

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA



Monitoreo de los Niveles de Radón 222 en el
Distrito de San Miguel - Lima en el Periodo 2016-2017

TESIS

Para optar el título profesional de
Licenciado en Física

Autores:

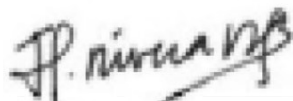
Bach. Rafael Ángel Liza Neciosup
Bach. Max Geider Riva Poclín

Asesor:

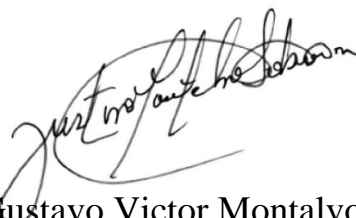
Dr. Luis Alberto Curo Maquen

Lambayeque, septiembre de 2019

Jurado Calificador:

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'J. Rivera V.' with a stylized flourish at the end.

M.Sc. Juan Pedro Rivera Vásquez
Presidente

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Gustavo Victor Montalvo Soberón' with a large, sweeping flourish.

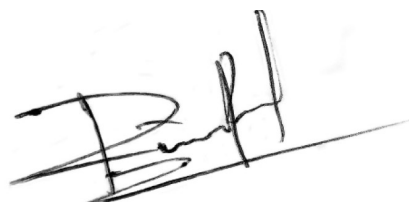
M.Sc. Gustavo Victor Montalvo Soberón
Secretario

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'A. Saba Effio' with a stylized flourish.

M.Sc. Augusto Saba Effio
Vocal

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'L' and 'M' that are interconnected, with several smaller strokes and loops.

Dr. Luis Alberto Curo Maquén
Asesor

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, bold 'M' followed by 'G' and 'R', with a long horizontal stroke extending to the right.

Bach. Max Geider Riva Poclín
Autor

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'R' and 'L' that are interconnected, with several smaller strokes and loops.

Bach. Rafael Ángel Liza Neciosup
Autor



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N° 012-2021-D/FACFyM

Siendo las 10:50 am del día 23 de marzo del 2021, se reunieron vía plataforma virtual,
<https://meet.google.com/cem-bwgs-tzz> los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"Monitoreo de los Niveles de Radón 222 en el Distrito de San Miguel - Lima en el Periodo 2016-2017".

Designados por Resolución N° 110-2019-D/FACFyM de fecha 29 de Enero de 2019.

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

M.Sc. Juan Pedro Rivera Vásquez	Presidente
M.Sc. Gustavo Víctor Montalvo Soberón	Secretario
M.Sc. Augusto Saba Effio	Vocal

La tesis fue asesorada por el Dr. Luis Alberto Curo Maquén nombrado por Resolución N° 547-2017-D/FACFyM de fecha 22 de Mayo de 2017.

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 179-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 17 de Marzo del 2021.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: **Liza Neciosup Rafael Angel y Riva Poclín Max Geider**; y tuvo una duración de 50 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de 19 (Nota Diecinueve) en la escala vigesimal, mención Muy Bueno.

Por lo que quedan aptos para obtener el Título Profesional de **Licenciado en Física**, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

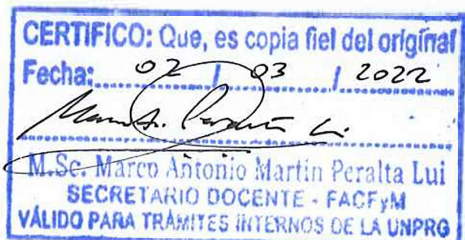
Siendo las 12:30 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

M.Sc. Juan Pedro Rivera Vásquez
Presidente

M.Sc. Gustavo Víctor Montalvo Soberón
Secretario

M.Sc. Augusto Saba Effio
Vocal

Dr. Luis Alberto Curo Maquén
Asesor



Declaración Jurada de Originalidad

Yo, Max Geider Riva Poclín con DNI: 45827262 y Rafael Ángel Liza Neciosup con DNI: 46373628, investigadores principales, y Dr. Luis Alberto Curo Maquén, como asesor del trabajo de investigación “Monitoreo de los Niveles de Radón 222 en el Distrito de San Miguel - Lima en el Periodo 2016-2017”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso de demostrarse lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar.

Que puede conducir a la anulación del título profesional emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 28 de abril de 2022

Investigadores:



Bach, Max Geider Riva Poclín



Bach. Rafael Ángel Liza Neciosup

Asesor:



Dr. Luis Alberto Curo Maquén

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo estimar los niveles de Radón 222 las viviendas en el distrito de San Miguel entre los años 2016-2017. En el estudio se tomó en consideración diferentes parámetros como el material de construcción, edad de la vivienda, tipo de suelo, entre otros, con el fin de encontrar una relación entre la concentración de radón y estos parámetros. Las mediciones se realizaron siguiendo la Metodología de Detectores de Trazas Nucleares, y el detector empleado fue el LR-115 tipo II (con una capa activa de nitrato de celulosa de 12 micrómetros y capaz de registrar partículas alfas en el rango de 1 - 5.6 MeV), detector pasivo de trazas nucleares. El monitoreo realizado en San Miguel forma parte de un proyecto realizado en Lima Metropolitana con el objetivo de elaborar el primer mapa de radón. Se estima que la concentración promedio de radón en el distrito de San Miguel es 160 Bq/m³. Con un total de 34 puntos de medición se elaboró el mapa de radón para San Miguel. Además, existe un 26,5% de probabilidad de sobrepasar el umbral de referencia de 200 Bq/m³ establecido por el IPEN.

Palabras clave: Radón, Trazas nucleares, LR-115.

Abstract

The aim of this study is to estimate the levels of Radon 222 in homes in the district of San Miguel between the years 2016-2017. In the study, different parameters were taken into consideration, such as building materials, age of the house, type of soil, among others, in order to find a relationship between radon concentration and these parameters. The measurements were made following Methodology Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTDs), and the detector employed for the measurements was the LR-115 type II (has approximately 12 micrometers active cellulose nitrate layer and capable of recording alpha particles in the range of 1 - 5.6 MeV). The monitoring carried out in San Miguel is part of a project carried out in Metropolitan Lima with the aim of preparing the first radon map. The average radon concentration in the San Miguel district is estimated to be 160 Bq/m³. With a total of 34 measuring points, the first radon map for the San Miguel district has been prepared. In addition, there is a 26.5 % probability of exceeding the reference level of 200 Bq/m³ set by IPEN.

Keywords: Radon, Nuclear tracks, LR-115.

Dedicatoria

A Marithsa Poclín y Max Riva

A Evert Rolando Riva

A Cynthia Lorena Riva

A Javier Tomanguilla

A Angélica Neciosup y Rafael Liza

A Luzmila y Rodri

A Lez & Adri

Agradecimientos

A nuestras familias por su constante apoyo.

A las personas que permitieron realizar las medidas en sus viviendas.

A nuestro asesor de tesis, por su tiempo y dedicación. Muchas gracias.

Índice General

Índice de Figuras

Índice de Tablas

1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Formulación del problema.....	1
1.3 Justificación.....	1
1.4 Hipótesis.....	2
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 Objetivo General.....	3
1.5.2 Objetivo Especifico.....	3
1.6 Antecedentes.....	3
1.6.1 Monitoreo de Radón 222 a nivel internacional.....	3
1.6.2 Monitoreo de Radón 222 en Lima.....	4
2. Diseño Teórico.....	5
2.1 Desintegración Radiactiva.....	5
2.1.1 Radiación Alfa.....	7
2.1.2. Radiación Beta.....	8
2.1.3. Radiación Gamma.....	8
2.2 Radón 222.....	9
2.2.1. Transporte de Radón.....	9
2.2.2 Fuentes de Radón 222.....	11
2.2.3. Medición y detección de Radón 222.....	12
2.3 Detección de las partículas alfa.....	14
2.3.1 Principio de detectores de trazas.....	14
2.3.2. Mecanismos de la formación de trazas.....	14
2.3.3. Geometría de las trazas nucleares.....	15
2.4. ¿Qué es un detector LR-115?.....	18
3. Métodos y Materiales.....	20
3.1. Características de la zona de medición.....	20
3.2 Distribución de los detectores.....	21
3.2.1. Población y muestra.....	22
3.3. Proceso de grabado y lectura de los detectores.....	22
3.4. Cálculo de la incertidumbre.....	24
3.5. Los niveles de Radón y la distribución Lognormal.....	25
4. Resultados y discusión.....	27
4.1. Variación de la concentración de Radón durante los diferentes periodos.....	27
4.2. Análisis del promedio de las concentraciones.....	29
4.2.1. Influencia de la ventilación sobre la concentración de radón en el interior de las viviendas.....	29
4.2.2. Distribución Log-normal.....	31

4.2.3. Áreas propensas (Prone areas).....	35
4.3. Mapa de Radón del distrito de San Miguel	36
5. Conclusiones.....	39
6. Recomendaciones	40
Bibliografía.....	41
Anexo A.....	43
Anexo B.....	44

Lista de Figuras

Figura 1: Periodo de desintegración de los radionucleidos emisores alfa en función de la energía	6
Figura 2: Decaimiento del Radón 222 en Polonio 218	7
Figura 3: Transición de un estado inicial de mayor energía a uno de menor energía por desintegración gamma.	8
Figura 4: Mecanismos presentes en el transporte de radón en medios porosos.....	10
Figura 5: Generación de radón en los granos del material	10
Figura 6: Posibles fuentes de radón en viviendas y edificios	12
Figura 7: Radón y su progenie.	12
Figura 8: Formación de la traza latente en: a) cristal b) polímero	15
Figura 9: Esquema geométrico de la traza nuclear después del grabado químico	16
Figura 10: Análisis geométrico de la traza post grabado	18
Figura 11: Esquema de las capas del LR-115 tipo 2.	19
Figura 12: Grilla de San Miguel 1km x 1km. Google maps-Elaboración propia.	21
Figura 13: Equipo para el revelado químico de detectores LR-115 (Laboratorio Pucp)	23
Figura 14: Equipo para lectura de detectores LR-115 (Politrack).	24
Figura 15: Zonas de las viviendas que presentan la mayor concentración de radón por periodo de medición.	28
Figura 16: Promedio de los niveles de Radón en San Miguel por periodo de medición.	29
Figura 17: Diferencias en los niveles de radón en las viviendas que cuentan con una adecuada y mala ventilación.....	31
Figura 18: Histograma de la concentración de Radón en San Miguel.	32
Figura 19: Prueba de normalidad de Anderson-Darling	33
Figura 20: Distribución empírica vs Distribución de la aproximación normal de los cuatro periodos.	34
Figura 21: Probabilidad de viviendas que superan los 200 Bq/m ³ en el distrito de San Miguel.	36
Figura 22: Mapa predictivo de Radón en San Miguel.	37
Figura 23: Variograma del mapa de radón de San Miguel	38
Figura 24: Distribución de la radicación de fondo natural y artificial.....	44

Lista de Tablas

Tabla 1: Umbral máximo de concentración de Radón reportados por algunos países.....	4
Tabla 2: Principales detectores de trazas de estado sólido	14
Tabla 3: Incertidumbre en LR-115 para una exposición promedio de 400 Bq/m ³	19
Tabla 4: Estadísticos de los cuatro periodos en Bq/m ³	32
Tabla 5: Concentración, código de casas y coordenadas GPS	43

1. Introducción

1.1 Descripción del problema

El Radón 222 se produce de forma natural a partir de la desintegración del Uranio 238. Este radioisótopo emite partículas alfa con 5,49 MeV de energía y tiene como progenie al Polonio 218 con un tiempo de vida de 3 minutos, el Plomo 214 con 26 minutos y finalmente al Plomo 206 que es el átomo estable producto del decaimiento. El radón es la principal fuente de radiación natural, por lo cual es importante conocer la cantidad de radón a la que las personas se encuentran expuestas. El cálculo de la dosis por inhalación de radón es un tema muy discutido aún hoy en día. Existen diferentes modelos dosimétricos, que basan la estimación de dosis en mSv/año (Quindós, 1989) en función de la Concentración de radón a la que las personas están expuestas en el interior de las viviendas. La importancia del presente trabajo es determinar con la mayor exactitud esta concentración de radón.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo la medición del nivel de Radón 222 en San Miguel - Lima durante el periodo 2016 - 2017 ayudará a la población de este distrito?

1.3 Justificación

Año tras años las mediciones de los niveles de Radón 222 se vienen implementando en diferentes países debido al riesgo para la salud que representa. El

radón es considerado como un agente cancerígeno del grupo 1 de acuerdo a la OMS (Zeeb, 2015), y se ha demostrado que hay una relación existente entre altos niveles de radón y casos de cáncer de pulmón y estómago (Axelson, 1995). Diferentes organismos internacionales vienen apoyando una serie de estudios para enfrentar esta problemática en diferentes países. Algo que llama la atención cuando se revisan los estudios realizados en otros países son los niveles que se establecen, esto debido a las diferentes realidades geológicas, geográficas y geopolíticas de cada lugar. El radón debe ser reconocido en cada país como un problema de salud, donde las autoridades se comprometan a educar, concientizar a sus habitantes y proponer políticas de salud pública. En el caso de Perú existe una normativa; sin embargo, aún se tiene una cantidad de mediciones insuficientes que permita establecer los niveles de referencia apropiados a la realidad del País.

El presente trabajo junto a las mediciones de los demás distritos en Lima metropolitana busca ayudar a establecer las normativas en Perú para establecer el nivel umbral de referencia y establecer los protocolos para la mitigación en los casos que sea necesario.

1.4 Hipótesis

El porcentaje de viviendas en San Miguel - Lima durante el periodo 2016 - 2017 que se encuentra por encima del límite de referencia de 200 Bq/m^3 como establece la normativa del IPEN en interiores es menor del 10%.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Verificar que los niveles de concentración de Radón 222 a los que se encuentran expuestos los habitantes del distrito de San Miguel – Lima se encuentran dentro de los límites admisibles.

1.5.2 Objetivo Especifico

- Describir al Radón 222 y los peligros que causan al ser un gas nocivo para la salud, así como su detección.
- Elaborar el primer mapa predictivo de Radón 222 en el distrito de San Miguel.

1.6 Antecedentes

1.6.1 Monitoreo de Radón 222 a nivel internacional

Las formaciones geológicas de la zona donde se realiza el estudio es un punto importante al momento de elaborar el mapa predictivo de radón. Un correcto manejo de los datos de las medidas de radón permite que se genere una buena retroalimentación con nuevas mediciones cada año. La cantidad total de mediciones de radón varía entre países y en la mayoría de los casos, los hogares han sido seleccionados estadísticamente, de manera que los resultados son representativos de las zonas pobladas de estudios. En algunos países las mediciones se hacen en invierno en periodos de tres meses, donde las concentraciones son más altas, debido a la poca ventilación en el interior de las viviendas. Sin embargo, otros países optan por realizar las mediciones en verano en periodos de dos meses, donde las concentraciones son más bajas.

Tabla 1: Umbral máximo de concentración de Radón reportados por algunos países.

País	Nivel de Referencia
Holanda	200
Luxemburgo	150
Estados Unidos	150
Australia	200
Irlanda	200
Reino Unido	200
Alemania	250
Austria	400

1.6.2 Monitoreo de Radón 222 en Lima

La tesis se desarrolla en el marco 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”, realizado por el Grupo de Investigación de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la PUCP. Se han realizado mediciones en múltiples distritos en la ciudad de Lima, como por ejemplo San Martín, San Isidro, Pueblo Libre, Los olivos, San Juan de Miraflores, entre otros. Las mediciones realizadas contribuirán a desarrollar un mapa completo de radón en Lima.

En este contexto, los integrantes del grupo de investigación presentaron sus investigaciones en múltiples eventos nacionales e internacionales sobre radón y medio ambiente (Štěpán, 2019) (Liza R. R.-B., 2017).

2. Diseño Teórico

2.1 Desintegración Radiactiva

Es un fenómeno que se da de forma espontánea en núcleos no estables. Este proceso se debe al exceso de energía potencial que tiene el sistema, donde el exceso de energía es liberado como radiación electromagnética o corpuscular que origina un nuevo núcleo.

El periodo de semidesintegración ($t_{1/2}$), la vida media (τ) y la constante de desintegración (λ) expresan el grado de inestabilidad. La Ley de desintegración radiactiva se emplea para estimar la cantidad de núcleos de una sustancia radiactiva al transcurrir el tiempo. Se expresa de la siguiente manera:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

El tiempo que le tomará a los núcleos de los isótopos decaer a la mitad viene dado por el periodo de semidesintegración (Kaplan, 1963).

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

De acuerdo a la ecuación 2, si se tiene un elemento con N número de átomos a un tiempo “t”, haciendo la derivada se obtiene:

$$dN(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt \quad (3)$$

Además, se puede definir al decaimiento radiactivo como un proceso probabilístico, lo que implica que un átomo tiene un tiempo de vida que puede ir de 0 a ∞ . Es posible calcular (τ) la vida media a partir de (Kaplan, 1963):

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones 2 y 4 es posible obtener la siguiente relación entre periodo de semidesintegración y vida media (Wichmann, 1996):

$$t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau \quad (5)$$

La relación que existe entre el periodo de semidesintegración y la energía de emisión en la desintegración se observa en la siguiente figura.

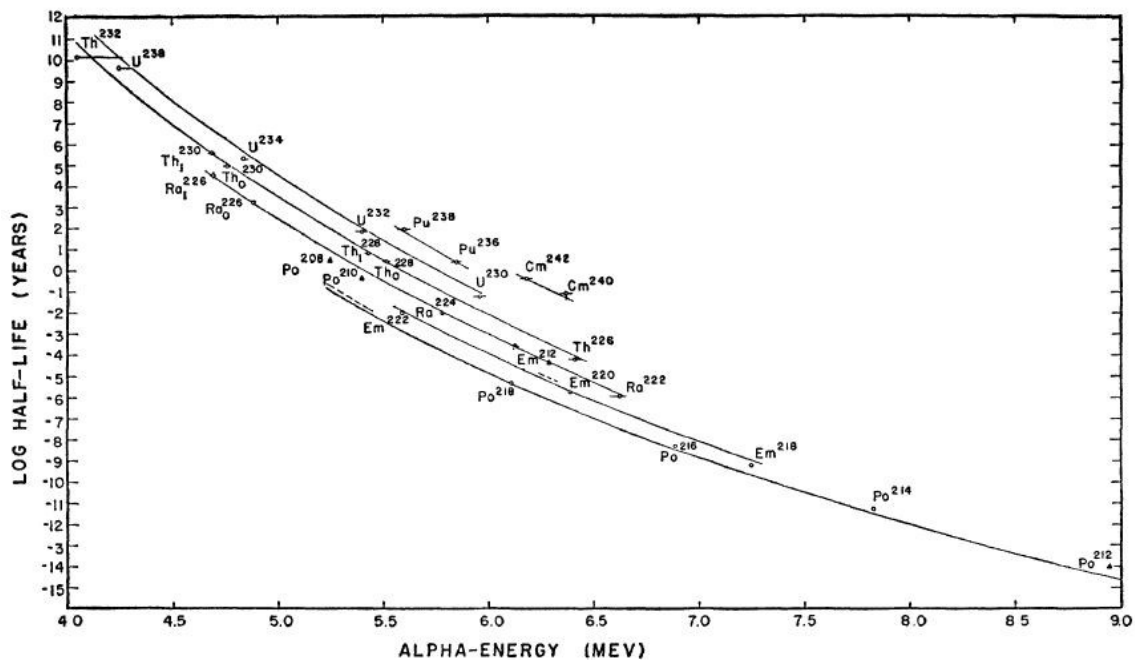


Figura 1: Periodo de desintegración de los radionucleidos emisores alfa en función de la energía (Perlman, 1950)

Existen tres tipos de decaimiento: alfa, beta y gamma. Por su naturaleza, estas formas de radiación interactúan de forma diferente con la materia. Las partículas alfa son

frenadas fácilmente por una hoja de papel, las partículas beta pueden atravesar sólo unos pocos milímetros de aluminio, mientras que los rayos gamma pueden llegar a atravesar algunos centímetros de plomo (Burchman, 1974).

2.1.1 Radiación Alfa

Este tipo de desintegración es común en los núcleos atómicos pesados, donde las partículas alfa están formadas por un núcleo de helio. Este tipo de decaimiento se puede representar por el siguiente esquema:

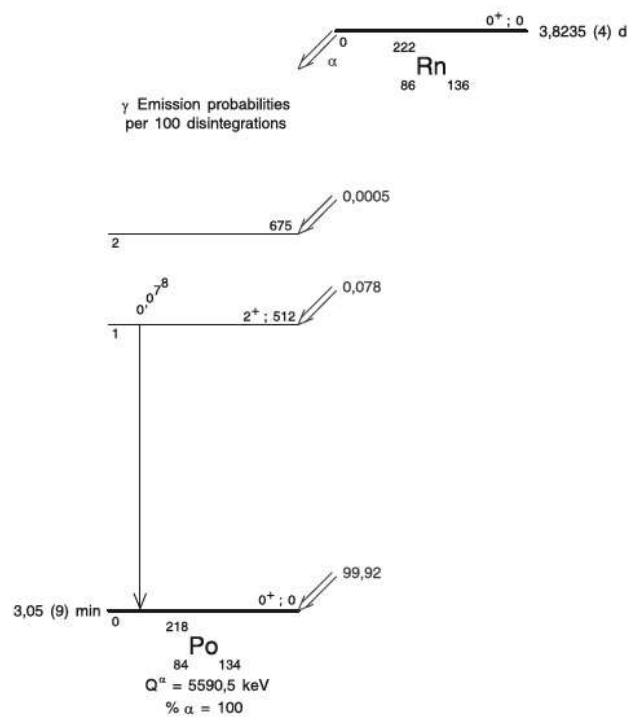


Figura 2: Decaimiento del Radón 222 en Polonio 218 (Brosed, 2011)

2.1.2. Radiación Beta

En el decaimiento beta un electrón es expulsado a gran velocidad del núcleo debido a la transformación de un neutrón a un protón (Garritz, 1998). La radiación beta presenta un menor poder de ionización que la radiación alfa.

La desintegración β^- se puede representar: $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

La desintegración β^+ se puede representar: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

2.1.3. Radiación Gamma

La radiación gamma o radiación electromagnética acompañan la emisión de partículas alfa o beta. Es el tipo de radiación más penetrante debido a la menor capacidad de interactuar con la materia.

La emisión de un rayo gamma de un núcleo no altera al mismo: es decir, sigue siendo el mismo núcleo, aunque después de la emisión posee una menor energía

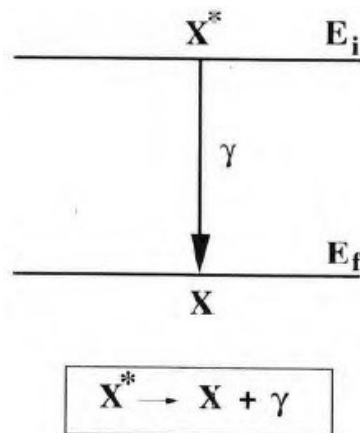


Figura 3: Transición de un estado de mayor a uno de menor energía por desintegración gamma (Soria, 2011).

2.2 Radón 222

2.2.1. Transporte de Radón

El radón es generado en los granos del suelo donde se encuentra el radio 226, a este proceso de producción se denomina 'Emanación'.

El radón generado que logra escapar de los granos se mueve en los espacios intersticiales existentes en los poros del material. Ahora se tiene una determinada cantidad de radón libre, el cual se moverá a través del material por dos posibles procesos: Difusión y/o convección.

Finalmente, una determinada concentración de radón es liberada al ambiente, a este proceso se denomina 'Exhalación'. Matemáticamente se puede describir todo este proceso en la siguiente ecuación (Porstendörfer, 1994):

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_{Rn} + \frac{k}{\mu \epsilon} \nabla P - \lambda_{Rn} C_{Rn} + \phi \quad (6)$$

Donde ϕ representa la generación de radón ($\text{Bq.m}^3.\text{s}^{-1}$)

$$\phi = \frac{A_{Ra,m} \cdot \rho_m \cdot f_m}{\epsilon_m} \lambda_{Rn} \quad (7)$$

$A_{Ra,m}$ es la cantidad de radio presente en el material (Bq.kg^{-1}). ρ_m es la densidad aparente (kg.m^{-3}). Finalmente f_m representa el coeficiente de emanación y ϵ_m es la porosidad del material ambos adimensionales.

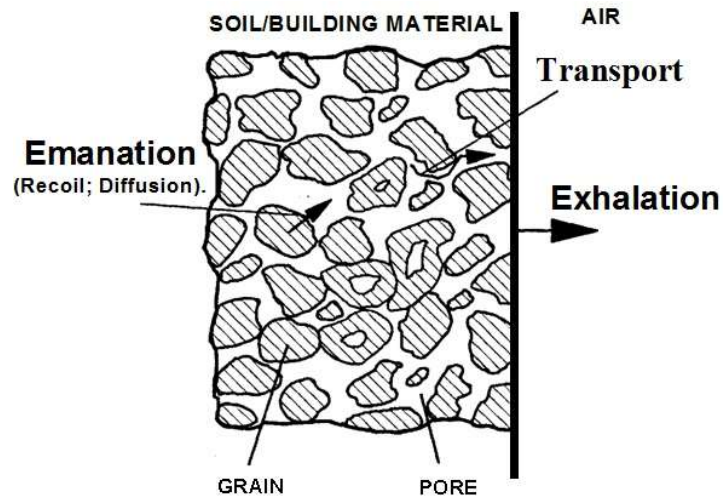


Figura 4: Mecanismos presentes en el transporte de radón en medios porosos (Baskaran, 2016)

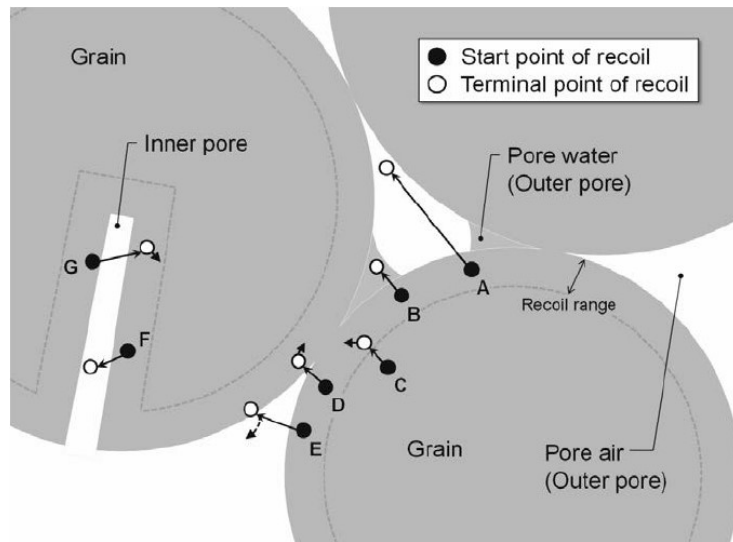


Figura 5: Generación de radón en los granos del material (Baskaran, 2016).

La densidad de flujo de radón debido al movimiento difusivo J_d ($\text{Bq.m}^2.\text{s}^{-1}$) se puede escribir:

$$J_d = -D_0 \nabla C_{Rn} \quad (8)$$

La ecuación anterior representa la Ley de Fick, lo que implica que, si el movimiento se debe solo a difusión, se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \varepsilon D_e \nabla^2 C_{Rn} + \phi - \lambda_{Rn} C_{Rn} \quad (9)$$

Para estudiar la velocidad a la que el radón se mueve en un medio (v_D) se emplea la ley de Darcy:

$$v_D = -\nabla P \frac{k}{\mu} \quad (10)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido y ∇P representa el gradiente de presión dinámica del suelo.

2.2.2 Fuentes de Radón 222

Todos los tipos de suelo y la mayoría de materiales de construcción empleados en la industria presentan trazas de Radio 226. Todos los tipos de suelos o materiales de construcción que contengan Radio son potenciales fuentes de radón contribuyendo a los niveles de la concentración de radón en el interior de las viviendas (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation., 1994). La exhalación de radón de los materiales presentes en las viviendas permite entender en cuanto contribuyen a la concentración de radón. De forma puntual, es necesario considerar las fuentes de radón presentes en la siguiente Figura



Figura 6: Posibles fuentes de radón en viviendas y edificios (Monitorización de la concentración de radón en aire, 2017)

2.2.3. Medición y detección de Radón 222

En la cadena del uranio 238, el único elemento gaseoso es el radón, no obstante, los elementos producto del decaimiento del radón son elementos sólidos (ver Figura 7)

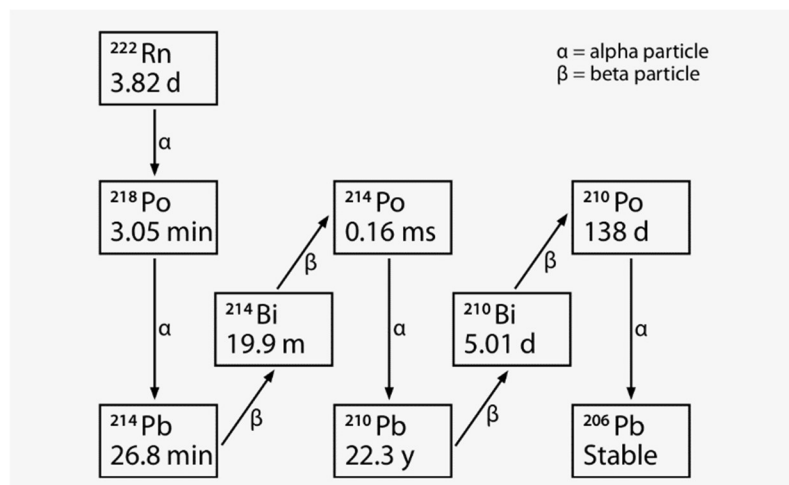


Figura 7: Radón y su progenie.

La amplia cantidad de dispositivos existentes en el mercado para la detección de radón y sus elementos de decaimiento puede ser clasificada en función del tiempo que requieren los dispositivos para realizar la medida. La elección del método de medición dependerá del tipo de estudio que se quiere realizar, así por ejemplo, existen detectores de radón de forma activa y pasiva. Una de las diferencia entre estos dos tipos de detectores es la forma como se capta el aire (tipo activo, para un sistema de captación de aire forzado).

Los detectores de trazas empleados en este estudio pertenecen a los dispositivos pasivos, los cuales cumplen una función integradora, es decir, brindan información de la concentración promedio del gas radón acumulada durante todo el tiempo de medición, integrando los parámetros externos que pudieran afectar la medida, como los parámetros climáticos (Liza R. R.-B., 2017).

Los dispositivos de medición pasivos requieren un mayor tiempo de exposición para obtener un mejor estimado de la concentración. Sin embargo, los métodos pasivos se pueden realizar con cortos periodos de exposición y se determina la concentración de forma puntual, esto significa no considerar las variaciones estacionales (Guillermo, 1994).

Tabla 2: Principales detectores de trazas de estado sólido (L'Annunziata, 2012)

Cristales	Vidrios	Polímeros
Moscovita	Tectita	PADC, CR -39
Apatita	Obsidiana	Lexana
Zirconio	Soda - Limo	Makrofol
Esfena	BO-1 glass	LR-115
Froxeno	Fosfato	PETAC - ADC

2.3 Detección de las partículas alfa

2.3.1 Principio de detectores de trazas

El impacto de una partícula alfa en un detector de trazas nucleares crea un sendero conocido como traza latente. El tamaño de la traza, dependerá de la energía con la que impacta la partícula alfa y del material del detector que sea usado para su detección. Se estima el diámetro de las trazas latentes entre 25 a 100 Å. La densidad de trazas y por consiguiente la estimación de concentración de radón empleando un detector de trazas nucleares dependerá de un correcto tratamiento del detector que inicia con el grabado químico y la lectura mediante microscopio o alguno de los sistemas automatizados de conteo de detectores disponibles en el mercado. El tamaño de la traza revelada (grabada) puede variar entre 1 a 15 μm .

2.3.2. Mecanismos de la formación de trazas

El principal factor que diferencia la formación de trazas entre sólidos cristalinos y sólidos amorfos es la producción de electrones secundarios (rayos δ), los cuales pueden

producir un ligero agrandamiento del diámetro del sendero generado por la traza al impactar en el detector (Kobetich, 1968).

La partícula alfa es capaz de arranca electrones en su recorrido por el detector, los cuales a su vez pueden producir nuevas ionizaciones. Se han planteado diferentes modelos con el propósito de explicar el mecanismo de formación de trazas, uno de ellos es el *modelo de pérdida de energía restringida* propuesto por Benton (Benton, 1969), y el *modelo de pico de explosión iónica* (ion explosion spike) propuesto por Fleischer (Fleischer, 1975) por citar algunos. El modelo de Fleischer es considerado como el más próximo a la realidad de la formación de la traza en sólidos cristalinos. En la Figura 8 se puede ver como una partícula alfa rompe las redes en un cristal o las cadenas poliméricas.

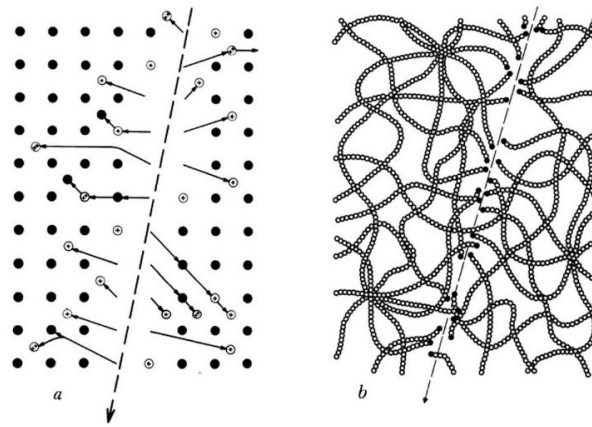


Figura 8: Formación de la traza latente en: a) cristal b) polímero (Fleischer, 1975)

2.3.3. Geometría de las trazas nucleares

Para determinar la eficiencia de un detector de trazas es necesario analizar la geometría de las trazas. La relación entre la cantidad de trazas observadas y trazas incidentes nos indicaran que tan eficiente es un detector de trazas (Durrani S. A., 2013).

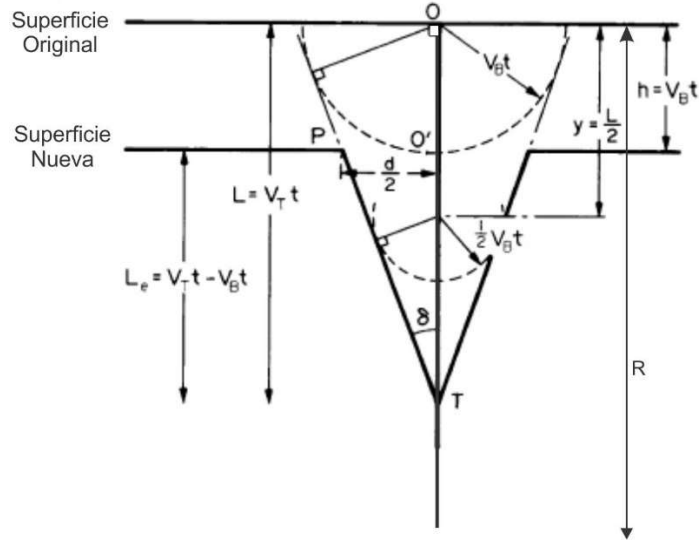


Figura 9: Esquema geométrico de la traza nuclear después del grabado químico (Durrani S. A., 2013)

Si se considera velocidad de grabado constante a lo largo del sendero originado por la incidencia de la partícula alfa V_T el cálculo es relativamente sencillo. El modelo de formación de trazas que se observa en la Figura 9 se establece de manera sencilla un conjunto de características del proceso de revelado químico. La traza latente se alargará hasta el punto L desde su origen, expresado por: $L = V_T \cdot t$ (Figura 9 y Figura 10 (Durrani S. A., 2013)). La velocidad de decapado V_B avanza desde la superficie hasta el final del sendero dejado por la traza al impactar sobre el detector, de forma que es posible calcular la longitud de la traza grabado por la siguiente expresión (Durrani S. A., 2013):

$$L_e = V_T \cdot t - V_B \cdot t \quad (11)$$

En la Figura 9 se observa un cono de ángulo δ :

$$\sin\delta = \frac{V_B t}{L} = \frac{V_B t}{V_T t} = \frac{V_B}{V_T} \quad (12)$$

Donde, δ es el ángulo crítico de grabado (Durrani S. A., 2013). Del triángulo O'PT se tiene:

$$\tan\delta = \frac{d/2}{L_e} \quad (13)$$

A partir de la expresion 12, la ecuación anterior queda:

$$\tan\delta = \frac{V_B}{\sqrt{(V_T^2 - V_B^2)}} \quad (14)$$

Para finalmente de la ecuación 13, la ecuación anterior queda:

$$d = \frac{2V_B L_e}{\sqrt{(V_T^2 - V_B^2)}} \quad (15)$$

En la Figura 9 se observa que se cumple la siguiente relación: $L_e = (V_T - V_B)t$. De forma que utilizando esta relación para reescribir la ecuación anterior se tendría:

$$d = 2V_B t \sqrt{\frac{V_T - V_B}{V_T + V_B}} \quad (16)$$

Lo que indica que, a una mayor V_T , el diametro de la traza grabada aumenta, hasta un máximo: $2V_B t$, bajo la condición de: $V_T \gg V_B$ (Durrani S. A., 2013).

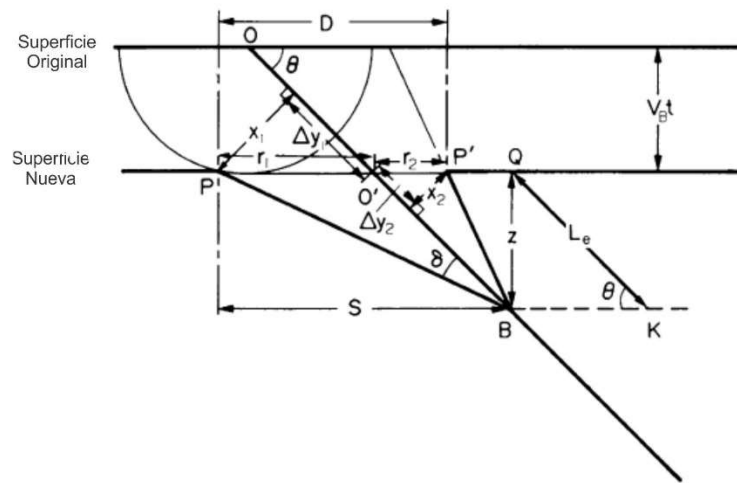


Figura 10: Análisis geométrico de la traza post grabado (Durrani S. A., 2013).

2.4. ¿Qué es un detector LR-115?

Es un polímero de nitrocelulosa que pertenece al grupo de detectores pasivos. Posee una ventana de detección para partículas alfa que va desde los 0.8 MeV hasta los 4.5 MeV (Kodak, 2017). La sensibilidad del detector se ve afectada por factores meteorológicos, así como de manipulación.

El detector LR115, está formado por una fina capa de nitrocelulosa al 90% (color rojo) y 12 micrómetros de espesor, y por una capa de poliéster de 100 micras que sirve como base (Figura 11). Es en el nitrato de celulosa (capa activa) donde se forman las trazas latentes, las cuales posterior a un tratamiento químico son reveladas para una correcta lectura en el microscopio o en algún sistema automatizado de lectura.

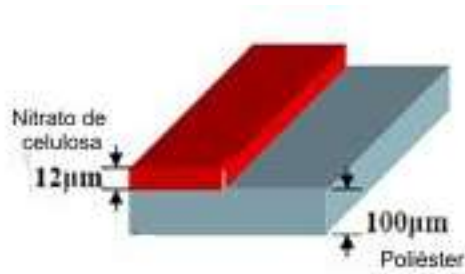


Figura 11: Esquema de las capas del LR-115 tipo 2.

El fabricante del detector, en este caso Kodak, reporta la incertidumbre de la medición en dependencia del tiempo de exposición (días). En la siguiente tabla se puede observar la incertidumbre asociada al tiempo de exposición.

Tabla 3: Incertidumbre en LR-115 para una exposición promedio de 400 Bq/m^3 (Kodak, 2017)

Tiempo de exposición (días)	Incertidumbre (+- Bq/m^3)	Incertidumbre (%)
90	24 - 30	6 - 8
75	26 - 33	6 - 8
60	29 - 37	7 - 9
45	34 - 42	8 - 11
30	41 - 52	10 - 13
15	58 - 73	15 - 18
7	85 - 108	21 - 27

En este trabajo de investigación los detectores fueron expuestos por 45 días, lo que representa una incertidumbre en la medición de 30%, valor que es aceptable según la ICRP.

3. Metodos y Materiales

3.1. Características de la zona de medición

Las mediciones se realizaron en el las viviendas de San Miguel - Lima, ubicado en la provincia de Lima, limita con San Isidro, Magdalena, Breña, Cercado de Lima y Callao. Presenta una extensión de 10.72 km². De acuerdo al censo del 2017, San Miguel cuenta con 155384 habitantes (INEI, U., & CEPAL, C., 2009).

Litológicamente San Miguel está constituido por grava aluvial pobremente gradada, arcillas orgánicas de alta plasticidad localizada y limos semi compactos. En la siguiente figura se observa la distribución de suelos en Lima. San Miguel ha sido marcado con un círculo rojo, el cual presenta tipos dos tipos de suelo: grava aluvial y arenas y limos (≈ 10 m de espesor).

Durante el invierno en el distrito de San Miguel, la humedad suele rondar el 99% durante la mayor parte del día, mientras que en el verano está entre 50-60% de humedad. Durante los primeros meses del año que son los del verano (enero, febrero y marzo) la temperatura ronda los 21° a 30° C, por otro lado, de junio a noviembre la temperatura oscila entre 12° a 17°.

3.2 Distribución de los detectores

Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto PIAP-3-P-671-14- En este contexto la investigación realizada sigue el protocolo establecido por el proyecto PIAP para la distribución de los detectores.

La distribución de detectores se determinó a partir de la densidad poblacional. Con el propósito de tener correctamente delimitado la ubicación de los detectores se realizó un grillado (1km x 1km) en el distrito (ver Figura 12).

De acuerdo a los trabajos realizados el grupo de investigación de la PUCP, para la densidad poblacional del distrito de San Miguel (14 494,78 hab/km²) corresponde 2 puntos de medición por km² (Liza R. A., 2017).

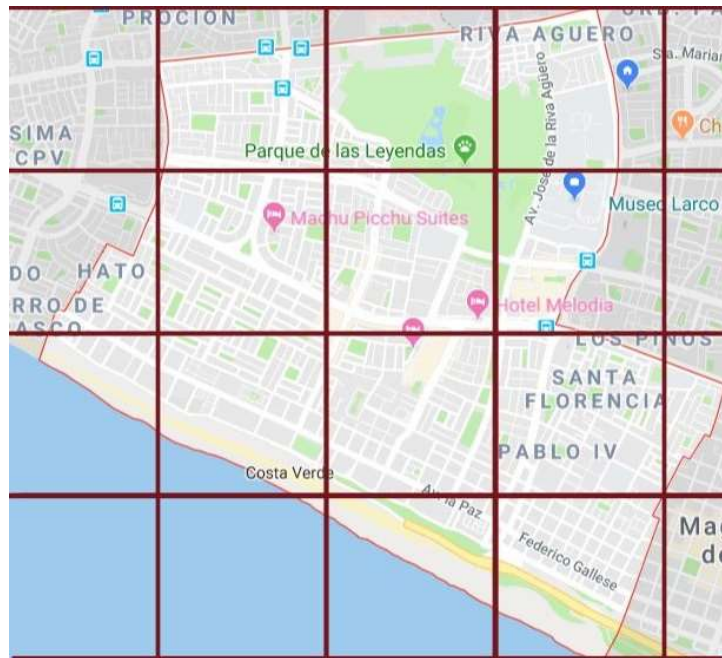


Figura 12: Grilla de San Miguel 1km x 1km. Google maps-Elaboración propia.

3.2.1. Población y muestra

Se conformó por las viviendas del distrito de San Miguel. Hasta el primer trimestre del 2016 se entregaron detectores en 55 viviendas. Sin embargo; al finalizar los 4 periodos de medición sólo se recuperaron los detectores de 34 viviendas. De acuerdo a las directrices tomadas en el proyecto en el que esta se desarrolla esta tesis en el distrito de San Miguel le corresponde como mínimo 20 puntos de medición. Por lo tanto, las 34 viviendas en las que se realizaron las mediciones conforman una muestra representativa para este estudio. De acuerdo a la política de confidencialidad que implica este tipo de estudio, sólo se detallan las coordenadas GPS de las viviendas.

3.3. Proceso de grabado y lectura de los detectores

Al termino de cada medición los detectores son llevados al laboratorio para ser sometidos al revelado químico (grabado químico), empleando una solución corrosiva (NaOH) con una normalidad de 2.5 por un tiempo de 90 minutos a $60^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ para los detectores LR-115 empleados en los estudios de monitoreo de Radón en interiores. En el caso de los detectores CR-39 las condiciones de revelado cambian, se emplea una solución de KOH con una normalidad de 6.5 siendo el tiempo de grabado variable dependiendo del tipo de estudio, la temperatura se mantiene constante en todos los casos a 60° . En la siguiente figura se puede ver el sistema de grabado de detectores.



Figura 13: Equipo para el revelado químico de detectores (Laboratorio Pucp)

Finalizada esta fase, los detectores están listos para la lectura. Empleando el equipo de lectura automática de detectores de trazas nucleares (politrack) se ha realizado la lectura de los detectores. Una de las ventajas que tiene el sistema de lectura politrack, es que permite la lectura en simultáneo de más de 40 detectores. Sin embargo, al ser un equipo que necesita una densidad óptica uniforme para una correcta lectura, requiere un grabado químico con mucha precisión para no tener problemas en la lectura.

Previo al presente trabajo de investigación se han realizado diferentes pruebas con el sistema de lectura politrack, garantizando de esta forma la uniformidad en el proceso.



Figura 14: Equipo para lectura de LR-115 (Politrack).

3.4. Cálculo de la incertidumbre

La incertidumbre de la concentración de radón con detectores de trazas parte por calcular la incertidumbre de la densidad de trazas σ_ρ .

Donde:

ρ : Densidad de trazas.

Tr : Número total de trazas.

S : Área del detector leída.

$$\rho = \frac{Tr}{S} \quad (17)$$

$$\sigma_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial Tr}\right)^2 \sigma_{Tr}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial S}\right)^2 \sigma_S^2} \quad (18)$$

Finalmente:

$$\sigma_{\rho} = \rho \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Tr}}{Tr}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{s}\right)^2} \quad (19)$$

La concentración de radón (C) se puede calcular a partir de la siguiente relación:

$$C = \frac{\rho}{FC(t)} \quad (20)$$

Donde:

FC: Factor de calibración.

t: periodo de exposición (días/horas).

** Por convención la incertidumbre relacionada al periodo de exposición es despreciada.

$$\sigma_C = C \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2} \quad (21)$$

3.5. Los niveles de Radón y la distribución Lognormal

La concentración de Radón en interiores tiene múltiples dependencias variables como tipo de suelo, tasa de ventilación, factores ambientales, entre otros.

Matemáticamente la podemos expresar (Durrani S. A., 1997):

$$Rn_{in} = Rn_{out} + X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \dots \quad (22)$$

Rn_{in} representa la concentración radón en el interior de la vivienda, Rn_{out} indica la concentración de radón en exteriores y las variables X_1, X_2, X_3 representan el contenido de edad de la vivienda, ventilación, temperatura, etc. Por lo tanto, es la cantidad de factores que influyen de forma multiplicativa en una distribución lognormal, lo que hace el fenómeno físico de la distribución de radón sea explicado con éxito.

La distribución lognormal se aplica a una serie de datos cuando al sacar el logaritmo de los datos, estos siguen una distribución normal. Además los valores de la variable a estudiar deben ser positivos, debido que se analiza el logaritmo de la variable, y éste sólo existe si dicho valor es positivo.

La función densidad de probabilidad:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x/\mu))^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

Donde:

μ : Media.

σ : Desviación estándar.

Además la media geométrica es numéricamente la misma que la mediana:

$$MG = e^{\mu} \quad (24).$$

Y la desviación estándar geométrica:

$$DEG = e^{\sigma} \quad (25)$$

Los momentos estadísticos de la distribución lognormal se han empleado con éxito para calcular la proporción de viviendas que sobrepasan un umbral de referencia (UR), conocidos como zonas de riesgo o prone areas (ver Sección 4.2.3).

4. Resultados y discusión

Realizar mediciones con detectores de trazas nucleares requiere el correcto empleo de un factor de calibración (FC) para transformar la densidad de trazas registrada por los detectores a concentración de Radón. Un factor importante en el proceso de medición son las condiciones de grabado químico, dentro de las cuales están factores como el tiempo de grabado, concentración de solución corrosiva (NaOH), y el estado de los detectores post exposición en los lugares de medición. En el presente trabajo se ha empleado un $FC = 0,020 \pm 0,002 \text{ tr.cm}^{-2}/\text{Bq.d.m}^{-3}$ (Ramachandran, 2003) calculado para condiciones similares a las que fueron analizados los detectores.

El cálculo del porcentaje de hogares que tienen una concentración mayor al umbral de referencia establecido por IPEN se ha calculado a partir de las consideraciones estadísticas para una distribución de tipo Log-normal.

Los valores de concentración de radón según su ubicación GPS se pueden encontrar en el Anexo A y una discusión de la radiación de fondo en la zona de medición en el anexo B.

Población: Viviendas del distrito de San Miguel

Muestra (muestreo aleatorio): Las 34 viviendas cuyos dueños aceptaron participar del monitoreo de Radón 222.

4.1. Variación de la concentración de Radón durante los diferentes periodos

Las mediciones de radón en el interior de las viviendas se realizaron en diferentes épocas del año con una duración promedio 90 días por periodo. Para la creación del mapa

de radón se emplearon datos de 4 diferentes periodos de medición. En algunos casos se realizaron más de una medición en cada vivienda, en otros casos las mediciones fueron realizadas en nuevos hogares, por lo cual el mapa es construido con una contribución de datos de nuevos puntos de medición en cada periodo. En el siguiente gráfico se puede ver las áreas de las viviendas en las que se puede encontrar una mayor concentración de radón.

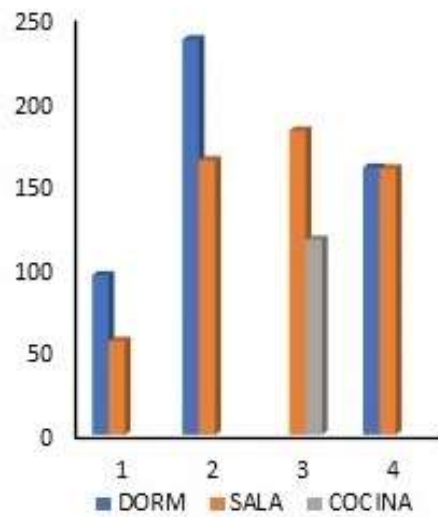


Figura 15: Zonas de las viviendas que presentan la mayor concentración de radón por periodo de medición.

De la Figura 15 se puede observar cómo tres de los cuatro periodos de medición la mayor concentración de radón siempre se ha encontrado en las habitaciones (dormitorios) de las viviendas, esto se puede entender debido a que las personas tienen la costumbre de tener las habitaciones poco ventiladas.

En la Figura 16 se muestran los valores promedio de las concentraciones de radón para los diferentes periodos de mediciones. Las variaciones no presentan una variación estadísticamente diferente en los tres primeros periodos; sin embargo, en el último periodo de medición el promedio si muestra un descenso considerable, esto se puede explicar debido a la época del año en la que se realiza la medición (verano), época en la que las viviendas presentan una mayor ventilación.

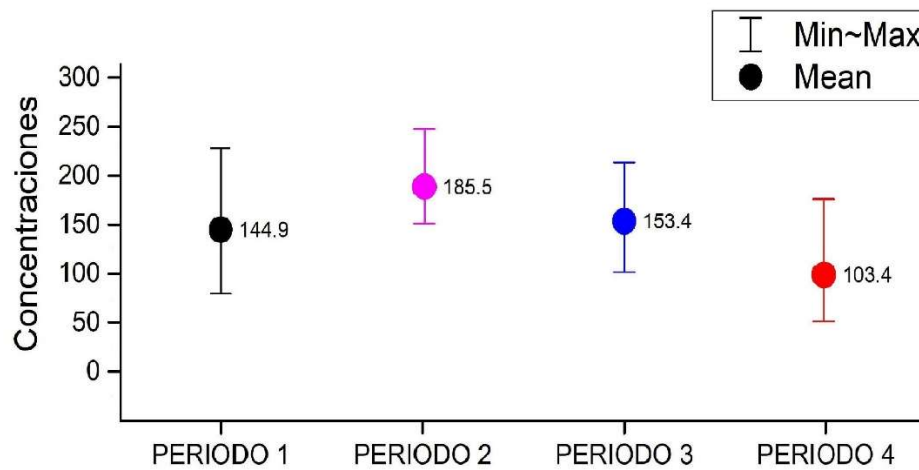


Figura 16: Promedio de los niveles de Radón en San Miguel por periodo de medición.

4.2. Análisis del promedio de las concentraciones

4.2.1. Influencia de la ventilación sobre la concentración de radón en el interior de las viviendas

El nivel de radón en el interior de las viviendas es de fácil reducción en la mayoría de los casos, siendo la recomendación básica, aumentar la ventilación en las

viviendas abriendo ventanas o colocando un pequeño sistema de extracción de aire (sistema que se puede instalar en el interior de la vivienda o en el exterior). De hecho, la ventilación es la primera medida de remediación que se propone en las viviendas con un nivel de radón por encima del umbral de referencia.

En este estudio se ha tomado en consideración la ventilación que tienen las viviendas en las cuales se ha realizado el estudio. Se ha podido observar que en el aproximadamente el 75% de las viviendas que formaron parte del estudio la ventilación está prácticamente ausente.

En la Figura 17 se muestran las diferencias de los niveles de radón en viviendas que presentan ventilación y las que no presentan ningún tipo de ventilación. El gráfico empleado muestra los valores extremos (máximos y mínimos) y las medianas en cada uno de los casos.

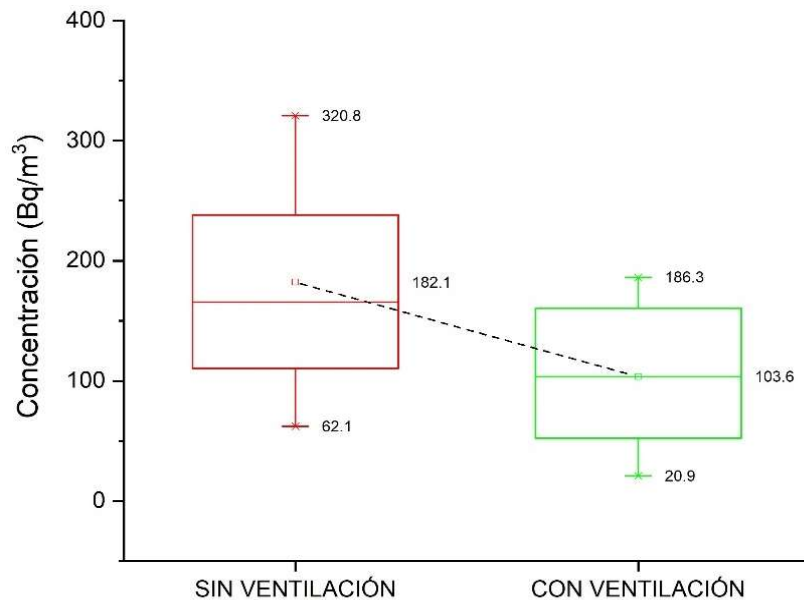


Figura 17: Diferencias en los niveles de radón en las viviendas que cuentan con una adecuada y mala ventilación.

Es posible observar una diferencia notable en los valores extremos (mínimos y máximos) de la concentración de radón en ambos escenarios (Sin ventilación y con ventilación). Sin embargo, como se ha mencionado la ventilación es una acción de remediación, una forma simple de reducir los niveles de radón en las viviendas. Los principales factores que influyen sobre el nivel de radón en el interior de una vivienda son el tipo de suelo y los materiales de construcción (Liza R. A., 2017).

4.2.2. Distribución Log-normal

Los valores de los estadísticos de los cuatro periodos para un total de 34 viviendas se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4: Estadísticos de los cuatro periodos en Bq/m³

Promedio	Máximo	Mínimo	Mediana	MG	DG
160.0	320.8	20.8	155.2	138.3	1.8

En la siguiente Figura se puede observar el histograma de los valores de concentración promedio de Radón durante todos los periodos de medición. En múltiples puntos se ha podido repetir las mediciones en más de un periodo; sin embargo, en cada periodo se agregaba un nuevo punto. Si se tenía una única medición en un punto, se consideraba este valor como promedio anual.

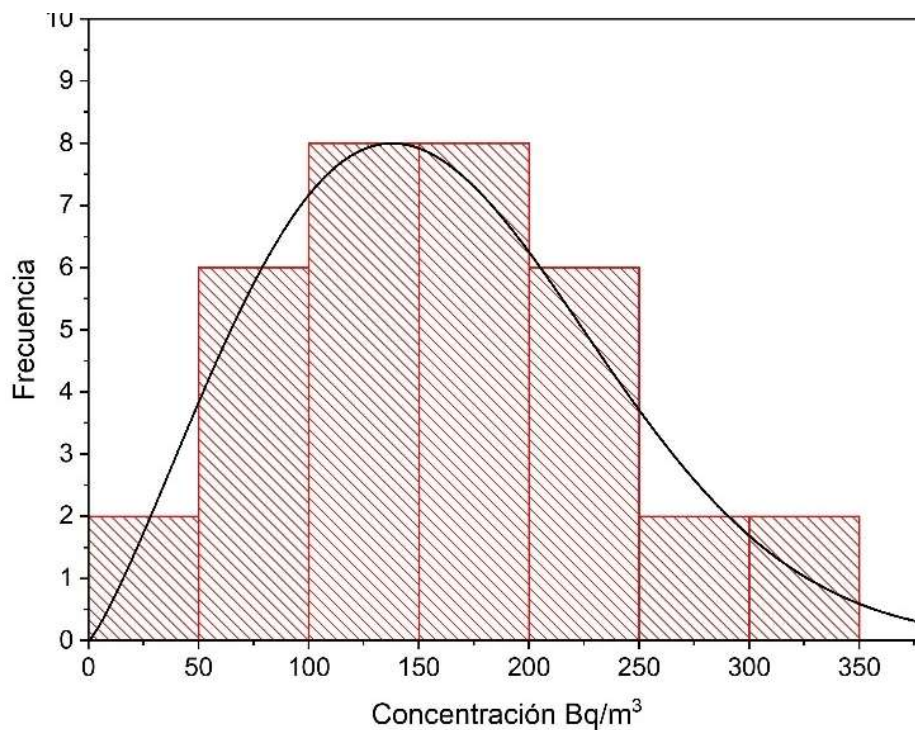


Figura 18: Histograma de la concentración de Radón en San Miguel.

Prueba de normalidad de Anderson-Darling:

Empleando los gráficos de probabilidad normal se verifica la normalidad de los datos.

Hipótesis:

- H_0 = Los datos se ajustan a una distribución normal.
- H_1 = Los datos no se ajustan a una distribución normal.

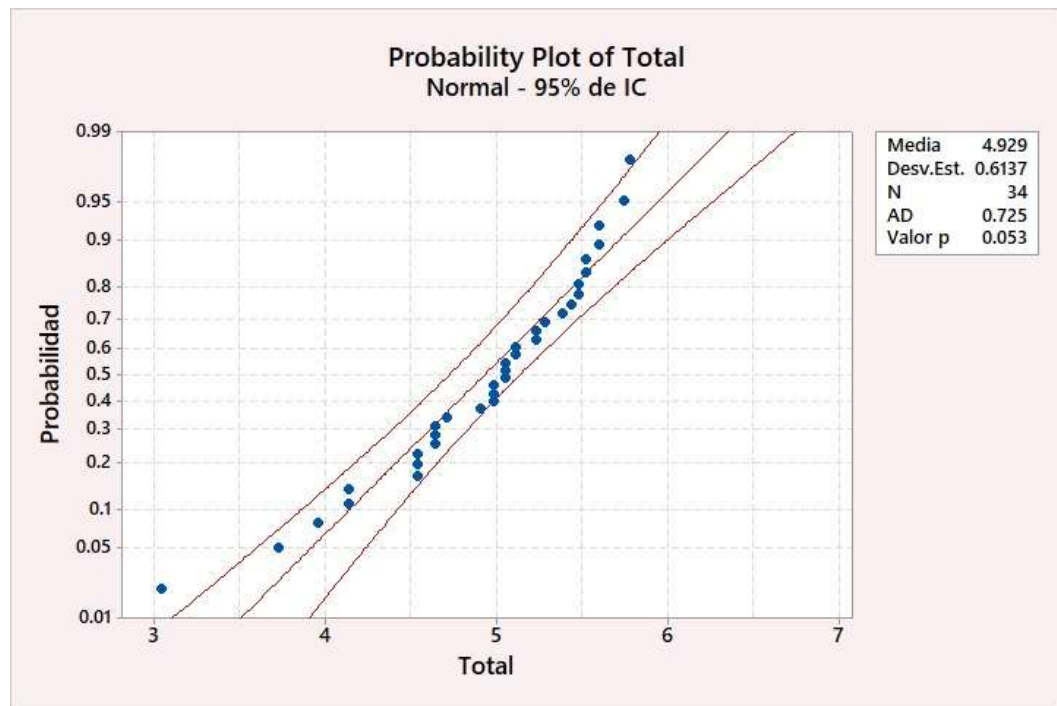


Figura 19: Prueba de normalidad de Anderson-Darling

La hipótesis nula es aceptada cuando cumple la siguiente condición ($\alpha = 0,05$):

$$P - Value \geq \alpha$$

En la figura anterior se puede observar un P-Value = 0,053. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov:

Se acepta la hipótesis nula cuando: $D_{tab} > D_{obs}$

Hipótesis:

- H_0 = Los datos siguen una distribución normal.
- H_1 = Los datos no siguen una distribución normal.

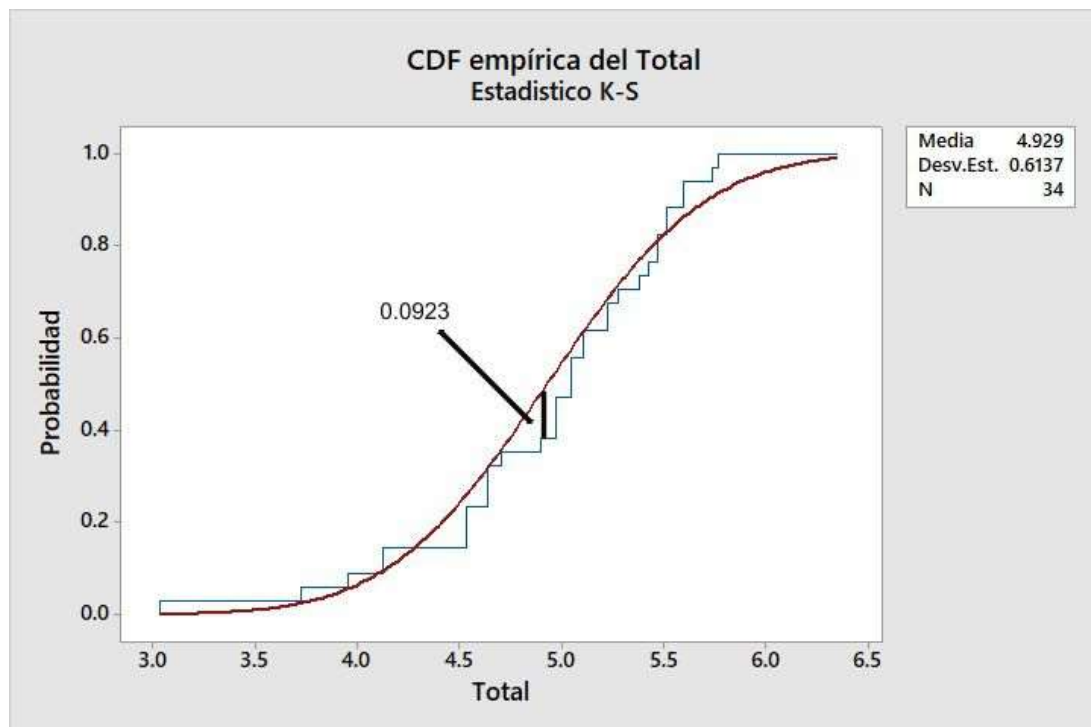


Figura 20: Distribución empírica vs Distribución de la aproximación normal de los cuatro periodos.

Dado el valor D_{obs} igual a 0.0923, y el dato tabulado D_{tab} igual a 0.227 ($P > 0.15$), permite concluir que la distribución se ajusta a una del tipo normal.

4.2.3. Áreas propensas (Prone areas)

A partir del cálculo de la probabilidad acumulada se puede determinar el porcentaje de viviendas que podrían superar el umbral de referencia (UR).

$$Z = \frac{\ln(UR) - \ln(MG)}{\ln(DG)} \quad (26)$$

$$Z = \frac{\ln(UR) - \mu_y}{\sigma_y} \quad (27)$$

$$P(Z > X) = P\left(Z > \frac{\ln(X) - \mu_y}{\sigma_y}\right) \quad (28)$$

$$P[Z > X] = 1 - P[Z \leq X] \quad (29)$$

Para una $MG = 138,3$, $DG = 1,8$ se obtiene:

$$P[Z > 0,63] = 1 - P[Z \leq 0,63] \quad (30)$$

Para Z en una distribución normal estandarizada $N(0,1)$ se tiene.

$$P[Z > 0,63] = 1 - 0,735 = 0,265 \quad (31)$$

Resultado que se puede interpretar como un 26,5% de probabilidad de encontrar viviendas que superen el umbral de referencia de 200 Bq/m³.

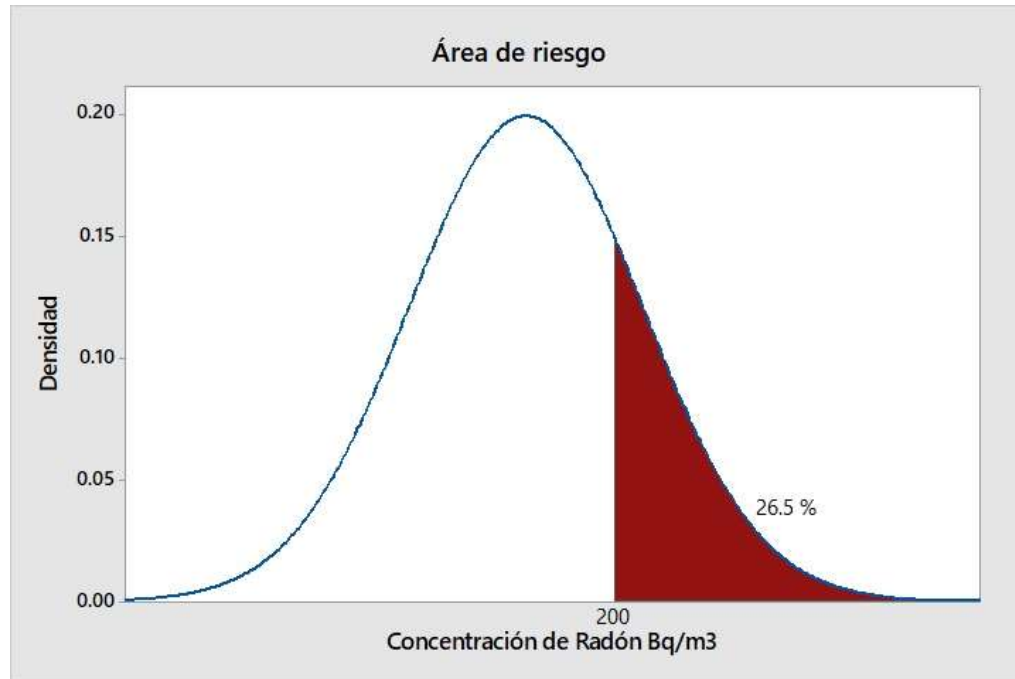


Figura 21: Probabilidad de viviendas que superan los 200 Bq/m³ en San Miguel.

4.3. Mapa de Radón del distrito de San Miguel

La determinación del riesgo que sufre la población (área de riesgo) de una determinada localidad por exposición al radón es uno de los objetivos de este trabajo a través de un mapa. En la Figura 22 se muestra el primer mapa de predictivo de radón para el distrito de San Miguel, en el cual se pueden observar las zonas con mayor probabilidad de encontrar niveles por encima de los 200 Bq/m³. El mapa de radón que se presenta ha sido elaborado empleando el método de interpolación de kriging ordinario. Estudios previos de mapeo de radón en Lima, nos indica que es el método de interpolación que mejor puede representar las variaciones de radón y la relación con las variaciones de suelo.

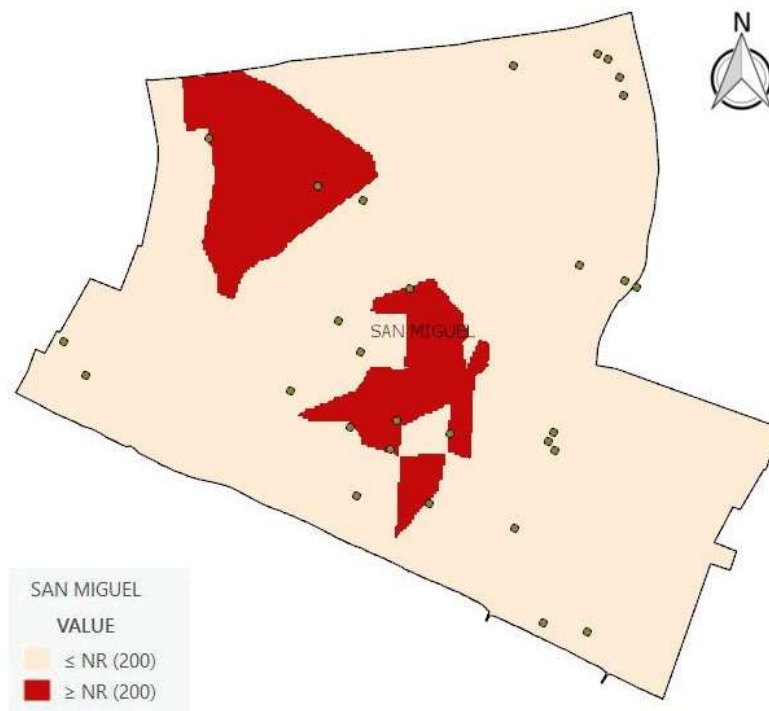


Figura 22: Mapa de predictivo de radón en San Miguel.

Debido a la gran cantidad de factores implicados, puede resultar complicado predecir si los niveles de radón serán elevados en un punto de medición; sin embargo, sí es posible hacer predicciones fiables (mapas predictivos) a partir de las mediciones realizadas.

En la Figura 23 se muestra el variograma empírico, el cual se ajustó a un modelo exponencial teórico, a partir del cual se puede inferir que los valores están correlacionados hasta una distancia de aproximadamente 5 km.

Esta última aseveración se podría contrastar con un mapa geológico del distrito. Al comparar ambos mapas (geológico vs mapa de radón) se podría observar el rango sobre el cual la geología tiende a variar notoriamente.

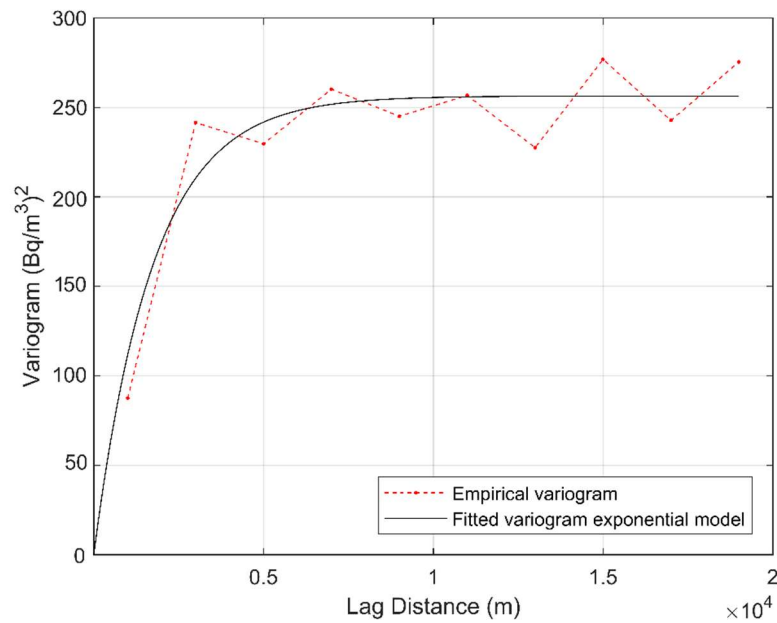


Figura 23: Variograma del mapa de radón de San Miguel

5. Conclusiones

1. La concentración media de radón en el distrito de San Miguel durante la época de medición fue de $160,0 \text{ Bq/m}^3$ con una mediana igual a $155,2 \text{ Bq/m}^3$. La probabilidad de encontrar viviendas por encima de 200 Bq/m^3 es de 26,5%.
2. Se ha observado que una correcta ventilación en las viviendas siempre será la forma más sencilla para reducir el nivel de radón. La ventilación es la forma de mitigación más económica; sin embargo, presenta ciertas limitaciones, como en zonas geográficas con bajas temperaturas y en viviendas en donde el nivel de radón es del orden de los KBq/m^3 .
3. La elaboración de mapas predictivos de radón es el método más directo para localizar las áreas de riesgo es a partir de mediciones de la concentración de radón en las viviendas. Sin embargo, se requiere una densidad considerable de medidas en todo el territorio, de manera que se consiga una cuadrícula suficientemente fina y un número de datos en cada casilla suficiente para que el error muestral no supere un valor prefijado.

6. Recomendaciones

1. Se puede observar que en las viviendas que presentan una mejor ventilación se ha reportado los niveles de radón más bajos. Debido a estos resultados, en las viviendas en las que se ha registrado una concentración superior a 200 Bq/m^3 es recomendable aumentar la tasa de ventilación.
2. Con el objetivo de tener una mejor resolución en el mapa predictivo de radón, se sugiere realizar nuevas mediciones en el distrito de San Miguel. Las mediciones, aún en diferentes años son acumulativas para la elaboración del mapa.
3. Para determinar la principal fuente del gas radón en el interior de las viviendas, además de caracterizar los materiales de construcción mayormente usados en las viviendas, es recomendable realizar un estudio de la exhalación de radón del suelo del distrito.

Bibliografía

- Axelsson, O. (1995). Cancer risks from exposure to radon in homes. *Environmental health perspectives*, 37-43.
- Baskaran, M. (2016). *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*. Springer.
- Benton, E. a. (1969). The restricted energy loss criterion for registration of charged particles in plastics. *Nuclear Instruments and Methods*, 343-347.
- Brosed, A. a. (2011). *Fundamentos de física médica*. Sociedad Española de Física Médica.
- Burchman, W. (1974). *Física Nuclear*. Reverte.
- Durrani, S. A. (1997). *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. World scientific.
- Durrani, S. A. (2013). *Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications*. Elsevier.
- Fleischer, R. L. (1975). *Nuclear tracks in solids: principles and applications*. Univ of California Press.
- Garritz, A. (1998). *Química*. Pearson Educación.
- Guillermo, E. (1994). *Trazas nucleares en sólidos*. Mexico Nat. Auton. Univ.
- INEI, U., & CEPAL, C. (2009). ERÚ: Estimaciones y proyecciones de población por sexo, según departamento, provincia y distrito, 2000-2015. *Boletín Especial* 18.
- Kaplan, I. (1963). *Nuclear physics*. Addison-Wesley.
- Kobetich, E. a. (1968). Energy deposition by electron beams and delta rays. *Physical Review*, 391.
- Kodak. (2017, enero). *Kodalpha Radon-Dosimeters and LR155 SSNTD Specifications*. Retrieved from http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf
- L'Annunziata, M. F. (2012). *Handbook of radioactivity analysis*. Academic Press.
- Liza, R. A. (2017). Mapeo de los niveles de Radón 222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima-Perú) en el periodo 2015-2016. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.
- Liza, R. R.-B. (2017). Tasa de exhalación de 222 Rn del suelo en el yacimiento arqueológico Huaca 20,. *Radiaciones ionizantes y su impacto*, 63.
- Monitorización de la concentración de radón en aire*. (2017, agosto). Retrieved from <http://fpsalmon.usc.es/secretlar/esp/servicios/servicioradon/inforadon.htm>
- Perlman, I. a. (1950). Consistency of Nuclear Radii of Even-Even Nuclei from Alpha-Decay Theory. *Physical Review*, 30.
- Porstendörfer, J. (1994). Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 219-263.
- Quindós, L. a. (1989). Radón, principal fuente de radiación natural. *Revista Española de física*, 22-27.

- Ramachandran, T. a. (2003). Radon-thoron levels and inhalation dose distribution patterns in India dwellings. *Bhabha Atomic Research Centre*.
- Soria, A. F. (2011). *Física nuclear y de partículas*. Universitat de Valencia.
- Štěpán, V. (2019). *International Conference on Protection against Radon at Home and at Work (9th)*.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1994). *Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1994 report to the General Assembly, with scientific annexes*.
- Wichmann, E. H. (1996). *Física Cuántica*. Reverté.
- Zeeb, H. a. (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública*. Organización Mundial de la Salud.

Anexo A

Tabla 5: Concentración, coordenadas y código de detector.

Concentración (Bq/m³)	Coordenadas		Detector
155.3	-12.0642784	-77.0756579	D1-10
310.1	-12.0825607	-77.919152	D1-11
217.4	-12.0774930	-77.934017	D1-12
186.3	-12.0622339	-77.0808644	D1-13
238.1	-12.0810573	-77.0915436	D1-14
196.7	-12.0689223	-77.0955887	D1-15
110.4	-12.0905187	-77.0735793	D1-16
269.1	-12.0822450	-77.0835937	D1-17
134.6	-12.0774930	-77.0934017	D1-18
155.3	-12.0786495	-77.1078469	D1-19
186.3	-12.0601586	-77.0783025	D1-20
103.5	-12.0625012	-77.0803045	D1-21
165.6	-12.0758904	-77.0945408	D1-22
93.2	-12.0634187	-77.0796859	D1-23
103.5	-12.0739635	-77.0794944	D1-24
41.4	-12.0854080	-77.0898958	D1-25
248.4	-12.0817522	-77.0887346	D1-26
320.9	-12.0663890	-77.1012700	D1-27
248.4	-12.0742616	-77.0788740	D1-28
269.1	-12.0920710	-77.0816150	D1-29
93.2	-12.0826641	-77.0832557	D1-30
62.1	-12.0768800	-77.1089950	D1-31
165.6	-12.0849300	-77.0936400	D1-32
20.9	-12.0915922	-77.0839132	D1-33
25.2	-12.0627719	-77.0852757	D1-34

Anexo B

La radiación de fondo a la que el ser humano esta expuesto es en un 55 % atribuida al radón, siendo la principal fuente de radiación natural. Sin embargo, existen otras fuentes como son las medicas con un 15% cósmicas 7%, terrestre 8%, radionucleidos naturales en el cuerpo humano 11%, entre otros con porcentajes por debajo del 2 % (Baskaran, 2016), como se puede observar en la siguiente figura:

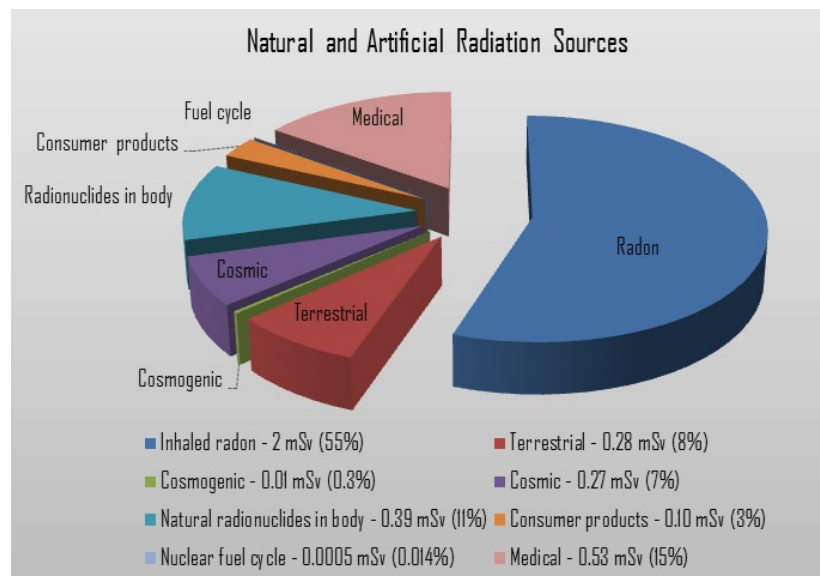


Figura 24: Distribución de la radiación de fondo natural y artificial (Soria, 2011)

En Lima se han realizado mediciones de radiación de fondo natural y se ha reportados que las radiaciones detectas tienen un rango de 171 a 602 nSv/h con un promedio de 367 nSv/h. Si se comparan estos valores con la dosis que representa la inhalación de radón en una persona bajo el modelo BEIR VI, para una concentración de 200 Bq/m³, la dosis por inhalación de radón representa aproximadamente el 15% en Lima (150 uSv/año).