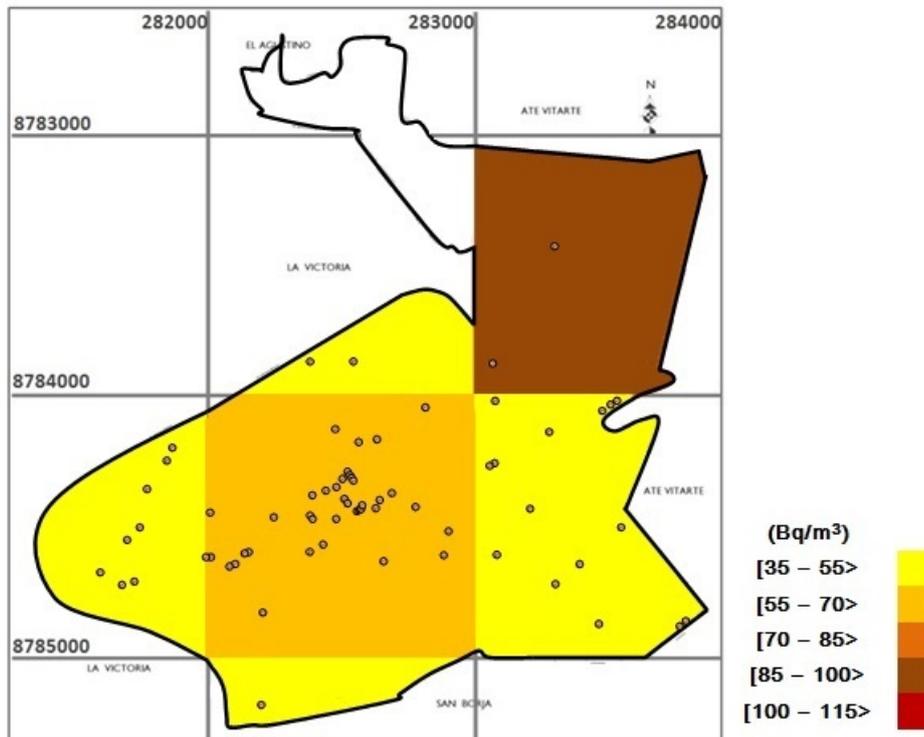


Figura 4.24: Mapa del Rn-222 (Hipótesis 2).

4.11. Factores que influyen en la concentración de la actividad del Rn-222

En esta sección se realizó un análisis de la correlación de los factores recopilados en la encuesta (Apéndice D), consideradas como variables independientes y los valores de las concentraciones obtenidos a lo largo del monitoreo en el distrito de San Luis, considerado como el conjunto de datos perteneciente a la variable dependiente.

El factor que permite relacionar ambos tipos de variables es el factor de correlación de Pearson (R), que refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos, donde la fuerza de la correlación $|R|$ es determinado de la siguiente manera^[11]:

- a. 0,00 - 0,39: correlación débil,
- b. 0,40 - 0,59: correlación moderada,
- c. 0,60 - 1,00: correlación fuerte.

Para ello, de acuerdo a la teoría, la concentración es el resultado del producto de diversas variables independientes. Éstas pueden ser: temperatura, humedad relativa, tipo de habitación monitoreada, ubicación de los detectores, tipo de material de construcción en las paredes, pisos, entre muchas más. Por esta razón, para establecer esta dependencia lineal, fue necesario trabajar con los logaritmos de todas las variables involucradas.

4.11.1. Variables meteorológicas

Los valores de las variables meteorológicas, fueron obtenidas a través de los datos históricos proporcionados por la estación meteorológica del Campo de Marte (distrito de Jesús María), desde Setiembre del 2015 hasta Enero del 2017, haciendo un total de 487 datos tanto de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%). En la *tabla 4.43* se muestra los valores de las concentraciones obtenidas para las hipótesis planteadas y los valores promedios de las variables meteorológicas para cada periodo de monitoreo.

Tabla 4.43: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de las variables meteorológicas por periodo de monitoreo.

Periodo de monitoreo	C_{Rn-222} (Bq/m^3)		Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	H.R. (%)
	Hipótesis 1	Hipótesis 2		
1	74 ± 10	59 ± 8	$19,01 \pm 1,28$	$84,04 \pm 0,45$
2	58 ± 6	46 ± 5	$23,28 \pm 1,75$	$79,95 \pm 2,34$
3	72 ± 9	57 ± 7	$19,65 \pm 2,56$	$84,49 \pm 2,83$
4	85 ± 10	68 ± 8	$16,77 \pm 0,34$	$86,63 \pm 0,68$
5	73 ± 10	58 ± 8	$20,58 \pm 2,63$	$80,33 \pm 1,56$

La *figura 4.25* refleja las variaciones de las concentraciones en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa para cada hipótesis planteada para cada periodo de monitoreo.

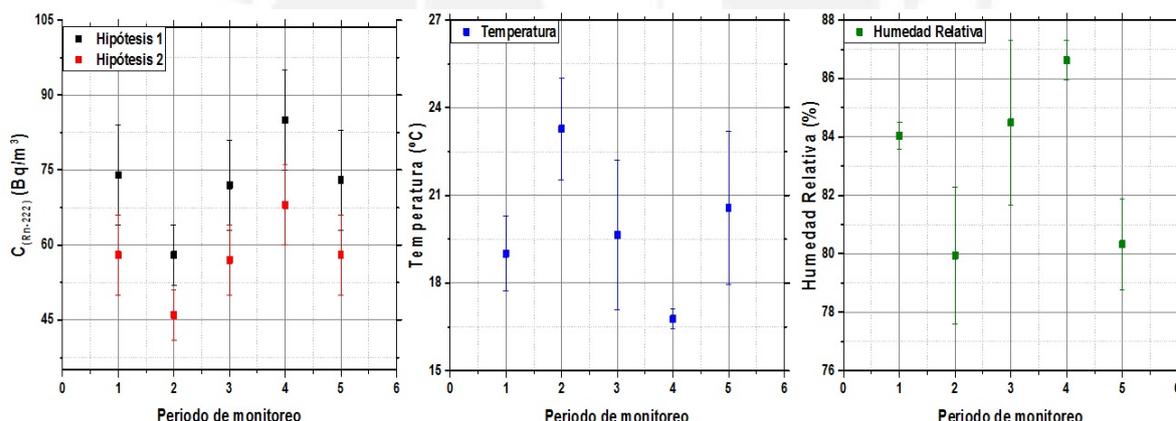


Figura 4.25: Valores de las concentraciones (Bq/m^3), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) promedio para cada periodo de monitoreo.

La influencia de las variables meteorológicas en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.44* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R^2), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.44: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y las variables meteorológicas.

Logaritmo de las variables	Parámetro	Ln (C)	
		Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (T)	Coef. Pearson (R)	-0,97	-0,96
	R ²	0,93	0,92
	p-value	0,01	0,01
Ln (HR)	Coef. Pearson (R)	0,80	0,79
	R ²	0,65	0,62
	p-value	0,10	0,11

Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre las variables de concentración y temperatura. Existe una correlación negativa fuerte entre ellas ($R=-0,97$, $R^2=0,93$, $p=0,01$) y ($R=-0,96$, $R^2=0,92$, $p=0,01$) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Como se visualiza en la *figura 4.25* los valores de las concentraciones toman su máximo valor $(85\pm 10)\text{Bq/m}^3$ y $(68\pm 8)\text{Bq/m}^3$ cuando la temperatura promedio es mínima (4to periodo: $16,77\pm 0,34$), correspondiente a la estación de (invierno-primavera) y viceversa. Además, la correlación entre las variables de concentración y humedad relativa es positiva ($R=0,80$, $R^2=0,65$, $p=0,10$) y ($R=0,79$, $R^2=0,62$, $p=0,11$) para ambas hipótesis.

Por tratarse de un monitoreo con detectores descubiertos, la influencia de las variables meteorológicas es muy importante en los valores de las concentraciones de la actividad del Rn-222.

4.11.2. Ubicación de la habitación

En la *tabla 4.45* se muestra los valores de las concentraciones en función de la ubicación de la habitación por cada periodo de monitoreo y el número de detectores empleados.

Tabla 4.45: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función de la ubicación de las habitaciones por periodo de monitoreo.

Periodo Hipótesis	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1er Piso	84±24 (n=14)	70±20	57±10 (n=52)	45±8	73±19 (n=50)	56±14	87±15 (n=45)	69±13	76±17 (n=30)	61±14
2do Piso	71±6 (n=13)	53±20	45±6 (n=26)	37±5	54±17 (n=25)	44±14	82±7 (n=27)	65±5	69±10 (n=24)	55±8
3er Piso	58±13 (n=10)	45±11	38±12 (n=18)	31±10	36±13 (n=19)	29±10	66±26 (n=12)	58±19	64±35 (n=7)	56±25
4to Piso	28±5 (n=1)	22±4	19±3 (n=4)	15±2	17±4 (n=4)	13±3	38±4 (n=4)	30±3	29±5 (n=4)	23±4
5to Piso	30±4 (n=2)	24±3	16±4 (n=2)	12±3	19±3 (n=6)	15±2	24±5 (n=2)	19±4	—	—
Total de detectores	40		102		104		90		65	

La influencia de la ubicación de la habitación en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.46* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad

(p-value).

Tabla 4.46: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la ubicación de la habitación.

Logaritmo de las variables	Piso	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (C)	1ero	Coef. Pearson (R)	0,95	0,90
		R ²	0,91	0,82
		p-value	0,01	0,04
	2do	Coef. Pearson (R)	0,92	0,93
		R ²	0,84	0,87
		p-value	0,03	0,02
	3ero	Coef. Pearson (R)	0,69	0,69
		R ²	0,48	0,48
		p-value	0,19	0,19
	4to	Coef. Pearson (R)	0,73	0,71
		R ²	0,54	0,50
		p-value	0,16	0,18
	5to	Coef. Pearson (R)	0,70	0,57
		R ²	0,49	0,32
		p-value	0,19	0,32

Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre las variables de concentración y las habitaciones ubicadas en el primer y segundo piso. Existe una correlación positiva fuerte entre ellas. En referencia a las habitaciones ubicadas en el primer piso las correlaciones fueron (R=0,95, R²=0,91, p=0,01) y (R=0,90, R²=0,82, p=0,04) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Mientras que en las habitaciones ubicadas en el segundo piso, las correlaciones fueron (R=0,92, R²=0,84, p=0,03) y (R=0,93, R²=0,87, p=0,02) para ambas metodologías.

Aunque las habitaciones ubicadas en el tercer, cuarto y quinto nivel presentan correlaciones positivas fuertes, la mayor influencia en los valores de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se debe a las habitaciones ubicadas en los dos primeros niveles.

4.11.3. Tipo habitación

En la *tabla 4.47* se muestra los valores de las concentraciones en función del tipo de habitación monitoreada en los cinco periodos de estudio y del número de detectores empleados.

Tabla 4.47: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función del tipo de habitación monitoreada durante los cinco periodos de estudio.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Sala	60±18 (n=12)	45±14	39±9 (n=28)	31±7	48±13 (n=32)	38±11	60±18 (n=23)	48±14	48±15 (n=16)	42±10
Dormitorio	60±16 (n=20)	50±16	46±11 (n=47)	37±9	55±15 (n=51)	45±12	62±15 (n=44)	49±12	61±18 (n=27)	49±14
Cocina	96±52 (n=3)	76±41	56±31 (n=8)	45±22	103±43 (n=7)	74±29	75±34 (n=7)	67±23	99±52 (n=5)	130±18
Comedor	46±21 (n=2)	37±17	104±15 (n=1)	83±12	—	—	—	—	—	—
Baño	92±13 (n=1)	74±10	84±12 (n=1)	67±10	—	—	141±19 (n=1)	112±15	130±18 (n=1)	104±14
Hall	—	—	34±6 (n=1)	28±5	—	—	45±7 (n=1)	36±5	38±6 (n=1)	30±5
Pasadizo	—	—	66±17 (n=2)	53±14	—	—	—	—	60±9 (n=1)	48±7
Lugares de Trabajo	38±4 (n=2)	30±3	49±11 (n=14)	39±9	61±20 (n=14)	41±14	78±20 (n=14)	63±17	69±21 (n=14)	55±17
Total de detectores	40		102		104		90		65	

La influencia del tipo de habitación monitoreada en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.48* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.48: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de habitación monitoreada.

Logaritmo de las variables	Tipo de Habitación	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (C)	Sala	Coef. Pearson (R)	0.89	0.96
		R ²	0.79	0.92
		p-value	0.04	0.01
	Dormitorio	Coef. Pearson (R)	0.92	0.89
		R ²	0.85	0.80
		p-value	0.03	0.04
	Cocina	Coef. Pearson (R)	0.54	0.74
		R ²	0.29	0.55
		p-value	0.35	0.15
	Comedor	Coef. Pearson (R)	-1.00	-1.00
		R ²	1.00	1.00
		p-value	—	—
	Baño	Coef. Pearson (R)	0.80	0.80
		R ²	0.64	0.64
		p-value	0.20	0.20

(continuación tabla 4.48)

Logaritmo de las variables	Tipo de Habitación	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (C)	Pasadizo	Coef. Pearson (R)	-1.00	-1.00
		R ²	1.00	1.00
		p-value	-	-
	Lugares de Trabajo	Coef. Pearson (R)	0.48	0.74
		R ²	0.23	0.55
		p-value	0.41	0.15

Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre las variables de concentración y el tipo de habitaciones monitoreadas (salas y dormitorios). Existe una correlación positiva fuerte entre ellas. En referencia a la habitación (salas) las correlaciones fueron (R=0,89, R²=0,79, p=0,04) y (R=0,96, R²=0,92, p=0,01) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Mientras que en el otro tipo de habitación (dormitorios), las correlaciones fueron (R=0,92, R²=0,85, p=0,03) y (R=0,89, R²=0,80, p=0,04) para ambas metodologías.

Habitaciones como baño y hall, presentan también una correlación positiva fuerte, pero de acuerdo a los valores de probabilidad calculados, no son significativamente diferentes, además las muestras de estos tipos de habitaciones son insuficientes para asegurar un grado de correlación con la variable concentración. Asimismo, las habitaciones monitoreadas tanto cocina y lugares de trabajo (entradas, almacenes, oficina, taller, sastrería y salón de belleza) presentan correlación positiva moderada (R=0,54, R²=0,29, p=0,35) y (R=0,48, R²=0,23, p=0,41) para la hipótesis 1, pero correlación positiva fuerte (R=0,74, R²=0,55, p=0,15) y (R=0,74, R²=0,55, p=0,15) para la hipótesis 2.

Por otro lado, las habitaciones comedor y pasadizo mostraron correlación negativa perfecta (R=-1,00, R²=1,00, p=0,00). No existe una interpretación profunda sobre ello, debido a que el tamaño muestral fue insuficiente en este caso.

Finalmente, la mayor influencia en los valores de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se debe a las habitaciones (salas y dormitorios), que representaron el 74,81 % de las habitaciones monitoreadas en total.

4.11.4. Tipo de ventilación

En la *tabla 4.49* se muestra los valores de las concentraciones en función del tipo de ventilación de las habitaciones durante los cinco periodos de monitoreo y del número de detectores empleados.

Tabla 4.49: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función del tipo del tipo de ventilación de las habitaciones durante los cinco periodos de estudio.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Buena	55±5 (n=27)	44±4	49±3 (n=75)	39±2	56±3 (n=80)	44±3	67±4 (n=64)	54±4	61±5 (n=44)	48±4
Regular	95±21 (n=4)	76±17	64±9 (n=15)	51±8	94±15 (n=9)	75±12	98±15 (n=9)	78±12	79±13 (n=8)	63±11
Mala	122±12 (n=9)	98±10	100±15 (n=12)	80±12	132±20 (n=15)	105±16	132±19 (n=17)	105±15	113±22 (n=13)	90±17
Total de detectores	40		102		104		90		65	

La influencia del tipo de ventilación de la habitación monitoreada en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.50* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.50: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de ventilación de la habitación monitoreada.

	Tipo de Ventilación	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (C)	Buena	Coef. Pearson (R)	0.92	0.92
		R ²	0.85	0.85
		p-value	0.03	0.03
	Regular	Coef. Pearson (R)	0.89	0.88
		R ²	0.79	0.78
		p-value	0.05	0.05
	Mala	Coef. Pearson (R)	0.86	0.84
		R ²	0.73	0.71
		p-value	0.06	0.07

Los resultados muestran que existe una correlación positiva fuerte entre las concentraciones y el tipo de ventilación. No existe una variación significativa entre los tres tipos de ventilación analizados en este estudio. Esto demuestra, que las concentraciones de la actividad del Rn-222 son influenciados por el tipo de ventilación en las habitaciones, contrastando con la literatura.

El tipo de ventilación categorizado como “buena” tiene una correlación de (R=0,92, R²=0,85, p=0,03) y (R=0,92, R²=0,85, p=0,03). El tipo de ventilación “regular” con una correlación de (R=0,89, R²=0,79, p=0,05) y (R=0,88, R²=0,78, p=0,05) y el categorizado como “mala” con una correlación de (R=0,86, R²=0,73, p=0,06) y (R=0,84, R²=0,71, p=0,07). En los tres casos para las hipótesis 1 y 2 respectivamente.

4.11.5. Material de las paredes

En la *tabla 4.51* se muestra los valores de las concentraciones en función al material de las paredes propias de las habitaciones monitoreadas durante los cinco periodos, como asimismo del número de detectores empleados.

Tabla 4.51: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al material de las paredes

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ladrillo con esmalte	38±4 (n=2)	30±3	37±2 (n=2)	30±2	26±4 (n=2)	21±3	45±6 (n=2)	36±5	37±4 (n=2)	30±3
Ladrillo con pintura	75±8 (n=30)	60±6	59±4 (n=88)	47±3	73±6 (n=91)	58±4	87±6 (n=78)	69±5	78±7 (n=57)	62±6
Ladrillo con látex	79±13 (n=8)	63±11	49±7 (n=8)	39±6	59±16 (n=7)	47±13	55±5 (n=6)	44±4	45±7 (n=4)	36±6
Ladrillo sin pintura	—	—	47±3 (n=4)	37±2	61±2 (n=4)	49±2	68±1 (n=4)	54±1	57±1 (n=2)	46±1
Total de detectores	40		102		104		90		65	

La influencia del material de las paredes de las habitaciones monitoreadas en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.52* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.52: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de material de la pared de las habitaciones monitoreadas.

Logaritmo de las variables	Tipo de pared	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln (C)	Ladrillo con esmalte	Coef. Pearson (R)	0.28	0.29
		R ²	0.08	0.08
		p-value	0.65	0.64
	Ladrillo con pintura	Coef. Pearson (R)	0.99	0.99
		R ²	0.98	0.98
		p-value	0.00	0.00
	Ladrillo con látex	Coef. Pearson (R)	0.29	0.29
		R ²	0.08	0.08
		p-value	0.64	0.63
	Ladrillo sin pintura	Coef. Pearson (R)	0.98	0.98
		R ²	0.96	0.95
		p-value	0.02	0.02

Los resultados muestran que existen diferencias significativas entre las concentraciones y tipo de material de las paredes (ladrillo con pintura y ladrillo sin pintura). Se evidencia una correlación positiva fuerte entre ambas. Con respecto a la variable (ladrillo + pintura) la correlación fue de (R=0,99, R²=0,98, p=0,00) y (R=0,99, R²=0,98, p=0,00) para la hipótesis 1 y 2 respectivamente. Mientras que el tipo de pared (ladrillo sin pintura) la correlación fue de (R=0,98, R²=0,96, p=0,02) y (R=0,98, R²=0,95, p=0,02) para ambas hipótesis.

Además, los tipos de paredes (ladrillo con esmalte y ladrillo con látex) presentaron una correlación positiva débil. Para la primera variable, la correlación fue de (R=0,28, R²=0,08, p=0,65) y (R=0,29, R²=0,08, p=0,64), mientras que para la segunda, la correlación fue de (R=0,29, R²=0,08, p=0,64) y (R=0,29, R²=0,08, p=0,63).

Si bien es cierto que cualquier tipo de recubrimiento (pintura, látex, esmalte, entre

otros) sobre el ladrillo, actúan como blindaje frente a la exhalación del Rn-222 y Rn-220 desde las paredes, se mostró en este caso que una de estas variables (ladrillo con pintura) junto al otro tipo de variable (ladrillo sin pintura) influenciaron en los valores de la concentración de la actividad del Rn-222.

4.11.6. Tipo de recubrimiento del piso

En la *tabla 4.53* se muestra los valores de las concentraciones en función del tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas durante los cinco periodos, como asimismo del número de detectores empleados.

Tabla 4.53: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Hipótesis										
Cemento	78±8 (n=19)	62±6	65±7 (n=27)	52±6	78±8 (n=30)	62±6	92±9 (n=28)	74±7	88±13 (n=18)	70±10
Mayólica	80±12 (n=16)	64±10	59±7 (n=33)	47±6	84±11 (n=35)	67±9	97±14 (n=30)	78±11	84±14 (n=23)	67±11
Parquet	41±10 (n=5)	33±8	55±6 (n=31)	44±5	61±8 (n=26)	49±6	73±8 (n=16)	58±6	59±6 (n=11)	47±5
Porcelanato	—	—	34±10 (n=2)	27±8	43±3 (n=2)	34±2	57±13 (n=3)	45±10	72±11 (n=1)	57±8
Loseta	—	—	44±5 (n=4)	35±4	36±2 (n=4)	29±2	54±5 (n=4)	43±4	42±5 (n=3)	33±4
Laminado	—	—	—	—	36±5 (n=4)	29±4	46±6 (n=4)	37±5	40±8 (n=4)	32±6
Vinílico	—	—	41±16 (n=3)	33±13	75±11 (n=1)	60±8	53±13 (n=3)	42±11	50±20 (n=3)	40±16
Tierra	—	—	50±2 (n=2)	40±2	61±2 (n=2)	49±2	67±3 (n=2)	54±2	57±1 (n=2)	46±1
Total de detectores	40		102		104		90		65	

La influencia del tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.54* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.54: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función del tipo de recubrimiento del piso de las habitaciones monitoreadas.

Logaritmo de las variables	Tipo de piso	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	Cemento	Coef. Pearson (R)	0.91	0.92
		R ²	0.84	0.85
		p-value	0.03	0.03
	Mayólica	Coef. Pearson (R)	0.98	0.98
		R ²	0.96	0.96
		p-value	0.00	0.00
	Parquet	Coef. Pearson (R)	0.33	0.31
		R ²	0.11	0.10
		p-value	0.58	0.61

(continuación tabla 4.54)

	Tipo de piso	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	Porcelanato	Coef. Pearson (R)	0,71	0,73
		R ²	0,50	0,53
		p-value	0,29	0,27
	Loseta	Coef. Pearson (R)	0,44	0,44
		R ²	0,19	0,19
		p-value	0,56	0,56
	Laminado	Coef. Pearson (R)	0,95	0,96
		R ²	0,90	0,93
		p-value	0,21	0,17
	Vinílico	Coef. Pearson (R)	0,47	0,45
		R ²	0,22	0,21
		p-value	0,53	0,55
	Tierra	Coef. Pearson (R)	0,97	0,96
		R ²	0,93	0,92
		p-value	0,03	0,04

Los resultados muestran que existen diferencias significativas entre las concentraciones y el tipo de piso de las habitaciones (cemento, mayólica y tierra). Se evidencian correlaciones positivas fuertes entre ellas. Con respecto al tipo de piso (cemento), la correlación fue de (R=0,91, R²=0,84, p=0,03) y (R=0,92, R²=0,85, p=0,03). La variable (mayólica), tuvo una correlación de (R=0,98, R²=0,96, p=0,00) y (R=0,98, R²=0,96, p=0,00). Y la variable (tierra) con una correlación de (R=0,97, R²=0,93, p=0,03) y (R=0,96, R²=0,92, p=0,04). Las tres variables, bajo las hipótesis 1 y 2 respectivamente.

Los tipos de pisos (porcelanato y laminado) también presentan una correlación positiva fuerte. Sin embargo, los recubrimientos como (loseta y vinílico) y (parquet) presentan una correlación positiva moderada y débil respectivamente.

El tipo de piso (cemento, mayólica y tierra) representaron el 60,58% de las habitaciones monitoreadas en total.

4.11.7. Antigüedad de la vivienda

El análisis consistió en dividir tres grupos de edades de las viviendas, aquellas ≤ 20 años, otro grupo entre $<20-40]$ años y el último grupo de viviendas >40 años de antigüedad. En la *tabla 4.55* se muestra los valores de las concentraciones en función de la edad de las viviendas monitoreadas durante los cinco periodos de estudio.

Tabla 4.55: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función a la edad de la vivienda monitoreada.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
≤20 años	—	—	48±7 (n=8)	39±6	52±6 (n=9)	41±5	60±7 (n=7)	48±6	52±11 (n=5)	41±8
<20-40] años	79±11 (n=14)	63±9	65±10 (n=23)	52±8	87±14 (n=23)	69±11	95±12 (n=25)	76±9	79±14 (n=16)	63±11
>40 años	60±12 (n=8)	48±10	56±6 (n=27)	45±5	68±9 (n=22)	55±7	82±11 (n=18)	66±9	71±12 (n=15)	56±9
Total de viviendas	22		58		54		50		36	

La influencia de la antigüedad de la vivienda monitoreada en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.56* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.56: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la edad de las viviendas monitoreadas.

Logaritmo de las variables	Edad de la vivienda	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	≤20 años	Coef. Pearson (R)	0.93	0.93
		R ²	0.87	0.86
		p-value	0.07	0.07
	<20-40] años	Coef. Pearson (R)	0.95	0.94
		R ²	0.90	0.88
		p-value	0.01	0.02
	>40 años	Coef. Pearson (R)	0.84	0.84
		R ²	0.71	0.70
		p-value	0.07	0.08

Los resultados muestran que existe una correlación positiva fuerte entre las concentraciones y la antigüedad de las viviendas. No existe una variación significativa entre los tres tipos de rangos adoptados en este estudio. Esto demuestra, que las concentraciones de la actividad del Rn-222 son influenciados por la antigüedad de las viviendas, contrastando con la literatura.

Para viviendas con antigüedad ≤ a 20 años, presentan una correlación de (R=0,93, R²=0,87, p=0,07) y (R=0,93, R²=0,86, p=0,07). Para aquellas viviendas comprendidas entre <20-40] años de antigüedad, tienen una correlación de (R=0,95, R²=0,90, p=0,01) y (R=0,94, R²=0,88, p=0,02) donde se obtuvieron las concentraciones más altas. Y para viviendas >40 años, una correlación de (R=0,84, R²=0,71, p=0,07) y (R=0,84, R²=0,70, p=0,08). En los tres casos para las hipótesis 1 y 2 respectivamente.

4.11.8. Presencia de fumadores

En la *tabla 4.57* se muestra los valores de las concentraciones en función de la presencia de fumadores en las viviendas durante los cinco periodos de estudio.

Tabla 4.57: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función a la presencia de fumadores en las viviendas monitoreadas.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Presencia de fumadores	157±8 (n=1)	125±7	58±29 (n=2)	46±23	33±7 (n=1)	26±8	51±4 (n=1)	40±3	31±5 (n=1)	25±4
Ausencia de fumadores	68±8 (n=21)	54±6	59±5 (n=56)	47±4	74±7 (n=53)	69±6	86±7 (n=49)	69±6	73±8 (n=35)	58±6
Total de viviendas	22		58		54		50		36	

La influencia de fumadores en las vivienda monitoreada en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.58* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.58: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función de la presencia de fumadores en las viviendas monitoreadas.

	Presencia de fumadores	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	Si	Coef. Pearson (R)	-0.01	0.00
		R ²	0.00	0.00
		p-value	0.98	1.00
	No	Coef. Pearson (R)	0.94	0.94
		R ²	0.89	0.88
		p-value	0.02	0.02

Los resultados muestran que existe una correlación positiva fuerte entre las concentraciones y la ausencia de fumadores en las viviendas. Se evidencia una correlación de (R=0,94, R²=0,89, p=0,02) y (R=0,94, R²=0,88, p=0,02) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente.

Por otro lado, existe apenas una correlación negativa débil entre las concentraciones y la presencia de fumadores (R=-0,01, R²=0,00, p=0,98) para la hipótesis 1, mientras que para la hipótesis 2 no existe correlación, lo que resulta aparentemente contradictorio con lo esperado. La muestra correspondiente a la presencia de fumadores en cada periodo es insignificante, motivo por el cual, la correlación prácticamente es inexistente. Por lo tanto, en este estudio la presencia de fumadores en las viviendas no garantiza influencia alguna en las concentraciones de la actividad del Rn-222, ni mucho menos que estén presentes en las habitaciones monitoreadas.

4.11.9. Tipo de tránsito vehicular

En la *tabla 4.59* se muestra los valores de las concentraciones en función del tipo de tránsito vehicular en las inmediaciones de las viviendas monitoreadas durante los cinco periodos de estudio. El tipo de tránsito vehicular alto (pesado y ligero), involucra aquellas viviendas ubicadas en avenidas y calles. El tipo de tránsito regular corresponde a mayor flujo de tránsito ligero con respecto al pesado. El tipo de tránsito bajo refiere a tránsito exclusivamente ligero. Y ausencia de tránsito categorizado como (nada) refiere a aquellas viviendas ubicadas en jirones o pasajes.

Tabla 4.59: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de tránsito vehicular.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Hipótesis Alto	79±39 (n=3)	63±31	66±16 (n=8)	53±13	96±24 (n=6)	77±19	96±20 (n=6)	76±16	76±22 (n=5)	61±18
Medio	72±11 (n=3)	58±9	58±11 (n=20)	47±8	72±15 (n=15)	58±12	81±13 (n=17)	65±11	73±15 (n=15)	58±12
Bajo	68±11 (n=14)	54±9	61±8 (n=17)	48±7	60±10 (n=18)	48±8	86±13 (n=15)	69±11	78±20 (n=7)	62±16
Nada	89±22 (n=2)	71±18	52±7 (n=13)	42±5	81±13 (n=15)	65±11	86±14 (n=12)	69±11	63±10 (n=9)	50±8
Total de viviendas	22		58		54		50		36	

La influencia del tipo de tránsito vehicular en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.60* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.60: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función al tipo de tránsito vehicular.

Logaritmo de las variables	Tipo de tránsito	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	Alto	Coef. Pearson (R)	0,81	0,79
		R ²	0,66	0,63
		p-value	0,10	0,11
	Medio	Coef. Pearson (R)	0,99	0,99
		R ²	0,99	0,99
		p-value	0,00	0,00
	Bajo	Coef. Pearson (R)	0,76	0,77
		R ²	0,58	0,59
		p-value	0,14	0,13
	Nada	Coef. Pearson (R)	0,82	0,82
		R ²	0,68	0,67
		p-value	0,09	0,09

Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre las concentraciones y el tipo de tránsito vehicular medio. Se evidencia una correlación positiva fuerte entre ambas (R=0,99, R²=0,99, p=0,00) y (R=0,99, R²=0,99, p=0,00) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Esta variable representa el 17,46 % del tránsito vehicular total en el distrito.

Aunque no exista diferencia significativa entre las concentraciones con las otras variables del tipo de tránsito vehicular (alto, bajo y nada), se presentan correlaciones positivas fuertes entre ellas.

La variable tipo de tránsito vehicular influye en las concentraciones de la actividad del Rn-222 en el distrito. Se puede observar desde la *tabla 4.59* que las mayores concentraciones se debe al tipo de tránsito alto. Esto supone el transporte de partículas hacia el interior de las viviendas incrementando el número de partículas suspendidas en el entorno del detector y mucho más aún cuando se trabaja en modo descubierto.

4.11.10. Tipo de zonificación distrital

A través del mapa de zonificación del distrito (Apéndice B) en la *tabla 4.61* se muestra los valores de las concentraciones en función de las viviendas categorizadas por zonas, durante los cinco periodos de estudio. Las categorías son las siguientes:

1. RDA: Residencial de densidad alta, 2. RDM: Residencial de densidad media, 3. CV: Comercio vecinal, 4. VT: Vivienda taller y 5. I: Industrial.

Tabla 4.61: Concentraciones de la actividad del Rn-222 en función al tipo de zonificación distrital.

Periodo	Concentraciones de la actividad del Rn-222 (Bq/m ³)									
	P1		P2		P3		P4		P5	
Hipótesis	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
RDA	—	—	49±13 (n=4)	39±10	45±10 (n=4)	36±	42±3 (n=3)	34±2	32±3 (n=3)	25±2
RDM	70±11 (n=15)	56±8	61±7 (n=39)	49±6	78±9 (n=37)	63±7	91±9 (n=35)	73±7	77±11 (n=23)	62±9
CV	91±35 (n=3)	73±28	60±22 (n=4)	48±18	80±25 (n=5)	64±20	69±17 (n=4)	55±14	72±21 (n=5)	57±16
VT	59±8 (n=2)	47±6	57±8 (n=7)	45±7	71±24 (n=4)	57±20	102±27 (n=3)	82±22	71±16 (n=2)	57±32
I	71±16 (n=2)	57±13	49±13 (n=4)	39±10	49±8 (n=4)	39±6	77±17 (n=5)	61±13	73±30 (n=3)	58±24
Total de viviendas	22		58		54		50		36	

La influencia del tipo zonificación distrital en los valores obtenidos de las concentraciones de la actividad del Rn-222 se detallan en la *tabla 4.62* a través del coeficiente de correlación de Pearson (R), coeficiente de determinación (R²), y la probabilidad (p-value).

Tabla 4.62: Correlación de los logaritmos neperiano de las concentraciones y los obtenidos en función al tipo de zonificación distrital.

Logaritmo de las variables	Tipo de zonificación	Parámetro	Ln (C)	
			Hipótesis 1	Hipótesis 2
Ln(C)	RDA	Coef. Pearson (R)	-0,43	-0,45
		R ²	0,18	0,20
		p-value	0,57	0,55
	RDM	Coef. Pearson (R)	0,93	0,92
		R ²	0,86	0,84
		p-value	0,02	0,03
	CV	Coef. Pearson (R)	0,44	0,45
		R ²	0,19	0,20
		p-value	0,46	0,45
	VT	Coef. Pearson (R)	0,81	0,79
		R ²	0,65	0,63
		p-value	0,10	0,11
	I	Coef. Pearson (R)	0,75	0,76
		R ²	0,56	0,58
		p-value	0,15	0,13

Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre las concentraciones y el

tipo de zonificación (residencia de densidad media: RDM). Se evidencia una correlación positiva fuerte entre ambas ($R=0,93$, $R^2=0,86$, $p=0,02$) y ($R=0,92$, $R^2=0,84$, $p=0,03$) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente. Esta variable representa el 37,2% del tipo de zona monitoreada en el distrito.

No se encuentra justificación de la correlación negativa moderada entre las concentraciones y el tipo de zonificación (residencia de densidad alta: RDA) ($R=-0,43$, $R^2=0,18$, $p=0,57$) y ($R=-0,45$, $R^2=0,20$, $p=0,55$) para ambas hipótesis. Se evidencia que no hubieron datos correspondientes al primer periodo y con respecto a los demás periodos, el número de datos fueron menores al de las otras categorías.

Aunque no exista diferencia significativa entre las concentraciones con las otras variables del tipo de zonificación distrital (Vivienda taller e industrial), se presentan correlaciones positivas fuertes entre ellas. Con respecto al tipo de zonificación (comercio vecinal: CV) presenta una correlación positiva moderada ($R=0,44$, $R^2=0,19$, $p=0,46$) y ($R=0,45$, $R^2=0,20$, $p=0,45$) para las hipótesis 1 y 2 respectivamente.



Capítulo 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1. Conclusiones

- Se logró realizar exitosamente el primer monitoreo de la concentración de la actividad del Rn-222 en el distrito de San Luis región Lima (Perú) dentro del marco del proyecto (120-PNICP-PIAP-2015) “Desarrollo de un sistema de monitoreo de Rn-222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares en ciudad de Lima - Perú”, desde Setiembre del 2015 hasta Enero del 2017 correspondientes a 84 viviendas en 5 periodos de estudio.

- Las distribuciones que siguieron los logaritmos de las concentraciones para las hipótesis planteadas en los 5 periodos de monitoreo, cumplen una distribución normal, que fue contrastado por el test Kolmogorov-Smirnov. Por lo tanto las distribuciones que tienden las concentraciones de la actividad del Rn-222 tienden a una distribución Log-Normal como lo indican otros trabajos similares.

- El promedio ponderado de las concentraciones en el distrito de San Luis bajo ambas hipótesis, a través de 6 grillas de monitoreo continuo fueron de $(68 \pm 21) \text{Bq/m}^3$ y $(54 \pm 16) \text{Bq/m}^3$.

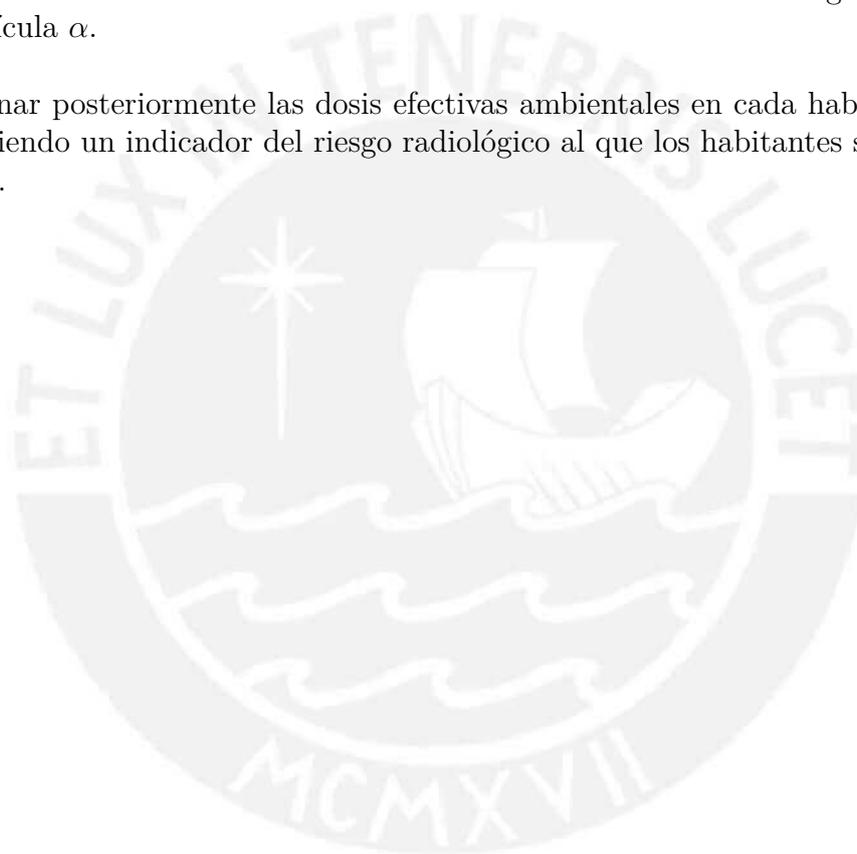
- El método de grillado permitió elaborar el mapa del Rn-222, donde el mayor valor de la concentración estuvo en el grillado 2 (zona industrial) para ambas hipótesis de este trabajo.

- Empleando el factor de correlación lineal de Pearson se pudo determinar el grado de influencia de las diversas variables (meteorológicas, de las características de las viviendas, entre otras) en la concentración de la actividad del Rn-222.

- Se cultivó una iniciativa de cultura de protección radiológica en la población, quedó demostrado durante los periodos de monitoreo la participación y sobre todo el conocimiento adquirido.

5.2. Perspectivas

- De acuerdo al número de habitantes en el distrito de San Luis, a través del último censo del INEI-2014, la población monitoreada representó al 0,55 % del total. Se debe de continuar con el monitoreo y agregar viviendas que no han sido estudiadas aún, con el fin de mejorar con la data histórica del distrito.
- Se propone en crear un sistema de medición de Rn-222 a través de una cámara de difusión y un detector LR-115 Tipo 2 en su interior con otro colocado exteriormente, que permitirá determinar el factor de equilibrio F para cada vivienda de monitoreo.
- Mediante estudios por Monte Carlo, se podrá determinar las características geométricas de las trazas en cada detector con el fin de estimar el valor de energía incidente de cada partícula α .
- Determinar posteriormente las dosis efectivas ambientales en cada habitación monitoreada, siendo un indicador del riesgo radiológico al que los habitantes se encuentran sometidos.



Bibliografía

- [1] Algade, dosirad laboratory. lr 115 films. description, instructions for use. version 2015-09. www.dosirad.fr. Accessed: 2016-01-14.
- [2] Distrito de san luis-lima, Perú. <https://www.google.com.pe/maps/place/San+Luis/@-12.073889,-76.9961072,15z/data=!4m5!3m4!1s0x9105c62350e6f59f:0xc3ea3178b4938207!8m2!3d-12.0754713!4d-76.9959872>. Accessed: 2017-02-27.
- [3] Gt analytic-kodalalpha radon-dosimeters and lr155 ssntd specifications. http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf. Accessed: 2015-01-14.
- [4] Inei. www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1157/libro.pdf. Accessed: 2015-08-11.
- [5] Inei. <http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/LIb0002/cap0104.htm>. Accessed: 2015-08-11.
- [6] Mesurage de la radioactivité dans l'environnement – air: radon 222 – partie 1: Origine du radon et de ses descendants à vie courte, et méthodes de mesure associées. http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=52187. Accessed: 2017-02-07.
- [7] Mesurage de la radioactivité dans l'environnement – air: radon 222 – partie 4: Méthode de mesure intégrée pour la détermination de l'activité volumique moyenne du radon avec un prélèvement passif et une analyse en différé. http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=52187. Accessed: 2017-02-07.
- [8] Nitrocellulose. <http://www.dow.com/dowwolff/en/pdfs/NCBroschureJan08.pdf>. Accessed: 2016-10-27.
- [9] Senamhi. www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi. Accessed: 2017-02-08.
- [10] Zonificación del distrito de san luis-lima, Perú. <http://www.munisanluis.gob.pe/portal/mapas/>. Accessed: 2017-02-27.
- [11] Mohammad Khairul Azhar ABDUL RAZAB, Nur Liyana HAMZAH, Siti Fatimah ABD KARIM, Siti Fatimah, Nur Ezati AZHAR, Nor Hakimin ABDULLAH, MOHAMED NOOR, Mazlan MOHAMED, Noraina ADAM, et al. Determination of indoor 222 rn concentrations level on different room sizes in academic building at universiti malaysia kelantan jeli campus. In *Materials Science Forum*, volume 888, 2017.

- [12] Kil Hoon Ahn. Determination of time-average equilibrium factor between radon and its progeny using ssntds. 2003.
- [13] Pérez Ancaya and Bertin Andrés. Fluctuaciones en la presencia de radón 222 ambiental en la ciudad de lima (zona san miguel). 2016.
- [14] R Banjanac, A Dragić, B Grabež, D Joković, D Markushev, B Panić, V Udovičić, and I Aničin. Indoor radon measurements by nuclear track detectors: Applications in secondary schools. *Facta universitatis-series: Physics, Chemistry and Technology*, 4(1):93–100, 2006.
- [15] R Barillon, M Fromm, A Chambaudet, H Marah, and A Sabir. Track etch velocity study in a radon detector (I_r 115, cellulose nitrate). *Radiation measurements*, 28(1):619–628, 1997.
- [16] MM Bé, V Chisté, Ch Dulieu, E Browne, V Chechev, N Kuzmenko, FG Kondev, A Luca, M Galán, A Pearce, et al. Table of radionuclides (vol. 4-a= 133 to 252). 2008.
- [17] Martin J Berger, JS Coursey, MA Zucker, and J Chang. *Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions*. NIST Physics Laboratory, 1998.
- [18] AM Bhagwat. Solid state nuclear track detection: Theory and applications. 1993.
- [19] A Canoba, FO Lopez, MI Arnaud, AA Oliveira, RS Neman, JC Hadler, PJ Iunes, SR Paulo, AM Osorio, R Aparecido, et al. Indoor radon measurements and methodologies in latin american countries. *Radiation measurements*, 34(1):483–486, 2001.
- [20] A Canoba, FO López, MI Arnaud, AA Oliveira, RS Neman, JC Hadler, PJ Iunes, SR Paulo, AM Osorio, R Aparecido, et al. Indoor radon measurements in six latin american countries. *Geofisica internacional*, pages 453–457, 2002.
- [21] Basurto Cartulin and Rosario del Pilar. Vulnerabilidad sísmica y mitigación de desastres en el distrito de san luis. 2007.
- [22] Herman Cember et al. Introduction to health physics. *Introduction to health physics.*, 1969.
- [23] Gerhard Albert Cook. *Argon, Helium, and the Rare Gases: The Elements of the Helium Group*, volume 2. Interscience Publishers, 1961.
- [24] C Richard Cothorn and James E Smith Jr. *Environmental radon*, volume 35. Springer Science & Business Media, 2013.
- [25] F De Cicco, M Pugliese, V Roca, and C Sabbarese. Dependence of the I_r-115 radon detector calibration factor on track density. *Applied Radiation and Isotopes*, 78:108–112, 2013.
- [26] Instituto Nacional de Estadística e Informática. Estado de la población peruana 2014, 2014.

- [27] M^a Ángeles Fernández de la Ossa, María López-López, Mercedes Torre, and Carmen García-Ruiz. Analytical techniques in the study of highly-nitrated nitrocellulose. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(11):1740–1755, 2011.
- [28] IPEN Reglamento de Seguridad Radiológica. Oficina técnica de la autoridad nacional. *Instituto Peruano de Energía Nuclear. Decreto Supremo*, (009-97), 1997.
- [29] Juan Miguel Barros Dios. El radón:¿ riesgo para la salud? *Revista de Salud Ambiental*, 11(1-2):27–31, 2011.
- [30] SA Durrani and PF Green. The effect of etching conditions on the response of Ir115. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, 8(1-4):21–24, 1984.
- [31] Saeed A Durrani and Richard K Bull. *Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications*, volume 111. Elsevier, 2013.
- [32] Saeed A Durrani and Radomir Ilic. *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. World Scientific, 1997.
- [33] KP Eappen and YS Mayya. Calibration factors for Ir-115 (type-ii) based radon thoron discriminating dosimeter. *Radiation Measurements*, 38(1):5–17, 2004.
- [34] Robert L Fleischer. Alpha-recoil damage: Relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6):1459–1466, 1988.
- [35] P Fonseca, A Zamorano, H Luna, and ACF Santos. Estudo do poder de frenamento de partículas alfa na matéria. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32(2):2305, 2010.
- [36] S Forkapić, I Bikit, Lj Čonkić, M Vesković, J Slivka, M Krmar, N Žikić-Todorović, E Varga, and D Mrđa. Methods of radon measurement. *Facta universitatis-series: Physics, Chemistry and Technology*, 4(1):1–10, 2006.
- [37] C Gonzalez Gomez and A Camacho Garcia. Vigilancia de la radiactividad natural en andalucía oriental. 1997.
- [38] DOE Fundamentals Handbook. Nuclear physics and reactor theory. *Washington DC: Department of Energy*, 1993.
- [39] IAEA. Analytical quality in nuclear applications no. iaea/aq/33, national and regional surveys of radon concentration in dwellings, review of methodology and measurement techniques. 2013.
- [40] ICRP and International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 66: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. Number 66. Elsevier Health Sciences, 1994.
- [41] Dadong Iskandar, Takao Iida, and Shiro Nakashima. Determination of ²²²Rn diffusion coefficient in Japanese soils. In *Proceedings of 10th International Congress of the International Radiation Protection Association, Hiroshima, Japan*, pages 14–19. Citeseer, 2000.

- [42] Martin Jiranek. Diffusive and convective transport of radon through cracks in the building understructure. In *Radon Investigations in the Czech Republic VIII and the Fifth International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*, page 65. Czech Geological Survey, 2000.
- [43] G Keller and B Hoffmann. The radon diffusion length as a criterion for the radon tightness. In *IRPA10 conference proceedings, Hiroshima*, 2000.
- [44] Teh-Lung Ku. The uranium-series methods of age determination. *Annual review of Earth and planetary Sciences*, 4:347, 1976.
- [45] SYY Leung, D Nikezic, JKC Leung, and KN Yu. Derivation of v function for lr 115 ssntd from its sensitivity to 220 rn in a diffusion chamber. *Applied radiation and isotopes*, 65(3):313–317, 2007.
- [46] SYY Leung, D Nikezic, and KN Yu. Derivation of v function for lr 115 ssntd from its partial sensitivity to 222 rn and its short-lived progeny. *Journal of environmental radioactivity*, 92(1):55–61, 2007.
- [47] SYY Leung, Dragoslav Nikezic, JKC Leung, and KN Yu. Sensitivity of lr 115 ssntd in a diffusion chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 263(1):306–310, 2007.
- [48] David R Lide. *CRC handbook of chemistry and physics*, volume 85. CRC press, 2004.
- [49] María López-López, María Ángeles Fernández de la Ossa, Jorge Sáiz Galindo, Jose Luis Ferrando, Alfonso Vega, Mercedes Torre, and Carmen García-Ruiz. New protocol for the isolation of nitrocellulose from gunpowders: utility in their identification. *Talanta*, 81(4):1742–1749, 2010.
- [50] JCH Miles. Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1-4):207–210, 1994.
- [51] MA Misdag. Radon, thoron and their progenies measured in different dwelling rooms and reference atmospheres by using cr-39 and lr-115 ssntd. *Applied radiation and isotopes*, 59(4):273–280, 2003.
- [52] AV Nero, MB Schwehr, WW Nazaroff, and KL Revzan. Distribution of airborne radon-222 concentrations in us homes. *Science*, 234:992–998, 1986.
- [53] D Nikezic and KN Yu. Optical characteristics of tracks in solid state nuclear track detectors studied with ray tracing method. *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications*.
- [54] 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.
- [55] D Nikezic and KN Yu. Computer simulation of radon measurements with nuclear track detectors. *Computer physics research trends*, 3:119–150, 2007.

- [56] The International Commission on Radiation Units and Measurements. Measurement and reporting of radon exposures. *Journal of the ICRU Report 88*, 12(2):1–208, 2015.
- [57] United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Effects of Ionizing Radiation: Report to the General Assembly, with scientific annexes*, volume 1. United Nations Publications, 2008.
- [58] World Health Organization et al. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. specific safety guide. 2015.
- [59] Helmut Paul. *The stopping power of matter for positive ions*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [60] 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.
- [61] P Buford Price. Science and technology with nuclear tracks in solids. *Radiation Measurements*, 40(2):146–159, 2005.
- [62] UNA PERSPECTIVA DE SALUD PÚBLICA. Manual de la oms sobre el radón en interiores. 2015.
- [63] 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.
- [64] TV Ramachandran and LA Sathish. 220 rn in indoor environment of india: A review.
- [65] BE Robayna. *Radón en viviendas de las Islas Canarias occidentales. Distribución geográfica y dosimetría*. PhD thesis, Tesis doctoral. Universidad de la Laguna, Tenerife, 1998.
- [66] Alberto Ruano-Ravina, Luis Quindós-Poncela, Carlos Sainz Fernández, and Juan M Barros-Dios. Radón interior y salud pública en españa: Tiempo para la acción. *Gaceta Sanitaria*, 28(6):439–441, 2014.
- [67] Luis Alberto Sánchez Rodas. Software para el conteo y clasificación de huellas nucleares alfa de incidencia normal sobre le polímero cr-39. 2010.
- [68] LA Sathish, K Nagaraja, TV Ramach, et al. The spatial and volumetric variations of radon in bangalore metropolitan, india. *International Journal of Physical Sciences*, 6(18):4348–4360, 2011.
- [69] LA Sathish, K Nagaraja, HC Ramanna, V Nagesh, and S Sundareshan. Concentration of radon, thoron and their progeny levels in different types of floorings, walls, rooms and building materials. *Iranian Journal of Radiation Research*, 7(1):1–9, 2009.
- [70] JJ Stein. *Isótopos radiactivos*. Number 539.115 STE. 1973.

- [71] M Tirmarche, JD Harrison, D Laurier, F Paquet, E Blanchardon, and JW Marsh. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Annals of the ICRP*, 40(1):1–64, 2010.
- [72] KCC Tse, FMF Ng, Dragoslav Nikezic, and KN Yu. Bulk etch characteristics of colorless Ir-115 ssntd. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 263(1):294–299, 2007.
- [73] Sources Unscear. effects of ionizing radiation. *United Nations, New York*, pages 453–487, 2000.
- [74] Rati Varshney, RG Sonkawade, Monika Gupta, RP Chauhan, AK Mahur, K Kant, A Parveen, and SK Chakarvarti. Bulk etch rate estimation of Ir-115 ssntd using phoenix interface. *Radiation Measurements*, 46(4):461–463, 2011.
- [75] CWY Yip, D Nikezic, JPY Ho, and KN Yu. Chemical etching characteristics for cellulose nitrate. *Materials Chemistry and Physics*, 95(2):307–312, 2006.
- [76] FW Young Jr. Polygonization of copper. *Journal of Applied Physics*, 29(5):760–764, 1958.
- [77] KN Yu, D Nikezic, FMF Ng, and JKC Leung. Long-term measurements of radon progeny concentrations with solid-state nuclear track detectors. *Radiation measurements*, 40(2):560–568, 2005.
- [78] James F Ziegler. *The Stopping and Ranges of Ions in Matter: Handbook of Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements*, volume 5. Elsevier, 2013.
- [79] James F Ziegler, Matthias D Ziegler, and Jochen P Biersack. Srim—the stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11):1818–1823, 2010.

ANEXOS



Apéndice A

Transformaciones cinéticas

A.1. Periodo de semidesintegración

Es el tiempo promedio requerido para que una cierta cantidad de núcleos de Rn-222 decrezca a la mitad de su cantidad original. De acuerdo a la ley de desintegración radiactiva, el Rn-222 tiene una vida media de $t_{1/2}=3.81$ días.

A.2. Media Vida

Definida como la suma de las vidas de los átomos individuales de Rn-222 divididos por el número total de átomos originalmente presentes. La media vida del Rn-222 es de 5.49 días, teniendo en consideración que su constante de decaimiento λ por unidad de tiempo es de $\tau = 0,18\text{días}^{-1}$.

A.3. Actividad

Basado en la cantidad de decaimientos radiactivos que sufre el átomo por unidad de tiempo. Para los estudios como en el caso de Rn-222 la unidad que describe la actividad en el Sistema Internacional es el *Becquerel: Bq* definido en términos de desintegración por segundo. Además también se emplea como unidad de medida el *Curie: Ci* que originalmente fue definido como la actividad empleada por 1 gramo de Ra-226, en otras palabras: $3,7 \times 10^{10}$ átomos transformados en un segundo. La relación que se obtiene entre ambas unidades de actividad es:

$$1\text{Ci}=37 \text{ GBq}$$

A.4. Equilibrios Radiactivos

Las cuatro cadenas de desintegración muestran una secuencia de transformación de los átomos radiactivos padres en relación de los descendientes (hijas). Esto se resume que la presencia de átomos radiactivos del descendiente aumentarán hasta un determinado periodo de tiempo, mientras que los átomos radiactivos padres disminuirán. La ecuación que gobierna esta descripción es la siguiente:

$$\frac{dN_B}{dt} = -(\lambda_B N_B - \lambda_A N_A)$$

Desarrollando la ecuación de diferencias, se tiene:

$$N_B = \frac{\lambda_A N_{0,A}}{\lambda_B - \lambda_A} (\exp(-\lambda_A t) - \exp(-\lambda_B t)) + N_{0,B} \exp(-\lambda_B t)$$

que representa el número de átomos radiactivos del descendiente en relación a la cantidad de la del padre en función de sus constantes de desintegración.

A.4.1. Equilibrio Secular: $t_{1/2\text{madre}} \gg t_{1/2\text{hija}}$

La relación cuantitativa entre radionucleidos en equilibrio secular está descrito cuando la vida media del isótopo A es mucho mayor que la del isótopo B, es decir que la constante de decaimiento de A es mucho menor que la de B. La cantidad de isótopos padres queda sustancialmente constante durante el periodo que es observado:

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A}{\lambda_B} (1 - \exp(-\lambda_B t))$$

A.4.2. Equilibrio Transitorio: $t_{1/2\text{madre}} > t_{1/2\text{hija}}$

La relación cuantitativa entre radionucleidos en equilibrio transitorio está descrito cuando la cantidad de átomos radiactivos del padre no es relativamente constante.

$$N_B = \frac{\lambda_A N_{0,A}}{\lambda_B - \lambda_A} (\exp(-\lambda_A t) - \exp(-\lambda_B t))$$

Desde que $\lambda_A < \lambda_B$, por lo tanto después de un largo periodo de tiempo, $\exp(-\lambda_B t)$ será mucho más pequeño que $\exp(-\lambda_A t)$. Bajo esta condición, la ecuación anterior puede ser reescrita como:

$$N_B = \frac{\lambda_A N_{0,A}}{\lambda_B - \lambda_A} \exp(-\lambda_A t)$$

Apéndice B

Zonificación del distrito de San Luis



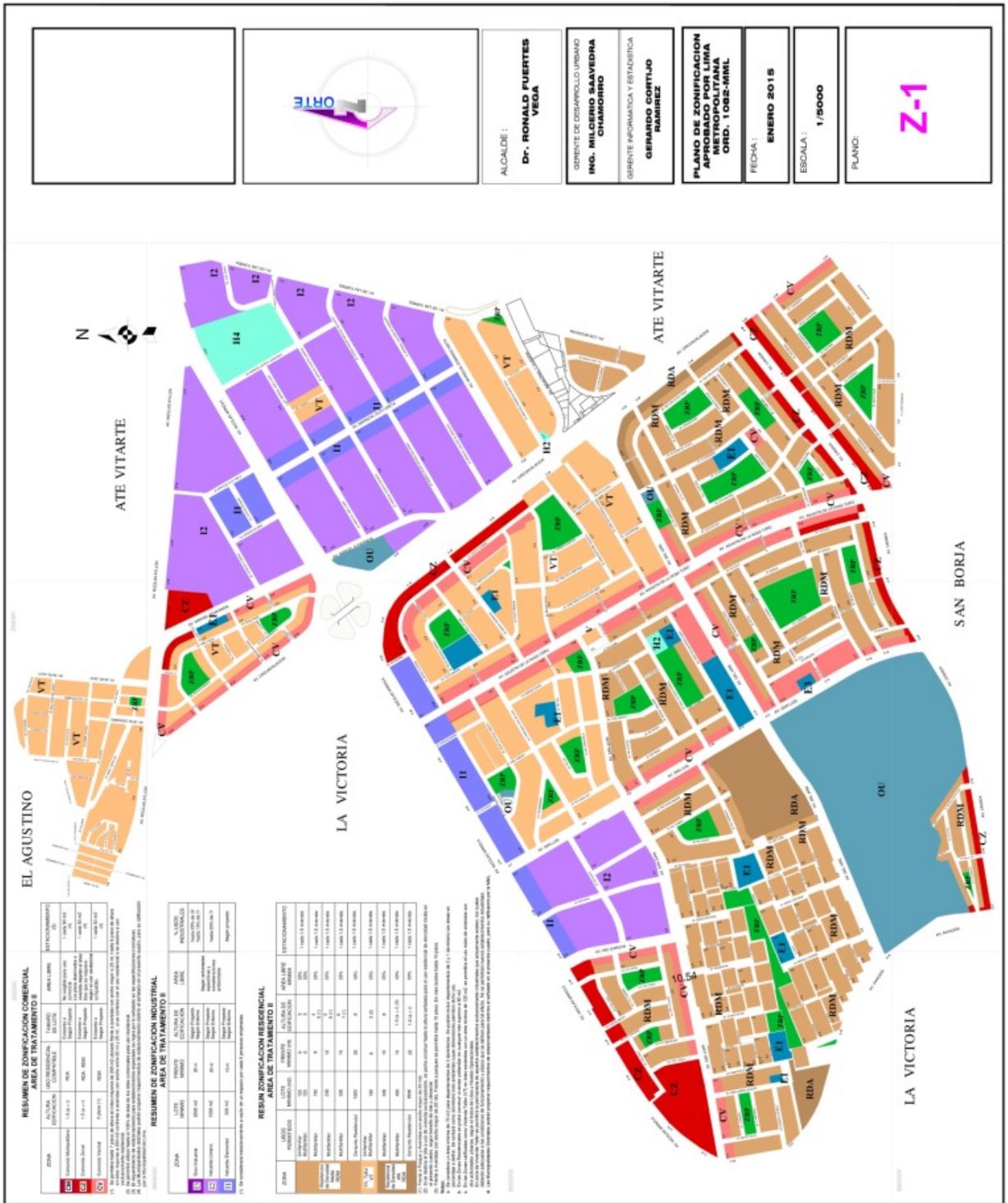


Figura B.1: Zonificación del distrito de San Luis^[10].

Apéndice C

Mapa geológico de la ciudad de Lima



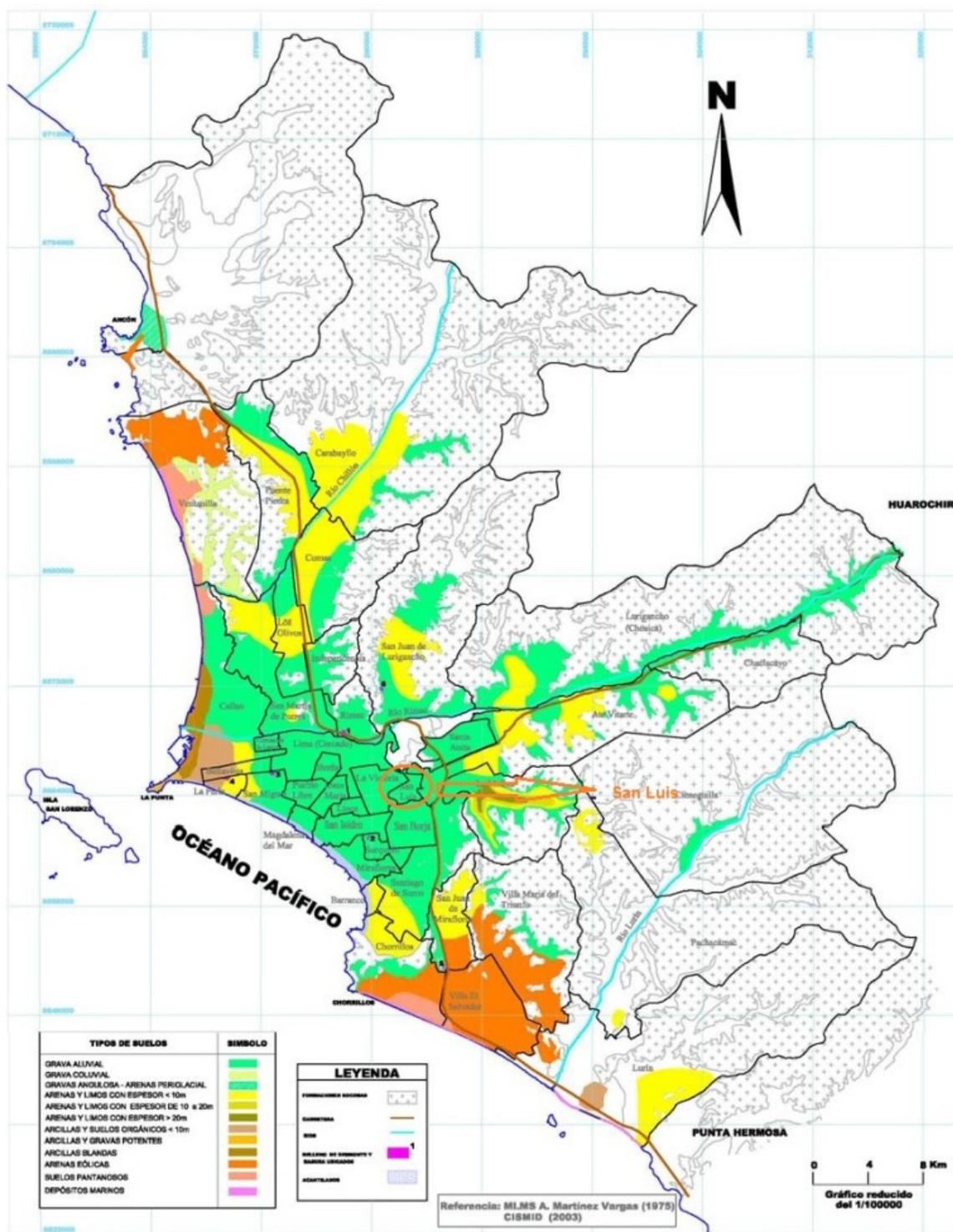


Figura C.1: Tipos de suelos en la región Lima^[21].

Apéndice D

Características de las viviendas monitoreadas



Tabla D.1: Características de las viviendas monitoreadas.

Det. C-13	Coordenada GPS	Habit. 1	Habit. 2	Vent. 1	Vent. 2	Tráfico	Pared 1	Pared 2	Piso 1	Piso 2	HAB.	N° en casa	Edad Viv. (años)	Fisuras	Pintado (5 años)	Presencia de luz solar
1																
2																
3	-12.0715;-76.9948	S2	D2	B	B	MEDIO	L+P	L+P	C	C	2	0	40	NO	MENOS	NUNCA
4	-12.0760;-76.9998	Co1	C1	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	7	0	40	SI	MAS	MAÑANAS
5	-12.0768;-76.9994	S3	D3	R	R	BAJO	L+P	L+P	C	C	4	0	50	NO	MENOS	NUNCA
6	-12.0768;-76.9994	S1	C1	M	M	BAJO	L+LX	L+LX	M	M	3	0	50	NO	MENOS	MAÑANAS
7	-12.0771;-76.9982	D5	S5	B	B	BAJO	L+P	L+P	M	M	2	0	40	NO	MENOS	MAÑANAS
8	-12.0752;-76.9950	S2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	4	0	50	NO	MENOS	MAÑANAS
9	-12.0767;-76.9994	S2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	2	0	40	NO	MENOS	TARDES
10	-12.0769;-76.9997	D3	D3	B	B	BAJO	L+P	L+P	M	M	6	0	50	NO	MENOS	TARDES
11	-12.0754;-77.0001	S2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	4	0	40	NO	MENOS	TARDES
12	-12.0753;-77.0002	S1	D1	B	B	BAJO	L+P	L+P	M	M	7	0	39	NO	MENOS	MAÑANAS
13	-12.0788;-76.9903	D1	S1	B	B	ALTO	L+P	L+P	M	M	5	0	40	NO	MENOS	SIEMPRE
14	-12.0754;-77.0001	D1	C1	M	R	BAJO	L+P	L+P	C	C	8	0	40	NO	MENOS	TARDES
15	-12.0752;-77.0008	D1	D2	B	B	ALTO	L+P	L+P	M	M	5	3	40	NO	MENOS	NUNCA
16	-12.0778;-77.0075	S1	D1	B	B	NADA	L+P	L+P	M	M	5	0	40	NO	MENOS	NUNCA
17	-12.0786;-76.9987	SB1	SB1	B	B	ALTO	L+E	L+E	M	M	4	0	30	NO	MENOS	TARDES
18	-12.0742;-76.9992	D3	C3	B	B	BAJO	L+LX	L+LX	C	C	3	0	35	NO	MENOS	MAÑANAS
19	-12.0672;-76.9916	D3	B3	M	M	MEDIO	L+P	L+P	M	M	5	0	40	NO	MENOS	MAÑANAS
20	-12.0754;-77.0001	S2	D2	R	M	BAJO	L+P	L+P	C	C	2	0	40	NO	MENOS	TARDES
21	-12.0768;-76.9995	S3	D3	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	5	0	50	SI	MENOS	MAÑANAS
22	-12.0768;-76.9995	S2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	5	0	50	NO	MENOS	MAÑANAS
23	-12.0768;-76.9995	S4	D4	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	6	0	50	NO	MENOS	MAÑANAS
24	-12.0716;-76.9994	D1	S1	B	B	NADA	L+P	L+P	C	C	3	0	60	SI	MENOS	NUNCA
25	-12.0734;-76.9998	S2	D2	B	B	MEDIO	L+LX	L+LX	C	C	1	0	50	NO	MENOS	NUNCA
26	-12.0757;-76.9998	D2	Co2	B	M	BAJO	L+LX	L+LX	C	C	3	0	40	SI	MENOS	TARDES
27																
28	-12.07625;-76.9987	C1	P2	R	R	MEDIO	L+P	L+P	P	P	5	1	25	NO	MENOS	TARDES
29	-12.0766;-77.00229	A1	E1	M	M	ALTO	L+P	L+P	C	C	3	0	50	NO	MENOS	TARDES
30	-12.0768;-76.9995	D5	S5	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	2	0	40	NO	MENOS	SIEMPRE
31	-12.07884;-77.00303	D2	S2	R	B	MEDIO	L+P	L+P	P	C	2	0	35	NO	MENOS	TARDES
32																
33	-12.07681;-77.0021	D1	C1	M	M	ALTO	L+P	L+P	M	M	3	0	40	NO	MENOS	TARDES
34	-12.0790;-77.0044	S1	D1	M	M	NADA	L+P	L+P	M	M	5	0	40	NO	MENOS	MAÑANAS
35	-12.0746;-77.0006	S2	D2	B	R	ALTO	L+P	L+P	C	C	3	0	45	SI	MENOS	MAÑANAS
36	-12.0767;-76.9991	D3	S3	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	1	0	45	NO	MAS	TARDES
37	-12.07689;-76.99793	D1	S1	B	B	ALTO	L+P	L+P	P	P	4	0	45	NO	MENOS	MAÑANAS
38	-12.0777;-77.0004	C3	D3	B	B	NADA	L+P	L+P	P	P	3	0	10	NO	MENOS	NUNCA
39	-12.0770;-77.0003	E1	A1	B	M	MEDIO	L+P	L+P	LO	LO	5	0	50	NO	MENOS	TARDES
40	-12.0777;-77.0006	Co1	S1	R	B	NADA	L+P	L+P	M	M	4	0	10	NO	MENOS	MAÑANAS

(continuación.)

Det. C-13	Coordenada GPS	Habit. 1	Habit. 2	Vent. 1	Vent. 2	Tipo de Tráfico	Pared 1	Pared 2	Piso 1	Piso 2	Nº HAB.	Nº Fum. en casa	Edad Viv. (años)	Fisuras	Pintado (5 años)	Presencia de luz solar	
41	-12.0753, -77.0048	S2	D2	B	R	BAJO	L+P	L+P	C	C	1	0	45	NO	MENOS	NUNCA	
42	-12.0768, -76.9994	S2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	4	0	40	SI	MAS	MAÑANAS	
43	-12.0760, -77.0003	S2	D2	R	M	ALTO	L+P	L+P	M	M	2	0	45	NO	MENOS	TARDES	
44	-12.0760, -77.0003	D3	D3	B	B	MEDIO	L+LX	L+LX	M	M	7	0	45	SI	MENOS	MAÑANAS	
45	-12.0763, -77.0011	C1	D1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	4	0	20	NO	MENOS	MAÑANAS	
46	-12.0772, -77.0025	D1	C1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	6	0	45	SI	MAS	TARDES	
47	-12.0787, -77.0039	S1	D1	B	B	NADA	L+P	L+P	M	M	5	0	50	SI	MENOS	SIEMPRE	
48	-12.0786, -77.0036	D2	S1	B	B	NADA	L+P	L+P	P	LO	2	0	45	SI	MENOS	TARDES	
49	-12.0786, -77.0056	S1	D1	B	B	NADA	L+P	L+P	P	G	1	0	45	NO	MENOS	TARDES	
50	-12.0743, -77.0057	D3	D3	B	B	NADA	L+P	L+P	P	P	5	0	45	NO	MAS	MAÑANAS	
51	-12.0770, -77.0056	C1	D1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	PO	PO	4	0	35	SI	MENOS	MAÑANAS	
52	-12.0780, -77.0034	C1	S1	B	B	NADA	L+P	L+P	M	P	2	0	45	SI	MENOS	NUNCA	
53																	
54	-12.0780, -77.0033	D1	D2	B	M	NADA	L+P	L+P	P	P	4	0	45	SI	MENOS	TARDES	
55	-12.0765, -77.0033	S1	D1	B	B	NADA	L+LX	L+LX	M	M	5	0	45	NO	MENOS	MAÑANAS	
56	-12.0775, -77.0060	D3	D3	R	R	NADA	L+P	L+P	P	P	2	0	45	SI	MENOS	MAÑANAS	
57	-12.0795, -77.0077	D1	S1	M	M	NADA	L+P	L+P	V	M	5	0	45	NO	MENOS	MAÑANAS	
58	-12.0787, -77.0082	A1	E1	R	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	5	0	40	NO	MENOS	MAÑANAS	
59	-12.0781, -77.0083	E1	A1	B	B	BAJO	L+P	L+P	C	C	2	0	45	NO	MENOS	MAÑANAS	
60	-12.0792, -77.0079	S4	D4	R	R	NADA	L+P	L+P	V	V	4	0	45	SI	MAS	SIEMPRE	
61	-12.0759, -77.0066	H1	P2	B	B	MEDIO	L+LX	L+LX	M	P	8	0	50	NO	MENOS	MAÑANAS	
62	-12.0751, -77.0061	D2	D2	B	B	MEDIO	L+P	L+P	C	C	12	0	28	NO	MENOS	SIEMPRE	
63																	
64	-12.0759, -77.0007	D3	S3	B	B	ALTO	L+P	L+P	M	M	4	0	3	SI	MENOS	MAÑANAS	
65																	
66	-12.0784, -77.00303	D1	S1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	LO	M	6	0	40	NO	MENOS	NUNCA	
67	-12.0778, -76.9959	D1	C1	M	M	MEDIO	L+P	L+P	M	M	3	0	40	NO	MENOS	SIEMPRE	
68	-12.0783, -76.9949	D1	D2	B	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	6	0	20	SI	MENOS	TARDES	
69	-12.0812, -76.9920	S1	D1	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	5	0	12	SI	MAS	SIEMPRE	
70	-12.0807, -76.9882	D1	C1	B	B	BAJO	L+P	L+P	M	M	2	0	40	SI	MENOS	MAÑANAS	
71	-12.0807, -76.9882	D2	D2	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	4	0	40	NO	MENOS	MAÑANAS	
72	-12.0786, -76.9921	S61	S61	B	B	BAJO	L+P	L+P	P	P	1	0	40	NO	MAS	NUNCA	
73	-12.0773, -76.9905	C4	D4	B	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	4	0	20	NO	MENOS	MAÑANAS	
74	-12.0767, -76.9939	D1	S1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	M	M	5	0	40	SI	MENOS	SIEMPRE	
75	-12.0734, -76.9914	T1	T1	B	B	MEDIO	LSP	LSP	T	T	2	0	40	SI	NUNCA	SIEMPRE	
76	-12.0733, -76.9912	E1	E1	B	B	MEDIO	L+P	L+P	C	C	2	0	25	NO	MENOS	TARDES	
77	-12.0733, -76.9912	D2	D2	B	B	MEDIO	LSP	LSP	C	C	3	0	25	NO	NUNCA	TARDES	
78	-12.0742, -76.9933	D3	D3	B	B	MEDIO	L+P	L+P	C	C	4	1	N.S.	NO	MENOS	MAÑANAS	
79	-12.0730, -76.9950	S3	O3	B	B	BAJO	L+LX	L+LX	P	P	2	0	6	NO	MENOS	MAÑANAS	
80	-12.0710, -76.9954	D1	S1	R	B	ALTO	L+LX	L+LX	P	P	2	0	N.S.	SI	MENOS	NUNCA	

(continuación)

Det.	Coordenada GPS	Habit. 1	Habit. 2	Vent. 1	Vent. 2	Tipo de Tráfico	Pared 1	Pared 2	Piso 1	Piso 2	Nº HAB.	Nº Fum. en casa	Edad Viv. (años)	Fisuras	Pintado (5 años)	Presencia de luz solar
C-13																
81																
82	-12.0783, -76.9999	C ₂	S ₂	B	B	NADA	L+P	L+P	LA	LA	4	0	10	NO	SI	SIEMPRE
83																
84	-12.0768, -76.9995	S ₅	D ₅	B	B	BAJO	L+P	L+P	M	M	1	0	40	NO	MENOS	SIEMPRE
85																
86																
87																
88	-12.0744, -76.9993	C ₂	S ₂	R	R	ALTO	L+P	L+P	M	M	1	0	40	NO	MENOS	NUNCA
89	-12.0786, -77.0056	D ₂	S ₂	B	B	NADA	L+P	L+P	P	P	4	0	45	NO	MAS	MAÑANAS
90																
91	-12.0781, -77.0005	D ₁ ⁴	D ₂ ⁴	B	B	NADA	L+P	L+P	LA	LA	4	0	10	NO	MENOS	TARDES
92	-12.0778, -77.0007	D ₂	S ₂	M	M	NADA	L+P	L+P	PO	PO	3	0	10	SI	MENOS	TARDES
93	-12.0799, -77.0065	S ₁	D ₁	R	R	NADA	L+P	L+P	M	M	4	0	40	SI	MAS	NUNCA
94	-12.0789, -76.9916															
95																
96																
97	-12.0779, -76.9975	S ₂	D ₂	B	B	MEDIO	L+P	L+P	PO	PO	4	0	3	NO	MENOS	NUNCA
98	-12.0717, -76.9998	D ₁	S ₁	B	B	NADA	L+P	L+P	C	C	3	0	60	SI	MENOS	NUNCA
99																
100																
101																
102																
103																
104	-12.0797, -76.9923	D ₃	S ₃	M	M	BAJO	L+P	L+P	M	M	2	0	20	NO	MENOS	MAÑANAS
105																
106	-12.0828, -77.00273	S ₂	D ₂	B	M	NADA	L+P	L+P	C	C	4	0	30	SI	MENOS	MAÑANAS

309

5

Ventilación: (B): Buena, (R): Regular y (M): Mala. **Pared:** (L+P): Ladrillo+Pintura, (L+LX): Ladrillo+Látex, (L+E): Ladrillo+Esmalte y (LSP): Ladrillo sin pintura. **Piso:**

(C):Cemento, (M): Mayólica, (P): Parqué, (LA): Laminado, (PO): Porcelanato, (G): Granito, (V): Vinílico, (LO): Loseta y (T): Tierra.

Apéndice E

Ficha de registro





Ficha de Ubicación Detector de Rn 222

Responsable:

Código de los detectores

--	--

Datos Generales:

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

Características del lugar de monitoreo

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

CONTRATO N° 120 PNICP PIAP 2015


PATRICIA PEREYRA ANAYA
COORDINADOR GENERAL

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.

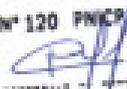
Contacto: Laboratorio de Huellas Nucleares (3er. Piso Física)

Patrizia Pereyra

Oficina 626 2000

ANEXOS 4112 / 4111 / 4127

Correo: grupo.githunu@pucp.pe

CONTRATO N° 120 PUCP/ MAP 2015

PATRIZIA PEREYRA ANAYA
COORDINADOR GENERAL

Apéndice F

Variación del espesor residual en los detectores LR-115 Tipo 2

Se determinó experimentalmente la variación del espesor residual (μm) para diferentes tiempos de grabado químico (min) por el agente NaOH a 2,5 N y a 60 °C. El rango de este tiempo estuvo comprendido entre 40 a 100 min. En la *tabla F.1*, se muestran los valores de los espesores residuales para un detector sin exposición.

Tabla F.1: Espesores residuales de detectores LR-115 Tipo 2 (sin exposición) a diferentes tiempos de grabado químico (min)

Tiempo de grabado (min)	Espesor residual (μm)
40	9.8 ± 0.1
50	8.9 ± 0.2
60	8.2 ± 0.2
70	7.6 ± 0.2
80	6.9 ± 0.1
90	6.1 ± 0.2
100	5.3 ± 0.2

Se puede observar, que para el tiempo de 90 min de acuerdo a las condiciones de laboratorio (GITHUNU - PUCP), la medición fue de $(6.1 \pm 0.2) \mu\text{m}$ para un detector sin exposición (sin variables que afecten al detector). Este valor se encuentra dentro del rango de espesores residuales recomendados $[5-8] \mu\text{m}$ ^[?].

La *figura F.1* muestra el ajuste lineal entre estas dos variables.

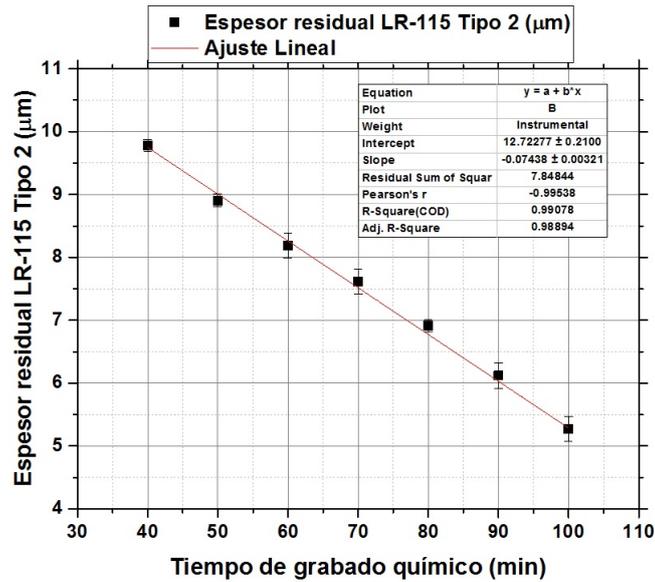
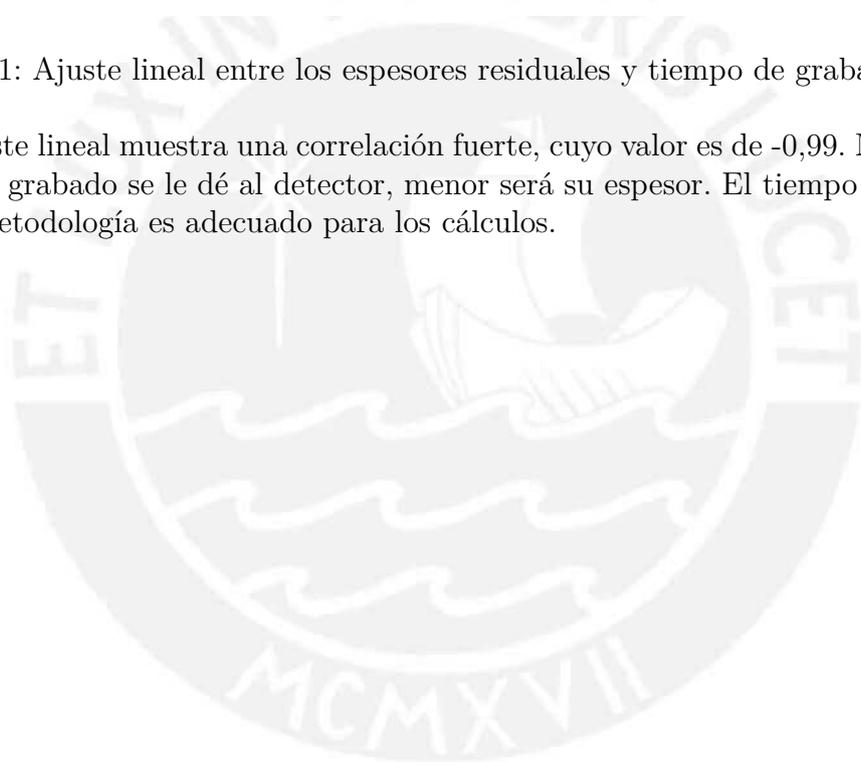


Figura F.1: Ajuste lineal entre los espesores residuales y tiempo de grabado químico.

El ajuste lineal muestra una correlación fuerte, cuyo valor es de -0,99. Mientras más tiempo de grabado se le dé al detector, menor será su espesor. El tiempo empleado en nuestra metodología es adecuado para los cálculos.



Apéndice G

Experiencias en campo

Dedico un espacio para expresar algunas experiencias ganadas durante el desarrollo del trabajo de campo desde Setiembre del 2015 hasta Enero del 2017.

La motivación para realizar la investigación, estuvo presente de inicio a fin, se trató de una experiencia nueva para mí como investigador y un reto por la magnitud de la investigación. El proyecto de monitorear el distrito involucraba compromiso y dedicación, y de hecho así lo fue.

Con el objetivo de identificar como mínimo 4 viviendas por grillado de acuerdo a la metodología planteada, utilicé una herramienta muy importante empleada por encuestadores, que consistió en ir directamente hacia la persona adulta, para poder explicarle el propósito y la importancia de realizar el monitoreo Rn-222 en el distrito de San Luis.

El inicio del primer periodo fue muy complicado, muchos pobladores se resistían a creer que la entrega de los detectores era gratuito y peor aún, que se trataba de un trabajo de investigación a gran escala en nuestra provincia de Lima. Sin embargo, no todo fue complicado, aunque el tiempo apremiaba se pudo identificar 26 viviendas al inicio de este trabajo. Sin duda, fue muy agotador pero gratificante, se había dado un gran paso. Después de las 8 semanas, el 84,62% cumplieron el objetivo, de devolver los detectores tal y como se les había indicado. El único inconveniente, es que las viviendas monitoreadas no estaban homogéneamente distribuidas en el distrito.

Como era tiempo de seguir con el monitoreo y se debía pasar al segundo periodo, la confianza ganada desde el primer periodo se afianzó cuando nuestro Grupo de Investigación de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU - PUCP) tuvo preparado un video que fue subido a las redes sociales permitiendo concientizar a la población sobre los riesgos de la presencia de Rn-222 en nuestras viviendas, sumado a ello el reparto de afiches y stickers, herramientas complementarias al diálogo que ya se había establecido desde el inicio del trabajo. Ello conllevó a identificar aproximadamente el triple de viviendas respecto al primer periodo. Se recorrió y se dialogó más, la población estaba muy participativa y muchos de ellos recomendaban a sus conocidos y vecinos para que participaran en este proyecto de investigación. Se identificaron así 74 viviendas, pero 61 fueron las que se lograron monitorear de manera efectiva, correspondiente a 110 detectores recolectados y analizados en el laboratorio.

De igual manera se procedió en los periodos 3 y 4, los mismos pobladores de las viviendas identificadas participaban en estos nuevos monitoreos, solo algunos por razones justificadas dejaban de hacerlo, pero fue compensado al monitorear nuevas viviendas y de esta manera no sufrir una disminución significativa de la muestra. En total fueron 54 y 50 viviendas monitoreadas respectivamente.

El último periodo fue tan complicado como el primero, aunque se identificaron 68 viviendas, 8 menos que en el segundo (mayor número de muestras), sólo el 52,94% de estas participaron de manera efectiva del proyecto. La conclusión a que llegué fue, que era fin de año y la gran mayoría había hecho remodelaciones en sus viviendas y por ende los detectores fueron extraviados.

Aún así, la población fue muy colaboradora.

