

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**Monitoreo de concentración de radón en el
distrito de San Juan de Miraflores
(Lima-Perú) en el periodo 2015-2016**

Tesis para optar el grado de Magíster en Física

Autor:

Victor Oliver Canchos López

Asesor:

Dra. María Elena López Herrera

Jurado:

Mg. Patricia Edel Pereyra Anaya

Dra. María Elena López Herrera

Dr Daniel Francisco Palacios Fernández

Lima, junio de 2019

Resumen

Más de la tercera parte del día lo pasamos en nuestros hogares, si estos presentan altas concentraciones de radón, entonces aumentará la probabilidad de enfermar de cáncer de pulmón por lo cual se requiere hacer estudios que permitan conocer las concentraciones de este gas en las viviendas y posteriormente sugerir que desde el estado se establezcan normas que permitan a la población tomar acciones frente a este posible riesgo.

En este trabajo se hacen mediciones de las concentraciones del gas radón en viviendas del distrito de San Juan de Miraflores, situado en la región sur de la provincia de Lima. Esta tesis es parte del proyecto Fincyt PIAP-3-P-671-14, el cual plantea hacer un mapeo de las concentraciones del gas radón en la provincia de Lima y Callao.

Las características geológicas del distrito de San Juan de Miraflores es que presenta un suelo variado: rocoso, arcilloso, arenoso y de relleno. Estas características del suelo de este distrito se ven reflejadas en las diferentes mediciones que se han realizado para detectar gas radón al interior de las 51 vivienda estudiadas.

La detección de radón se ha realizado aplicando la técnica de huellas nucleares en detectores LR115 tipo 2 en la modalidad de detector desnudo. Los detectores fueron colocados en dos puntos de la vivienda, en la sala, cocina y/o dormitorio de acuerdo a la elección de los habitantes.

Los resultados de las mediciones en las 37 viviendas monitoreadas durante el período de 2015 al 2016, muestran un valor máximo de promedio anual de concentración de radón de 331.6 Bq/m³ y un valor mínimo de 61.8 Bq/m³. Y se determina que la probabilidad de hallar una casa con una concentración mayor a 200 Bq/m³ (valor de referencia establecido por el IPEN Perú) es de 15.87% dentro del marco de este estudio.

Introducción

El radón 222 es un gas radiactivo de origen natural; se produce por la descomposición del uranio 238 que a su vez se desintegra hasta el radio 226 y éste en radón 222. Esto tiene lugar en el seno de la corteza terrestre por ser el uranio 238 un elemento presente en pequeñas cantidades en muchos tipos de rocas, suelos y materiales. De estos materiales el gas radón emigra hacia la atmósfera y, una vez en ésta, se dispersa y se desintegra en sus descendientes (también radiactivos), que se adhieren a las partículas que están siempre presentes en el aire (aerosol atmosférico. También en la naturaleza se encuentran los isótopos del radón 222 que son el radón 220 (torón) y el radón 219 (actinón); por su corta vida media y por la metodología usada en este trabajo solo se considera el radón 222, el más abundante y de mayor vida media. La OMS ha presentado estudios en los que se demuestra que el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población de fumadores, después del tabaco y la primera causa de cáncer de pulmón en no fumadores. Debido al peligro que representa el radón debe ser monitoreado en hogares, en centros de trabajo, y en general, en todo lugar al que las personas tengan acceso, donde este gas se puede concentrar. Según la Comisión Internacional de Protección Radiológica, (ICRP) en su última publicación respecto al radón, ICRP126, se recomienda un nivel de referencia para la concentración de radón, en interiores, de 300 Bq/m^3 ya sean viviendas o lugares de trabajo. En Perú, y en general en Latinoamérica no se han realizado estas mediciones o se está en sus inicios, es por lo tanto una tarea necesaria y urgente.

Dedicatoria

A mis padres, Víctor y Esperanza

A mis hermanos, Graciela, Rocío, José y Paul

A mi novia, Elizabeth



La experimentación jamás se equivoca. Es el juicio quien se engaña cuando anhela resultados que no responden a la experimentación.

Leonardo da Vinci



Agradecimientos

A mis padres y a mi novia por su constante apoyo, su amor y preocupación.

A las familias que apoyaron este estudio, permitiendo que se coloquen detectores en sus viviendas.

A mi asesora Dra. María Elena López Herrera y profesora Patrizia Pereyra por sus enseñanzas, su paciencia y su apoyo constante en el desarrollo de la maestría y en la elaboración de ésta tesis. Al Dr. Daniel Palacios por sus enseñanzas, sus consejos y la transmisión de su experiencia como investigador en el área que ha sido de mucha utilidad para sacar adelante ésta tesis. A todos mis compañeros del grupo de investigación GITHUNU que me han apoyado de distintas formas durante el desarrollo de la maestría.



Objetivos

Generales:

Investigar y desarrollar una metodología adecuada que nos permita medir la concentración de radón en viviendas en el Perú

Con las mediciones realizadas contribuir a elaborar el mapa de concentración de radón de Lima y más adelante del Perú.

Específicos:

Realizar las medidas de las concentraciones de radón en interiores en el distrito de San Juan de Miraflores.

Identificar viviendas en el distrito de San Juan de Miraflores con una concentración de radón superior a los niveles de referencia dados por el ICRP 126 y el IPEN Perú, para sugerir o buscar algún tipo de remediación.

Justificación

En el Perú el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) ha publicado un dispositivo legal, el Reglamento de Seguridad Radiológica (D. S. Nro. 009-97-EM), en el cual se indican los niveles de referencia de concentración de radón en viviendas y en lugares de trabajo. Sin embargo en Perú no se ha realizado aún un estudio de concentración de radón en viviendas o en lugares de trabajo que permita verificar si los niveles de referencia planteados son los más adecuados. Los niveles de referencia que se plantean a nivel mundial se basan en estudios de concentración de radón llevados a cabo por varios países, en estos estudios se ha considerado un monitoreo a nivel nacional. En el Perú se han realizado algunos estudios de concentración de radón pero que no han cubierto toda su superficie, inclusive en la capital, provincia de Lima, los estudios realizados por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) de concentración de radón en interiores no ha considerado aún una muestra representativa en todos los distritos. En ese sentido en este trabajo se está considerando un monitoreo de concentración de radón en el distrito de San Juan de Miraflores, perteneciente a la provincia de Lima que es capital del departamento de Lima y del Perú.

Índice general

Lista de Figuras	x
Lista de Tablas	xii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Mediciones de Rn 222 en Lima Metropolitana	1
1.2. Decaimiento radiactivo	1
1.2.1. Radiación alfa	2
1.2.2. Radiación beta	2
1.2.3. Radiación gamma	2
1.3. Ley de decaimiento radiactivo	3
1.4. Radón 222 en interiores	3
1.5. Monitoreos de radón 222 en otros países	4
2. Fundamento teórico	6
2.1. Cadenas de desintegración radiactiva	6
2.1.1. Ecuaciones de Bateman	7
2.2. Interacción de las partículas alfa con la materia	9
2.2.1. Alcance o rango	9
2.2.2. Ionización	10
2.2.3. Poder de frenado	10
2.2.4. Transferencia lineal de energía	11
2.3. Radón 222	11
2.3.1. Transporte de radón	11
2.3.2. Fuentes de Radón 222	13
2.3.3. Decaimiento de Radón 222	14
2.3.4. Medición y detección de Radón 222	15
2.4. Trazas nucleares en Detectores de Huellas Nucleares de Estado Sólido (SSNTD)	16
2.4.1. Registro y desarrollo de las trazas en detectores de estado sólido	16
2.4.2. Geometría de la traza grabada	17
2.5. El detector LR 115 tipo 2	19

3. Métodos y procedimientos	22
3.1. Características del distrito de San Juan de Miraflores	22
3.1.1. Ubicación	22
3.1.2. Viviendas construidas sobre los diferentes tipos de suelos del distrito	23
3.2. Preparación, distribución y grabado de los detectores	24
3.2.1. Preparación	24
3.2.2. Distribución	25
3.2.3. Grabado	26
3.3. Conteo de las trazas nucleares en los detectores	27
3.4. Expansión de incertidumbres	28
3.5. Distribución log normal	29
4. Resultados e interpretación	31
4.1. Análisis de datos obtenidos por periodo de medición	31
4.1.1. Concentraciones de radón medidas en el primer periodo .	31
4.1.2. Concentraciones de radón medidas en el segundo periodo	33
4.1.3. Concentraciones de radón medidas en el tercer periodo .	35
4.1.4. Concentraciones de radón medidas en el cuarto periodo .	37
4.2. Análisis de las concentraciones de radón promedio	39
4.2.1. Concentraciones de radón promedio de los cuatro periodos	39
4.2.2. Test de bondad de ajuste	44
4.2.3. Determinación del porcentaje de viviendas que superan el límite de riesgo.	44
4.3. Variabilidad de las concentraciones en los ambientes de las vi- viendas	46
4.4. Variabilidad de las concentraciones en función del tipo de suelo .	49
5. Conclusiones y recomendaciones	50
A. Ficha de datos para la ubicación de los detectores	53
B. Valores promedio de los parámetros climáticos durante el pe- riodo de medición	55
C. Artículo presentado en el XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear Congreso Regional IRPA	57

Índice de figuras

1.1. Esquema de decaimiento del Radón 222 [8]	2
1.2. Esquema de desintegración gamma de un estado inicial de energía a otro con menor energía. [25]	3
1.3. Ingreso de radón a las viviendas [3]	4
2.1. Cadena de desintegración del uranio [2]	7
2.2. Curva de Bragg [27]	10
2.3. Mecanismo de transporte de radon en suelos y materiales [6]	12
2.4. Proceso de emanación de radon en suelos y materiales [6]	13
2.5. Fuentes de radón en interiores de viviendas [4]	14
2.6. Radón y su progenie [5]	15
2.7. Paso de una partícula alfa a través de un polímero [13]	17
2.8. Formación de la traza después del grabado químico [13]	18
2.9. Parámetros geométricos de la traza grabada [13]	19
2.10. Detector LR-115 tipo 2	20
2.11. Ventana de energía del detector LR-115 tipo 2 [19]	21
3.1. Características del suelo del distrito de San Juan de Miraflores [12]	23
3.2. Aproximado del número de viviendas construidas hasta el 2015 [10]	24
3.3. Detector empleado en el monitoreo	24
3.4. Grilla para la distribución de los detectores LR-115 en el distrito de San Juan de Miraflores	26
3.5. Sistema de grabado de los detectores LR-115	27
3.6. Trazas encontradas en un campo de medición (imagen obtenida con el software V.4.0 del microscopio Leica)	28
4.1. Distribución de los detectores en el primer periodo	33
4.2. Distribución de los detectores en el segundo periodo	35
4.3. Distribución de los detectores en el tercer periodo	37
4.4. Distribución de los detectores en el cuarto periodo	39
4.5. Distribución de los detectores en los cuatro periodos	41
4.6. Mapa de los niveles de radón en el distrito	42
4.7. Evolución de las concentraciones promedio de radón en los periodos de medición	43

4.8. Histograma de las concentraciones medidas, obtenidas en los cuatro periodos	43
4.9. Test Kolmogorov - Smirnov para el promedio de las mediciones .	44
4.10. Porcentaje de viviendas que superan el límite referenciado por el IPEN Perú	45
4.11. Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición	47
4.12. Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición	47
4.13. Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición	48
4.14. Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición	48
4.15. Comparación de mapa geologico vs mapa de radón [21]	49
A.1. Ficha de ubicación de los detectores (Parte I)	53
A.2. Ficha de ubicación de los detectores (Parte II)	54
B.1. Valores promedio de la Temperatura durante los 4 periodos de medición	55
B.2. Valores promedio de la Humedad relativa durante los 4 periodos de medición	56

Índice de tablas

1.1. Niveles de referencia de radón dados por diferentes países y organizaciones. [26]	5
2.1. Energía de ionización para algunos gases [18]	10
2.2. Valores de Ra226 en diferentes tipos de rocas [22].	14
2.3. Detectores de estado sólido[20]	15
2.4. Algunas sustancias grabadoras útiles para detectores de huellas nucleares [13]	17
3.1. Tipos de distribuciones de data de radón como fue hallada en la literatura. LN: distribución lognormal. DEG: desviación estándar geométrica.	29
4.1. Concentraciones de radón del primer periodo en Bq/m^3 (octubre - noviembre del 2015)	32
4.2. parametros estadísticos de la concentración de radón en el primer periodo (Bq/m^3)	32
4.3. Concentraciones de radón del segundo periodo en Bq/m^3 (febrero - marzo del 2016)	34
4.4. Parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en el segundo periodo (Bq/m^3)	34
4.5. Concentraciones de radón del tercer periodo en Bq/m^3 (junio - julio del 2016)	36
4.6. parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en el tercer periodo (Bq/m^3)	36
4.7. Concentraciones de radón del cuarto periodo en Bq/m^3 (agosto - setiembre del 2016)	38
4.8. parámetros estadísticos de las concentraciones del cuarto periodo (Bq/m^3)	38
4.9. Concentración de radón en Bq/m^3 promedio de los cuatro periodos	40
4.10. parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en los cuatro periodos (Bq/m^3)	41
4.11. Distribución de los detectores en los ambientes de las viviendas	46

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Mediciones de Rn 222 en Lima Metropolitana

El presente estudio forma parte del proyecto PIAP-3-P-671-14 “Desarrollo de un sistema de monitoreo de radón 222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares, en la ciudad de Lima, Perú”, dentro del cual se han hecho otros estudios de monitoreo de radón 222 en diferentes distritos de Lima metropolitana. Estos distritos monitoreados son Villa el Salvador, San Miguel, San Luis, San Martín de Porres, Los Olivos y en este trabajo San Juan de Miraflores. Los monitoreos realizados han contribuido de manera significativa a la metodología de trabajo en el laboratorio, aportando además las consideraciones necesarias para el correcto procesamiento de datos. En este contexto en el grupo de investigación GITHUNU, los miembros han presentado trabajos en diferentes congresos y simposium internacionales relacionados con este tema.

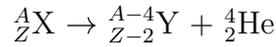
1.2. Decaimiento radiactivo

El decaimiento radiactivo es un fenómeno, natural, espontáneo, el cual como todos los procesos espontáneos se produce debido a que el sistema tiene un exceso de energía, la que es liberada como radiación de origen electromagnético o corpuscular. Las sustancias radiactivas emiten tres tipos distintos de radiación: radiación alfa, radiación beta y radiación gamma. Estas tres formas de radiación presentan capacidades de penetración bastante diferentes. Las partículas alfa pueden atravesar una hoja de papel con dificultad, mientras que las partículas beta pueden atravesar algunos milímetros de aluminio, y los rayos gamma varios centímetros de plomo [24].

Los principales mecanismos de decaimiento radioactivo son:

1.2.1. Radiación alfa

Es la emisión de núcleos de He^4 , denominados partículas alfa. En el decaimiento alfa el núcleo “padre” libera una partícula que está formada por dos protones y dos neutrones. En este proceso el número de masa (A) y el número atómico (Z) de los elementos, cumplen:



En la siguiente figura se puede ver el esquema de decaimiento para el radón 222.

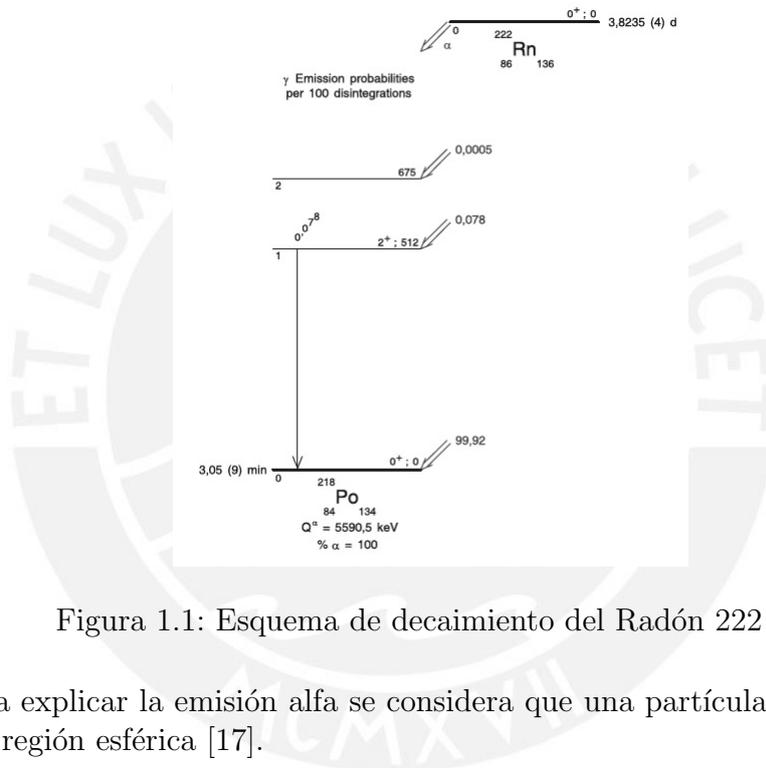


Figura 1.1: Esquema de decaimiento del Radón 222 [8]

Para explicar la emisión alfa se considera que una partícula alfa se mueve en una región esférica [17].

1.2.2. Radiación beta

En este proceso el número de masa (A) no se altera mientras que el número atómico (Z) varía en una unidad. El decaimiento beta viene caracterizado por la emisión de un electrón a altas velocidades del núcleo como resultado de la transformación de un neutrón a un protón [15].

El decaimiento β^\pm se puede escribir de la siguiente manera:



1.2.3. Radiación gamma

Un núcleo puede ocupar una serie de estados cuánticos, y al igual que los átomos tienen valores discretos de energía [25]. En consecuencia, cuando un

núcleo emite un rayo gamma, se mantiene como el mismo núcleo, pero en un estado de menor energía.

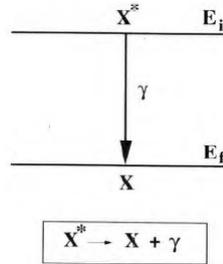


Figura 1.2: Esquema de desintegración gamma de un estado inicial de energía a otro con menor energía. [25]

1.3. Ley de decaimiento radiactivo

Si N núcleos radiactivos están presentes en un tiempo “ t ” en una muestra, entonces el número de decaimientos dN en un tiempo “ dt ” es proporcional a N de la siguiente forma:

$$\lambda = -\frac{dN/dt}{N} \quad (1.1)$$

Donde λ se conoce como la constante de desintegración o constante de decaimiento, mientras que el término de la mano derecha indica la probabilidad por unidad de tiempo para el decaimiento de un átomo.

Integrando la ecuación 1.1 se deduce la ley de desintegración:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

y para el caso de la actividad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Es importante observar que la ley exponencial simple del decaimiento radiactivo aplica solo a un conjunto limitado de circunstancias, de manera que, para que una cantidad inicial de una sustancia que decae a un producto final estable se pueden presentar variedades de modos de desintegración [25].

1.4. Radón 222 en interiores

La organización mundial para la salud ha catalogado al radón como un agente cancerígeno, situándolo como la primera causa de cáncer de pulmón en

personas no fumadoras. Diferentes estudios epidemiológicos hasta la fecha no reportan un umbral por debajo del cual el radón no represente un riesgo para la salud. Como una fuente de radiación natural el radón se encuentra en todos los ambientes, ya sea mínimas o en grandes concentraciones, y debido a su naturaleza fluctuante es importante su medición. Sin embargo, el principal problema radica en la progenie del radón, los cuales se puede adherir a las partículas de polvo u agua producto de la humedad del ambiente. En promedio las personas pasan entre el 80 y 90 % de su tiempo en interiores, ya sea en lugares de trabajo o el hogar, donde el radón está siempre presente. Es importante entonces además de conocer los niveles de radón a los que se está expuesto, determinar las principales fuentes que contribuyen con la exhalación de este gas al ambiente, ello permitirá tomar las correctas medidas para la remediación en el caso se encuentren viviendas que superen un determinado umbral. Diferentes países han realizado monitoreos para conocer la concentración promedio de radón, y así poder establecer los límites o niveles de referencia como base de una normativa. Este trabajo de investigación busca sumar con la información necesaria para que en Perú se pueda consolidar dicha normativa.

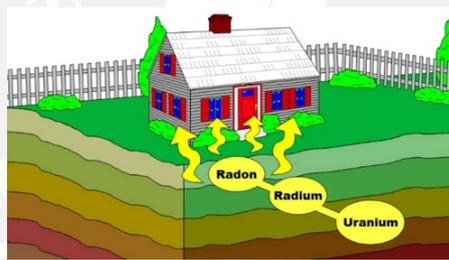


Figura 1.3: Ingreso de radón a las viviendas [3]

1.5. Monitoreos de radón 222 en otros países

Diferentes países europeos han realizado monitoreo de radon en interiores como Austria, Bélgica, Finlandia, Irlanda, los cuales se caracterizan por tomar en cuenta el origen geológico del radón, a partir de estos estudios, en estos países, se realizaron mapas de riesgo de radón. En los monitoreos mencionados, se elabora una base de datos de las medidas realizadas, y posteriormente cuando se obtienen nuevos resultados, éstos se suman a los que ya se tenían. La cantidad de medidas varía de un país a otro, por ejemplo en Austria hasta el 2012 se tienen 30000 registros, mientras que en los Países Bajos se tienen hasta 1996 un total de 1500 registros. En la mayoría de estos países los hogares fueron estadísticamente seleccionados de manera que los resultados son representativos de las áreas habitadas. En algunos países como en Bélgica las mediciones se hacen en invierno (3 meses) donde las concentraciones son más altas, mientras que en otros como en Finlandia las medidas se toman en los

meses de verano (2 meses), donde las concentraciones son más bajas, pero también se hacen medidas a lo largo de un año como en los países Bajos. En la mayoría de estos países son instituciones estatales las encargadas de sacar adelante estas mediciones. En muchos de estos países como en Bélgica se toma en cuenta información de cómo fueron colocados los detectores, sistemas de ventilación y ambientes de las viviendas en las cuales fueron colocados los detectores, debido a que éstas características influyen en las medidas que se obtienen.

Tabla 1.1: Niveles de referencia de radón dados por diferentes países y organizaciones. [26]

País, organización	Nivel de referencia de radón (Bq/m^3)
Países Bajos	20
Luxemburgo	150
Estados Unidos de América	150
Australia	200
Irlanda	200
Noruega	200
Suecia	200
Reino Unido	200
Alemania	250
Austria	400
Bélgica	400
Finlandia	400
Suiza	400
Canadá	800
Comunidad Europea	400
IAEA, WHO y otros	200-600
ICRP	200-600

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1. Cadenas de desintegración radiactiva

Existen tres cadenas radiactivas naturales, que tienen el mismo orden de vida del planeta tierra, cuyas cabezas son respectivamente U^{238} , U^{235} y Th^{232} . Todas ellas terminan con la formación de un isótopo estable del plomo, no sin antes producirse otros elementos radiactivos en el proceso de desintegración. En cada una de las tres series aparece un determinado isótopo del gas radón. El Rn^{220} que se encuentra en la familia del Th^{232} , que tiene también por nombre torón, y el Rn^{219} que figura en la familia del U^{235} , que tiene por nombre actinón, tienen periodos de semidesintegración de 55,6 s y 4 s, respectivamente. Nuestro radón es el Rn^{222} que figura en la cadena del U^{238} , procedente del Ra^{226} , y posee un periodo de 3,8 días y es al que se le denomina propiamente radón [23].

Cada núcleo radiactivo sufre una transformación vía radiación alfa, radiación beta y/o radiación gama por lo cual cambia su número atómico y sufre un

desplazamiento en la tabla periódica como se muestra en la siguiente figura.

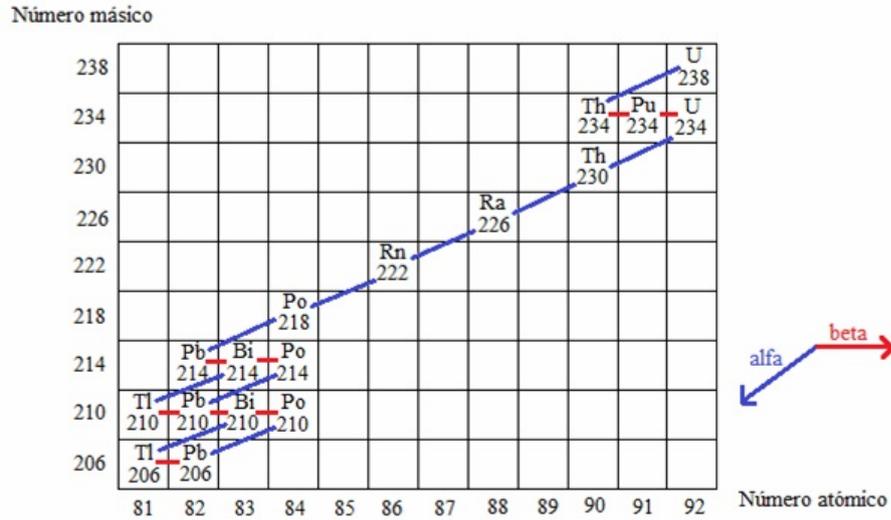


Figura 2.1: Cadena de desintegración del uranio [2]

2.1.1. Ecuaciones de Bateman

Las cadenas de desintegración radiactiva contienen más de un elemento, por lo que es importante conocer en cada instante el número de átomos de cada elemento que existe en la muestra. Por ejemplo, en una cadena radiactiva en la que el núcleo padre A , se desintegra en un nuevo elemento (hijo radiactivo) B , se describe por:



Con el sistema de ecuaciones diferenciales propuesto por Rutherford y Soddy[7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_A}{dt} &= -\lambda_A N_A \\ \frac{dN_B}{dt} &= \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \\ \frac{dN_C}{dt} &= \lambda_B N_B - \lambda_C N_C \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Donde la actividad del núcleo hijo es $A_B = \lambda_B N_B$, y el número de núcleos hijo pasa por un máximo, que se obtiene al exigir que $dN_B/dt = 0$ [25].

$$t_{max} = \frac{\ln(\lambda_B/\lambda_A)}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.3)$$

En el caso $\lambda_A \ll \lambda_B$ (Equilibrio Secular).

Para verificar ésto partimos de las siguientes condiciones iniciales:

$$N_A(0) = N_0 \quad (2.4)$$

$$N_B(0) = N_B(0) = 0 \quad (2.5)$$

Se verifica que:

$$dN_A = -\lambda_A N_A dt \Rightarrow N_A(t) = N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (2.6)$$

Usando ésta última ecuación y de:

$$dN_B = \lambda_A N_A dt - \lambda_B N_B dt \Rightarrow \frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (2.7)$$

O sea:

$$\frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B = \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (2.8)$$

La solución general de ésta ecuación diferencial está dada por:

$$N_B = \alpha e^{-\lambda_A t} + \beta e^{-\lambda_B t} \quad (2.9)$$

Reemplazando ésta solución en la ecuación anterior y considerando las condiciones iniciales se obtiene que:

$$\alpha = -\beta = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 \quad (2.10)$$

Por lo tanto:

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.11)$$

Y la actividad del núcleo hijo está dada por:

$$A_B(t) = \lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.12)$$

Para hallar el instante de tiempo en que la actividad del hijo es máxima se plantea que:

$$\frac{dA_B}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

De donde se obtiene que:

$$-\lambda_A e^{-\lambda_A t} + \lambda_B e^{-\lambda_B t} = 0 \quad (2.14)$$

De donde se obtiene el tiempo para que la actividad del hijo sea máxima:

$$t_{max} = \frac{\ln(\lambda_B/\lambda_A)}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.15)$$

El equilibrio secular se establece cuando las actividades del núcleo padre y del núcleo hijo se igualan, esto puede ocurrir cuando $\lambda_A \ll \lambda_B$ ya que de la ecuación que da la actividad del hijo se puede obtener que:

$$A_B(t) = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.16)$$

De donde:

$$A_B(t) \approx \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_B} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.17)$$

$$A_B(t) \approx \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} (1 - e^{-(\lambda_B - \lambda_A)t}) \quad (2.18)$$

O sea:

$$A_B(t) \approx A_A(t) (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.19)$$

Para un tiempo t suficientemente grande $e^{-\lambda_B t} \approx 0$
Entonces se establece el equilibrio secular

$$\frac{A_B(t)}{A_A(t)} \approx 1 \Rightarrow A_B(t) \approx A_A(t) \Rightarrow \lambda_B N_B \approx \lambda_A N_A \quad (2.20)$$

2.2. Interacción de las partículas alfa con la materia

2.2.1. Alcance o rango

Al medir la ionización específica en aire producida por el recorrido de las partículas alfa de una determinada fuente, a diversas distancias de dicha fuente es posible obtener una curva característica, denominada *curva de Bragg* [16]. Debido a la masa de las partículas alfa, su poder de penetración en la materia es muy bajo. Existe una proporción inversa entre la energía y el periodo de un radioisótopo, por lo cual mientras más corto es el periodo, mayor será el alcance de las alfas [16]. Mediante la siguiente fórmula empírica es posible estimar el alcance de las partículas alfa en aire:

$$R(\text{aire}) = 0,318E^{3/2} \quad (2.21)$$

Donde R representa el alcance de las partículas alfa en centímetros y E es la energía en MeV.



Figura 2.2: Curva de Bragg [27]

2.2.2. Ionización

Al colisionar una partícula cargada con un átomo, ésta puede alterar el estado de sus electrones. Se define la Ionización total (J_t), como el total de iones formados por el paso de una partícula, mientras que la Ionización específica se define como la ionización producida por unidad de recorrido de la partícula. En su paso por el medio material, la partícula cargada necesita una determinada energía para arrancar un electrón de un átomo, así por ejemplo la energía requerida para ionizar algunos gases se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Energía de ionización para algunos gases [18]

Gas	w(eV/par)
H2	37
He	41
N2	35
O2	31
Aire	35
Ne	36
Ar	26

2.2.3. Poder de frenado

Se define como la energía perdida por la partícula por unidad de longitud en el material. Una forma de medir el poder de frenado de un material de manera experimental, es por la medición de la energía de las partículas que

tienen al atravesar dicho material.

$$L = -\frac{dE}{dx} \quad (2.22)$$

Donde E es la energía cinética clásica, el poder de frenado varía con la energía de la partícula; y el rango de la partícula viene dado por:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)} \quad (2.23)$$

Donde E_0 representa a la energía cinética inicial.

Si se conoce el rango como función de la energía, el poder de frenado se puede obtener por:

$$\frac{dR}{dE} = \frac{1}{S(E)} \quad (2.24)$$

La energía perdida por una partícula cargada no relativista, se puede representar por la siguiente expresión:

$$S = \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N}{m_e v^2} Z \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \quad (2.25)$$

Donde ze es la carga de la partícula (para una partícula alfa z tiene el valor de 2) y v es la velocidad de la partícula. m_e es la masa del electrón, Z es el número atómico del material, N el número de átomos/ cm^3 del material, I es el potencial promedio de excitación de un átomo en el material, obtenido de forma experimental.

2.2.4. Transferencia lineal de energía

Se define la transferencia lineal de energía (LET) de partículas cargadas en un medio como:

$$L = \frac{dE_L}{dl} \quad (2.26)$$

Donde, dE_L es la energía promedio localmente impartida por la partícula cargada en el medio al atravesar una distancia dl . La LET es medida en $KeV/\mu m$.

2.3. Radón 222

2.3.1. Transporte de radón

El proceso se inicia con la emanación del radón en los granos del material que contienen radio, el radon generado se mueve a través de los poros existentes entre los granos del material (espacio intersticial), y busca ser liberado al exterior, en este proceso que parece simple, existen ciertas condiciones que se

deben dar en el material para que el radón generado logre alcanzar la superficie (exhalación de radón). La ecuación que describe este proceso de transporte de radón viene dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_\epsilon \nabla^2 C + \frac{k}{\mu \epsilon} \nabla P \nabla C - \lambda_{Rn} C + G \quad (2.27)$$

Donde G es el término de la generación de radón en el material ($Bq.m^3.s^{-1}$)

$$G = \frac{A_{Ra,m} \cdot \rho_m \cdot f_m}{\epsilon_m} \lambda_{Rn} \quad (2.28)$$

Y los parametros para determinar G son:

- Contenido de radio en el material $A_{Ra,m}$ ($Bq.kg^{-1}$)
- Densidad aparente del material ρ_m ($Kg.m^{-3}$)
- Coeficiente de emanación del material f_m (adimensionales)
- Porosidad del material ϵ_m (adimensionales)

Cuando el radón es generado; está en el volumen de poro del suelo, y migra básicamente a través de los poros más grandes, por dos mecanismos: flujos difusivos y advectivos, como se puede ver en las Figuras 2.3 y 2.4

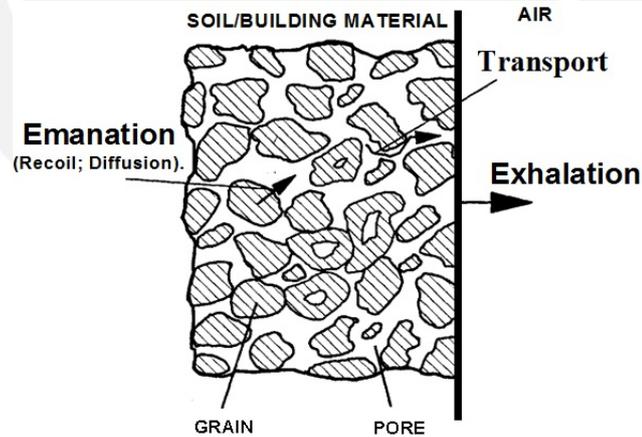


Figura 2.3: Mecanismo de transporte de radon en suelos y materiales [6]

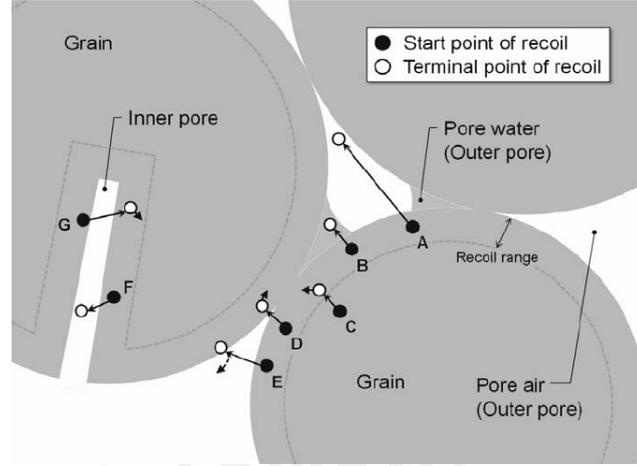


Figura 2.4: Proceso de emanación de radón en suelos y materiales [6]

La densidad de flujo difusivo de la actividad del radón J^d (Bqm^2s^{-1}) se da como resultado del movimiento molecular aleatorio, el cual se pueden expresar mediante la Ley de Fick:

$$J^d = -D_0 \nabla C \quad (2.29)$$

Si solo se considera el movimiento por flujo difusivo, la ecuación general de transporte se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \varepsilon D_e \nabla^2 C + G - \lambda_{Rn} C \quad (2.30)$$

La velocidad a la que el radón pasa a través del medio (v_D), se puede expresar por la ley de Darcy:

$$v_D = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (2.31)$$

∇P es el gradiente de presión dinámica del suelo y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Entonces al multiplicar v_D por la concentración de radón se obtiene:

$$J^a = -\frac{k}{\mu \varepsilon_a} \nabla PC \quad (2.32)$$

2.3.2. Fuentes de Radón 222

Todos los materiales de la corteza terrestre contienen radio en mayor o menor proporción. Un material que contenga Ra 226 es una fuente de radón, dando lugar a concentraciones del gas, tanto en el interior como en el exterior del material [22]. Por ejemplo los materiales que se usan para la construcción de viviendas, que provienen de minerales de rocas o suelos contienen una cierta cantidad de radionucleidos por lo cual pueden ser una fuente de Radón dentro de una vivienda. Según datos de la UNSCEAR el nivel de concentración

promedio de Ra 226 en el mundo, en el suelo, es de 35 Bq/kg, sin embargo dependiendo de la zona, existen áreas en el mundo que superan el rango normal en cuanto a la variación de radionucleidos, así como también del tipo de actividades que se realizan en determinadas regiones [9].

Tabla 2.2: Valores de Ra226 en diferentes tipos de rocas [22].

TIPO DE ROCA	Ra-226 (Bq/kg)
Granitos	78
Basalto	11
Cal(s)	45
Arcillas(s)	60
Metamórficas	40

Es posible determinar, mediante el cálculo de la tasa de exhalación de radón de cada material empleado en la construcción de las viviendas y del suelo, en cuanto contribuyen al radón presente en la atmósfera de las viviendas. Además es importante considerar otras fuentes como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 2.5: Fuentes de radón en interiores de viviendas [4]

2.3.3. Decaimiento de Radón 222

El radón es el único elemento gaseoso de la cadena de desintegración del uranio 238, sin embargo su progenie son partículas sólidas, como se puede observar en la siguiente figura, donde además a medida que va decayendo la energía de emisión de las partículas alfa va en aumento.

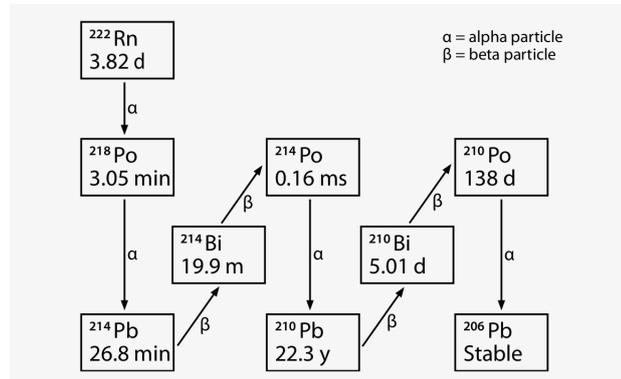


Figura 2.6: Radón y su progenie [5]

2.3.4. Medición y detección de Radón 222

Existen diferentes dispositivos empleados para la medición del radón y su progenie en aire. Elegir el método de medición está en función del tiempo requerido para las mediciones, el equipamiento que se tiene disponible, y el costo. Existen métodos activos y pasivos para la detección de radón y éstos se distinguen según la captación forzada o no de un flujo de aire del ambiente donde se realiza la medición [1]. Sin embargo el presente trabajo de investigación pone énfasis en los detectores pasivos que fueron empleados en la investigación.

Los métodos pasivos requieren exposiciones más largas, lo que permite obtener concentraciones medias de los niveles de radón en las diferentes estaciones del año, por otro lado los métodos activos se pueden realizar con cortos periodos de exposición y la determinación de la concentración es puntual, en otras palabras, no considera las variaciones estacionales.

Los detectores de trazas nucleares o SSNTD por sus siglas en inglés son del tipo pasivos e integradores en el tiempo, que permiten obtener información de las concentraciones promedio durante un tiempo que puede variar entre días, semanas o meses [1]. En la siguiente tabla se puede ver los tipos de detectores de estado sólido.

Tabla 2.3: Detectores de estado sólido[20]

	SSNTD	
CRYSTALS	GLASSES	POLYMERS
Muscovite	Tektite	PADC, CR-39
Apatite	Obsidian	Lexan
Zircon	Soda-Lime	Makrofol
Sphene	BP-1 glass	LR-115
Phroxene	Phosphate	PETAC-ADC

En este trabajo de investigación se usa el detector LR 115 tipo 2, que es un polímero de nitrocelulosa sobre una lámina de poliéster.

2.4. Trazas nucleares en Detectores de Huellas Nucleares de Estado Sólido (SSNTD)

Cuando un ión pesado, como una partícula alfa, pasa a través de un sólido puede dejar en este un camino casi continuo de daño conocido como huella latente, en el caso de un sólido cristalino el daño afecta a su estructura cristalina en cambio en el caso de un polímero se rompen sus cadenas poliméricas y genera además radicales libres. El diámetro de las huellas latentes están en el orden de 25 a 100 Å por lo cual éstas no pueden ser visualizadas fácilmente pero si el sólido es sometido a un procedimiento químico éstas huellas pueden ser agrandadas hasta el orden de los μm para así poder ser vistas con ayuda de un microscopio óptico.

Los materiales sólidos en los cuales es posible que se formen trazas nucleares son dieléctricos, el límite inferior para la resistividad de éstos es $2000 \Omega \text{ m}$ [13]. Diferentes dieléctricos presentan diferentes umbrales de registro por lo cual si se desea detectar huellas de partículas alfa emitidas por el radón 222 se pueden usar detectores como el CR39 o el LR115. Hoy en día los detectores de huellas nucleares plásticos son los más usados, comunmente, en todo el mundo, ya que éstos son pequeños, fáciles de usar, baratos y simples de procesar y leer.

2.4.1. Registro y desarrollo de las trazas en detectores de estado sólido

El tipo de daño por la irradiación de sólidos depende no solo de la naturaleza de la radiación ionizante sino también de la naturaleza del sólido. En plásticos la radiación ionizante directa produce moléculas excitadas e ionizadas y electrones, el efecto neto en el plástico será la ruptura de cadenas moleculares. En sólidos cristalinos la irradiación resulta en la formación, por varios

medios, de vacancias en la red e intersticiales.

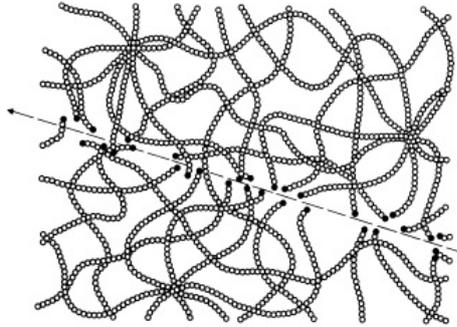


Figura 2.7: Paso de una partícula alfa a través de un polímero [13]

Tabla 2.4: Algunas sustancias grabadoras útiles para detectores de huellas nucleares [13]

Material	Sustancia grabadora
Polycarbonate plastics	Solución de NaOH; Típicamente 1-12 M. Temp: 40-70 °C *
Plásticos de nitrato de celulosa	NaOH; 1 - 12 M. Temp: 40-70°C
Plásticos CR-39 (allyl diglycol carbonato)	Soluciones de NaOH, KOH; 1 - 12 M. Temp: 40-70 °C
Ortopiroxenos y clinopiroxenos	6 g NaOH + 4 g H_2O . Hirviendo, bajo reflujo.
Mica	48 % HF. Temp: 20 - 25°C**
Cristales	1 - 48 % HF. Temp: 20-25 °C
Feldespatos	1 g NaOH + 2 g H_2O . Hirviendo, bajo reflujo.
Apatita, Whitlockite***	0.1 - 5 % HNO_3 . Temp: 20-25°C
Circón	11.5 g KOH + 8 g NaOH (eutéctico). Temp: 200-220°C.
Esfeno	$1HF : 2HNO_3 : 3HCl : 6H_2O$. Temp: 20°C.

2.4.2. Geometría de la traza grabada

Elegimos el modelo más simple para definir los parámetros de interés en la formación de huellas. Los parámetros más fácilmente medibles de una traza revelada son la longitud del cono “ L_e ”, o la longitud S proyectada sobre la superficie del detector (ver Figura 2.9), los ejes mayor y menor D, d respectivamente de la abertura de la traza grabada (ver Figuras 2.8 y 2.9). El propósito del estudio de la geometría de la traza revelada es relacionar estos parámetros con las velocidades V_T , V_B y con la longitud de la traza “ R ”. De modo que las cantidades de interés tales como la carga (Z), masa (M) y energía (E) pueden ser deducidas. Estudiar la geometría también permite determinar cantidades tales como la eficiencia de un detector, que se define como la relación entre el número de trazas observadas y el número de trazas latentes que atraviesan un área unitaria de la superficie original del detector [13].

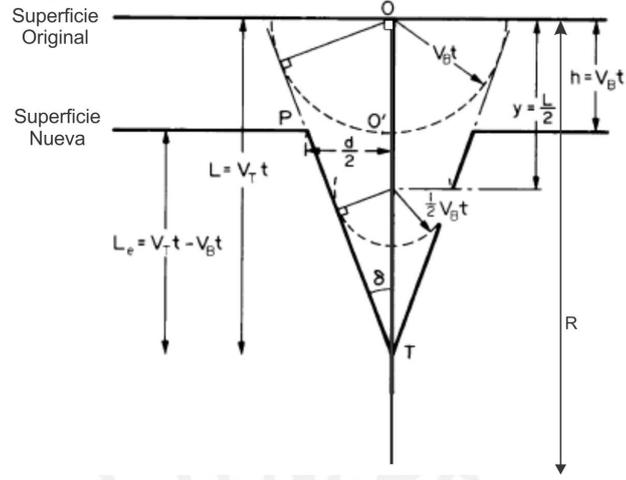


Figura 2.8: Formación de la traza después del grabado químico [13]

El cálculo de los parámetros de la traza grabada es relativamente sencillo cuando la velocidad de grabado V_T a lo largo de la traza latente se toma como constante. El modelo de V_T constante permite que se establezcan de una manera bastante sencilla una serie de características del proceso de grabado de trazas. La velocidad lineal de grabado a lo largo de la traza latente es V_T de manera que en un tiempo de grabado t la traza latente se extenderá hasta una distancia L desde el punto de origen, dada por $L = V_T \cdot t$ como se puede ver en la Figura 2.8 y Figura 2.9 [13]. Por otro lado sobre la superficie y a lo largo del sendero dejado por la partícula en el detector la sustancia grabadora también se desplaza hacia fuera a una velocidad V_B ; De modo que la longitud de la traza grabada será [13]:

$$L_e = V_T \cdot t - V_B \cdot t \quad (2.33)$$

Como se ve en la Figura 2.9 esto conduce a la Formación de un cono con ángulo semi-cónico δ dado por:

$$\sin \delta = \frac{V_B t}{L} = \frac{V_B t}{V_T t} = \frac{V_B}{V_T} \quad (2.34)$$

El ángulo $\delta = \sin^{-1}(\frac{V_B}{V_T})$ es conocido como el ángulo crítico de grabado [13]. Del triángulo $O'PT$ en la Figura 2.8, se observa que:

$$\tan \delta = \frac{d/2}{L_e} \quad (2.35)$$

De la ecuación (2.34), se obtiene:

$$\tan \delta = \frac{V_B}{\sqrt{(V_T^2 - V_B^2)}} \quad (2.36)$$

De la ecuación (2.35), la expresión anterior quedará como:

$$d = \frac{2V_B L_e}{\sqrt{(V_T^2 - V_B^2)}} \quad (2.37)$$

Finalmente de la Figura 2.8 se puede usar la expresión $L_e = (V_T - V_B)t$, en la ecuación anterior de manera que se puede reescribir de la siguiente manera:

$$d = 2V_B t \sqrt{\frac{V_T - V_B}{V_T + V_B}} \quad (2.38)$$

De esta expresión se puede entender que los diámetros de las trazas grabadas aumentan directamente con el incremento de V_T , alcanzando un máximo de $2V_B t$ cuando $V_T \gg V_B$ [13].

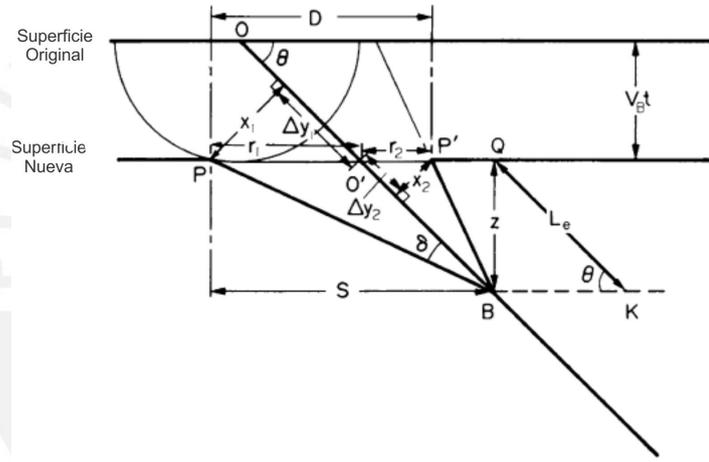


Figura 2.9: Parámetros geométricos de la traza grabada [13]

Para una traza con incidencia normal se considera que el eje mayor es igual al eje menor $D = d$. En el caso de la Figura 2.9 se puede observar una traza con ángulo de incidencia θ , la cual para un tiempo de grabado t , la traza se divide por O' en partes desiguales, r_1 y r_2 . δ (que es igual al ángulo crítico θ) es el semi-ángulo del cono grabado, cuya proyección sobre la superficie del detector tiene una longitud:

$$S = L_e \cos \theta + r_1 \quad (2.39)$$

2.5. El detector LR 115 tipo 2

Los LR 115 son detectores integradores para la radiación alfa incidente sobre ellos la cual queda registrada en forma de trazas, éstos detectores pueden ser guardados por largo tiempo y la información grabada permanece inalterable

para su posterior análisis. Su sensibilidad a la radiación alfa depende de varios factores, entre ellos de la humedad, temperatura, radiación UV y velocidad del viento. El LR115 tipo 2, consta de una capa activa de color rojo, de nitrato de celulosa, al 90 %, de 12 micras de espesor, la cual está sobre una base de poliéster de 100 micras (ver Figura 2.10). Es en la capa activa donde, debido a las interacciones físico-químicas que ahí ocurren, se forman las huellas latentes que luego permitirán determinar el número de partículas alfa que la atravesaron y así poder develar la energía asociada a las partículas alfa incidentes.



Figura 2.10: Detector LR-115 tipo 2

Las partículas alfa, provenientes de la progenie de corta vida del radón que se adhieren a la superficie del detector no pueden ser develadas por el grabado químico, debido a que están más allá de la ventana de energía de detección del LR115 (0.8 – 4.5 MeV) como se puede ver en la Figura 2.11. En contraste, todas las partículas alfa provenientes de las progenie pueden formar huellas grabables en CR 39, para un corto tiempo de grabado. Esta es una ventaja del LR 115 sobre el CR 39 [20]. Los detectores LR 115 tienen ventajas que permiten su empleo en diferentes mediciones, incluyendo la simplicidad de la metodología de detección y lectura, su durabilidad, resistencia y bajo costo. Las trazas en los detectores LR 115 se observan con ayuda de un microscopio de transmisión como puntos pequeños brillantes (si llegan a penetrar por completo al detector) y así se les puede distinguir de defectos superficiales, defectos producidos por partículas alfa con energía fuera de la ventana o con ángulos de incidencia menor que el crítico y de partículas de polvo que se hayan adherido a la superficie. Las huellas dejadas por las partículas alfa en el detector LR 115 presentan diámetros que están entre 20 y 50 Å (huellas latentes) [14] las cuales no se pueden observar aún con ayuda de un microscopio óptico, por lo cual el detector debe ser sometido a la acción de una sustancia corrosiva que permita que en el detector se formen huellas que si puedan visualizarse con el microscopio. La sustancia corrosiva que se utiliza es el NaOH con lo cual se obtienen huellas de diámetro de entre 1 a 15 micrómetros [19].

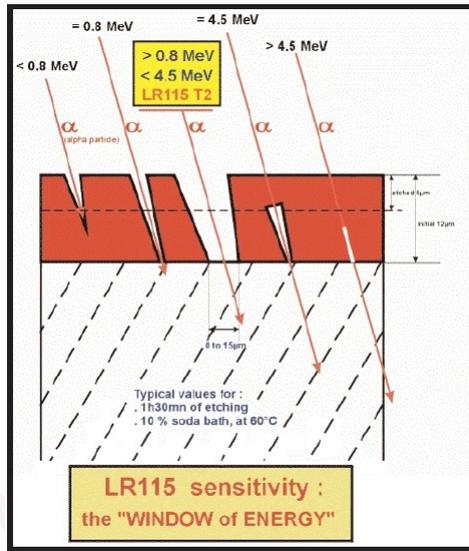


Figura 2.11: Ventana de energía del detector LR-115 tipo 2 [19]

Capítulo 3

Métodos y procedimientos

3.1. Características del distrito de San Juan de Miraflores

3.1.1. Ubicación

El distrito de San Juan de Miraflores se encuentra ubicado en la provincia de Lima a 108 msnm, con una extensión territorial de 23.98 km^2 . Limita al Norte con los distritos de Santiago de Surco y La Molina, al Este con el distrito de Villa María del Triunfo, al Sur con el distrito de Villa El Salvador, y el Oeste con el Distrito de Chorrillos. Es el octavo distrito más poblado de Lima, después del Callao, con 404001 habitantes a junio del 2015 según el INEI.

En la siguiente figura se puede apreciar la composición del suelo de San Juan de Miraflores

Mapa de suelos en el sur de Lima

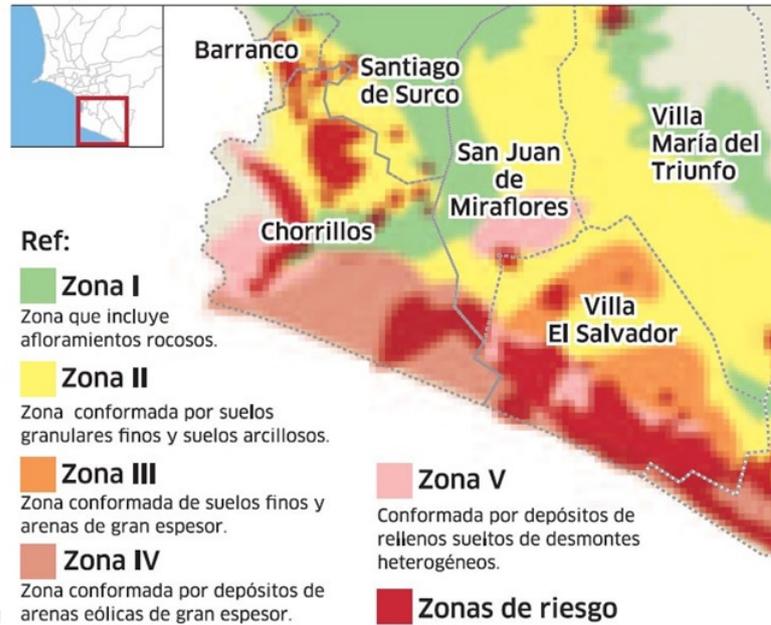


Figura 3.1: Características del suelo del distrito de San Juan de Miraflores [12]

Un aspecto importante a considerar es que debido a las características físicas del suelo del distrito, fue dividido en regiones, que corresponden a las zonas I, II, III, IV, V y de alto riesgo (de acuerdo la figura 3.1) lográndose colocar detectores en cada una de estas zonas, y las viviendas fueron identificadas a través de coordenadas GPS.

3.1.2. Viviendas construidas sobre los diferentes tipos de suelos del distrito

En el siguiente gráfico se puede ver la cantidad de viviendas construidas sobre los diferentes tipos de suelos que presenta el distrito



Figura 3.2: Aproximado del número de viviendas construidas hasta el 2015 [10]

Se aprecia que la mayoría de construcciones se han realizado sobre suelo rocoso y sobre arena de gran espesor. Esto es relevante para este estudio.

3.2. Preparación, distribución y grabado de los detectores

3.2.1. Preparación

Los detectores de radón se preparan recortando las láminas de LR 115 tipo 2 (de 9 cm x 12 cm) en cuadrados de 2 cm de lado que se adhieren a una base de mica que previamente ha sido codificada, este dispositivo se pegará a una superficie vertical en la habitación en la que se desea medir la concentración de radón, se debe tener cuidado de colocar el lado sensible del LR 115 tipo 2 apuntando en dirección opuesta a la mica o no registrará ninguna huella. Se colocará a una altura de 1,5 m aproximadamente, es decir a la altura de la nariz de una persona de talla promedio. Se preparan sobres que contienen dos detectores para cada hogar. Los habitantes de cada hogar deciden en que habitación colocar éstos, sala, dormitorio, cocina u otros.



Figura 3.3: Detector empleado en el monitoreo

3.2.2. Distribución

Para determinar la cantidad de detectores que debían distribuirse en el distrito de San Juan de Miraflores se usó el método de grillas de 1 km x 1 km y se tuvo en cuenta la densidad de habitantes por grilla que es 16 847 habitantes por kilómetro cuadrado. Esto nos llevó a colocar detectores en dos casas por grilla como mínimo. Los detectores fueron distribuidos en el distrito de San Juan de Miraflores, como se debía cubrir toda la superficie del distrito se decidió recorrer el distrito explicando, puerta por puerta, sobre el proyecto y la importancia de medir la concentración de gas radón en las viviendas. El distrito de San Juan de Miraflores, según el INEI, es uno de los distritos con mayor índice de criminalidad [11]. Por lo que se eligieron zonas que no fueran peligrosas pero buscando abarcar la mayor parte de la superficie del distrito. En las zonas elegidas se hizo el recorrido, encontrándose una alta desconfianza de parte de los pobladores para permitir que se coloquen o se dejen los detectores en el interior de las viviendas, aún así se logró colocar detectores de acuerdo a lo planificado. De lo indicado se infiere que se utilizó el muestreo aleatorio estratificado, en el cual se divide la población a estudiar en grupos y dentro de cada grupo se aplica un muestreo aleatorio simple. Un aspecto importante a considerar es que el distrito, debido a las características físicas de su suelo, es dividido en 4 zonas y se lograron colocar detectores en cada una de estas zonas, y las viviendas fueron identificadas a través de coordenadas GPS.

El tiempo de exposición al que fueron sometidos los detectores en cada habitación fué de 8 semanas, al cabo de las cuales se procedía a su recojo y se anotaba el tipo de habitación en el que había sido colocado.



Figura 3.4: Grilla para la distribución de los detectores LR-115 en el distrito de San Juan de Miraflores

3.2.3. Grabado

Luego que los detectores fueron expuestos y recogidos fueron sometidos a un proceso químico conocido como etching o grabado químico. Como ya se explicó las partículas alfa que impactan en el detector, con las energías adecuadas, dejan en éste una huella latente que no es visible con un microscopio óptico por lo cual, para facilitar la lectura de estas huellas, se realiza el grabado químico que permite aumentar las dimensiones de la traza dejada hasta que es posible verlas con la ayuda del microscopio óptico.

Basándonos en estudios previos, y en investigaciones hechas en el grupo GITHUNU - PUCP y en experimentos desarrollados durante los cursos de la maestría se ha llegado a definir la metodología que permite obtener detectores grabados para ser analizados y determinar la cantidad de huellas que detectaron.

La solución química con la cual se lleva a cabo el grabado es hidróxido de sodio (NaOH), el cual se prepara en una concentración de 2,5 N. El proceso de grabado debe desarrollarse a una temperatura constante y ésta debe ser la misma en todos los puntos de la solución, por lo cual, se hizo uso de un equipo de baño termostático que permitió mantener una temperatura de $60,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El proceso de grabado dura 90 minutos, al cabo de los cuales los detectores son enjuagados, una primera vez usando agua potable para retirar

los residuos del grabador que puedan quedar y finalmente se enjuagan con agua destilada a presión y se dejan secar durante 24 horas.



Figura 3.5: Sistema de grabado de los detectores LR-115

3.3. Conteo de las trazas nucleares en los detectores

Una vez que los detectores secaron se puede proceder a su análisis en el microscopio, se usó el microscopio Leica con un aumento de 10X. El microscopio está conectado a una computadora, contamos con el software V.4.0 que permite el uso del microscopio junto con la computadora, por lo que en la pantalla se muestra un campo de visión del microscopio con el cual se hace el análisis. En el detector se ubican una cierta cantidad de campos en los cuales se debe leer la cantidad de huellas presentes.

Para hallar cuantos campos deben ser considerados se debe tener en cuenta que para el conteo de trazas se aplica la estadística de Poisson, en común con otros fenómenos nucleares (donde, de un gran número de átomos disponibles, sólo una fracción muy pequeña experimenta alguna reacción observable) En ésta estadística, la incertidumbre está dada por la raíz cuadrada de los eventos que realmente se cuentan. En nuestro caso al contar N trazas en un detector la incertidumbre estará dada por \sqrt{N} y la incertidumbre relativa por $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Para tener una incertidumbre relativa baja, considerando el promedio de concentración de radón esperado a partir de medidas hechas con anterioridad se encontró que debíamos trabajar con 25 campos en cada detector.

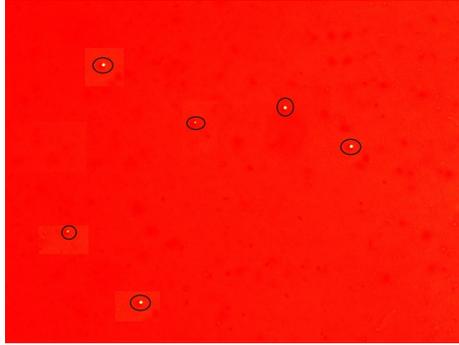


Figura 3.6: Trazas encontradas en un campo de medición (imagen obtenida con el software V.4.0 del microscopio Leica)

3.4. Expansión de incertidumbres

Para hallar la incertidumbre de la concentración de gas radón, que se mide en interiores de casas, usando detectores LR 115 tipo 2 desnudos, debemos partir por conocer cómo calcular la incertidumbre de el cálculo de la densidad de trazas.

Sean:

ρ : Densidad de trazas.

T: Número total de huellas contadas en un detector.

A: Área total sobre la que se contó T.

$$\rho = \frac{T}{A} \quad (3.1)$$

La fórmula para calcular la incertidumbre de la densidad de traza, σ_ρ , es

$$\sigma_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2} \quad (3.2)$$

De donde se obtiene que

$$\sigma_\rho = \rho \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} \quad (3.3)$$

Sean:

k: Factor de calibración.

t: tiempo de exposición de los detectores.

La concentración de gas radón se calcula como:

$$C = \frac{\rho}{kt} \quad (3.4)$$

De donde, despreciando el aporte a la incertidumbre debido al tiempo de exposición, se obtiene la incertidumbre total en el cálculo de la concentración de gas radón, σ_C :

$$\sigma_C = C \sqrt{\left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2} \quad (3.5)$$

3.5. Distribución log normal

La concentración en el interior de las viviendas depende de diversos factores, los cuales son independientes entre sí y aleatorios. Diferentes estudios realizados de monitoreos de radón en interiores muestran una clara tendencia en la distribución de los datos, ajustándose a una distribución lognormal como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 3.1: Tipos de distribuciones de data de radón como fue hallada en la literatura. LN: distribución lognormal. DEG: desviación estandar geométrica.

Autores	Variable	Región	Tipo de distribución
Andersen et al., 2001	interior	DK	LN; DEG=1,81
Antonic et al., 2007	interior	ME, town	LN; DEG=3,00
Chen et al., 2008	interior	Cánada, Winnipeg	LN; sótano DEG 2,00, dormitorio 2,17
Cortina et al., 2008	interior	Es, S. de Compostela	LN; DEG=3
Fáisca et al., 1992	interior	PT	Aproximadamente LN
Janssen y Stebbings, 1992	interior	USA, state	Distribución gamma. DEG=2,60

La distribución lognormal es asimétrica, y tiene dos parámetros característicos “a” y “b” los cuales se denominan factor de escala y forma respectivamente.

La función densidad de probabilidad para una distribución lognormal es:

$$f(x; a, b) = \frac{1}{xb\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x/a))^2}{2b^2}} \quad (3.6)$$

Donde “a” y “b” son también la media y la desviación estándar respectivamente.

En una distribución lognormal, la media geométrica (MG) es numéricamente igual a la mediana, la cual se define por:

$$MG = e^a \quad (3.7)$$

Mientras que la desviación estandar geométrica (DEG), viene dada por:

$$DEG = e^b \quad (3.8)$$

En el estudio de las concentraciones de radón en interiores, ajustar la distribución de los datos obtenidos a un modelo lognormal, permite realizar un estimado de la cantidad de viviendas que podrían estar superando un determinado nivel de referencia, empleando los momentos estadísticos: media geométrica y desviación estándar geométrica.



Capítulo 4

Resultados e interpretación

4.1. Análisis de datos obtenidos por periodo de medición

4.1.1. Concentraciones de radón medidas en el primer periodo

El primer periodo de medición comprende 8 semanas en los meses de octubre y noviembre del 2015, en los cuales la temperatura promedio fue de 18,7 °C, los detectores fueron colocados por 8 semanas. El trabajo de campo fue complejo, debido a la desconfianza mostrada por los pobladores en brindar el acceso a sus domicilios o también por el temor de recibir en sus casas una sustancia que consideraban un probable riesgo para su salud. En el primer periodo se colocaron detectores en 9 casas, en cada casa se colocaron 2 detectores o sea se colocaron en total 18 detectores de los cuales se recogieron 17, para su posterior análisis.

Tabla 4.1: Concentraciones de radón del primer periodo en Bq/m^3 (octubre - noviembre del 2015)

Ubicación GPS de las viviendas			CONCENTRACION		
1	-12.1402067	-76.9567974	82.9	±	36.9
2	-12.1636474	-76.9584135	214.7	±	45.1
3	-12.1401621	-76.9568588	142.6	±	32.7
4	-12.1404830	-76.9568351	171.1	±	33.3
5	-12.1796430	-76.9604922	116.1	±	40.2
6	-12.1725043	-76.9682126	53.8	±	18.4
7	-12.1628690	-76.9652210	268.7	±	31.1
8	-12.1616810	-76.9797800	107.8	±	20.6
9	-12.1871370	-76.9604230	147.1	±	28.1

Tabla 4.2: parametros estadisticos de la concentración de radón en el primer periodo (Bq/m^3)

PERIODO 1	N total	Media	D.E	M.G	DEG	Mínimo	Mediana	Máximo
	9	144.9	66.4	131.3	1.63	53.8	142.6	268.7

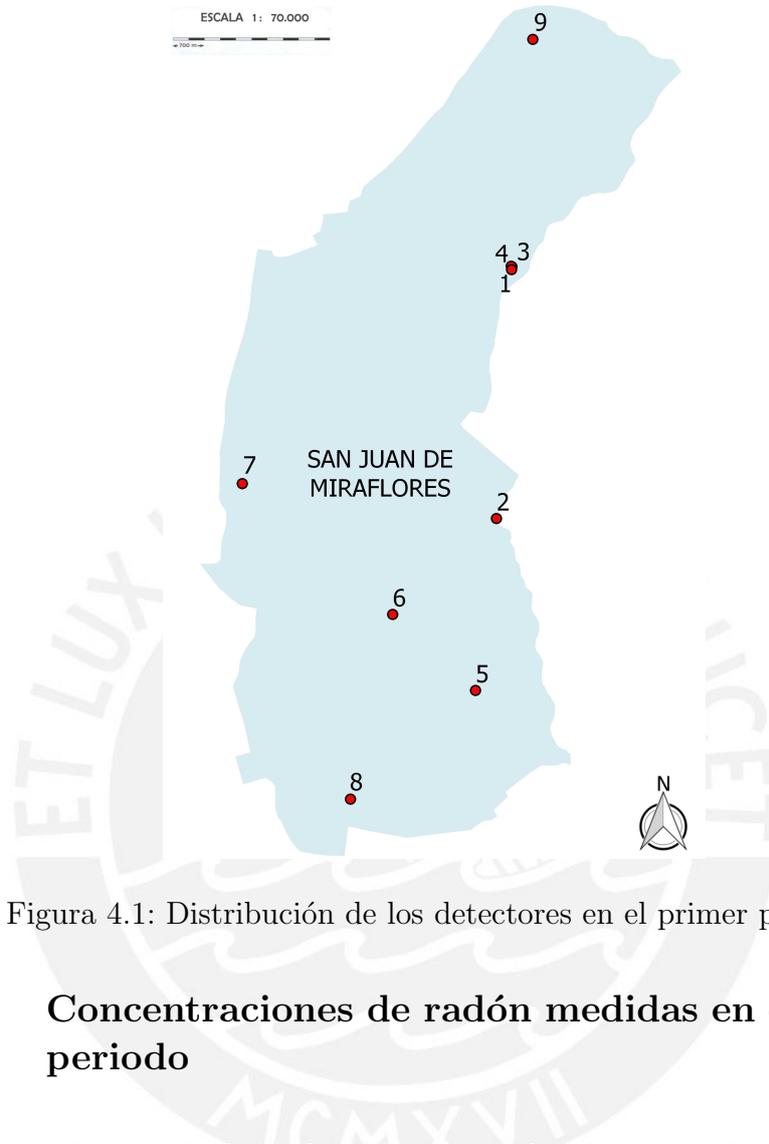


Figura 4.1: Distribución de los detectores en el primer periodo

4.1.2. Concentraciones de radón medidas en el segundo periodo

El segundo periodo de medición corresponde a los meses de verano (febrero y marzo) del 2016, la temperatura promedio para estos dos meses fue de 25,2 °C, los detectores fueron colocados por 8 semanas, en 29 casas o sea se colocaron 58 detectores, de los cuales fueron devueltos 50, de una casa no se devolvió ninguno de los dos detectores y de cuatro casas se recuperó al término del periodo de muestreo solo un detector.

Tabla 4.3: Concentraciones de radón del segundo periodo en Bq/m^3 (febrero - marzo del 2016)

Ubicación GPS de las viviendas			CONCENTRACION	
1	-12.140207	-76.956797	206.1	± 44.0
2	-12.163647	-76.958414	106.1	± 34.7
3	-12.140162	-76.956859	56.3	± 11.1
4	-12.140483	-76.956835	76.3	± 22.5
5	-12.179643	-76.960492	29.0	± 13.9
18	-12.172504	-76.968213	110.2	± 35.4
10	-12.139525	-76.958404	103.0	± 30.8
11	-12.138925	-76.957746	79.8	± 25.1
12	-12.137418	-76.957583	155.7	± 37.5
13	-12.139312	-76.959033	109.5	± 16.8
14	-12.144264	-76.962160	132.3	± 30.6
15	-12.144383	-76.961904	93.6	± 24.3
16	-12.143936	-76.962500	99.7	± 18.7
17	-12.149515	-76.970993	100.6	± 35.4
6	-12.172504	-76.968213	60.3	± 19.9
19	-12.136454	-76.956850	49.3	± 18.7
20	-12.135766	-76.956836	47.0	± 19.9
21	-12.149274	-76.966741	188.2	± 32.5
22	-12.139276	-76.959154	141.0	± 29.9
23	-12.173052	-76.968552	244.8	± 51.4
24	-12.153362	-76.968772	58.1	± 20.0
25	-12.153305	-76.968803	84.7	± 33.6
26	-12.137845	-76.957366	77.1	± 30.0
28	-12.179050	-76.961721	128.7	± 22.9
29	-12.188419	-76.962193	99.7	± 19.7
30	-12.126085	-76.958867	61.8	± 22.2
31	-12.153079	-76.964394	94.0	± 19.7

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en el segundo periodo (Bq/m^3)

PERIODO 2	N total	Media	D.E	M.G	DEG	Mínimo	Mediana	Máximo
	27	103.4	50.2	92.8	1.62	29.1	99.7	244.8

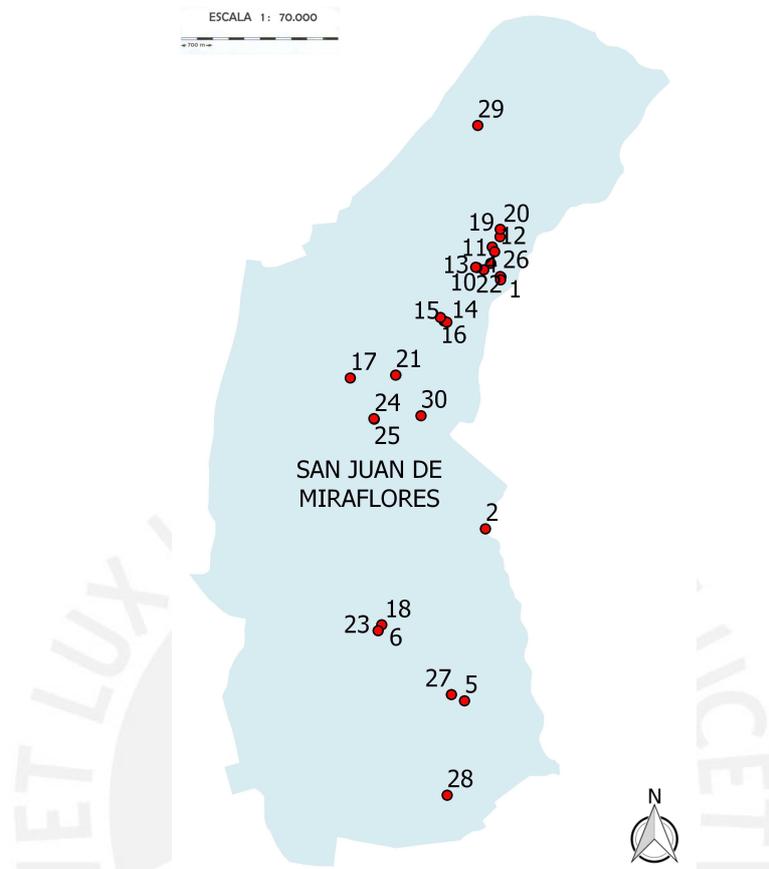


Figura 4.2: Distribución de los detectores en el segundo periodo

4.1.3. Concentraciones de radón medidas en el tercer periodo

El tercer periodo de medición corresponde a los meses de junio y julio del 2016, la temperatura promedio para estos dos meses de invierno fue de 16,6 °C, los detectores fueron colocados por 8 semanas, en 25 casas o sea se colocaron 50 detectores, de los cuales fueron devueltos 47, de tres casas devolvieron solo un detector.

Tabla 4.5: Concentraciones de radón del tercer periodo en Bq/m^3 (junio - julio del 2016)

Ubicación GPS de las viviendas			CONCENTRACION	
1	-12.140207	-76.956797	259.6	± 46.2
2	-12.163647	-76.958414	209.2	± 57.3
3	-12.140162	-76.956859	140.0	± 34.7
4	-12.140483	-76.956835	171.4	± 35.3
5	-12.179643	-76.960492	124.3	± 24.3
18	-12.172504	-76.968213	167.8	± 41.7
10	-12.139525	-76.958404	117.0	± 25.0
11	-12.138925	-76.957746	31.3	± 14.1
12	-12.137418	-76.957583	136.9	± 26.6
13	-12.139312	-76.959033	121.9	± 32.9
14	-12.144264	-76.96216	130.1	± 30.3
15	-12.144383	-76.961904	213.1	± 43.0
16	-12.143936	-76.962500	98.0	± 26.9
17	-12.149515	-76.970993	62.7	± 22.3
6	-12.172504	-76.968213	60.5	± 21.6
19	-12.136454	-76.956850	126.7	± 29.3
20	-12.135766	-76.956836	79.0	± 19.1
22	-12.139276	-76.959154	319.5	± 53.1
23	-12.173052	-76.968552	395.8	± 77.4
24	-12.153362	-76.968772	89.9	± 35.5
25	-12.153305	-76.968803	193.7	± 69.8
26	-12.137845	-76.957366	267.5	± 73.6
28	-12.179050	-76.961721	88.6	± 33.8
32	-12.168535	-76.975034	123.2	± 15.8
33	-12.150403	-76.963500	108.6	± 25.0

Tabla 4.6: parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en el tercer periodo (Bq/m^3)

PERIODO 3	N total	Media	D.E	M.G	DEG	Mínimo	Mediana	Máximo
	25	153.5	85.6	132.8	1.8	31.3	126.7	395.8

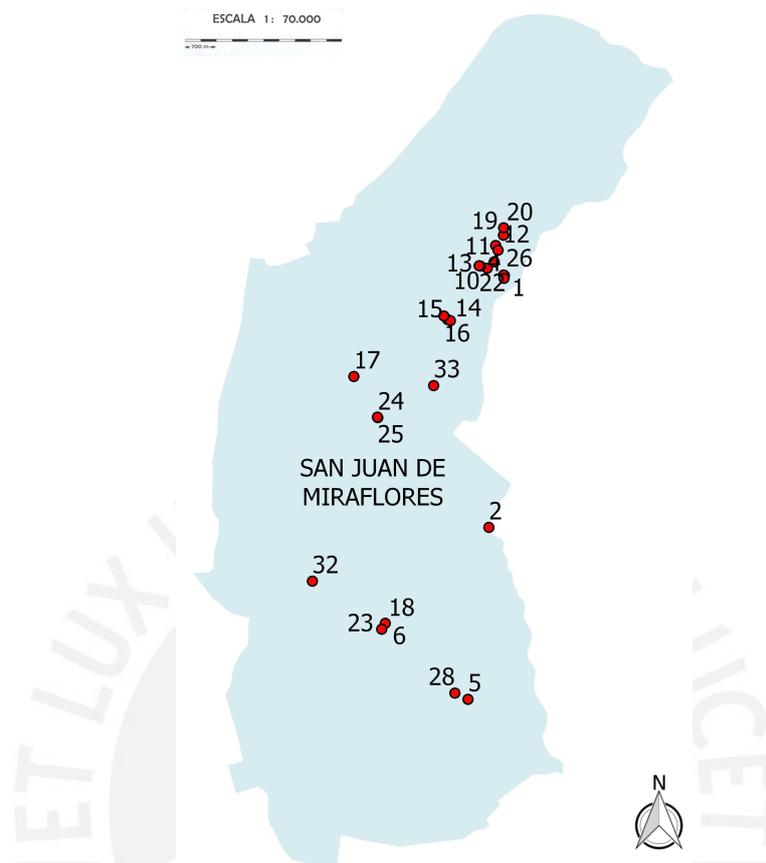


Figura 4.3: Distribución de los detectores en el tercer periodo

4.1.4. Concentraciones de radón medidas en el cuarto periodo

El cuarto periodo de medición corresponde a los meses de agosto y septiembre del 2016, la temperatura promedio para estos dos meses de invierno y primavera fue de 16,31 grados Celsius, los detectores fueron colocados por 8 semanas, en 24 casas o sea se colocaron 48 detectores, de los cuales fueron devueltos 42, de tres casas no devolvieron ninguno de los detectores.

Tabla 4.7: Concentraciones de radón del cuarto periodo en Bq/m^3 (agosto - setiembre del 2016)

Ubicación GPS de las viviendas			CONCENTRACION	
1	-12.140207	-76.956797	222.4	± 48.2
2	-12.163647	-76.958414	137.8	± 27.3
3	-12.140162	-76.956859	121.5	± 25.6
4	-12.140483	-76.956835	252.6	± 59.8
5	-12.179643	-76.960492	91.5	± 25.4
18	-12.172504	-76.968213	281.3	± 74.1
10	-12.139525	-76.958404	551.2	± 90.1
11	-12.138925	-76.957746	352.2	± 60.9
12	-12.137418	-76.957583	108.4	± 30.9
13	-12.139312	-76.959033	224.9	± 48.0
14	-12.144264	-76.96216	122.4	± 33.2
15	-12.144383	-76.961904	106.8	± 32.7
16	-12.143936	-76.9625	312.9	± 55.0
17	-12.149515	-76.970993	152.8	± 33.3
6	-12.172504	-76.968213	152.5	± 34.0
21	-12.149274	-76.966741	278.3	± 86.6
22	-12.139276	-76.959154	27.1	± 14.1
23	-12.173052	-76.968552	51.2	± 22.1
26	-12.137845	-76.957366	93.3	± 33.6
28	-12.17905	-76.961721	72.9	± 25.8
34	-12.126085	-76.958867	331.6	± 69.2
35	-12.140689	-76.978333	83.4	± 19.5
36	-12.160078	-76.983055	92.2	± 20.0
37	-12.146407	-76.961025	230.9	± 38.1

Tabla 4.8: parámetros estadísticos de las concentraciones del cuarto periodo (Bq/m^3)

PERIODO 4	N total	Media	D.E	M.G	DEG	Mínimo	Mediana	Máximo
	24	185.5	122.2	150	2	27.1	145.2	551.2

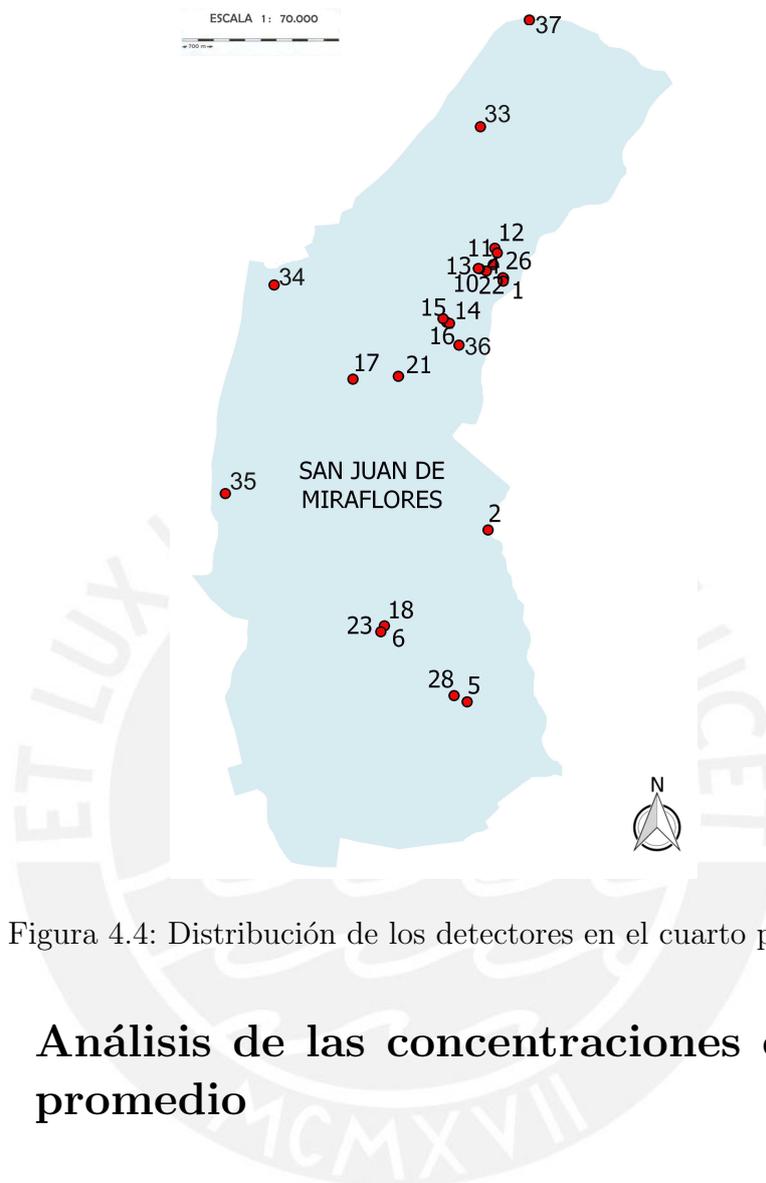


Figura 4.4: Distribución de los detectores en el cuarto periodo

4.2. Análisis de las concentraciones de radón promedio

4.2.1. Concentraciones de radón promedio de los cuatro periodos

Para un total de 37 puntos de medición distribuidos en prácticamente la totalidad del distrito se tiene el siguiente cuadro donde se puede ver el promedio de las concentraciones de radón en las viviendas donde se realizó el estudio.

Tabla 4.9: Concentración de radón en Bq/m^3 promedio de los cuatro periodos

PUNTOS	CONCENTRACION		
1	192.8	±	43.8
2	166.9	±	41.1
3	115.1	±	26.1
4	167.9	±	37.7
5	90.2	±	25.9
6	81.8	±	23.5
7	268.7	±	31.1
8	107.8	±	20.6
9	147.1	±	28.1
10	257.1	±	48.6
11	154.4	±	33.4
12	133.7	±	31.7
13	152.1	±	32.6
14	128.3	±	31.4
15	137.8	±	33.3
16	170.2	±	33.5
17	105.4	±	30.3
18	186.4	±	50.4
19	87.9	±	24.1
20	63.1	±	19.5
21	233.3	±	59.6
22	162.5	±	32.4
23	230.6	±	50.3
24	74.1	±	27.8
25	139.2	±	51.7
26	145.9	±	45.7
28	96.7	±	27.5
29	99.7	±	19.7
30	61.8	±	22.2
31	94.1	±	19.7
32	123.2	±	15.8
33	108.6	±	25.1
34	331.6	±	69.2
35	83.4	±	19.5
36	92.2	±	20.1
37	230.9	±	38.1

Tabla 4.10: parámetros estadísticos de las concentraciones de radón en los cuatro periodos (Bq/m^3)

PROMEDIO	N total	Media	D.E	M.G	DEG	Mínimo	Mediana	Máximo
	36	145.1	63.2	133.2	1.5	61.8	135.8	331.6

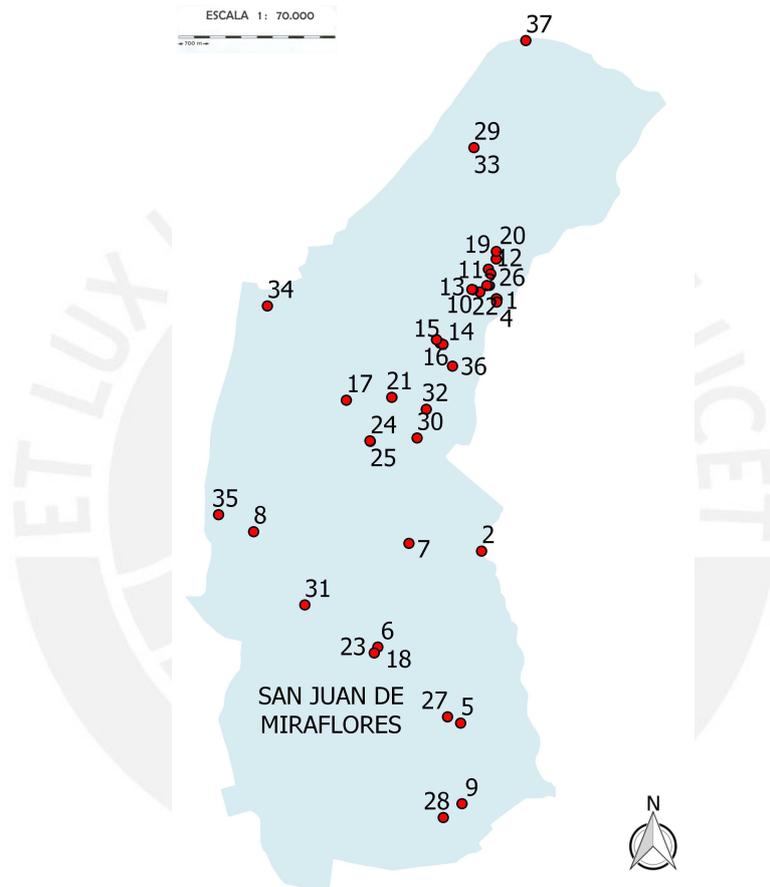


Figura 4.5: Distribución de los detectores en los cuatro periodos

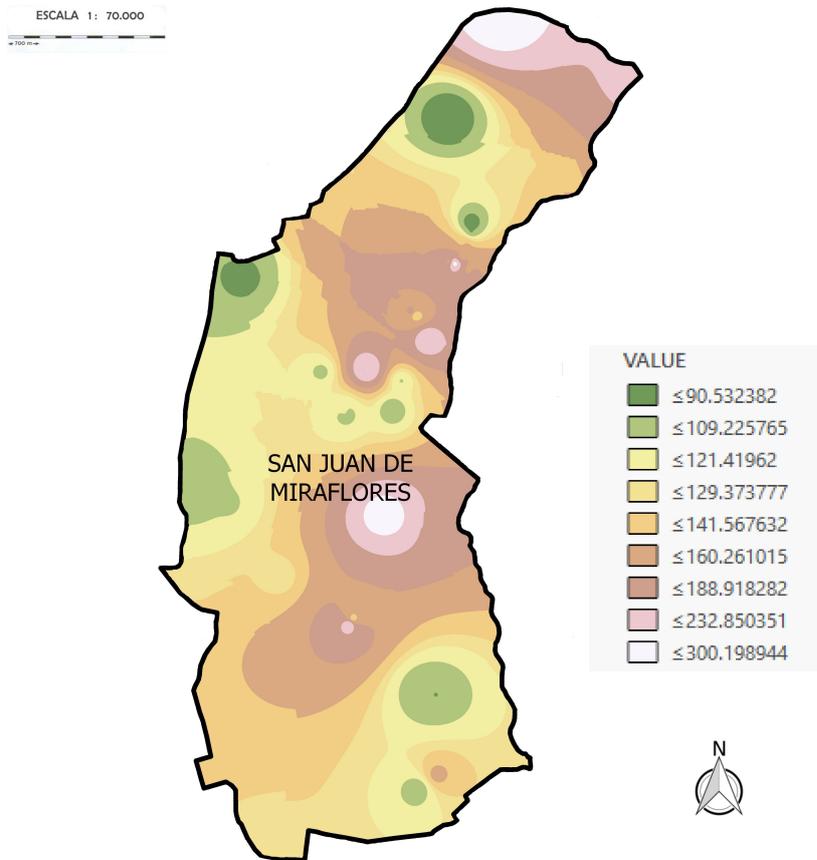


Figura 4.6: Mapa de los niveles de radón en el distrito

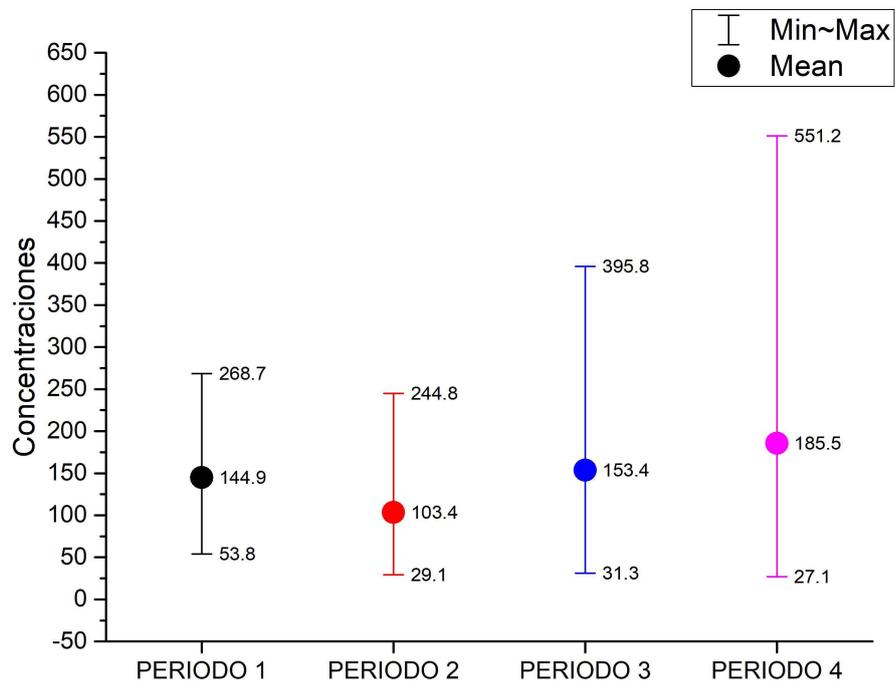


Figura 4.7: Evolución de las concentraciones promedio de radón en los periodos de medición

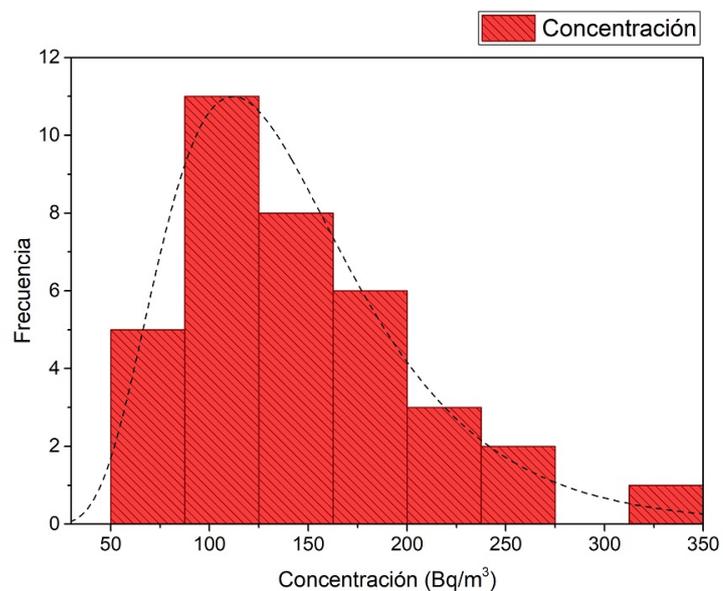


Figura 4.8: Histograma de las concentraciones medidas, obtenidas en los cuatro periodos

4.2.2. Test de bondad de ajuste

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

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

Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 = Los datos analizados no siguen una distribución normal.

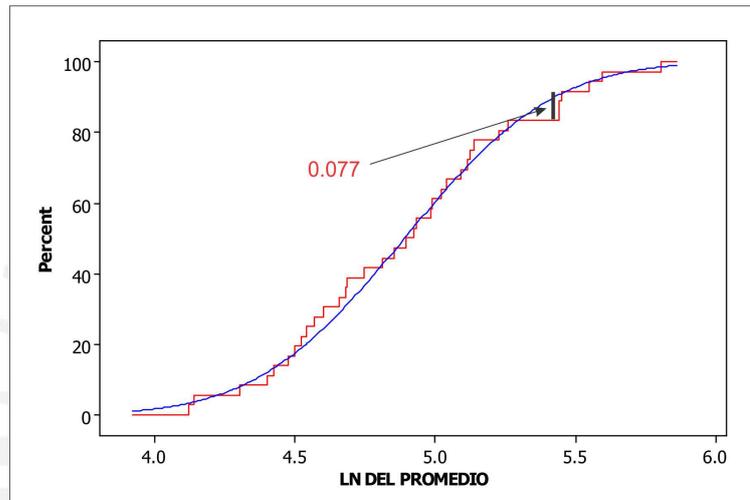


Figura 4.9: Test Kolmogorov - Smirnov para el promedio de las mediciones

Para los 36 datos, con los que contamos, con un nivel de confianza del 95 % el valor D_{obs} es igual a 0,077, mientras que el D_{tab} es igual a 0,22119 ($P > 0,15$), por tanto, se aprueba la hipótesis nula.

4.2.3. Determinación del porcentaje de viviendas que superan el límite de riesgo.

Una vez calculadas la media geométrica (MG) y la desviación estándar geométrica (DEG), procedemos a calcular el porcentaje de viviendas cuyas concentraciones de radón estarían superando el nivel de referencia (NR) de concentración de radón que hemos considerado.

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

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

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

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

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

Finalmente para el caso del promedio de los cuatro periodos que presentan una media geométrica de $133,2 \text{ Bq}/\text{m}^3$ y una desviación estandar geométrica de 1,5 se obtiene:

$$P[Z > 1,00] = 1 - P[Z \leq 1,00] \quad (4.5)$$

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

$$P[Z > 1,00] = 1 - 0,8413 = 0,1587 \quad (4.6)$$

Lo cual nos indica que hay un 15,87% de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

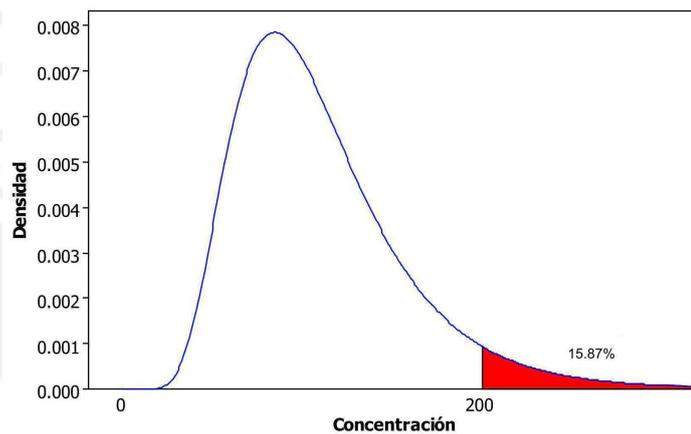


Figura 4.10: Porcentaje de viviendas que superan el límite referenciado por el IPEN Perú

4.3. Variabilidad de las concentraciones en los ambientes de las viviendas

Tabla 4.11: Distribución de los detectores en los ambientes de las viviendas

Detector	PERIODO 1		PERIODO 2		PERIODO 3		PERIODO 4	
1	DORM.	SALA	DORM.	SALA	SALA	DORM.	SALA	DORM.
2	DORM.	SALA	SALA	DORM.	DORM.	SALA	DORM.	SALA
3	SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA
4	SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.
5	DORM.	SALA	SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.
6	SALA	DORM.	DORM.	SALA	DORM.	SALA	SALA	DORM.
7		DORM.						
8	DORM.	GARAJE						
9	SALA	SALA						
10			SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA
11			COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA
12			DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA
13			SALA	COMEDOR	SALA	COMEDOR	SALA	COMEDOR
14			SALA	COMEDOR	SALA	COMEDOR	SALA	COMEDOR
15			COCINA	SALA	COCINA	SALA	SALA	COCINA
16			COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA
17			COCINA	DORM.	COCINA	DORM.	COCINA	DORM.
18			SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.
19			COCINA	SALA	COCINA	SALA	SALA	COCINA
20			COCINA	SALA	COCINA	SALA		
21			COCINA	SALA			COCINA	SALA
22			SALA	SALA ESTU	SALA	SALA ESTU	SALA	SALA ESTU
23			DORM.	COCINA	DORM.	COCINA	DORM.	COCINA
24			COCINA	DORM.	COCINA	DORM.		
25			SALA	COCINA	SALA	COCINA	SALA	COCINA
26			SALA	DORM.	SALA	DORM.	SALA	DORM.
27								
28			DORM.	TALLER	DORM.	TALLER	DORM.	TALLER
29				SALA				
30			SALA	DORM.				
31			DORM.	PISO 2				
32					SALA			
33					PISO 2	SALA		
34							SALA	DORM.
35							DORM.	DORM.
36							SALA	SALA
37							SALA	SALA

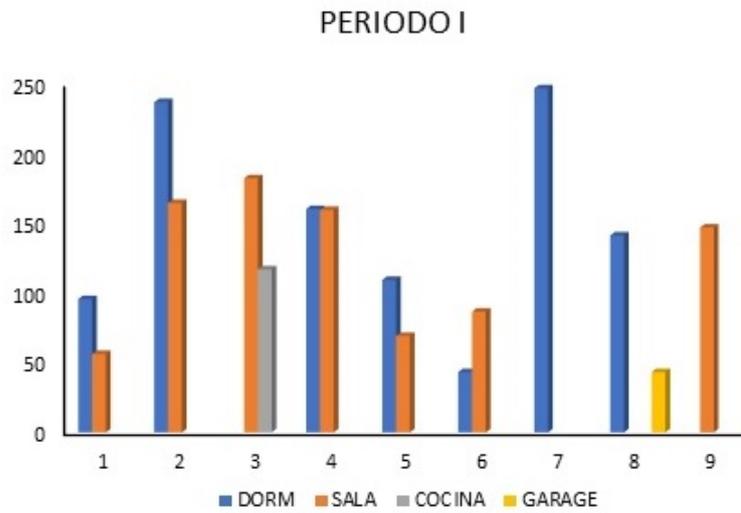


Figura 4.11: Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición

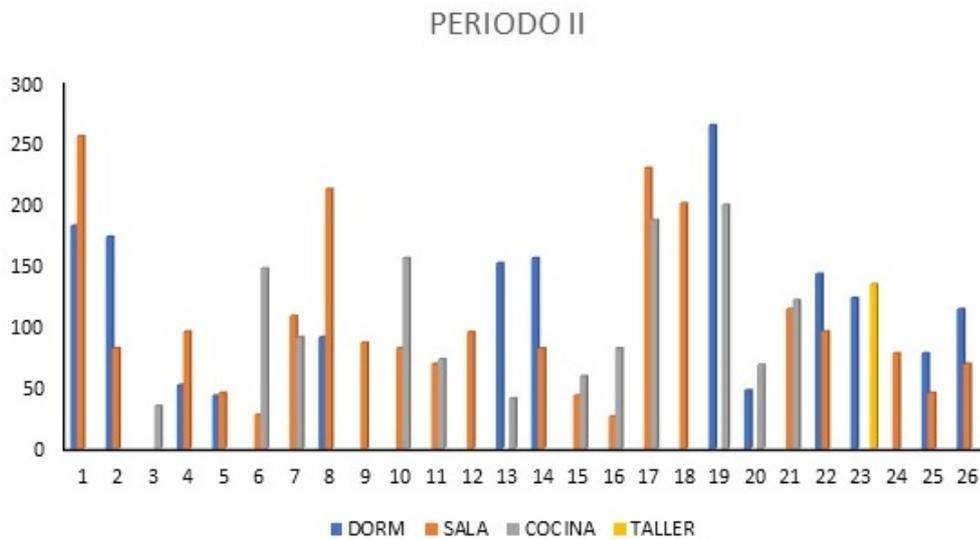


Figura 4.12: Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición

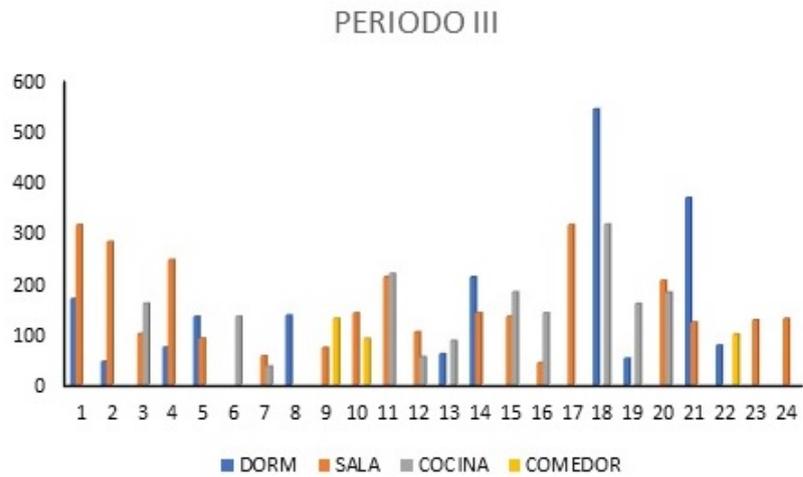


Figura 4.13: Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición

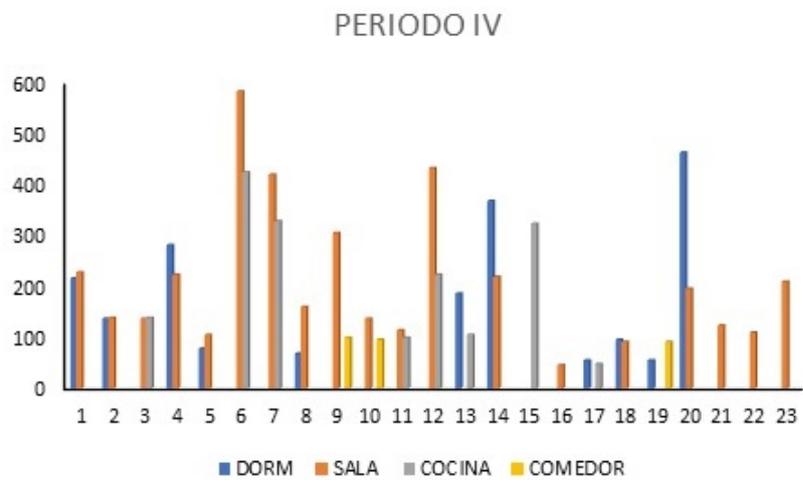


Figura 4.14: Distribución de las concentraciones de radón en los ambientes de las viviendas en el primer periodo de medición

4.4. Variabilidad de las concentraciones en función del tipo de suelo

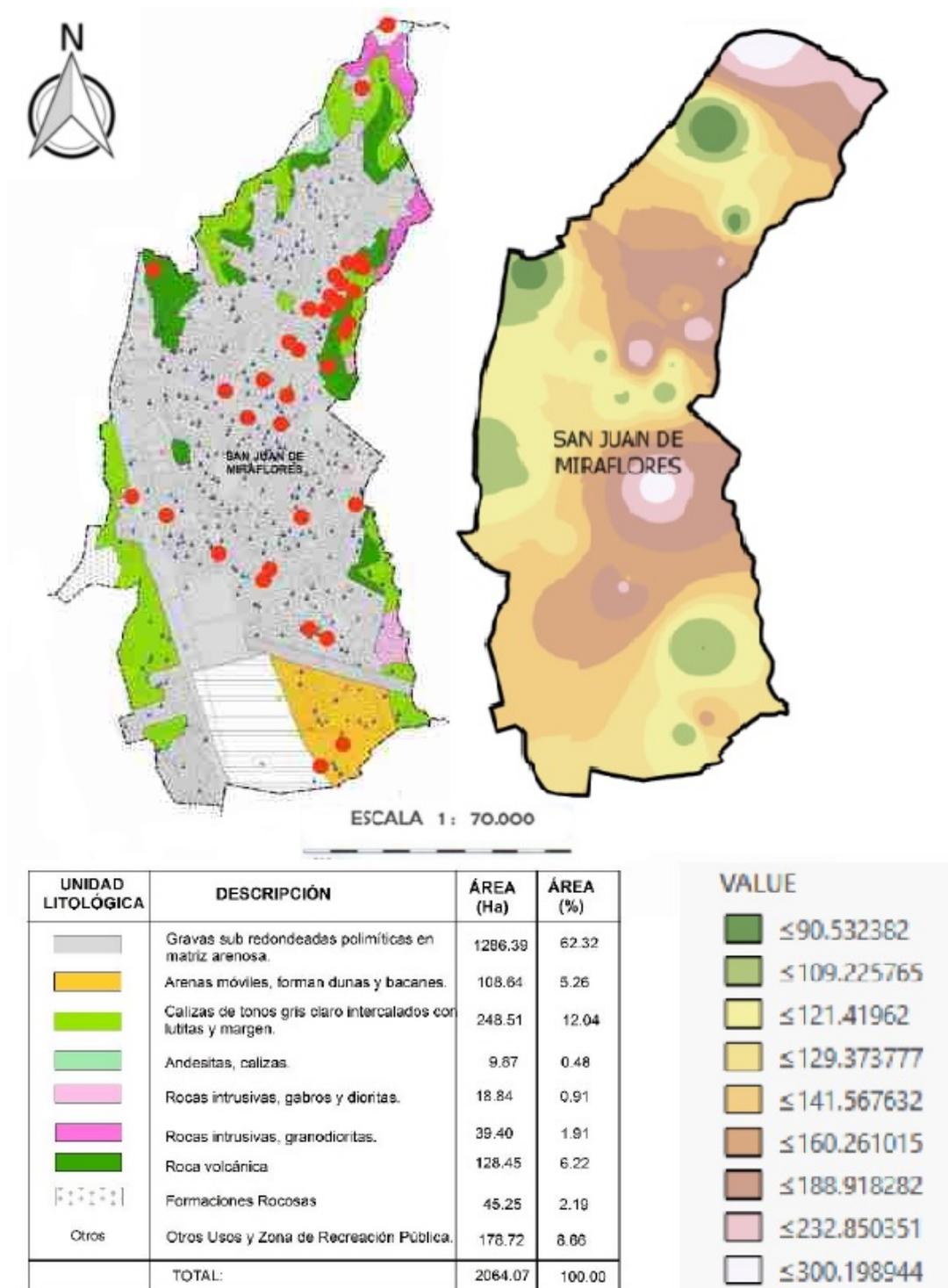


Figura 4.15: Comparación de mapa geológico vs mapa de radón [21]

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

1. El promedio de concentración de gas radón, en el interior de las viviendas monitoreadas, para los cuatro periodos de medición es de $145,1 \text{ Bq/m}^3$, la mediana, que delimita al 50% de los datos, es igual a $135,8 \text{ Bq/m}^3$. Para el área de riesgo (prone area) se obtuvo que existe un 15,87% de probabilidad de encontrar puntos de medición que superen los 200 Bq/m^3 .
2. Comparando los promedios de concentración de radón en los distintos periodos de medición y la temperatura se observa que en el segundo periodo (verano) donde la temperatura es la más alta se obtiene el mínimo valor de concentración de radón, mientras que en el cuarto periodo (invierno) donde la temperatura es la más baja se obtiene el máximo valor de concentración de radón.
3. Comparando los promedios de concentración de radón para los cuatro periodos de medición con el tipo de suelo se encuentra que los valores más bajos de concentración de radón se ubican en las zonas que incluyen afloramientos rocosos mientras que los valores más altos de concentración de radón se ubican en las zonas conformadas por depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos y en las zonas conformadas por suelos granulares finos y suelos arcillosos de donde se deduce que posiblemente éstos últimos permiten que el gas radón se difunda a través de ellos con mayor facilidad, para confirmar ésto se requieren estudios adicionales que exceden los objetivos del presente trabajo.

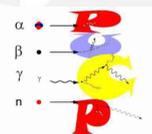
Bibliografía

- [1] Ntp 140: Estadística y mediciones ambientales. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/-NTP/Ficheros/101a200/ntp_140.pdf.
- [2] Química nuclear: la alquimia del s. xxi. <http://wolframio1783.blogspot.com/2016/05/quimica-nuclear-de-la-transmutacion-de.html>, Agosto. 2016.
- [3] Los peligros del radon. <http://elblogdejoaquinpiquer.blogspot.pe/2015/09/los-peligros-del-radon.html>, Agosto. 2017.
- [4] Monitorización de la concentración de radón en aire. <http://fpsalmon.usc.es/secretlar/esp/servicios/servicioradon/inforadon.htm>, Agosto. 2017.
- [5] Moles y bits: educación en ciencia y tecnología. <http://www.molesybits.es/2013/03/contaminacion-de-interiores.html>, Marzo. 2018.
- [6] Mark Baskaran. *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*. Springer, 2016.
- [7] Harry Bateman. The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. In *Proc. Cambridge Philos. Soc*, volume 15, pages 423–427, 1910.
- [8] Antonio Brosed and Sociedad Española de Física Médica. *Fundamentos de física médica*. Sociedad Española de Física Médica, 2011.
- [9] María Belén Peralta Carrión. *CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR*. PhD thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2019.
- [10] Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). Estudio para determinar el nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un gran sismo de gran magnitud: Distrito de san juan de miraflores. 2011.
- [11] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: Anuario estadístico de la criminalidad y seguridad ciudadana 2011 2017. 2018.

- [12] Unidad de Planeamiento Estratégico y Cooperación Técnica de la Municipalidad de Villa El Salvador. Municipalidad distrital de villa el salvador plan operativo institucional con enfoque de resultados y perspectiva de programación multianual. 2016.
- [13] Saeed A Durrani and Richard K Bull. *Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications*, volume 111. Elsevier, 2013.
- [14] Robert Louis Fleischer, Paul Buford Price, and Robert M Walker. *Nuclear tracks in solids: principles and applications*. Univ of California Press, 1975.
- [15] A. Garritz. *Química*. Pearson Educación, 1998.
- [16] Samuel Glasstone and Alexander Sesonske. *Ingeniería de reactores nucleares*. Reverté, 1990.
- [17] David Halliday and Joaquín Catalá de Alemany. *Introducción a la física nuclear*. Reverté, 1956.
- [18] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [19] KODAK. Kodalpha radon-dosimeters and lr155 ssntd specifications.
- [20] Michael F L'Annunziata. *Handbook of radioactivity analysis*. Academic Press, 2012.
- [21] Construcción y Saneamiento Ministerio de Vivienda. Evaluación del riesgo sísmico en edificaciones en la ciudad de lima. 2016.
- [22] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. Sources and effects of ionizing radiation. unsear 1993 report to the general assembly, with scientific annexes. 1993.
- [23] LS Quindós. *Radón: un gas radiactivo de origen natural en su casa*. Ed. Universidad de Cantabria, 1995.
- [24] Raymond A Serway, Clement J Moses, and Curt A Moyer. *Física moderna*. Number 539.1 SER. 2010.
- [25] Antonio Ferrer Soria. *Física nuclear y de partículas*. Universitat de València, 2011.
- [26] H Synnott and D Fenton. An evaluation of radon reference levels and radon measurement techniques and protocols in european countries. *European Radon Research and Industry Collaborative Concerted Action (ERRICCA2), European Commission Contract (FIRI-CT-2001-20142) Google Scholar*, 2005.
- [27] EH Wichman. Física cuántica, barcelona: Reverté. 1991.

Apéndice A

Ficha de datos para la ubicación de los detectores



*Ficha de Ubicación
Detector de Rn 222*

Grupo de Investigación de Huellas Nucleares

Responsable:

Código de los detectores

--	--	--	--

Datos Generales:

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

Características del lugar de monitoreo

sala	cocina	dormitorio	baño	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

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

Si el recubrimiento es pintura:

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

Otras características

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

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

Muchas gracias por su participación.

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

Patrizia Pereyra

Oficina 626 2000

ANEXOS 4112 / 4111 / 4127

Correo: grupo.githunu@pucp.pe

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

Apéndice B

Valores promedio de los parámetros climáticos durante el periodo de medición

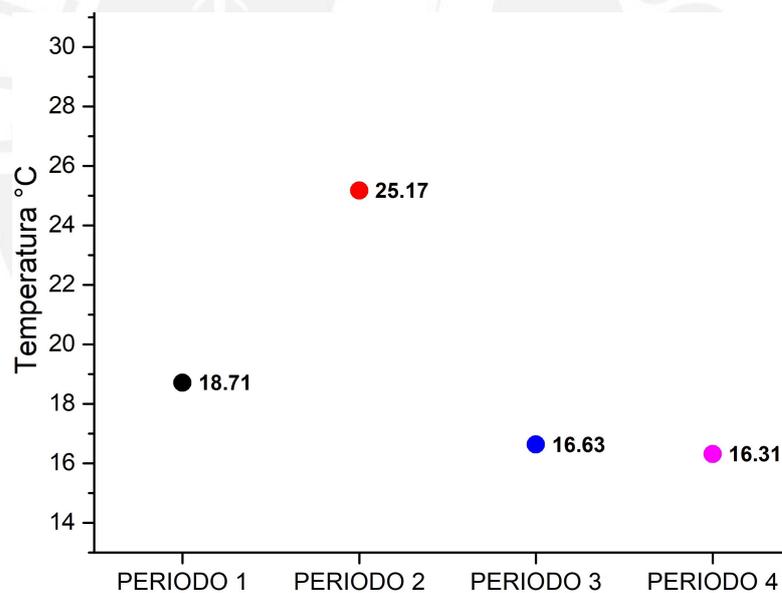


Figura B.1: Valores promedio de la Temperatura durante los 4 periodos de medición

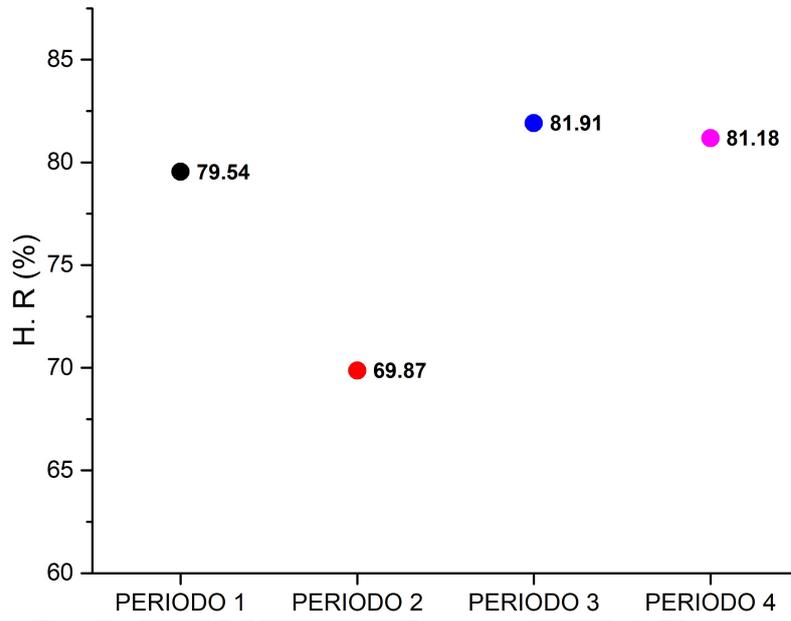


Figura B.2: Valores promedio de la Humedad relativa durante los 4 periodos de medición



Apéndice C

Artículo presentado en el XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear Congreso Regional IRPA

RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN 222 EN EL DISTRITO DE SAN JUAN DE MIRAFLORES-LIMA-PERÚ Y EL TIPO DE SUELO.

Canchos López V., Vega Cabrera B. O., Liza Neciosup R., Palacios Fernández D.,
Pereyra Anaya P., López Herrera M.E.

Departamento de Ciencias. Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Detectores de trazas nucleares LR-115 Tipo 2 en modo desnudo fueron empleados para monitorear los niveles de Rn-222 en 37 viviendas del distrito de San Juan de Miraflores-Lima Perú durante 4 periodos consecutivos, correspondiente a las temporadas de primavera del 2015 y verano, otoño e invierno del 2016. Por su formación geológica, el distrito presenta diferentes tipos de suelo: afloramientos rocosos, suelos granulares finos y suelos arcillosos, depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos y arena de gran espesor. En el presente estudio se analizó la relación entre las concentraciones de gas radón en el interior de las viviendas y el tipo de suelo sobre la que se encuentran. Los valores más altos de concentración se hallaron en los depósitos de rellenos correspondientes a la Zona V-Alto Riesgo y los valores más bajos en afloramientos rocosos (Zona I-II) y en suelos granulares y arcillosos (Zona III-IV), registrando valores promedios de 166 Bq.m³, 128 Bq.m³ y 136 Bq.m³ respectivamente. A partir de esta información se puede considerar tomar medidas específicas para construir una vivienda sobre un determinado tipo de suelo y evitar que ésta presente valores elevados de concentración de gas radón.

1. INTRODUCCIÓN

Cuatro años después del descubrimiento de la radiactividad del uranio por Becquerel, en 1900 fueron descubiertos los isótopos del radón: Rn-222 y Rn-220. Esto fue debido a la emanación en las series tanto del U-238 y Th-232 respectivamente, donde Rutherford y Brooks demostraron que el radón es un gas radiactivo^{[1],[2]}.

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^[3].

La producción de radón en suelos varía ampliamente y esto depende de los contenidos de uranio presentes en los minerales, variando desde el cuarzo (SiO₂) con menos del 3x10⁻¹² de la fracción del peso del uranio a dióxido de uranio (UO₂) con 0.88^[4]. El U-238 se desintegra dando lugar al Ra-226 que a su vez se desintegra produciendo Rn-222 y por lo tanto constituye una fuente continua de radón en la Tierra.

En efecto; suelos, rocas así como en materiales de construcción son las principales fuentes de exposición de Rn-222. Por ello es necesario entender el mecanismo de liberación y de transporte del suelo al aire.

Como ya se mencionó, la existencia de Rn-222 en suelos dependerá del contenido de uranio en éstos, y varía según el terreno. Aquellos suelos de origen arcilloso o granítico la

proporción de uranio es mayor que en suelos de origen basáltico y suelos carbonatados como areniscas, donde el potencial emisor de radón es pequeño^[5]. El radón generado en el interior de la corteza terrestre es capaz de alcanzar la atmósfera por procesos de difusión y convección, por lo que también se encuentra presente en el aire. El Rn-222 puede transportarse en el suelo por diferencias de concentración^[6]. Una alta porosidad permite ser más extensivo este tipo de transporte proveniente desde suelos y rocas. Las rocas pueden variar desde entre agrietadas y sin porosidad a altamente fracturadas^[7]. Inevitablemente esto ocurre, aunque su grado puede ser limitado. La humedad y tamaño del grano presente son también considerados en este mecanismo.

Otro parámetro que influye en la variabilidad de la concentración de la actividad del radón en interiores provenientes de suelos son los gradientes de presión y de temperatura entre ambos medios, donde el fluido que contiene al radón actúa como vehículo de transporte^[6]. La figura 1, resume los procesos de transporte y detalla los parámetros que influyen en el mecanismo de transporte del radón.

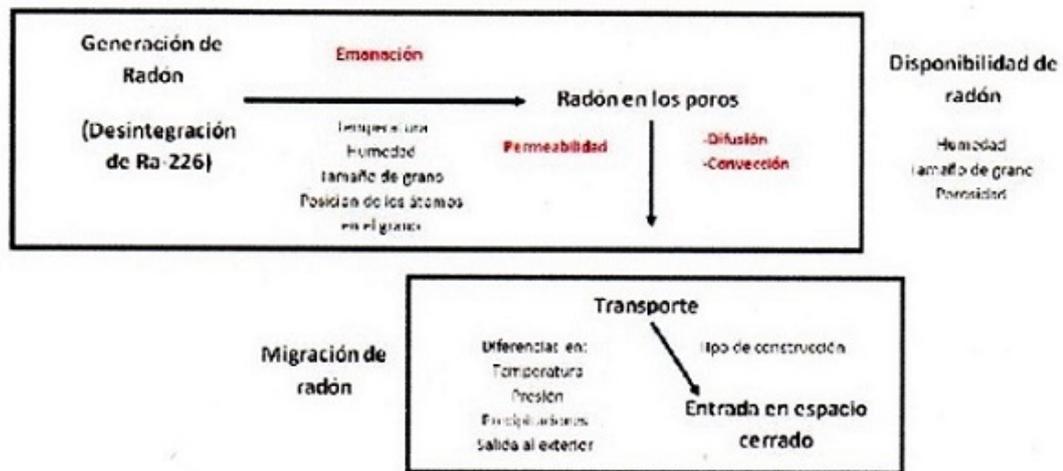


Figura 1. Fuente y mecanismo de transporte del radón^[6]

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha proporcionado información con evidencia 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 asociado 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. En efecto; el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población de fumadores, después del tabaco y la primera causa de cáncer de pulmón en no fumadores.

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^[8]. 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^[9]. En términos generales la dosis colectiva analizada en la población aportará un mayor espectro del riesgo potencial del radón a la salud.

Debido al peligro que representa el radón debe ser monitoreado en hogares, en centros de trabajo, y en general, en todo lugar al que las personas tengan acceso, donde este gas se puede concentrar. Según la Comisión Internacional de Protección Radiológica, (ICRP) en su última publicación respecto al radón, ICRP 126, se recomienda un nivel de referencia para la concentración de radón, en interiores, de 300 Bq/m³ ya sean viviendas o lugares de trabajo. En Perú, y en general en Latinoamérica han realizados ciertos estudios de monitoreo, pero que hoy en día sigue siendo una tarea pendiente.

Nuestro trabajo se centra en el monitoreo de la concentración de la actividad Rn-222 en interiores en el distrito de San Juan de Miraflores. La elección del distrito está basada a su compleja geografía, siendo de interés la correlación de los resultados con respecto al tipo de suelo, una de las diversas variables que puede ser un indicador de la variación en la concentración de Rn-222, que servirán como indicadores para adoptar medidas precautorias y/o correctivas si estos valores superan los niveles de acción: ≥ 148 Bq/m³ (EPA-1986) o ≥ 200 Bq/m³ (NRPB).

El distrito de San Juan de Miraflores se encuentra ubicado en la provincia de Lima a 108 msnm, con una extensión territorial de 23.98 km². Limita al Norte con los distritos de Santiago de Surco y La Molina, al Este con el distrito de Villa María del Triunfo, al Sur con el distrito de Villa El Salvador, y el Oeste con el Distrito de Chorrillos. Es el octavo distrito más poblado de Lima, después del Callao, con 404 001 habitantes a junio del 2015 según el INEI^[10]. En la figura 2 se visualiza la composición del suelo de menor a mayor vulnerabilidad en el cono sur de la provincia de Lima, donde incluye el distrito de San Juan de Miraflores.



Figura 2: Mapa de zonificación de tipos de suelos en el cono sur de la provincia de Lima^[11].

En la figura 3 se aprecia el número aproximado de viviendas construidas sobre los diferentes tipos de suelos que presenta el distrito hasta el año 2015.

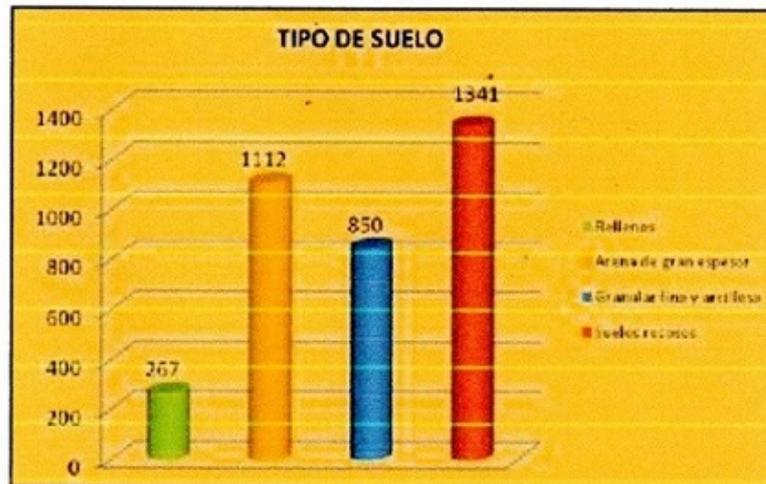


Figura 3: Aproximado del número de viviendas construidas sobre los diferentes tipos de suelos hasta el 2015^[12].

Se aprecia que la mayoría de construcciones se han realizado sobre suelo rocoso y sobre arena de gran espesor. Esto es relevante para este estudio.

2. METOLOGÍA

2.1. Metodología de Campo

En este trabajo, se emplearon detectores de trazas nucleares LR-115 tipo 2 en modo desnudo, que consiste en 12 μm de nitrato de celulosa y 100 μm de poliéster, protegidos en por una lámina de mica en la parte posterior del detector (no activa). La figura 4 muestra el proceso de la configuración y de la codificación del detector.

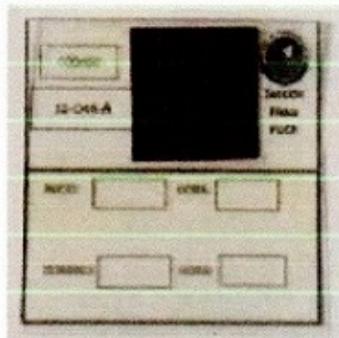


Figura 4. Configuración y codificación del detector LR-115 Tipo 2

De acuerdo a la figura 5, se empleó el método de grillado en el distrito, considerando 1 km x 1 km, representando una densidad de habitantes de 16 847 habitantes por kilómetro cuadrado. De acuerdo a nuestra metodología establecida previamente a través del proyecto (PIAP-3-P-

671-14), en este trabajo correspondió colocar detectores en dos casas por grilla como mínimo.

El muestreo aleatorio estratificado fue empleado para este estudio, en el cual se divide la población a estudiar en grupos y dentro de cada grupo se aplica un muestreo aleatorio simple. Un aspecto importante a considerar es que el distrito, debido a las características físicas de su suelo, es dividido en 4 zonas, que corresponden a las zonas I, II, V y de alto riesgo (de acuerdo la figura 2) lográndose colocar detectores en cada una de estas zonas, y las viviendas fueron identificadas a través de coordenadas GPS.

Los detectores fueron entregados a los responsables de las viviendas para que sean colocados a una altura aproximada de 1,5 m del suelo, en habitaciones de mayor índice de concurrencia y así mismo un menor índice de ventilación, éstas en su mayoría fueron sala y dormitorio (previa codificación). El tiempo de exposición al que fueron sometidos los detectores en cada habitación fue de 8 semanas, al cabo de las cuales se procedió a su recojo.



Figura 5. Mapas del distrito de San Juan de Miraflores. Método de grillado 1 km x 1 km (izquierda). Ubicación de las 37 viviendas monitoreadas (derecha).

Las viviendas fueron monitoreadas durante 4 periodos: (primero: Octubre – Noviembre 2015), (segundo: Febrero – Marzo 2016), (tercero: Junio – Julio 2016) y (cuarto: Agosto – Setiembre 2016).

2.2. Metodología de Laboratorio

2.2.1. Grabado de detectores y técnica de conteo de trazas

Para facilitar la lectura de las huellas se realizó el grabado químico, con la finalidad de hacer visible las trazas latentes dejadas por las partículas alfa en su impacto con el detector a través de un microscopio óptico. Esta solución química fue el hidróxido de sodio (NaOH), con una

concentración de 2,5 N, sometido a un baño termoestático de $(60,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ de temperatura, con un tiempo de 90 min. Posteriormente, los detectores fueron enjuagados, una primera vez usando agua y luego con agua destilada por un periodo de 20 min. La figura 6, muestra el sistema de grabado de los detectores LR-115.



Figura 6. Sistema de grabado de los detectores LR-115.

Con respecto al número de campos de lectura considerados se tuvo en cuenta la estadística de Poisson, en común con otros fenómenos nucleares (donde, de un gran número de átomos disponibles, sólo una fracción muy pequeña experimenta alguna reacción observable). Para garantizar una incertidumbre menor al 10%, se empleó 25 números campos efectivos por detector, a través de una magnificación de 10 X.

2.2.2. Factor de calibración y cálculo de la concentración de la actividad del Rn-222

El factor de calibración ($k_B = \text{trazas.cm}^{-2}/\text{Bq.h.m}^{-3}$) que consiste en transformar la densidad de huellas (trazas.cm^{-2}) en el detector a concentración de la actividad de Rn-222 (Bq.m^{-3}) fue determinado teórico y experimentalmente en nuestro Laboratorio de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU-PUCP) para un detector LR-115 Tipo 2 en modo desnudo, tomando un valor de $0,02 \text{ trazas.cm}^{-2}/\text{Bq.h.m}^{-3}$.

Se consideró despreciable la contribución del gas Rn-220 debido a la altura de ubicación de los detectores anteriormente mencionada, considerando que la longitud de difusión del Rn-220 es mucho menor a la Rn-222 tanto en aire como en suelo. Por otro lado, el soporte de mica donde se estuvo adherido el detector, actuó como un blindaje de las partículas α provenientes desde la pared. De acuerdo a la ecuación 1, se calculó las concentraciones de la actividad de Rn-222:

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

Donde:

C_{Rn-222} : es la concentración de la actividad de Rn-222 (Bq.m^{-3})

$P_{(\text{total-fondo})}$: representa la densidad de trazas efectivas en el detector (trazas.cm^{-2})

k_B : factor de calibración del LR-115 Tipo en modo desnudo ($0,02 \text{ trazas.cm}^{-2}/\text{Bq.h.m}^{-3}$)

t: tiempo de exposición (días)

F_{Rn-222} : factor de equilibrio, que representa la fracción entre el radón y su progenie en un volumen de aire dado, este valor fue tomado de la literatura especializada ($F_{Rn-222} = 0,4$)^{[3],[6]}.

3. RESULTADOS

En la tabla 1, se detalla el promedio de viviendas monitoreadas por periodo como así mismo el promedio de la concentración de la actividad de Rn-222.

Tabla 1. Indicadores del promedio de las concentraciones de la actividad de Rn-222 en función al número de viviendas monitoreadas en los cuatro periodos de muestreo.

Periodo	Meses de monitoreo	Nº de viviendas monitoreadas	Promedio C_{Rn-222} (Bq.m ⁻³)
1	Octubre – Noviembre 2015	9	145 ± 32
2	Febrero – Marzo 2016	27	103 ± 27
3	Junio – Julio 2016	33	153 ± 37
4	Agosto – Setiembre 2016	37	186 ± 42

Se puede apreciar que el promedio de las concentraciones de la actividad de Rn-222 son mayores en el cuarto periodo con respecto a los demás. Asimismo se visualiza que en este periodo se obtuvo un mayor índice de muestreo en las viviendas. El tercer y cuarto periodo corresponde a las estaciones de invierno e inicios de primavera respectivamente, con la cual dichos resultados son mayores en contraste al del segundo periodo correspondiente a la estación de verano. Por otro lado, el primer periodo corresponde a la estación de primavera donde no se encuentra diferencia significativa con los resultados obtenidos en el cuarto periodo.

En la tabla 2, se detalla el promedio de las concentraciones de la actividad de Rn-222 a lo largo de los 4 periodos en función de la ubicación de las viviendas según sus coordenadas GPS.

Tabla 2. Promedio de las concentraciones de la actividad de Rn-222 (color de acuerdo al tipo de suelo) con sus respectivas coordenadas GPS de las viviendas.

Ubicación	Coordenadas GPS		C_{Rn-222} (Bq/m ³)
1	-12.140207	-76.956797	193 ± 44
2	-12.163647	-76.958414	167 ± 41
3	-12.140162	-76.956859	115 ± 26
4	-12.140483	-76.956835	168 ± 38
5	-12.179643	-76.960492	90 ± 26
6	-12.1725043	-76.9682126	82 ± 24
7	-12.162869	-76.965221	269 ± 31
8	-12.161681	-76.97978	108 ± 21
9	-12.187137	-76.960423	147 ± 28
10	-12.139525	-76.958404	257 ± 49
11	-12.138925	-76.957746	154 ± 33
12	-12.137418	-76.957583	134 ± 32
13	-12.139312	-76.959033	152 ± 33
14	-12.144264	-76.96216	128 ± 31
15	-12.144383	-76.961904	138 ± 33
16	-12.143936	-76.9625	170 ± 34

17	-12.149515	-76.970993	105 ± 30
18	-12.172504	-76.968213	186 ± 50
19	-12.136454	-76.95685	88 ± 24
20	-12.135766	-76.956836	63 ± 20
21	-12.149274	-76.966741	233 ± 60
22	-12.139276	-76.959154	163 ± 32
23	-12.173052	-76.968552	231 ± 50
24	-12.153362	-76.968772	74 ± 28
25	-12.153305	-76.968803	139 ± 52
26	-12.137845	-76.957366	146 ± 46
27	-12.17905	-76.961721	97 ± 28
28	-12.188419	-76.962193	100 ± 20
29	-12.126085	-76.958867	62 ± 22
30	-12.153079	-76.964394	94 ± 20
31	-12.168535	-76.975034	123 ± 16
32	-12.150403	-76.9635	109 ± 25
33	-12.126085	-76.958867	332 ± 69
34	-12.140689	-76.978333	83 ± 20
35	-12.160078	-76.983055	92 ± 20
36	-12.146407	-76.961025	231 ± 38
37	-12.153022	-76.964461	248 ± 14

En la figura 6, se comparan los mapas provenientes de los resultados de las concentraciones de la actividad de Rn-222 de las viviendas (izquierda) con respecto al tipo de suelo del distrito.

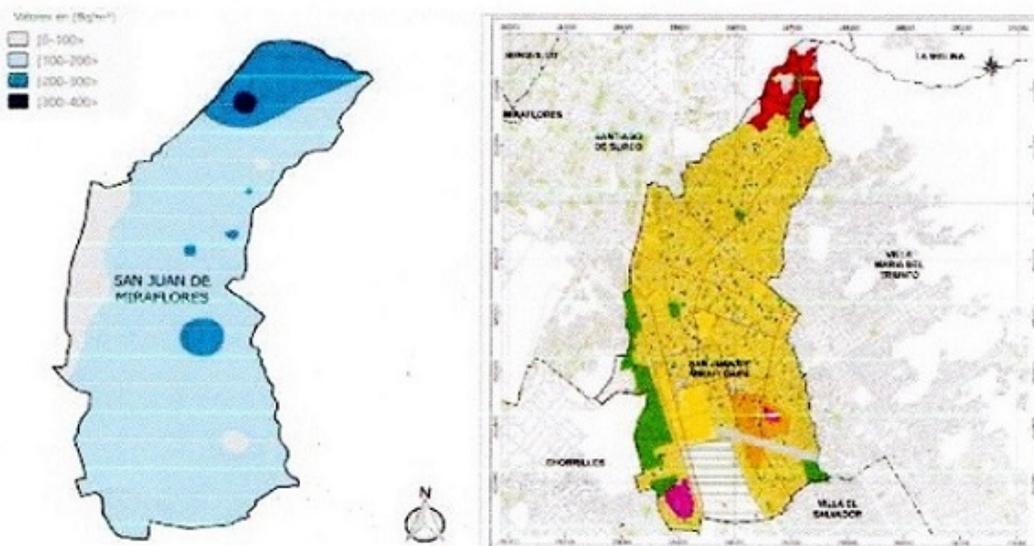


Figura 6. Comparación de Mapas de las concentraciones de la actividad Rn-222 (izquierda) con respecto al de Tipo de Suelos^[13] (derecha) del distrito de San Juan de Miraflores.

Se ha registrado el mayor índice de concentración de la actividad Rn-222 en la vivienda de coordenadas GPS (-12.126085; 76.958867) con $332 \pm 69 \text{ Bq.m}^{-3}$, correspondientes al tipo de zona de riesgo (color rojo del mapa). Se han registrado 5 viviendas con índices de radón comprendida entre $[200-300 > \text{Bq.m}^{-3}]$, una de ellas en la zona de riesgo (rojo) y las 4 restantes en la zona II (color amarillo).

En la tabla 3, se detalla un resumen del promedio de concentraciones de la actividad de Rn-222 con respecto al tipo de suelo como así mismo la correlación de Pearson para cada una de ellas.

Tabla 3. Concentraciones de la actividad del Rn-222 y correlación en función al tipo de del suelo.

Tipo de Suelo	Nº Viviendas	Promedio $C_{\text{Rn-222}}$ (Bq.m^{-3})	Correlación Pearson: R	p-value ($p < 0,05$)
Zona I – II	27	128	0,91	0,08
Zona III – IV	7	136	0,33	0,66
Zona V – Alto Riesgo	3	166	0,80	0,41

Los resultados muestran que no podemos declarar significancia estadística en los tres criterios. Aunque si podemos indicar, que existen correlaciones positivas fuertes entre las concentraciones y los tipos de suelos Zona I-II y Zona V-Alto Riesgo ($R=0,91$; $p=0,08$) y ($R = 0,80$; $p = 0,41$) respectivamente.

4. CONCLUSIONES

La correlación de Pearson fue un indicador del grado de influencia de la variable tipo de suelo con respecto a la concentración de la actividad de Rn-222 en viviendas. Existe coherencia en los resultados, debido a que la zona más vulnerable del distrito (Zona V- Alto Riesgo) presenta un 22,89% más en los niveles de radón que la zona de mayor afloramiento rocoso (Zona I-II).

Los p-values al ser mayores que 0,05, indican que no es suficiente correlacionar las concentraciones con un solo tipo de variable. La variabilidad del Rn-222 en interiores empleando detectores LR-115 en modo desnudo depende fuertemente también de los factores climatológicos. Los resultados obtenidos en la tabla 1 reflejan la variabilidad en función de las estaciones del año.

Además, los resultados en la tabla 3, correspondientes a la correlación de Pearson pueden mejorarse, aumentando el número de viviendas monitoreadas. La data obtenida para el tipo de suelo Zona I-II, correlaciona fuertemente las variables por el gran número de información obtenida.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo resume parte de la labor de investigación que se viene desarrollando dentro del marco del proyecto (PIAP-3-P-671-14) “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 (PNICP)-Innovate Perú 2015. Por ello, nuestro profundo y sincero agradecimiento al equipo de trabajo conformado por profesores, alumnado y administrativos del Grupo de Investigación de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gerhard Albert Cook. Argon, Helium, and the Rare Gases: The Elements of the Helium Group, volume 2. Interscience Publishers, 1961.
- [2] C Richard Cothorn and James E Smith Jr. Environmental radon, volume 35. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] R Banjanac, A Dragic, B Grabez, D Jokovic, D Markushev, B Panic, V Udovicic, and I Anicin. Indoor radon measurements by nuclear track detectors: Applications in secondary schools. *Facta universitatis-series: Physics, Chemistry and Technology*, 4(1):93–100, 2006.
- [4] Robert L Fleischer. Alpha-recoil damage: Relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6):1459–1466, 1988.
- [5] Marta Fuente Lastra. Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos (Tesis Máster). Facultad de Ciencias. Universidad de Cantabria. Septiembre 2016.
- [6] Juan Miguel Barros Dios. El radón: ¿riesgo para la salud? *Revista de Salud Ambiental*, 11(1-2):27–31, 2011.
- [7] Saeed A Durrani and Radomir Ilic. Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment. World Scientific, 1997.
- [8] UNA PERSPECTIVA DE SALUD P'UBLICA. Manual de la OMS sobre el radón en interiores. 2015.
- [9] Sources UNSCEAR. Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, pages 453–487, 2000.
- [10] Instituto Nacional de Estadística e Informática. Estado de la población peruana 2014, 2014.
- [11] Zonificación del distrito de San Luis-Lima, Perú. <http://www.munisanluis.gob.pe/portal/mapas/>. Accessed: 2017-02-27.
- [12] <http://www.munisjm.gob.pe/geografia>
- [13] Evaluación del riesgo sísmico en edificaciones en la ciudad de Lima. <http://www3.vivienda.gob.pe/pnc/docs/GestionRD/5.a.-%20CISMID%20Zavala.pdf> (2015).