



UNIVERSIDAD NACIONAL

“PEDRO RUIZ GALLO”

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS



**MEDICIÓN DEL NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE
RADÓN-222 EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES DE LA
PROVINCIA DE LAMBAYEQUE - 2017**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

AUTORA

Bach. MARÍA ASUNCIÓN GONZÁLEZ ESQUECHE

ASESORA

M.Sc. PATRIZIA EDEL PEREYRA ANAYA

LAMBAYEQUE - PERÚ

2018

**MEDICIÓN DEL NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE
RADÓN-222 EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES DE LA PROVINCIA DE
LAMBAYEQUE - 2017**

PRESENTADO POR:



Bach. MARÍA A. GONZÁLEZ ESQUECHE
AUTORA



M.Sc. PATRIZIA ÉDEL PEREYRA ANAYA
ASESORA

APROBADO POR:



Dr. ANTERO CELSO VASQUEZ GARCIA
PRESIDENTE



Dra. BLANCA MARGARITA ROMERO GUZMAN
SECRETARIO



M.Sc. JAIME HECTOR SOTERO SOLIS
VOCAL

Junio, 2018

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, a Javier e hijos, a mis padres, a mis hermanos, a mi abuelita Santos y a mi Profesor Jorge Salas Vidal. A Dios por sus bendiciones que cada día me regala, cuidándome, protegiéndome y dándome perseverancia para continuar, a Javier; mi gran admiración profesional, por su amor y paciencia en este período de culminación de mi Proyecto de Tesis, por su confianza y entregar su tiempo para realizarme profesionalmente, a mis hijos mis grandes motivos de vida por su amor y paciencia, a mis padres, por estar a mi lado siempre dándome amor y ánimo a seguir adelante para el logro de mis retos, a mis hermanos, por su amor, a mi abuelita Santos, quien desde el cielo se ha convertido en mi ángel que siempre me acompaña en todo mi camino y a mi profesor Jorge Salas Vidal, quien siempre está presente en mi corazón y desde el cielo sé que me guía y cuida para que todos mis metas se cumplan.

A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios por el camino de la felicidad hasta ahora, a Javier A. Castañeda Akamine, Docente de la UNPRG, mi asesora Dra. Patricia Pereyra Anaya, Dra. Maria Elena López Herrera y Dr. Daniel Palacios, Docentes de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por su gran apoyo intelectual, por su dedicación y su confianza en mí por el logro de mi proyecto de tesis.

A todas las familias que colaboraron permitiendo la instalación de los detectores en sus viviendas.

A Yesabella y Jenny, mi grandes amigas, por sus mensajes de aliento y fortaleza.

A los integrantes del Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares – GITHUNU-PUCP, por su apoyo incondicional

A mis profesores Docentes de la Escuela Profesional de Física - UNPRG, a quienes debo gran parte de mis conocimientos, por su gran apoyo incondicional. Finalmente al Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares – GITHUNU-PUCP y al Instituto de Energía Nuclear- IPEN, por proporcionar los detectores, por su asesoría y haberme brindado su laboratorio, sin cuyo apoyo no hubiera sido posible realizar este trabajo de investigación.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar la concentración de Radón 222 en viviendas de los distritos de la Provincia de Lambayeque y establecer su relación con diversos parámetros: materiales de construcción, ventilación, diseño de las viviendas, constatando si estos niveles están dentro de los valores permitidos establecidos por la normativa dada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Se utilizaron detectores de Nitrato de Celulosa LR-115 tipo 2; los cuales se distribuyeron aleatoriamente en los distritos de la Provincia de Lambayeque de acuerdo a su densidad poblacional, tratando de cubrir tanto zona urbana como rural. Transcurridos los 90 días desde el inicio de la instalación los detectores fueron desinstalados de dichas viviendas y luego llevados al Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP- Lima. Se pudo observar, según los resultados obtenidos que en algunas viviendas de los distritos de la Provincia de Lambayeque los valores fueron: distrito de Lambayeque 367 Bq/m^3 , Túcume 314 Bq/m^3 , y Chóchope de 260 Bq/m^3 los cuales exceden los valores respecto a la Norma Nacional. Se concluyó que 1. las diferencias encontradas de Radón 222 entre las viviendas se deben básicamente a la antigüedad de su construcción, materiales empleados en la construcción de la vivienda, tipo de suelo, y el lugar donde está ubicada la vivienda, siendo la ventilación de la vivienda o la habitación, la condición más importante e influyente en la detección de Radón 222. 2. Las viviendas no ventiladas muestran mayor concentración de Radón 222, tal es el caso de los distritos de Lambayeque, Túcume y Chóchope, y 3. El 15% del total de viviendas sobrepasó el Límite Máximo Permisibles por Norma, esto corrobora la importancia de este trabajo por su aporte a la salud de la población en forma preventiva.

Palabras Claves: Radón 222, Contaminación Ambiental, Decaimiento Radioactivo, Medio Ambiente.

ABSTRACT

The objective of this research was to quantify the concentration of Radon 222 in dwellings in the districts of the Province of Lambayeque and establish its relationship with various parameters: building materials, ventilation, housing design, verifying if these levels are within the values permitted by the regulations given by the Peruvian Institute of Nuclear Energy (IPEN). LR-115 type 2 cellulose nitrate detectors were used; which were randomly distributed in the districts of the Province of Lambayeque according to their population density, trying to cover both urban and rural areas. After 90 days from the start of the installation, the detectors were removed from said homes and then taken to the PUCP-Lima Nuclear Footprint Laboratory. It was observed, according to the results obtained that in some dwellings of the districts of Lambayeque Province the values were: Lambayeque district 367 Bq / m³, Túcume 314 Bq / m³, and Chóchope of 260 Bq / m³ which exceed the values with respect to the National Standard. It was concluded that 1. the differences found in Radon 222 between the houses are basically due to the age of their construction, materials used in the construction of the house, type of floor, and the place where the house is located, being the ventilation of the dwelling or the room, the most important and influential condition in the detection of Radon 222. 2. The non-ventilated houses show a greater concentration of Radon 222, such is the case of the districts of Lambayeque, Túcume and Chóchope, and 3. The 15% of the total housing exceeded the Maximum Limit Permissible by Standard, this corroborates the importance of this work for its contribution to the health of the population in a preventive manner.

Key Words: Radon 222, Environmental Pollution, Radioactive Decay, Environment.

INDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I: ANÁLISIS DEL OBJETO DE ESTUDIO	4
1.1. UBICACIÓN	4
1.2. CÓMO SURGE EL PROBLEMA	4
1.3. COMO SE MANIFIESTA Y QUE CARACTERÍSTICAS TIENE EL PROBLEMA.....	4
1.4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	5
1.4.1. Identificación de la zona de estudio	5
1.4.2. Ubicación y recolección de detectores	6
1.4.3. Baño químico	9
1.4.4. Lectura de trazas de microscopio óptico	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	17
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	17
2.2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.2.1. RADIATIVIDAD NATURAL	18
2.2.1.1. Decaimiento Radiactivo	20
2.2.1.2. Curva de Crecimiento	24

2.2.1.3. Series Radiactivas.....	27
2.2.1.4. Decaimientos dentro de las Series Radiactivos	30
2.2.1.5. Unidades de Radiactividad	32
2.2.1.6. Decaimientos α	37
2.2.2. EL RADÓN	39
2.2.2.1. Propiedades de Radón 222	40
2.2.2.2. Movimiento del Radón	43
2.2.2.3. Efectos del Radón 222 sobre la salud	45
2.2.2.4. Entrada de Radón en edificios.....	46
2.2.3. DETECTORES EN HUELLAS NUCLEARES EN ESTADO SÓLIDO	47
2.2.3.1. Detector LR 115 Tipo 2	48
2.2.3.1.1. Características del Detector LR 115 tipo 2	49
2.2.4. CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN	50
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS	52
3.1.1. Resultados de la detección de Rn 22 en los distritos de la Provincia de Lambayeque año 2017	52
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	61
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	62
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	66

ANEXOS

ANEXO I	67
ANEXO II	69
ANEXO III	72
ANEXO IV	78
ANEXO V	81

LISTA DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1. Consideraciones de muestreo, números de viviendas a monitorear por Km ²	5
Tabla 2. Núcleos radiactivos naturales con vidas medias del mismo orden o mayor que la edad del universo (4.5 x10 ⁹ años)	27
Tabla 3. Isótopos que generan las tres series radioactivas naturales	29
Tabla 4. Isótopo de la serie de U ²³⁸	30
Tabla 5. Factores de ponderación de la radiación wR para distintos tipos de radiación y Energía	35
Tabla 6. Propiedades físicas y químicas del Radón 222	42
Tabla 7. Características del período de muestreo durante el 29 de Setiembre de 2017 a 29 de Diciembre de 2017	52
Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10. Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 del ambiente monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo para cada vivienda de los distritos de la provincia de Lambayeque	54
Tabla 11 Máximo y mínimo del período de monitoreo en los distritos de la provincia de Lambayeque	57
Tabla 12. Estadística del período de monitoreo en Bq/m ³	58
Tabla 13 y Tabla14. Ubicación GPS de los lugares de medición Distritos de la Provincia de Lambayeque	70
Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 Características del lugar de monitoreo.....	73

LISTADO DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Hoja de instrucción para el uso del detector de Radón 222 diseñada por el grupo de investigación en técnicas de Huellas Nucleares GITHUNU – PUCP	6
Figura 2. Detector LR-115 tipo 2 adherido sobre la pared en el interior de la vivienda	7
Figura 3. Cámaras de difusión debidamente ubicadas	7
Figura 4. Detectores desnudos y colocados en su respectivo sobre	8
Figura 5. Cámaras de difusión selladas con cinta gutapercha	8
Figura 6. Detectores cubiertos de papel aluminio y envueltas en bolsa plástica en su momento de desinstalación	9
Figura 7. Medidas para el preparado del baño químico	10
Figura 8. Sensores ubicados en el baño químico mediante sujetadores	10
Figura 9. Equipo para el grabado de detectores LR 115	11
Figura 10. Procedimiento de grabado, enjuague y secado de los detectores LR 115	12
Figura 11. Detectores preparados sobre el porta muestras	13
Figura 12. Lectura del detector mediante el microscopio	14
Figura 13. Software Leica Application Suite, para conteo de trazas	14
Figura 14. Campos de conteo del detector LR 115	15
Figura 15. Imagen digitalizada mostrada en PC	15
Figura 16. Huellas obtenidas de una de ls viviendas del Distrito de Lambayeque debido a la desintegración de Radón 222	16
Figura17. La curva de Decaimiento exponencial	23

Figura 18. Cuando se toma el logaritmo natural de la ecuación (6), da $\ln A = \ln A_0 - \lambda t$ Cuando el $\ln A$ se grafica contra t , da una línea recta cuya pendiente es igual a $-\lambda$	24
Figura 19. A medida que los núcleos padre del P-32 decaen por emisión β , hay un crecimiento de los núcleos hijo estables S-32	25
Figura 20. Crecimiento y decaimiento de un núcleo hijo inestable	26
Figura 21. Serie de uranio – radio. El número másico de cada elemento en la serie está dado por $4n + 2$, donde n es un entero positivo	28
Figura 22. Variación con el tiempo de la cantidad de Rn^{222} , cuya vida media es de 2.62d y que se forma por el decaimiento (con factor $f=1$) del Ra^{226} , cuya vida media es de 1600 a	32
Figura 23. Esquema de decaimientos del Ra^{226} al Rn^{222} . Las líneas oblicuas llenas indican los posibles decaimientos α mientras que las líneas de puntos indican subsecuentes decaimientos γ	37
Figura 24. Potencial efectivo esquemático para el decaimiento de una partícula α	39
Figura 25. Propiedades químicas de Radón 222	42
Figura 27. El Radón puede moverse a través grietas en las rocas y a través de espacios de poro en suelos	43
Figura 28. Algunos átomos de radón permanecen atrapado en el suelo y la descomposición para formar plomo estable; otros átomos escapan rápidamente en el aire	44
Figura 29. El Radón puede ingresar a una casa a través de muchos caminos	47
Figura 30. Formación de huellas en LR 115 Tipo 2, en rangos de energía luego de un baño químico	49
Figura 31. Puntos de Ubicación de detectores en los distritos de la Provincia de Lambayeque	53

Figura 32. Resultados de la medición de concentración de Rn 222, realizada en los distritos de la Provincia de Lambayeque durante el período de monitoreo	57
Figura 33. Histograma de los promedios de las concentraciones de radón 222 en los distritos de la Provincia de Lambayeque	58
Figura 34. Histograma del Logaritmo natural de las concentraciones obtenidas	59
Figura 35. Prueba de Anderson – Darling para período de monitoreo	60

INTRODUCCIÓN

El Radón 222 es de origen natural. procedente de la desintegración radiactiva de pequeñas cantidades de uranio, se encuentra en casi todos los tipos de suelo, incluso en la roca y el agua, la Organización Mundial de la Salud lo ha catalogado como el principal responsable en la incidencia de cáncer de pulmón en personas no fumadoras. (OMS, 2016, pág.12)

Se han realizado diversos estudios para medir los niveles de concentración de Radón 222 a nivel mundial, debido al riesgo que conlleva la acumulación de este gas en interiores y los efectos en los habitantes, como por ejemplo el desarrollo de ciertos tipos de cáncer, cáncer pulmonar y estomacal. Como resultado de estos estudios, diversos países tienen una reglamentación definida para concentraciones de Radón 222 en viviendas. En la provincia de Lambayeque hasta la fecha no se registra ninguna investigación enfocada a medir los niveles de concentración de Radón 222 en nuestras viviendas y mucho menos sus efectos en los habitantes, tampoco existen investigaciones sobre la existencia de este gas radioactivo en las viviendas y su incidencia de cáncer pulmonar no obstante las estadísticas del Hospital Provincial Docente "Belén" de la ciudad de Lambayeque se tiene registrado una alta tasa de incidencia de cáncer pulmonar para esta provincia, esto alcanza una notoria relevancia dadas las características especiales de las viviendas en la región. La principal característica que hace importante la medición de este radioisótopo es que no es percibido a nuestros sentidos al ser un gas noble incoloro, inodoro e insípido, por tanto al ser descendiente del Radio 226 presente en los minerales del subsuelo son sometidos a un fenómeno de transporte de altas concentraciones a bajas concentraciones difundándose a través del subsuelo hasta alcanzar la superficie, exhalando hacia la atmósfera concentrándose en lugares cerrados (principalmente en lugares con poca ventilación), viviendas y lugares de trabajo haciéndose parte del aire que respiramos. Al respecto.

Efstratios *et al* (2014), En su artículo Fuentes de Radón y riesgo asociado en términos de exposición y dosis, señala que el radón concierne a la comunidad científica internacional desde principios del siglo

XX, inicialmente como emanación del radio y casi en la segunda mitad del siglo como un peligro significativo para la salud humana. Hoy en día, hay una evidencia concreta de que el radón y su progenie pueden causar cáncer de pulmón.

Rojas (2016) en su tesis sobre Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de Lima, señala que las diferencias encontradas en las concentraciones de Radón 222 se deben básicamente a los materiales de construcción, al tamaño de las habitaciones, a la ventilación, al diseño de las viviendas.

Liza (2017) en su investigación sobre Mapeo de Niveles de radón 222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima – Perú) en el período 2015-2016, señala que en las viviendas donde el recubrimiento de las paredes es pintura, no se ha podido determinar una relación con las diferencias de los niveles de Radón y el tipo de pintura; sin embargo, sí se ha podido encontrar que en cuatro puntos de medición donde las paredes no presentan acabados las concentraciones superan los 200 Bq/m³. Este resultado respalda la importancia de las capas de pintura como un blindaje contra el Radón que proviene de los materiales de construcción.

Pérez (2015) en su investigación sobre el Estudio de la contaminación ambiental debido a elementos radiactivos naturales, usa detectores de nitrocelulosa (LR-115 tipo 2) y aplica la técnica de huellas nucleares, lo que le permite nos permiten tener un indicador de la presencia de radón en el aire durante diferentes estaciones del año y de otros posibles contaminantes radiactivos.

El problema científico se enunció: ¿El nivel de Concentración de Radón 222 existente en viviendas unifamiliares de la Provincia de Lambayeque se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles?

La hipótesis quedó definida: Los niveles de Concentración de Radón 222 en las viviendas unifamiliares de los distritos de la Provincia de Lambayeque, exceden los Límites Máximos Permitidos, dependiendo de la ubicación, ventilación y materiales de construcción.

Siendo los objetivos siguientes:

General:

1. Cuantificar la concentración de Radón 222 en las viviendas de los distritos de la Provincia de Lambayeque, y compararlos con los valores permitidos por la Norma Nacional.

Específicos:

1. Identificar las viviendas que sobrepasan los niveles de concentración de Radón 222 máximos recomendados bajo norma.
2. Establecer posibles relaciones entre la concentración de Radón 222 con su distribución en los ambientes de las viviendas, los materiales de construcción y el tipo del recubrimiento del suelo de las casas de la zona de estudio.
3. Comparar los niveles de concentración de Radón 222 obtenidos, con los valores establecidos por la normativa dada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), reglamento de protección radiológica D.S 009-97 EM, en el anexo IV, respecto al Rn 222 en viviendas.
4. Elaborar un mapa de Radón 222 propio de la Provincia de Lambayeque.
5. Gestionar con ayuda de los agentes sociales pertinentes la mitigación de los efectos del gas radón 222 en viviendas.

Esta Investigación contribuirá a establecer como requisito de construcción dentro de una zona a poblarse la medición previa de este gas radioactivo, así como diseñar en forma adecuada la construcción de viviendas para que se logre una ventilación eficiente y generar una señal de advertencia a las familias en cuyas viviendas se encuentran niveles de Radón 222 por encima del permisible con la finalidad de mitigar la presencia de este gas radioactivo en sus viviendas.

CAPITULO I: ANÁLISIS DEL OBJETO DE ESTUDIO

1.1. UBICACIÓN

La Provincia de Lambayeque está ubicada en el Departamento de Lambayeque, con una población de 296, 645 hab., una extensión 9 364,63 Km² y densidad poblacional es de 31,68 hab/km². Está conformada por 12 distritos. Para esta investigación las zonas de estudio fueron los distritos de: Lambayeque, Chóchope, Illimo, Jayanca, Mochumi, Mórrope, Motupe, Olmos, Pacora, Salas, San José y Túcume,

1.2. Cómo surge el problema

Debido a la creciente aparición de estudios que relacionan la presencia de este gas radioactivo en las viviendas y su posible influencia en la salud de sus moradores, es que surge la necesidad de investigar el Nivel de contaminación de Radón 222 en los diferentes tipos de viviendas de los distritos de la Provincia de Lambayeque, para correlacionar factores que influyan en altas concentraciones y establecer protocolos de mitigación a fin de prevenir riesgos adicionales en la salud de sus pobladores.

1.3. Cómo se manifiesta y qué características tiene el problema

En nuestra región no se ha podido encontrar antecedentes de este tipo de estudios en viviendas, motivo por el cual obliga a implementar un método debidamente sustentado para medir la concentración este gas radiactivo en las viviendas de los distritos de la Provincia de Lambayeque, y que la presencia de este gas se encuentre entre los valores establecidos por la normativa dada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), reglamento de protección radiológica D.S 009-97 EM, en el anexo IV, respecto al Rn 222 en viviendas, implementando así una serie de procedimientos que implica la selección, ubicación, recolección y procesamiento de los detectores destinados para este tipo de investigación.

1.4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA

Para la evaluación de los detectores del presente trabajo de investigación, como el uso de los materiales y equipos, se contó con el apoyo del laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP, el cual garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos para la medición de Radón 222.

1.4.1. Identificación de la zona de estudio

La Provincia de Lambayeque está ubicada en el Departamento de Lambayeque, con una población de 296, 645 hab. Extensión 9 364,63 Km² y densidad poblacional es de 31,68 hab/km² y está conformado por 12 distritos: Lambayeque, Chóchope, Illimo, Jayanca, Mochumí, Mórrope, Motupe, Olmos, Pacora, Salas, San José y Túcume, los cuales para este trabajo las viviendas de dichos distritos son las muestras para esta Investigación. La cantidad mínima de viviendas a monitorear en los distritos de la Provincia de Lambayeque están basadas según criterio de densidad poblacional establecida en el proyecto 120-PNCIP-PIAP-2015, haciendo un total de 46 viviendas a monitorear como mínimo. De acuerdo a lo establecido, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de monitoreo en la Investigación, mostrado en la siguiente Tabla:

Tabla 1
Consideraciones de muestreo; Números de viviendas a monitorear por Km²

Criterio	N° habitantes/Km²	Consideraciones	Tipos de recubrimiento
		N° viviendas/Km²	de la vivienda
TIPO A	< 300, 450 >	Monitorear 8 viviendas	Falso piso ó contrapiso, piso de tierra, cemento pulido y mayólica
TIPO B	< 150, 300 >	Moniterear 4 viviendas	Mayólica, piso de tierra, cemento pulido
TIPO C	< 150, 0 >	Monitorear 2 viviendas	Piso de tierra, falso piso, cemento pulido

Nota. Tipo A, B y C ; según el N° Habitantes/Km²

1.4.2. Ubicación y recolección de detectores

Para la ubicación y recolección de los detectores se consideró el siguiente procedimiento:

1. Los detectores se distribuyeron aleatoriamente en los distritos de la Provincia de Lambayeque según criterio de densidad poblacional, tratando de cubrir tanto zona urbana como rural.
2. Cada responsable del hogar fue informado del objetivo de esta investigación, antes de instalar los sensores en sus viviendas. Se utilizó la hoja de instrucciones del proyecto 120-PNCIP-PIAP-2015 utilizada en el monitoreo de Lima y diseñada por el grupo GITHUNU – PUCP. (ver Figura 1)

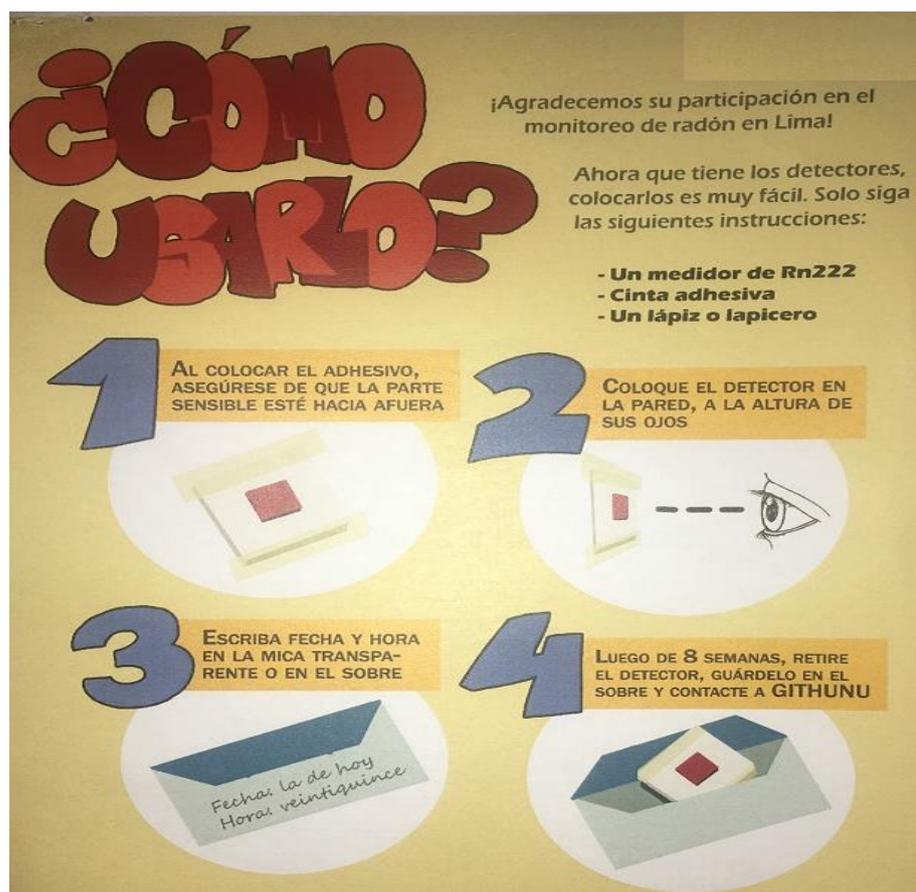


Figura 1. Hoja de instrucción para el uso del detector de Radón 222 diseñada por el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares GITHUNU – PUCP.

3. En las viviendas seleccionadas se instalaron 4 detectores: 02 detectores desnudos, dos (02) cámaras de difusión por cada vivienda. Los detectores pasivos desnudos son láminas de forma cuadrada de 20 mm de lado, sujetos en un soporte cuadrado de 60 mm de lado tomados de una película de transparencia, debidamente codificados, el cual fue colocado directamente sobre la pared, a la altura de los ojos como se muestra en la siguiente figura



Figura 2. Detector LR-115 tipo 2 adherido sobre la pared en el interior de la vivienda. *Elaboración propia.*

Las cámaras de difusión fueron colocadas próximas entre sí sobre una mesa o repisa, en un lugar seguro, para no ser manipuladas ni removidas durante el período de medición. mostrado en la Figura 3.



Figura 3: Cámaras de difusión debidamente ubicadas. *Elaboración propia.*

4. Los detectores fueron colocados en una habitación del primer piso, buscando de preferencia lugares poco ventilados, alejados de fuente de calor, en el momento de la instalación en la cámara blanca se anotó la fecha de inicio de medición, tal como se aprecia en la figura anterior.
5. Al ser instalados los detectores se aplicó una ficha técnica al responsable del hogar, que contiene información con respecto al tipo de material, tipo de suelo, etc. de la vivienda (ver Anexo I).
6. Al cumplir los 90 días desde el inicio de la medición, los detectores desnudos fueron colocados dentro un sobre anotándose su fecha de retiro.(Figura 4)



Figura 4. Detectores desnudos desinstalados y colocados en su respectivo sobre. *Elaboración propia.*



Figura 5. Cámaras de difusión selladas con cinta gutapercha. *Elaboración propia*

en los detectores G2 (cámara blanca) también se anotó la fecha de retiro (ver Figura 5), ambos tipos de detectores fueron cubiertas con papel aluminio y depositadas en bolsas plásticas para evitar que sigan registrando la radiación natural, como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Detectores cubiertos de papel aluminio y envueltas en bolsa plástica en el momento de su desinstalación. *Elaboración propia*

7. Los detectores ya embalados fueron remitidos al Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP para su posterior análisis, la cual se detalla posteriormente.

1.4.3. Baño químico

En el Laboratorio de análisis se desempacan los sensores para su limpieza y posteriormente ser sometidos al proceso de revelado o baño químico para que las huellas latentes en el detector sean visibles al microscopio óptico. A cada detector se le sujeta un cable delgado, cada uno de los detectores lleva un código ya establecido de acuerdo al distrito.

El siguiente paso es determinar las proporciones de agua y NaOH, en un vaso de precipitado de 500 ml se vierte 200 ml de agua bidestilada que será el medio termostático y en otro vaso de precipitado de 150 ml la solución de 110 ml de NaOH que tendrá una normalidad de 2,5 N. La estabilidad y el control de los parámetros críticos de temperatura, concentración de la solución y el tiempo de grabado son parámetros básicos con el fin de obtener resultados fiables y precisos.

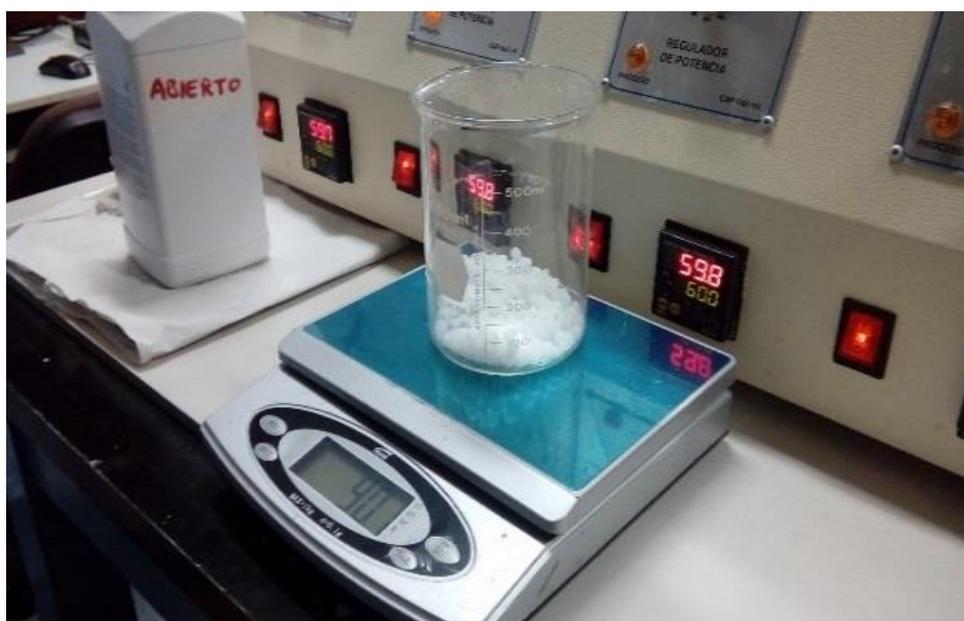


Figura 7. Medidas para el preparado del baño químico. *Elaboración propia*

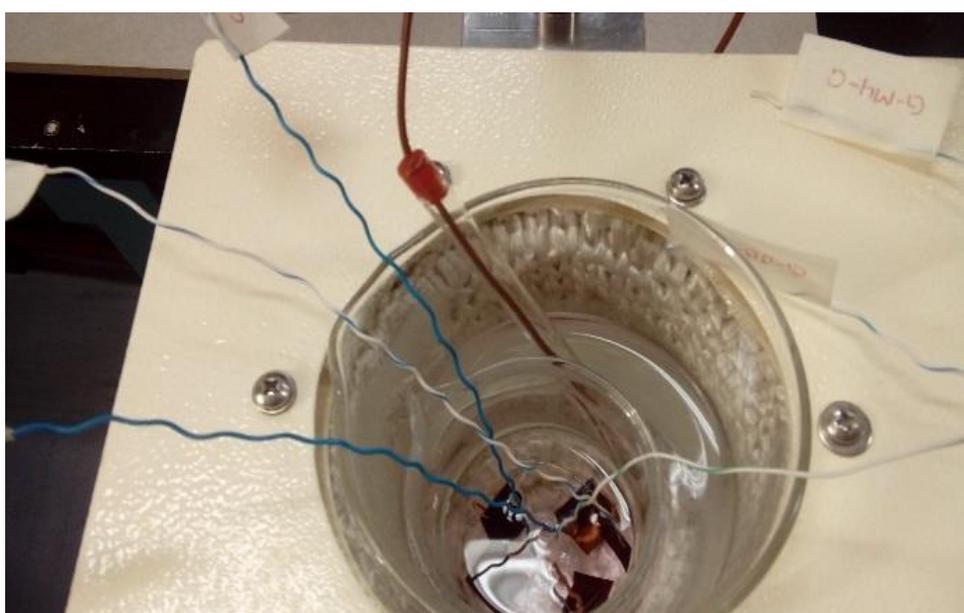


Figura 8. Sensores ubicados en el baño químico mediante sujetadores. *Elaboración propia*

Se enciende el aire acondicionado regularizando a una temperatura ambiente a 25°C, alrededor de 30min se espera para encender el baño, todos los controladores deben ser fijados a una potencia aproximada de 40% y a una temperatura de $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ temperatura a la cual se realiza el grabado químico, el tiempo necesario para que llegue a estabilizarse a esta temperatura es de una hora aproximadamente, luego se sumerge cada detector en el baño en promedio a 6 detectores por baño, esperando 90min en el que dura el ataque químico, se extraen los detectores y se someten al enjuague. Es importante que la temperatura se mantenga constante durante todo el proceso de grabado. Figura 9.



Figura 9. Equipo para el grabado de detectores LR 115. *Elaboración propia.*

Luego de haber sometido los detectores al grabado químico durante 90min, estos se sumergen en agua destilada, para detener la corrosión del nitrato de celulosa durante 30min, luego se enjuagan una vez más con agua destilada a chorros varias veces,



Figura 10. Procedimiento de grabado, enjuague y secado de los detectores LR 115. *Elaboración propia.*

este proceso es necesario para neutralizar el polímero, finalmente se deja secar por un período de 24 horas.

1.4.4. Lectura de trazas por microscopio óptico

Una vez transcurrido el tiempo de secado, se procede a preparar los detectores LR 115 tipo 2 para su lectura, sobre un porta muestras se colocan los detectores cada uno con su código.

Luego se enfoca el objetivo del microscopio con aumento de 10X sobre la superficie del detector, para poder observar las trazas generadas por las partículas alfas, como se aprecia en las Figuras 11 y Figura 12.



Figura 11. Detectores preparados sobre el porta muestras. *Elaboración Propia.*

El microscopio cuenta con conexión a cámara CCD la cual permite digitalizar las



Figura 12. Lectura del detector mediante el microscopio. *Elaboración Propia.*

imágenes observadas mediante conexión a la PC, empleando el Software Leica Application Suite, que permite el conteo de trazas. Figura 13.



Figura 13. Software Leica Application Suite, para conteo de trazas. *Elaboración Propia.*

Se consideran 20 campos distribuidos tal como se muestra en la siguiente Figura, que son enfocados en el microscopio en forma manual y luego digitalizados

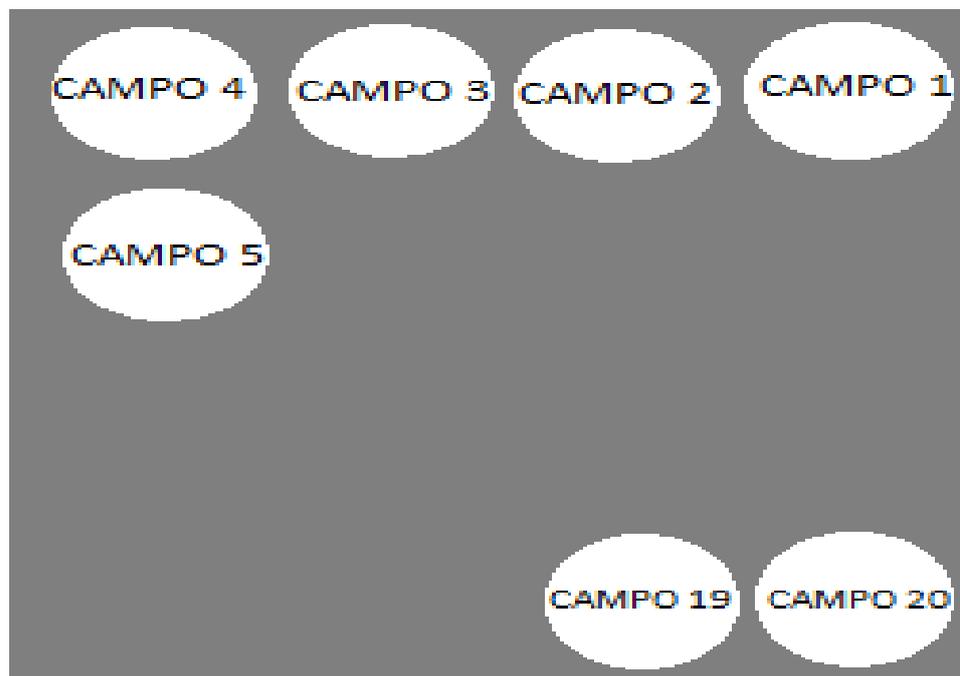


Figura 14. Campos de conteo del detector LR 115. *Elaboración Propia*

El conteo de trazas en cada campo se realiza en la imagen digitalizada mostrada en la PC, de momento el conteo de trazas se realiza en forma visual. Figura adjunta.

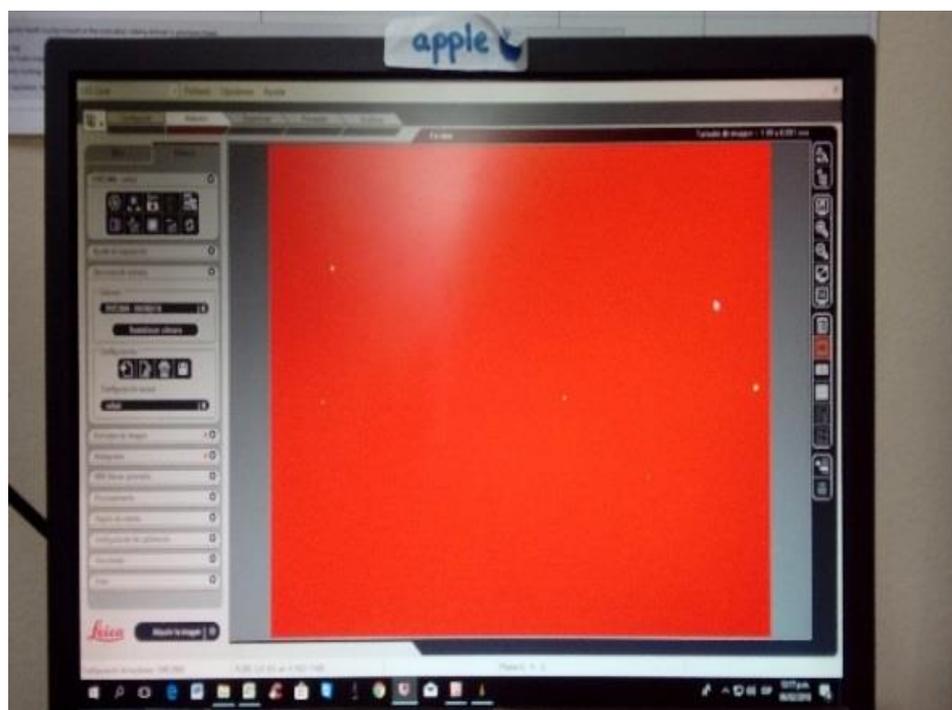


Figura 15. Imagen digitalizada mostrada en PC. *Elaboración Propia.*

El software nos proporciona un área de lectura de $1,19 \times 0,891 \text{ mm}^2$ lo cual permite determinar la densidad de trazas por unidad de área correspondiente para los 20 campos de medición realizados.

En la siguiente Figura 16, se muestra una de las huellas observadas por el microscopio óptico, donde se puede observar las huellas claramente que son los puntos luminosos color amarillo, ya que la luz ha traspasado completamente el detector, cada huella representa el registro de una partícula alfa en el detector; estos son los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

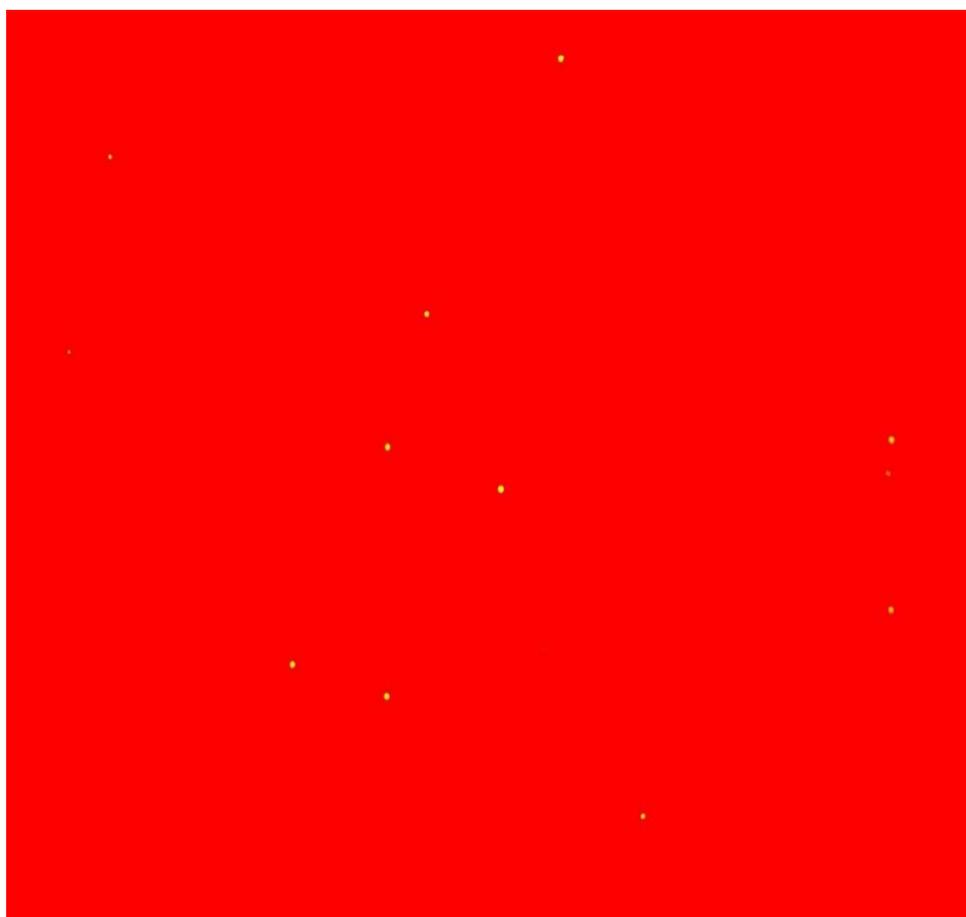


Figura 16. Huellas obtenidas de una de las viviendas del Distrito de Lambayeque debido a la desintegración de radón 222 . *Elaboración propia.*

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Rojas (2016) en su tesis sobre Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de Lima, señala que las diferencias encontradas en las concentraciones de Radón 222 se deben básicamente a los materiales de construcción, al tamaño de las habitaciones, a la ventilación, al diseño de las viviendas, encontrando que la velocidad con la que entra y sale el aire de una casa es un parámetro determinante, siendo la ventilación una de las formas más efectivas de reducir las concentraciones del Radón 222 en una vivienda habitada.

Liza (2017) en su tesis Mapeo de Niveles de radón 22 en el distrito de San Martín de Porres (Lima – Perú) en el período 2015-2016, indica que en las viviendas donde el recubrimiento de las paredes es de pintura, no se puede determinar una relación con las diferencias de los niveles de Radón y el tipo de pintura; sin embargo, sí se puede encontrar que en cuatro puntos de medición donde las paredes no presentan acabados las concentraciones superan los 200 Bq/m³. Este resultado respalda la importancia de las capas de pintura como un blindaje contra el Radón que proviene de los materiales de construcción.

Pereyra, *et al* (2014) en el artículo Mediciones de la Concentración de Radón 222 en residencias de Lima – Perú, se registra valores que corresponden a concentraciones por debajo de 200 Bq/m³, y se encuentra que los valores altos registrados pueden indicar cierta correlación entre la edad de la vivienda y el nivel de radón 222 presente, asimismo los niveles en sótanos aumentan considerablemente, y son justamente 3 de los 4 casos con mayor concentración de Rn 222 medido. Se puede entender también que en el caso de los sótanos, las tuberías de agua incrementan los niveles de radón junto con la poca ventilación, factor clave en la difusión de radón.

Lantz , *et al* (2013) En el artículo “Radón, tabaquismo y cáncer de pulmón: la necesidad de reorientar la política de control del radón”, la exposición al radón es la segunda causa principal de cáncer de pulmón, y el riesgo es significativamente mayor para los fumadores que para los no fumadores. Más del 85% de las muertes por cáncer de pulmón inducidas por el radón se encuentran entre los fumadores.

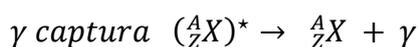
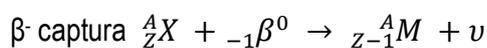
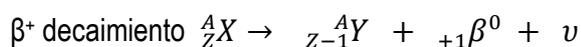
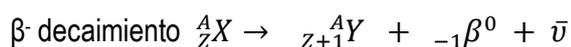
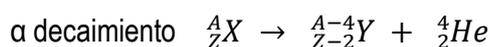
2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1 RADIATIVIDAD NATURAL

En 1896 Becquerel estaba llevando a cabo ciertos estudios sobre la luminiscencia de las sales de uranio excitadas por luz ordinaria. En el curso de sus experiencias, observó que las radiaciones luminiscentes eran capaces de reproducir las siluetas de ciertos objetos opacos colocados sobre unas placas fotográficas, aun cuando éstas se encontraran adecuadamente protegidas por papel negro. El asombroso descubrimiento de Becquerel consistió en la observación de que la radiación emitida por el uranio subsistía aun en ausencia de la luz de excitación, demostrando además que la radiación se ponía de manifiesto para todos los compuestos del uranio, en relación directa con su contenido en dicho elemento, y que tal emisión espontánea de radiación, o radiactividad, era una propiedad del átomo de uranio en su estado normal. Para 1898, Marie y Pierre Curie habían tenido éxito en separar la cantidad de 1gm de sustancia activa alrededor de pechblenda. La nueva sustancia fue denominada *polonio* en honor de la Polonia natal de Marie Curie. A los esposos Curie se les concedió juntamente con Becquerel el premio Nobel de física en 1903 por este descubrimiento. En 1911 a Marie Curie recibió el premio Nobel de química por aislar el radio, elemento naturalmente radiactivo. Los físicos Ingleses Ernest Rutherford y Frederic Soddy demostraron que en todos los procesos radiactivos, ocurre una transmutación de elementos. (Acosta *et al*; 2015; pág. 322)

Rutherford descubrió que un campo magnético separaba la radiación en partículas α , que son núcleos de helio, y partículas β , que son electrones. Posteriormente Paul Willard encontró aún otro tipo de radiación diferente, rayos γ , forma muy energética de ondas electromagnéticas. Cualquier núclido que cambia su estructura emitiendo rayos γ o alguna partícula nuclear como las partículas α , β^- , ó β^+ es llamado núcleo *radiactivo*. Hay 272 núcleos estables entre los elementos encontrados en la naturaleza, y todos los demás, conocidos como radioisótopos, son radioactivos en alguna forma.

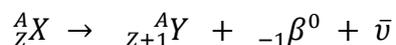
Los siguientes procesos son representativos de la desintegración de los nucleídos naturalmente radiactivos:



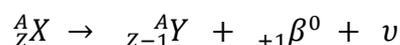
En estos procesos ν y $\bar{\nu}$ representan al neutrino y al antineutrino, y $({}_Z^A X)^*$ representa un átomo en un estado excitado de la energía. El átomo regresa al estado base ${}_Z^A X$ por la emisión de un rayo γ .

Este es un fenómeno físico mediante el cual un átomo inestable (llamado padre) decae, emitiendo espontáneamente partículas o radiación electromagnética, en uno o más átomos (llamados hijas). El átomo resultante al cual decae el padre puede continuar siendo inestable, y por lo tanto sigue decayendo hasta alcanzar una configuración electrónica estable. (Acosta, V; 2015; pág. 323)

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



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



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

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

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

2.2.1.1. DECAIMIENTO RADIATIVO:

En un decaimiento radiactivo, un núcleo inicialmente inestable denominado padre, emite una partícula y decae en un núcleo denominada hija; del nacimiento de la

hija se ocasiona por la muerte del padre. La hija puede ser el mismo núcleo en un estado de energía más bajo, como es el caso del decaimiento γ , o un núcleo completamente nuevo, como ocurre en los decaimientos α y β . Todos los decaimientos nucleares siguen la misma ley de *decaimiento radiactivo* sin importar qué tipo de partículas sean emitidas. Si inicialmente N_0 núcleos padres inestables, el número N de padres que quedan después de un tiempo t es

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

La constante λ se denomina constante de decaimiento o constante de desintegración y depende del proceso particular de decaimiento. La ecuación (1) es una ley estadística y no determinista que da el número esperado de padres que sobreviven después de un tiempo t . Sin embargo, si N_0 es muy grande (como ocurre siempre en la práctica, el número presente de supervivientes y el número esperado casi siempre difieren en una fracción muy insignificante de N_0 .

La rapidez de decaimiento de una muestra radiactiva se mide generalmente por la vida media, $T_{1/2}$, definida como el intervalo, en el cual el número de núcleos padres se reduce a la mitad. La vida media se obtiene en términos de λ así.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \dots\dots (2)$$

Así, con N_0 núcleos inicialmente, al cabo de un tiempo $T_{1/2}$ quedarían $N_0/2$; después de un tiempo $2T_{1/2}$, quedarían $N_0/4$ y así, sucesivamente.

Otra cantidad que mide la rapidez con que una muestra decae es el promedio o tiempo de vida medio de un núcleo T_m , dado por

$$T_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \quad \dots\dots(3)$$

La ley que describe el aumento de los núcleos hija, suponiendo que éstos son estables, se obtiene de (1)

$$N_D = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad \dots\dots (4)$$

En muchos decaimientos el núcleo hija es también inestable y decae posteriormente en una nieta. La actividad de una muestra se define como el valor de la rapidez de desintegración y representa la razón a la cual ocurren las desintegraciones de los núcleos:

$$\text{Actividad} = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \quad \dots\dots (5)$$

La unidad de medida de rapidez de desintegración o actividad es el Curie, definido como $1\text{Ci} = 3.700 \times 10^{10}$ desintegraciones/seg, o el milicurie (mCi), que es igual a 3.70×10^7 desintegraciones/seg. La Unidad de radioactividad en el Sistema Internacional (SI) es el Becquerel que ha sustituido al Curie, $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}$ Bq.

Donde $\lambda N_0 = A_0$ es la actividad inicial, y $\lambda N = A$ es la actividad en el tiempo t. Esto da para la actividad

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

o, en forma logarítmica,

$$\ln A = \ln A_0 - \lambda t \quad \dots\dots (7)$$

Si el logaritmo natural de la actividad se grafica contra el tiempo como en la figura 2, producirá según la ecuación 7 una línea recta con pendiente igual a $-\lambda$. La constante de desintegración λ para el P-32 se encuentra a partir de la pendiente y da

$$\lambda = \frac{10.8 - 7.0}{78 - 0} = 0.049 \text{días}^{-1}$$

Por ejemplo, la actividad del P-32 se ha reduce a la mitad del valor original cuando se

encuentra en 25 000 cuentas/min. El tiempo correspondiente muestra entonces que la vida media para el P-32 es de 14.3 días. Usando este valor en la ecuación (2), podemos encontrar el valor de la constante de desintegración.

En forma gráfica, si se representara la Actividad en función del tiempo transcurrido se podrían observar las siguientes curvas de decaimiento dependiendo del nucleído, es decir, dependiendo del $t_{1/2}$, característico de cada nucleído. Figura 17.

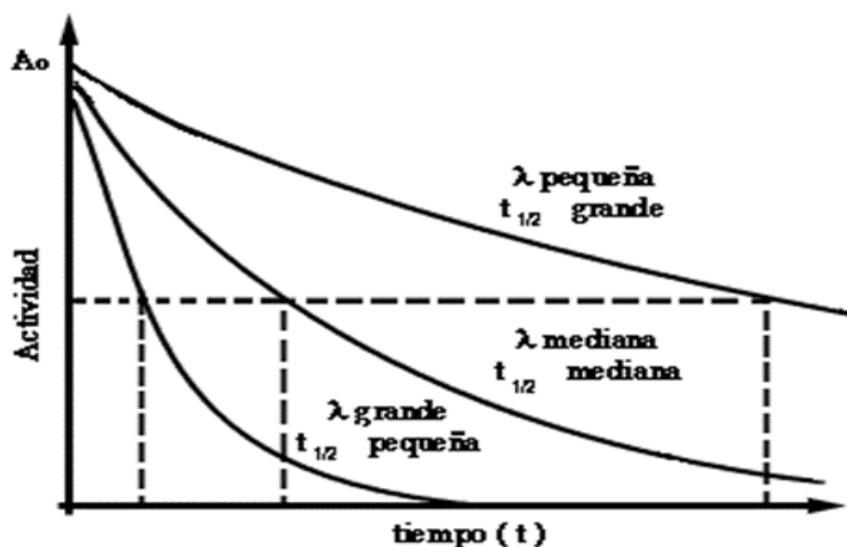


Figura 17. La curva de decaimiento exponencial. Recuperado de Segre, E. Núcleos y partículas (2014)

Por lo tanto, si hay dN_1 átomos con un tiempo de vida t_1 , dN_2 con un tiempo de vida t_2 , y así sucesivamente, entonces la vida media T se define en la forma

$$\bar{T} = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + \dots}{dN_1 + dN_2 + \dots} \quad \dots\dots (8)$$

ó en términos de cálculo integral

$$\bar{T} = \frac{\int_{t=0}^{\infty} t dN}{\int_{N_0}^0 dN} = - \frac{\int_{t=0}^{\infty} t dN}{N_0} \quad \dots\dots (9)$$

Sin embargo,

$$dN = d(N_0 e^{-\lambda t})$$

$$dN = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

La sustitución en la ecuación (9), e integrando por partes da ahora

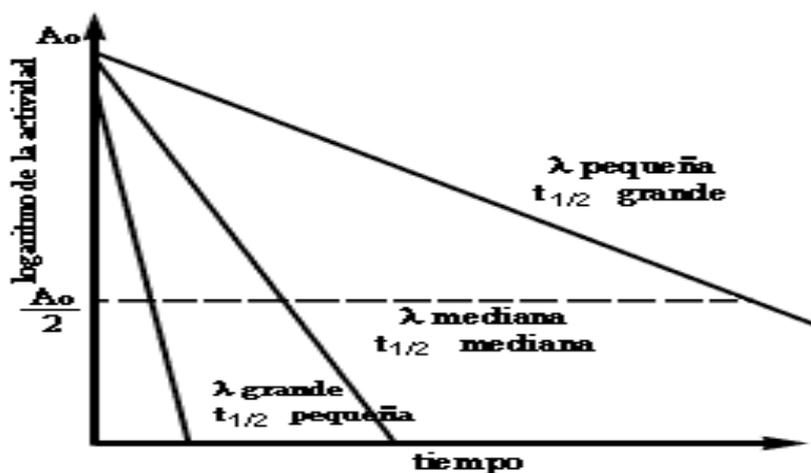


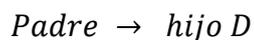
Figura 18. Cuando se toma el logaritmo natural de la ecuación (6), da $\ln A = \ln A_0 - \lambda t$. Cuando el $\ln A$ se grafica contra t , da una línea recta cuya pendiente es igual a $-\lambda$

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \dots \dots (10)$$

$$\bar{T} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \text{ ó } T_{1/2} = 0,693\bar{T} \dots \dots (11)$$

2.2.1.2. CURVA DE CRECIMIENTO

Cuando se desintegra un núcleo de decaimiento llamado núcleo padre P, se incrementa el número del radioisótopo hijo. En forma esquemática, esto es



En el tiempo $t = 0$ segundos, el número de núcleos padre es N_0 mientras que el número de núcleos hijo de cero. En algún tiempo posterior t , el número de núcleos padre es N

mientras que el número de núcleos hijo es $N' = N_0 - N$.

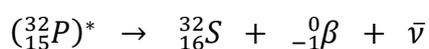
La ecuación que describe el decaimiento del padre P es

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Mientras que la que describe el incremento del número de átomos hijo es

$$N' = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad \dots\dots (12)$$

El decaimiento exponencial del P-32 se muestra en la figura 19, donde el esquema de decaimiento es



Note que en el instante de la vida media los núcleos hijo y padre son iguales en número.

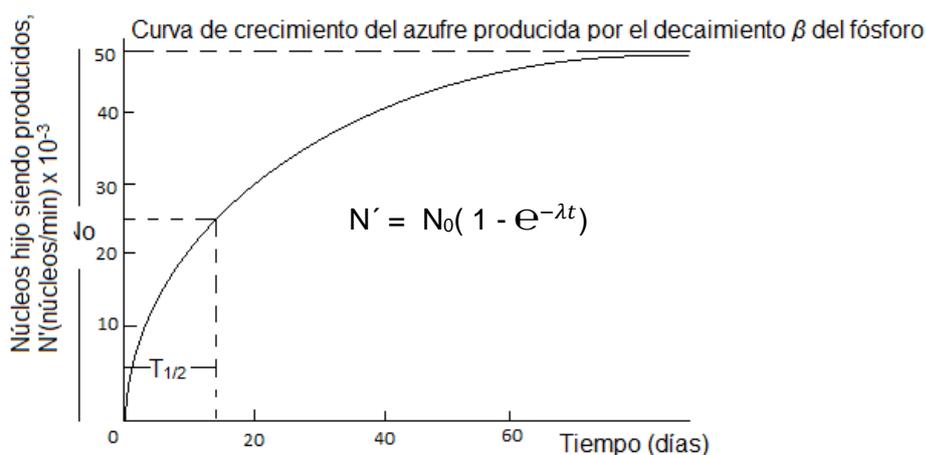


Figura 19. A medida que los núcleos padre del P-32 decaen por emisión β , hay un crecimiento de los núcleos hijo estables S-32

Recuperado de Física Moderna, Acosta *et al* (2015), página 325.

Hasta este punto, el crecimiento del hijo se ha descrito suponiendo que es un núclido estable. Si los núcleos hijo son inestables y también decaen, el número N' de los núcleos hijo puede en un cierto instante estar creciendo o decreciendo. La razón a la cual está cambiando el número de núcleos hijo es

$$\frac{dN'}{dt} = \lambda N - \lambda' N' \dots \dots \dots (13)$$

Donde λ y λ' son las constantes de desintegración de los núcleos padre e hijo. El término λN es el incremento de núcleos hijo por unidad de tiempo debido a la desintegración de los padres, y $\lambda' N'$ es el decremento de núcleos hijo debido a su propio decaimiento.

La ecuación (13) se puede escribir ahora

$$\begin{aligned} \frac{dN'}{dt} + \lambda' N' &= \lambda N \\ &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

Si se supone que en $t=0$, $N'=0$, entonces la solución de la ecuación (14) es

$$N' = N_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda' - \lambda} \right) (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda' t}) \dots \dots \dots (15)$$

Obsérvese que la ecuación (15) muestra cuando $t=0$ $N'=0$ y que cuando

$t \rightarrow \infty$, $N' \rightarrow 0$. La figura 20 muestra una curva de un núcleo hijo que es inestable y decae.

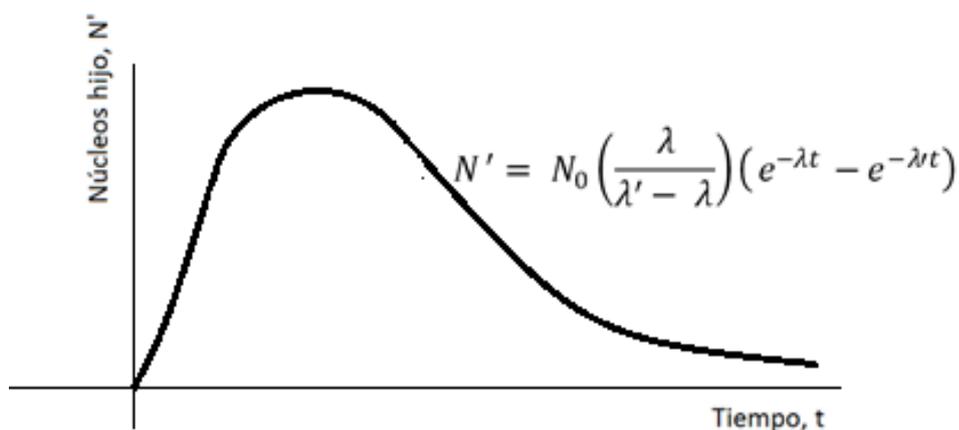


Figura 20. Crecimiento y decaimiento de un núcleo hijo inestable. Recuperado de Física Moderna, Acosta et al (2015), página 326

2.2.1.3. SERIES RADIATIVAS

En la naturaleza solo se encuentran 14 núcleos radiactivos cuya vida media es del mismo orden o mayor en magnitud que la edad del universo, la cual se estima en 4.5×10^9 años.

Estos se observan en la Tabla 2.

Tabla 2

Núcleos radiactivos naturales con vidas medias del mismo orden o mayor que la edad del universo (4.5×10^9 años)

Núclido	Modo de decaimiento	Vida media (años)
K-40	β^- , e Captura	1.2×10^9 decae en hijo estable
V-50	e Captura	4.0×10^{14} decae en hijo estable
Rb-87	β^-	6.2×10^{10} decae en hijo estable
Ln-115	β^-	6.0×10^{14} decae en hijo estable
La-138	β^- , e Captura	1.0×10^{11} decae en hijo estable
Ce-142	α	5.0×10^{15} decae en hijo estable
Sm-147	α	1.2×10^{11} decae en hijo estable
Lu-176	β^-	5.0×10^{10} decae en hijo estable
Re-187	β^-	4.0×10^{12} decae en hijo estable
Pt-192	α	1.0×10^{15} decae en hijo estable
Th- 232	α	1.4×10^{10} diez generaciones activas
U-235	α	7.1×10^9 diez generaciones activas
U-238	α	4.5×10^9 diez generaciones activas

Nota. Recuperado de Física Moderna, Acosta et al (2015), página (327)

Los primeros 11 nucleídos en la tabla 1 decaen en hijos estables, pero los últimos tres, el Th 232, el U-235, y el U-238, decaen en hijos que son a su vez radiactivos y decaen en otros hijos radiactivos, a través de varias generaciones, hasta que se llega a un elemento estable.

Los núclidos estables en los cuales decaen estas tres series naturales radiactivas son tres isótopos del plomo, el Pb-208, el Pb-207 y el Pb-206, respectivamente.

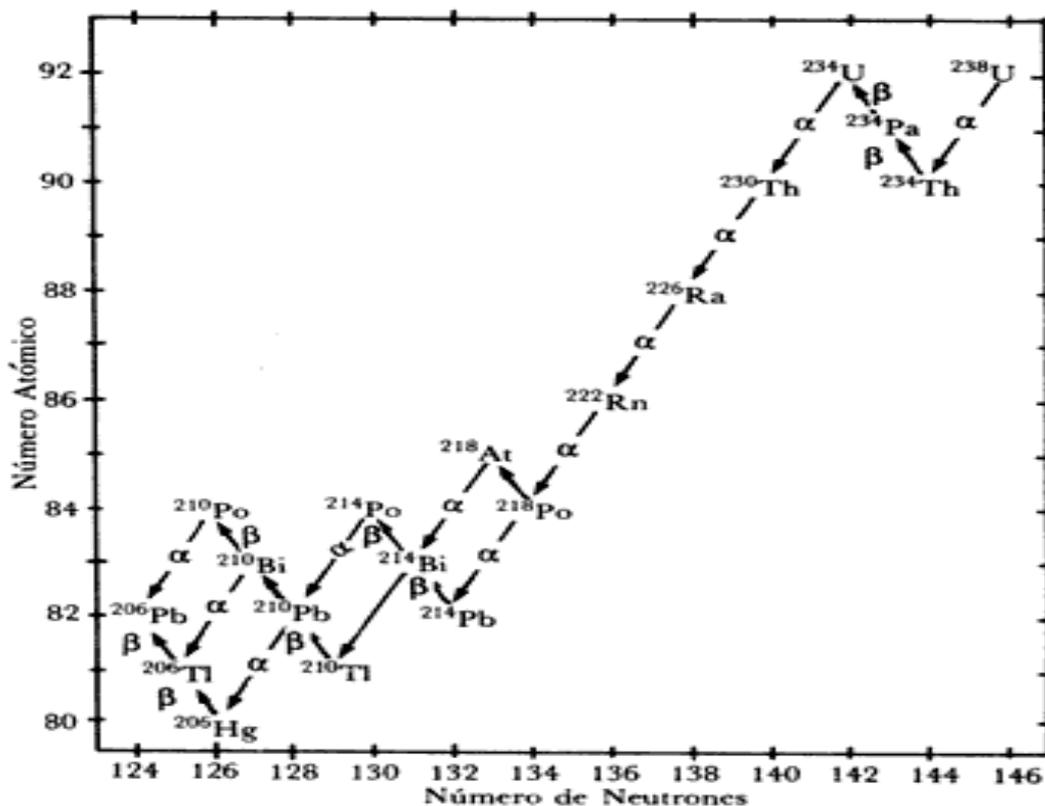


Figura 21. Serie de uranio-radio. El número másico de cada elemento en la serie está dado por $4n+2$, donde n es un entero positivo

Las teorías de la formación de los elementos (núcleo síntesis) indican que, cuando los elementos se forman (principalmente en el interior de las estrellas), además de los elementos estables que existen en la Tierra se crean muchos elementos radioactivos, y entre ellos isótopos de los transuránicos ($Z > 92$) que no tienen isótopos estables. Sin embargo, la mayoría de ellos tienen una vida media $T_{1/2}$ mucho menor que el tiempo de

existencia de la Tierra ($\sim 4.5 \times 10^9$ a) y por lo tanto ya han decaído a núcleos estables. Los existentes actualmente se encuentran en forma natural, o tienen vida media muy larga, o se producen continuamente a partir de sus precursores los cuales tienen vidas muy largas.

La gran mayoría de los isótopos radioactivos naturales existentes pueden agruparse en tres series que se originan en los isótopos indicados en la Tabla 3.

Tabla 3
Isótopos que generan las tres series radioactivas naturales

Elemento	Vida media	Nombre de la serie	Nombre alternativo de la serie
Th^{232}	1.4×10^{10} a	Serie de Torio	$4n$
U^{238}	4.5×10^9 a	Serie de Uranio	$4n + 2$
U^{235}	7.0×10^8 a	Serie de actinio	$4n + 3$

Nota. Recuperado de Ortiz, J. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB

Las masa (en uma) de los miembros de cada una de estas series están aproximadamente dadas por las expresiones que aparecen a la última columna de la tabla con n variando, de 51 o 52 a 58 o 59. Estas series comienzan en el nucleido mencionado y decaen por emisión de partículas α o β hasta terminar en isótopos estables del plomo. (Ortiz, J; 2004; pág. 4)

Los miembros de estas series se indican en Tabla 4

Tabla 4
Isótopo de la serie de U²³⁸

Elemento	Símbolo	Vida media	α (MeV)	β (MeV)	γ (MeV)	Porcentaje de ocurrencia γ
92 Uranio	U ²³⁸	4.5x10 ⁹ a	4.2	—	0.048	23
90 Torio	Th ²³⁴	24.1d	—	0.19	0.09	4
91 Protoactinio	Pa ²³⁴	1.17m	—	2.29	1.0	0.6
92 Uranio	U ²³⁴	2.5x10 ⁵ a	4.8	—	0.05	28
90 Torio	Th ²³⁰	7.5x10 ⁵ a	4.8	—	0.068	24
88 Radio	Ra ²²⁶	1600 a	4.8	—	0.186	4
86 Radón	Rn ²²²	3.82 d	5.49	—	0.5	0.07
84 Polonio	Po ²¹⁸	3.05 m	6.00	—	—	—
82 Plomo	Pb ²¹⁴	26.8 m	—	0.65	0.24	4
83 Bismuto	Bi ²¹⁴	19.9 m	5.5	1.5	0.61	47
84 Polonio	Po ²¹⁴	164 μ s	7.7	—	0.8	0.014
82 Plomo	Pb ²¹⁰	22.3 a	—	0.016	0.046	81
83 Bismuto	Bi ²¹⁰	5.0 d	—	1.16	—	—
84 Polonio	Po ²¹⁰	138 d	5.30	—	0.80	0.001
82 Plomo	Pb ²⁰⁶	—	—	Estable	—	—

Nota. Recuperado de Ortiz, J. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB

2.2.1.4. DECAIMIENTOS DENTRO DE LAS SERIES RADIOACTIVAS

La actividad de una sustancia radiactiva sigue una simple ley exponencial.

Sin embargo si la sustancia no está aislada de sus progenitores su actividad no presenta

un decaimiento puramente exponencial. Esto se debe a que, por poder ser continuamente creada, la correspondiente actividad depende del tiempo no sólo a través de la vida media de la sustancia sino también de las de sus progenitores. Sea $N_1(t)$ el número de núcleos del padre al tiempo t y $N_2(t)$ el número de núcleos del hijo. La actividad del padre (que en el caso de emisión α o γ se puede separar claramente de la correspondiente al hijo) decrece exponencialmente con una constante de decaimiento λ_1 . Por lo tanto, la variación del número de núcleos del hijo dN_2 en un intervalo dt está dada por

$$dN_2 = (f\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt = (N_1(0)f\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2) \dots (16)$$

Hay que tener en cuenta que en la Ec.16 la cantidad dN_2 corresponde a la variación total del número de núcleos del hijo en el intervalo dt . Si, experimentalmente, uno no midiera la actividad total del hijo sino p.ej; el número de partículas α de una cierta energía emitidas en dt por el hijo con constante de decaimiento relativa $f\alpha$, entonces para obtener la cantidad dN_2 que entra en la ecuación anterior la actividad medida debe ser dividida por $f\alpha$. Si a $t=0$, el número de núcleos del hijo es $N_2(0) = 0$, la Ec.16 puede ser fácilmente integrada dando por resultado

$$N_2(t) = fN_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \dots (17)$$

Existen dos casos límites de interés en que se pueden obtener formas simplificadas de la Ec.17.

1. Si se verifica que $\lambda_1 \ll \lambda_2$: En este caso el hijo tiene una vida media mucho más corta que el padre, es decir $(T_{1/2})_2 \ll (T_{1/2})_1$. En esta situación se puede aproximar $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda_2$. Además, para tiempos no muy largos se puede considerar $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$.

Con estas aproximaciones se obtiene

$$N_2(t) \cong fN_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad \dots (18)$$

Por lo tanto para valores de t en el rango $(T_{1/2})_2 \ll t \ll (T_{1/2})_1$, $N_2(t)$ alcanza un valor de equilibrio dado por:

$$N_2^{equil} = fN_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad \dots (19)$$

Ya que el hijo decae ni bien se forma. En ejemplo de esta situación se ilustra en la Fig.22 para el decaimiento del Ra^{226} en Rn^{222}

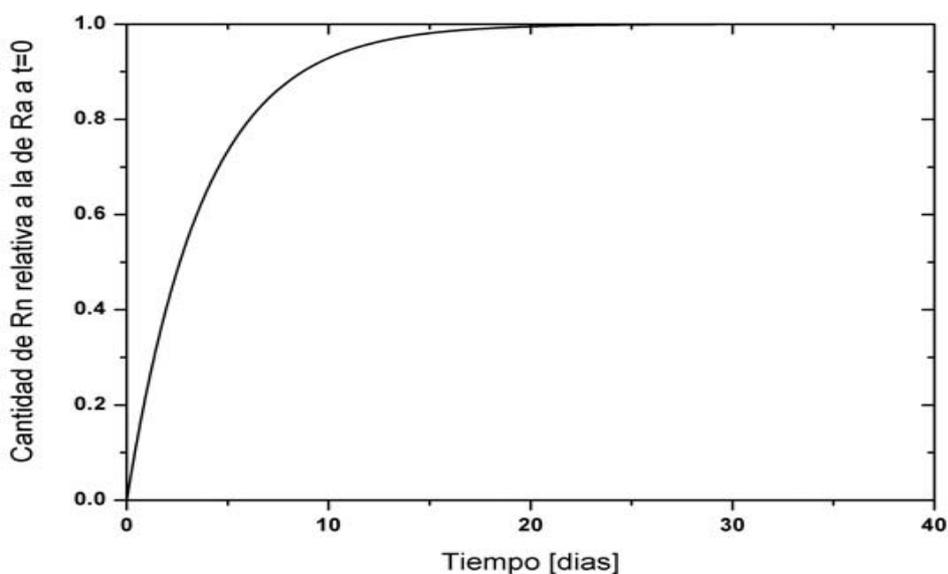


Figura 22. Variación con el tiempo de la cantidad de Rn^{222} , cuya vida media es de 2.62d y que se forma por el decaimiento (con factor $f=1$) del Ra^{226} , cuya vida media es de 1600 a. Recuperado de Ortiz, J. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB

2.2.1.5. Unidades de radiactividad

Tradicionalmente la unidad para medir la actividad de una muestra de material radioactivo ha sido el *Curie (Ci)*, que equivale a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.

Una actividad de 1 *Ci* es aproximadamente la correspondiente a 1 g de Ra^{226} , o sea a

una fuente cuya actividad es muy peligrosa. La mayoría de las fuentes utilizadas en el laboratorio tienen una actividad del orden de los mCi o μCi . En parte por ese motivo, en el SI se adoptó como unidad de actividad el *Becquerel (Bq)* que corresponde a una desintegración por segundo, es decir

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

El número de decaimientos por unidad de tiempo no es suficiente para caracterizar completamente una fuente radiactiva ya que en muchas aplicaciones lo que importa no es la actividad sino la cantidad de energía que una fuente puede proveer a la materia que la circunda. Esto depende no solo de la actividad sino del tipo de radiación y su energía. En el caso de la radiación electromagnética (γ o X) la exposición se define como la carga total de los iones positivos producidos por la radiación en una masa de aire que ocupa un volumen de 1 cm^3 , a 0° C y 760 mm Hg de presión. La unidad de exposición es el Roentgen (R), que es la carga de una esu (unidad electrostática de carga) por cm^3 de aire a 0° C y 760 mm Hg de presión. Como $1 \text{ esu} = 0,333 \text{ Ci}$ y 1 cm^3 de aire a 0° C y 760 mm Hg de presión tiene una masa de $1,293 \text{ g}$ se obtiene que

$$1R = 1.61 \times 10^{15} \frac{\text{pares de iones}}{\text{kg de aire}}$$

Por otro lado, dado que producir un ion se requiere en promedio 34 eV , 1 R corresponde a una pérdida de energía, en aire, de $5.47 \times 10^{16} \text{ eV / kg}$ o $87,6 \text{ erg / g}$.

En general para materiales distintos del aire la tasa de absorción de energía cuando se los expone a una radiación ionizante, es diferente. Se define entonces la dosis absorbida D de un material como la cantidad de energía depositada por la radiación por unidad de masa del material. Tradicionalmente la unidad de dosis absorbida ha sido el rad definido que corresponde a una dosis de 100 erg / g . La unidad correspondiente en el SI es el

Gray (Gy) que equivale a una energía depositada de 1 Joule por Kg del material. Por lo tanto, $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$.

Para definir estándares de protección radiológica de los seres vivos es necesario poder cuantificar el efecto biológico de los distintos tipos de radiaciones ionizantes que, en general, son diferentes. Por ejemplo, los rayos α pierden energía rápidamente y por lo tanto depositan prácticamente toda su energía en distancias muy cortas. En consecuencia producen mucho mayor daño que un rayo γ o β , para los cuales la pérdida de energía se produce gradualmente. Para cuantificar estas diferencias se define la efectividad biológica relativa ó factor RBE como el cociente de la dosis de una cierta radiación respecto de la dosis de rayos X que produce el mismo efecto biológico. Como medir la RBE no es proceso sencillo se utiliza un factor de ponderación de la radiación (w_R) que se calcula para un dado tipo de radiación a una dada energía de acuerdo a la energía depositada por unidad de distancia. Así, radiaciones que depositan poca energía por unidad de longitud tienen w_R cercanos a la unidad mientras que aquellas que depositan mucha energía por unidad de longitud pueden llegar a tener w_R del orden de 20.

Los valores de w_R para distintos tipos de radiaciones y energías se indican en la Tabla 5.

Tabla 5

Factores de ponderación de la radiación w_R para distintos tipos de radiación y energía

Radiación	Ponderación de radiación (w_R)
Rayos X y γ (todas las energías)	1
E y muones (todas las energías)	1
neutrones < 10Kev	5
neutrones < 10-100 KeV	10
neutrones > 100KeV hasta 2MeV	20
neutrones > 2 -20 MeV	10
neutrones > 20 MeV	5
protones > 2 MeV	5
α , fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

Nota. Recuperado de Ortiz, J. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB

La *dosis equivalente para daño biológico (DE)* se define como el producto de la dosis D y el factor de ponderación de la radiación w_R , es decir $DE = w_R D$. Tradicionalmente la unidad utilizada para esta magnitud ha sido el *rem* (roentgen equivalent man) siendo $1\text{rem} = \text{rad} \times w_R$. Sin embargo, en el SI se ha adoptado el *Sievert (Sv)* siendo $1\text{Sv} = 1\text{Gy} \times w_R = 100\text{rem}$

En cuanto a las dosis equivalentes aceptables para el ser humano, la *International Commission for Radiation Protection* recomienda no exceder una dosis equivalente máxima de $20\text{mSv} / \text{año}$, promediado en 5 años, sin que en un año dado la dosis sobrepase los 50mSv . Es importante notar que todos los seres vivos estamos continuamente expuestos a radiaciones ionizantes de origen natural y/o artificial. El

fondo natural esta dado por:

a) *Las radiaciones ionizantes* procedentes del espacio exterior, o radiación cósmica.

Tiene su causa en los procesos nucleares que tiene lugar en el exterior de la Tierra, singularmente en el sol. La atmósfera absorbe parcialmente estas radiaciones, por lo que su intensidad varia según su altitud, siendo la menor a nivel del mar con respecto a los viajes en avión, sobre todo transoceánicos ya que en ellos se vuela a mayor altura, producen un notable incremento a la exposición a estas radiaciones.

b) *Las radiaciones emitidas por las sustancias presentes en la corteza terrestre.* La

distribución de estas radiaciones varia notablemente entre uno y otros puntos de la Tierra conforme a la distribución de los elementos que la componen. La radiactividad en suelos graníticos, por ejemplo, es mucho mayor que la presente en suelos calcáneos.

c) *La radiación de los isótopos radiactivos* contenidos en el propio organismo humano,

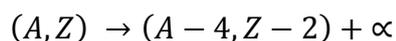
principalmente isótopos del carbono y del potasio. Aparte de su presencia natural en el organismo, los niveles de radiación interna se relacionan directamente con la ingesta de alimentos y con la inhalación de gases radiactivos, singularmente el Radón.

La dosis efectiva promedio proveniente de estas fuentes naturales está estimada en $2 \text{ mSv} / \text{año}$. Finalmente, se estima que la *dosis mortal*, es decir la dosis que tiene asociada un 50 % de probabilidad de muerte en 30 días (sin tratamiento) es de 2.5 a 3 Gy.

2.2.1.6. DECAIMIENTOS α

El decaimiento α consiste en la emisión por parte de un núcleo padre (A, Z) de un núcleo de He^4 transformándose así en un núcleo hijo con $(A - 4, Z - 2)$.

Es decir,



Con frecuencia el núcleo hijo se produce en el estado fundamental. En este caso la fuente radioactiva sólo emite una partícula α de energía bien definida. Sin embargo, también se puede producir en estados excitados que luego se decaen emitiendo rayos γ . En este caso el decaimiento del padre puede dar lugar a varios rayos α de diferentes energías. Un ejemplo de esta situación se produce en el decaimiento del Ra^{226} al Rn^{222} que se ilustra en la Figura 23

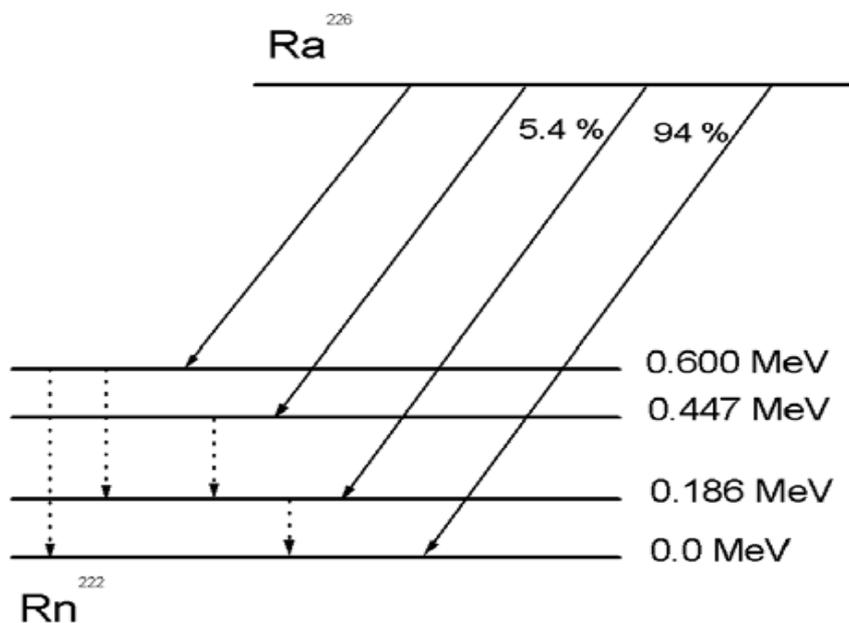


Figura 23. Esquema de decaimientos del Ra^{226} al Rn^{222} . Las líneas oblicuas llenas indican los posibles decaimientos α mientras que las líneas de puntos indican subsecuentes decaimientos γ

Es evidente que el decaimiento α solo puede producirse si está energéticamente permitido, es decir si se verifica que Q_α satisface

$$\frac{Q_\alpha}{c^2} = M(A, Z) - M(A - 4, Z - 2) - M_\alpha > 0$$

Sin embargo, a pesar de que para átomos pesados, es decir a partir de $A \sim 140$ se cumple que $Q_\alpha > 0$, por mucho tiempo el emisor α más liviano conocido fue el Po210. Este hecho se puede explicar notando que para poder ser emitida la partícula α debe atravesar una barrera de potencial, lo cual también explica la existencia de un enorme rango de valores para las vidas medias asociadas a los decaimientos α . En efecto, ya en la década de 1910 Geiger y Nuttall notaron que había una correlación entre la vida media y la energía de la partícula α emitida. Ellos encontraron que, con buena precisión, se cumple la siguiente relación

$$\ln T_{1/2} \cong A - B \ln E_\alpha$$

donde A y B son dos constantes. Para explicar esta relación empírica alrededor de 1928 y en forma casi simultánea, Gamow por un lado y Condon y Gurney por otro desarrollaron la llamada teoría del efecto túnel por la cual para ser emitida la partícula α debe atravesar la barrera coulombiana generada por el campo electromagnético del resto del núcleo. Esta teoría constituye la primera aplicación exitosa al estudio del núcleo atómico. La idea básica es que la constante de decaimiento λ esta dada por

$$\lambda = \kappa P$$

donde κ es la frecuencia con que la partícula α se forma dentro del núcleo y llega a la superficie del mismo y P corresponde a la probabilidad de penetración de la barrera. Es decir, una vez formada la partícula α tiene una probabilidad P de salir del núcleo. La cantidad κ es difícil de calcular ya que depende de los estados nucleares. Una estimación

de su valor es $\kappa \approx v_0 / (2R)$, donde v_0 es la velocidad de la partícula α dentro del núcleo y R es el radio nuclear. Por otro lado como veremos a continuación la probabilidad P puede estimarse usando la aproximación semiclásica WKB.

Esquemáticamente la situación es la que se representa en la Figura 24.

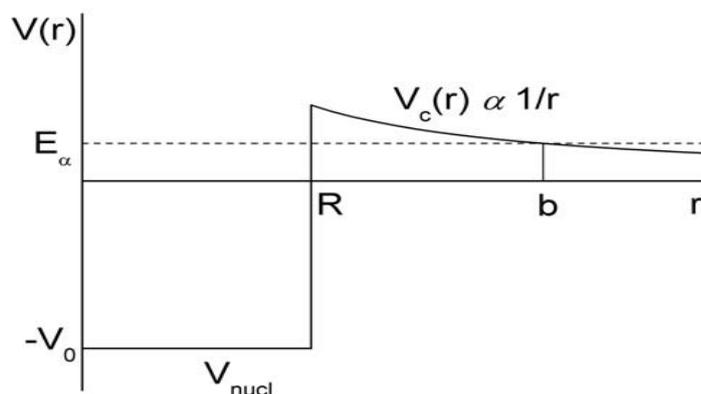


Figura 24. Potencial efectivo esquemático para el decaimiento de una partícula α . Recuperado de Ortiz, J (2004)

2.2.2. EL RADÓN

El radón es un elemento radiactivo de origen natural, una gran parte de la radiactividad natural proviene de tres cadenas radiactivas naturales, Torio (^{232}Th), Uranio (^{238}U) y Actinio (^{235}U). Se forma en la cadena de desintegración del ^{238}U . Gran parte de la radiactividad de los minerales y desechos de uranio se debe a la descomposición de los isótopos de uranio U-238 y U-235 y su decaimiento radioactivo productos. El uranio es un elemento radiactivo natural en la corteza terrestre y en los minerales. La radioactividad de los minerales y desechos de uranio son causados por la descomposición de los isótopos radiactivos. El uranio tiene tres isótopos naturales: uranio-238 (U-238); uranio-235 (U-235); y uranio234 (U-234); todos los cuales son radiactivos. Las abundancias relativas de U-238, U-235, y U-234 son 99.28, 0.71 y 0.006%, respectivamente (Attendorn y Bowen 1997;Ragnarsdottir y Charlet 2000). Estos

nucleidos primarios son inestables; ellos decaen a nucleidos hija y libera radiación en forma de partículas alfa y beta como bien rayos gamma. De hecho, U-238 y U-235 son los isótopos originales de varios radionucleidos intermedios, y U-234 es un producto de decaimiento de U-238 (Ragnarsdottir y Charlet 2000). Estos nucleidos intermedios se deterioran aún más - a través de emisión alfa o beta - a nuevos nucleidos que a su vez se descomponen en otros radionucleidos. Uranio-238 y U-235 son la cabeza de dos series de decaimiento separadas, que finalmente producen el isótopo estable. El uranio-235 no es tan prevalente en la naturaleza como el U-238 debido a su vida media más corta.

2.2.2.1. Propiedades del Radón 222

El Rn-222 es un nucleido hijo intermedio de la serie U-238, es un radionucleido que: (a) tiene una vida media de 3.8 días; (b) es soluble en agua; (c) de alta movilidad debido a su estado gaseoso y sus propiedades químicas inertes; y (d) decae a productos hijos sólidos radioactivos que pueden depositarse en los pulmones humanos.

El Radón es un gas noble incoloro, inodoro e insípido con tres emisiones naturales isótopos radiactivos (es decir, Rn-219, Rn-220, Rn-222). El término radón comúnmente se refiere solo a Rn-222 (Sharma 1997). Radon-219 es el producto secundario del Serie U-235, Rn-220 es un miembro de la serie Th-232, y Rn-222 es una hija producto de la serie U-238 y el descendiente directo de Ra-226. El más abundante isótopo es Rn-222 que se debe a la abundancia de su isótopo padre U-238. Los otros dos isótopos Rn-219 y Rn-220 son significativamente menos abundantes, tienen menor vidas medias menores, y por lo tanto son de poca preocupación ambiental (Sharma 1997).

En contraposición, el Rn-222 tiene una vida media relativamente mayor de 3.8 días. El

Radón-222 es motivo de preocupación en la extracción de uranio y procesamiento porque:

1. Radón-222 es un descendiente de radionucleidos precursores con medias vidas largas (Th-230: vida media 80,000 años; Ra-226: vida media de 1622 años). Como resultado, Rn-222 representa un peligro a largo plazo a pesar de su corta vida media de 3,8 días.
2. Radón-222 es un gas noble y soluble en agua. Tales propiedades permiten que el radón moverse libremente en aguas subterráneas y superficiales.
3. Radón-222 mismo se descompone por la emisión de una partícula alfa. Las hijas son polonio-218 (Po-218), plomo-214 (Pb-214) y bismuto-214 (Bi-214), es decir, la llamada progenie del radón. Estos sólidos productos hijas son altamente radiactivos y emiten partículas alfa y beta, así como los rayos gamma.
4. Una vez que el ser humano inhala Rn-222, sus productos de desintegración sólida radiactiva son depositados directamente dentro de los pulmones. La progenie del radón alojado causará radiación ionizante e inducir cáncer de pulmón.

Una vez que se recupera el uranio (U-238, U-235, U-234) el mineral, la mayoría de los nucleidos hijos radioactivos terminan en relaves de plantas de uranio.

Por lo tanto, los relaves de uranio tienen requisitos de contención especiales debido a su radioactividad. Los relaves llevan alrededor del 85% de la radiactividad originalmente presente en el mineral de uranio. En entornos de minas de uranio, el gas radón emana particularmente del mineral de uranio, rocas de desecho mineralizadas y relaves de plantas de uranio. El radón también se emite desde trabajos subterráneos y pozos abiertos. Después de el término de la minería, el radón continuará emanando de las

paredes y el piso. Dado que la mayor parte del mineral generalmente se elimina del trabajo de la mina, las principales fuentes de radón son las pilas de roca de desecho y las reservas de mineral. Los efectos meteorológicos locales pueden afectar la emanación del radón del suelo que depende de la presión del aire, la humedad del suelo, la estructura del suelo, la cubierta del suelo, el viento y temperatura (Nielson et al., 1991). Sus características y propiedades más importantes se encuentran descritas en la Tabla 6 y Figura 25.

Tabla 6
Propiedades físicas y químicas del Radón 222

Propiedades físicas y químicas	Rn 222
Número de Masa	222
Punto de fusión	-71°C
Punto de ebullición	-61.8°C
Densidad a 20°C	9,96x10 ⁻³ g/cm ³
Solubilidad en agua a 20°C	230 cm ³ /L
Vida media	3,825 días
Actividad específica	1,3x10 ² Bq/g
Energía de decaimiento	5,49 MeV

Elaboración Propia

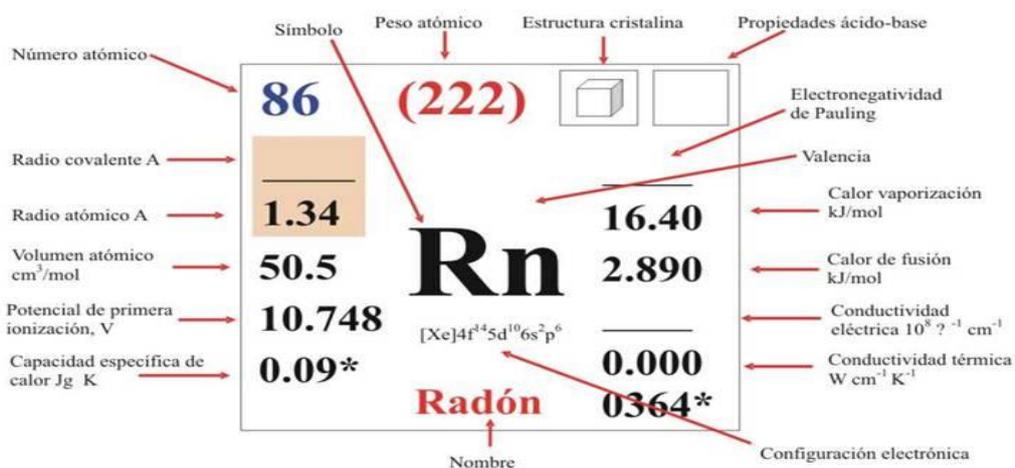


Figura 25. Propiedades químicas del Radón 222.

2.2.2.2. Movimiento del radón

Debido a que el radón es un gas, tiene mayor movilidad que el uranio y el radio, que están fijos en la materia sólida en rocas y suelos. El radón puede abandonar más fácilmente las rocas y los suelos escapando en fracturas y aberturas en las rocas y por espacios porosos entre los granos de tierra. La facilidad y eficiencia con que el radón se mueve en el espacio de poro o la fractura afecta a cómo mucho radón entra a una casa. Si el radón es capaz de moverse fácilmente en el espacio de los poros, entonces puede viajar una gran distancia antes de que se descomponga, y es más probable que se acumule en altas concentraciones dentro de un edificio.

El método y la velocidad del movimiento del radón a través de los suelos está controlado por la cantidad de agua presente en el espacio de los poros (el contenido de humedad del suelo), el porcentaje de espacio poroso en el suelo (el porosidad), y la "interconexión" de la espacios porosos que determinan la capacidad del suelo para transmitir agua y aire (la permeabilidad).

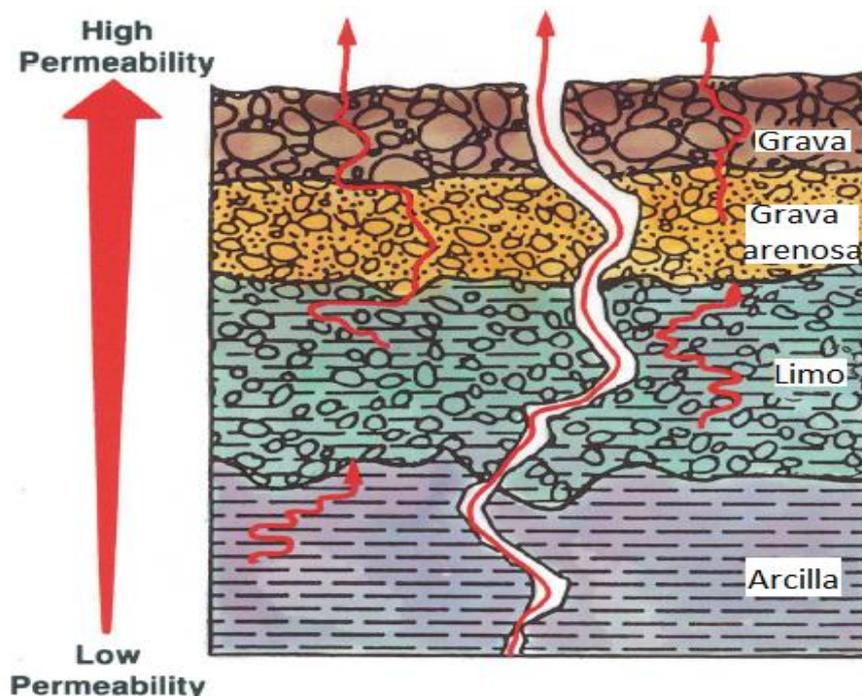


Figura 27. El radón puede moverse a través grietas en las rocas y a través de espacios de poro en suelos. Recuperado de Otton, J. <https://pubs.usgs.gov/gip/7000018/report.pdf>

El radón se mueve más fácilmente a través de suelos permeables, como arena gruesa y grava, en relación a suelos impermeables, como las arcillas. Fracturas en cualquier suelo o roca permiten que el radón se mueva con más rapidez. El radón en el agua se mueve más lento que el radón en el aire. La distancia que el radón se mueve antes de la mayor parte descomponga es menor de 1 pulgada en agua saturada rocas o suelos, pero es tanto como 6 pies a través rocas o suelos secos. Porque el agua también tiende a fluir mucho más lentamente a través de los poros del suelo y fracturas de roca que el aire, el radón viaja distancias más cortas en suelos húmedos que en suelos secos. Por estas razones, hogares en áreas más secas, suelos altamente permeables y roca firme, como pendientes, bocas y fondos de cañones, gruesos depósitos glaciales, y lecho de rocas fracturados o cavernosos, puede tener altos niveles de radón en interiores. Incluso si el contenido de radón del aire en el suelo o fractura está en el rango normal (200-2,000 pCi / L), la permeabilidad de estas áreas permite el radón aire para moverse mayores distancias antes de que se descomponga y por lo tanto, contribuye a un alto nivel de radón en interiores.

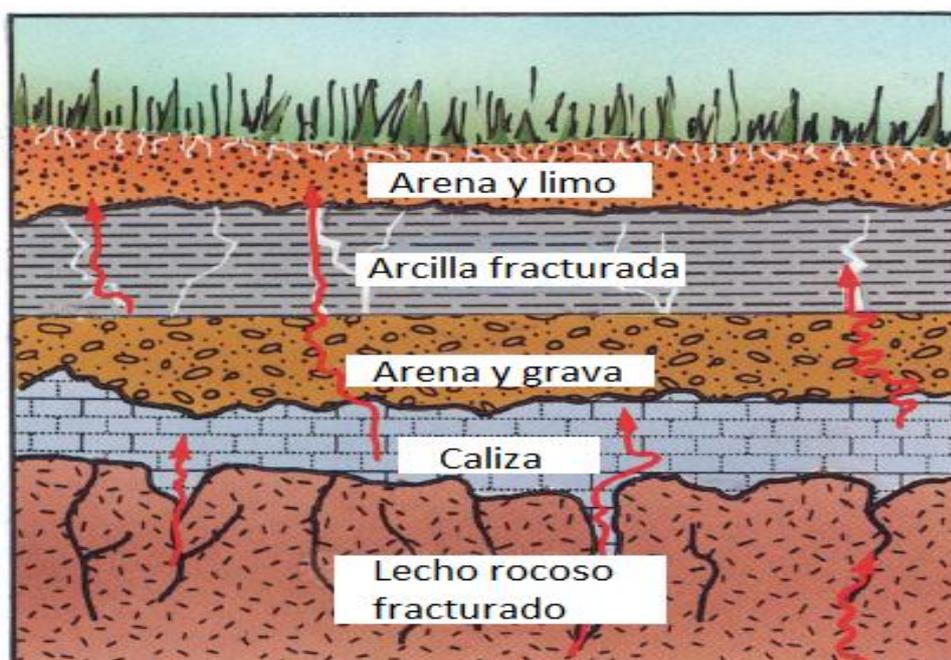


Figura 28. Algunos átomos de radón permanecen atrapado en el suelo y la descomposición para formar plomo estable; otros átomos escapan rápidamente en el aire. Recuperado de Otton, J.

2.2.2.3. Efectos del Radón 222 sobre la salud

El gas radón, está presente en nuestras viviendas y edificios de forma natural. Desde el suelo, accede a nuestros hogares y puede acumularse alcanzando niveles de concentración peligrosos para nuestra salud.

La exposición al gas radón puede ocasionarnos cáncer de pulmón. Es la causa de miles de muertes al año, que pueden ser evitadas.

Organizaciones de Salud Pública como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Asociación Americana del Pulmón (ALA), el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (INSHT) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) advierten del peligro de la exposición al gas radón.

Evidencias científicas y médicas, demuestran que la exposición prolongada a este gas, en concentraciones moderadas como las que presentan las viviendas, puede ocasionarnos cáncer de pulmón.

Cuando al respirar, incorporamos el gas radón a nuestro torrente respiratorio, las partículas altamente radiactivas, se adhieren al tejido pulmonar, donde irradian las células broncopulmonares.

Esta radiación puede alterar las células, causando cáncer de pulmón.

1. 1999, en el informe BEIR VI (Biological Effects of Ionizing Radiation VI) se establece que la exposición al gas radón es el segundo factor de riesgo de contraer cáncer de pulmón después del tabaco y el primero en no fumadores.
2. 2017, la EPA (Environmental Protection Agency), estima que la radiactividad del radón es la causa de 21.000 muertes por cáncer de pulmón al año en Estados Unidos.
3. 2010, Estudios realizados en Galicia (España), cifran en 332 muertes al año en esta

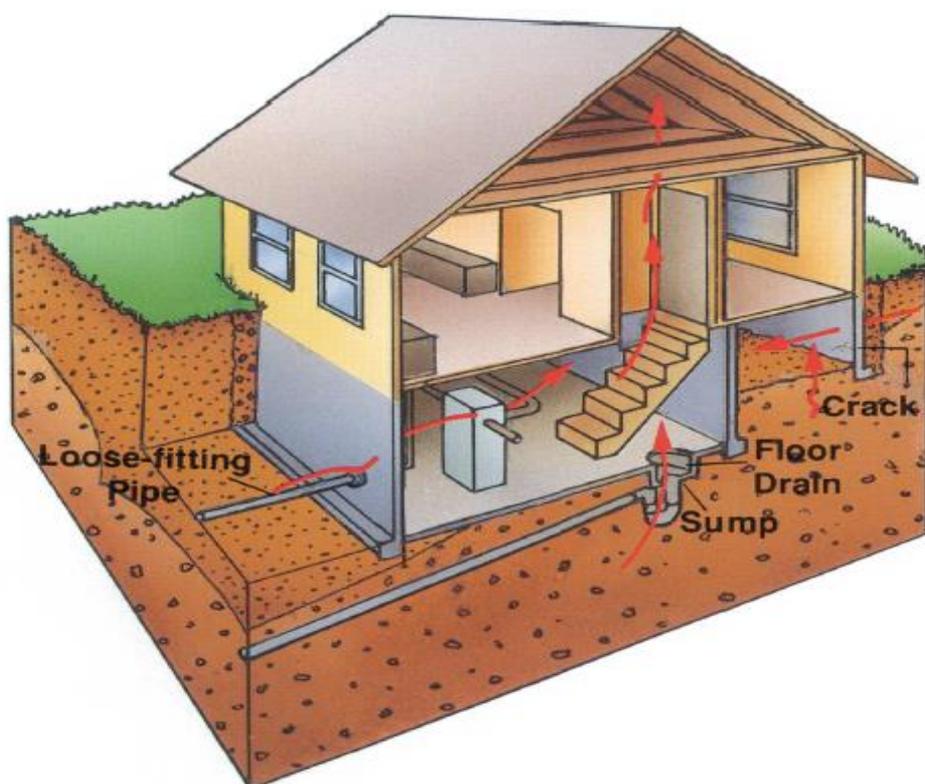
región, ocasionadas por cáncer de pulmón en las que interviene la exposición al gas radón. (Fuente:"Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain". Mónica Pérez-Ríos, Juan M. Barros-Dios, Agustín Montes-Martínez and Alberto Ruano-Ravina).

2.2.2.3. Entrada de Radón en edificios

El Radón se mueve a través de los espacios de poros del suelo y fracturas de roca cerca de la superficie de la tierra por lo general escapa a la atmósfera. Su presencia en las casas, sin embargo es principalmente debida al aire proveniente del suelo que a menudo fluye desde sus cimientos por tres razones: diferencias en el aire presión entre el suelo y la casa, la presencia de aberturas en los cimientos, y el aumento de la permeabilidad alrededor del sótano (si hay uno presente). Al construir una casa con un sótano, un agujero se excava, se establecen cimientos y generalmente se usa grava gruesa como base para la losa del sótano. (Otton, J; 1992; pág.12)

Luego, una vez que se hayan construido los muros del sótano, la brecha entre las paredes del sótano y la del suelo exterior está lleno de material que a menudo es más permeable que el suelo original (zona perturbada). El radón se mueve hacia la zona perturbada y el lecho de grava debajo del suelo circundante. El material de relleno en la zona perturbada es comúnmente rocas y suelo del sitio de la fundación, que también generan y liberan radón. Los cantidad de radón en la zona perturbada y la grava depende de la cantidad de uranio presente en la roca en el sitio, el tipo y la permeabilidad de suelo que rodea la zona perturbada y debajo del lecho de grava y la humedad del suelo contenido. La presión de aire en el suelo alrededor de la mayoría de las casas es a menudo mayor que la presión del aire en el interior. Todos las cimientos de las casas tienen aberturas tales como grietas, entradas de utilidad, uniones entre paredes de

cimientos y losas, sumideros, materiales de cimentación permeables, y el suelo descubierto en los espacios de arrastre y sótanos. La mayoría de las casas extraen menos del uno por ciento de su aire interior del suelo; el resto proviene de aire exterior, que generalmente es bastante bajo en radón. Casas con bajas presiones de aire interior, pobres cimientos, y varios puntos de entrada para el aire del suelo, sin embargo, puede obtener hasta un 20 por ciento de su aire interior del suelo. Incluso si el aire del suelo solo tiene niveles moderados de radón, los niveles dentro de la casa puede ser muy altos. (Otton, J; 1992; pág.13)



2.2.3. Detectores en huellas nucleares de estado sólido

El presente trabajo de investigación se utilizó detectores desnudos LR 115 Tipo 2 y cámaras blancas que son diseño propio del grupo GITHUNU PUCP modelo G2, así como cámaras negras que son medidores de Radón comerciales de firma ALGADE y que pertenecen al proyecto nacional PER 9024

2.2.3.1. Detector LR 115 Tipo 2

Los detectores LR115 Tipo 2, son películas que consiste en una base de poliéster de 100 μm de grosor que está recubierta con una fina capa delgada de nitrato de celulosa de color rojo de 12 μm .

La película de tipo LR115 es sensible a las partículas α . Cuando una partícula α golpea la capa delgada, causa daño a la estructura molecular de la capa delgada de nitrato de celulosa. Esto se puede observar visiblemente a través de un microscopio, cuando la película expuesta se graba en un baño de solución diluida de hidróxido de sodio bajo condiciones específicas establecidas como se muestra en la Figura 30. Después de este procesamiento pequeños agujeros son visibles bajo el microscopio que pueden ser contados y por lo tanto ser exactamente cuantificados con precisión. Los agujeros tienen diámetros de 1 μm a 15 μm y están ubicados donde la película fue golpeada por partículas α . La película LR115 no es sensible a otros tipos de radiación, como β , γ o rayos X. (Kodalpha Radon-Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications; pág.1)

La detección de partículas α con películas LR115:

Antes del análisis, las películas del detector se tratan químicamente en un proceso de grabado. Después del grabado las huellas nucleares en las películas son visibles bajo un microscopio. La estabilidad y el control de los parámetros críticos (temperatura y concentración del baño de grabado, tiempo de grabado ...) son requisitos básicos para obtener resultados confiables y precisos. Incluso pequeñas variaciones en el la temperatura del baño puede causar resultados incorrectos. Sin embargo, desde el tiempo de grabado de

las películas LR115 es de solo 1.5 horas (en comparación con ~ 8 horas para otros detectores como el CR 39) y el hecho de que las películas LR115 son grabados en grandes recipientes que minimizan los cambios de temperatura, los resultados del análisis del radón LR115 dosímetros son muy confiables y precisos. (Kodalpha Radon- Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications, pág.1)

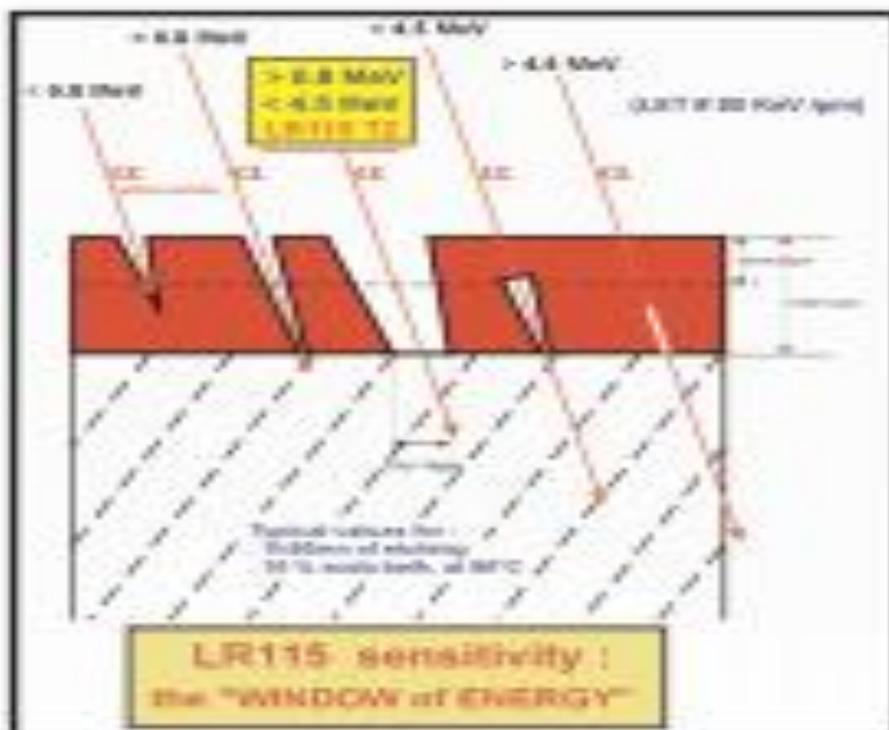


Figura 30. Formación de huellas en LR 115 Tipo 2, en rangos de energía luego de un baño químico. Recuperado de Kodalpha Radon- Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications . www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf

2.2.3.1.1. Características del Detector LR 115 tipo 2

Para la detección de partículas α , por lo tanto, es necesaria una distancia mínima entre la película y la fuente de las partículas α

- Posee un rango de medición de energía entre 0,8 MeV a 4,5 MeV.
- La distancia mínima en aire para las partículas alfas provenientes del

Radón 222 es de aproximadamente 5 mm.

- La distancia máxima en aire para la detección es de aproximadamente 35 mm para el Radón
- Las películas LR115 son insensibles a la deposición en la superficie de los productos sólidos de descomposición de Radón que emiten partículas α , tales como Po-218. Por esta razón, los dosímetros no están influenciados por el efecto de plate out.
- El nivel de saturación típico de la película LR115 es de aproximadamente 600 trazas / mm² (diámetro de las trazas: 1 - 15 μ m)
- La exposición máxima (nivel de saturación) de la película LR115 está en el rango de 70 MBq.h / m³ cual es significativamente mayor en comparación con otros tipos de dosímetros y muy superior al promedio ambiental.
- La exposición mínima, que significa el umbral de detección más bajo, es de solo 2 kBq.h / m³.

2.2.4. Cálculo de la concentración de Radón

En los primeros estudios hechos en minas, se trabajaba con una unidad llamada Working Level (WL), unidad de densidad de energía volumétrica (MeV/L) energía que puede ser depositada por las hijas del Radón en el pulmón, debido a ello se tomó un límite de concentración para el radón en minas de 100pCi/L, dado que en las viejas minas la ventilación era deficiente, se puede llegar a un estado en donde tanto el radón y sus hijas pueden llegar al equilibrio y en esas condiciones para la concentración del Radón

antes mencionada, las hijas del Radón pueden liberar 130000 MeV de energía por decaimiento alfa entonces se tiene que, $1\text{WL} = 130000 \text{ MeV/L}$, esto en el aire, luego de ella se definió el working level month = 1WL exposición por 170 horas

El WL es un parámetro importante ya que nos da una referencia de cuanta dosis podríamos recibir respecto las hijas del Radón, dado por lo general a un equilibrio, entonces la concentración de las hijas se estima en un 40% siendo pues el factor de conversión de $1\text{pCi/L} = 24\mu\text{WLM}$. Se asume un factor de equilibrio de 0,40, en estas condiciones se asume también que el promedio de permanencia en casa es 7000 horas durante un año es pues $1\text{WLM} = 4\text{mSv}$, es una aproximación de cuanto dosis podríamos recibir.

Como se ha visto, es importante determinar las concentraciones de Radón, ya que a partir de ella se puede estimar la dosis a la que podríamos estar expuestas debido a las hijas del Radón, entonces la relación que se usa para determinar la concentración de Radón 222 usando (SSNTD).

$$C = \frac{T}{Kt}$$

Donde:

C; es la concentración en Bq/m^3 , $1\text{pCi/L} = 37 \text{ Bq/m}^3$

T; es la densidad de huellas #Huellas/ mm^2

K; factor de calibración $\frac{\#Huellas/mm^2}{\left(\frac{\text{Bq}}{m^3}\right)h}$

t; es el tiempo a la que el detector estuvo expuesto (h), horas.

Mediante esta ecuación podemos calcular la concentración, sin embargo hay que tener ciertas consideraciones respecto al factor calibración.

CAP. III. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

3.1.1. Resultados de la detección de Rn 222 en los distritos de la Provincia de Lambayeque año 2017

En Setiembre del 2017 se inició el muestro de Radón 222 en los 12 distritos de la Provincia de Lambayeque: Chóchope, Illimo, Jayanca, Mochumi, Mórrope, Motupe, Olmos, Pacora, Salas, San José y Túcume, el muestreo se realizó por un período de 12 semanas. En la Tabla 7, se describe el intervalo de tiempo en días que duró la medición, la temperatura y humedad promedio, así como también se detalla la cantidad de detectores instalados y los puntos donde fueron ubicados, según Figura 31.

Tabla 7

Características del período de muestreo durante el 29 de Setiembre de 2017 a 29 de Diciembre de 2017

Condiciones de detectores	Cantidad
N° de viviendas Monitoreadas	46
N° de detectores instalados	150
N° de detectores Desinstalados	144
N° de detectores en buen estado	90
N° de detectores Deteriorados	54

Nota. Muestreo realizado a Temperatura promedio 23°C, y Humedad promedio 69%, en estación de primavera

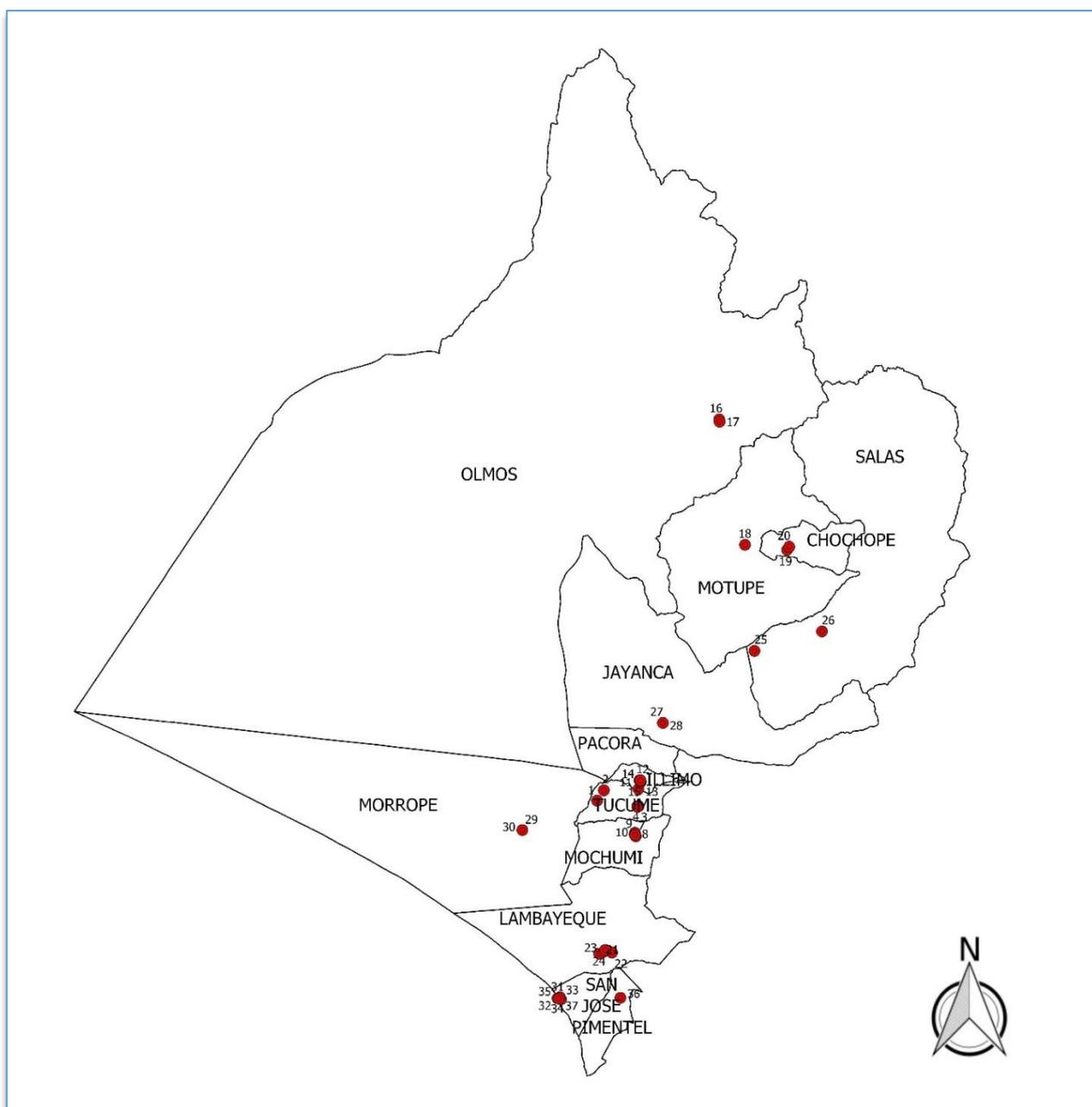


Figura 31. Puntos de Ubicación de detectores en los distritos de la Provincia de Lambayeque Elaboración propia

Tabla 8

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 del ambiente monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo para cada vivienda de los distritos de la Provincia de Lambayeque

CÓDIGO	Densidad (huellas/mm²)	Concentración (Bq/m³)
D-T3-A	5.33 ± 0.41	211 ± 16
D-T3-B	2.29 ± 0.28	91 ± 11
D-T3-C	2.92 ± 0.29	116 ± 12
D-T3-E	2.43 ± 0.35	96 ± 14
D-T3-F	7.92 ± 0.63	314 ± 25
D-T3-G	1.18 ± 0.23	47 ± 9
D-M5-A	4.55 ± 0.43	181 ± 17
D-M5-B	2.00 ± 0.30	80 ± 12
D-M5-C	1.72 ± 0.27	68 ± 11
D-M5-D	2.10 ± 0.25	83 ± 10
D-I1-C	0.26 ± 0.09	15 ± 4
D-I1-D	0.21 ± 0.14	15 ± 5
D-I1-E	2.74 ± 0.33	109 ± 13

Nota. Elaboración Propia

Tabla 9

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 del ambiente monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo para cada vivienda de los distritos de la Provincia de Lambayeque

CÓDIGO	Densidad (huellas/mm²)	Concentración (Bq/m³)
D-I1-G	0.12 ± 0.09	15 ± 4
D-I1.H	0.40 ± 0.17	16 ± 7
D-P11-B	0.31 ± 0.10	15 ± 4
D-OLM6-A	2.48 ± 0.30	98 ± 12
D-OLM6-B	1.51 ± 0.22	60 ± 9
D-MT10-A	2.38 ± 0.29	94 ± 12
D-MT10-B	1.51 ± 0.20	60 ± 8
D-CH7-A	6.55 ± 0.57	260 ± 22
D-CH7-B	6.15 ± 0.68	244 ± 27
D-L4-A	3.00 ± 0.26	119 ± 10
D-L4-B	9.24 ± 0.82	367 ± 32
D-L4-C	1.75 ± 0.31	69 ± 12
D-L4-D	3.14 ± 0.46	124 ± 18

Nota. Elaboración Propia

Tabla 10

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 del ambiente monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo para cada vivienda de los distritos de la Provincia de Lambayeque

CÓDIGO	Densidad (huellas/mm²)	Concentración (Bq/m³)
D-SL12 -A	2.64 ± 0.41	105 ± 16
D-SL12-B	0.12 ± 0.08	15 ± 3
D-J8-A	2.90 ± 0.37	115 ± 15
D- J8-B	5.19 ± 0.43	205 ± 17
D-MP9-A	1.11 ± 0.18	44 ± 7
D-MP9-B	0.21 ± 0.09	15 ± 3
D-SJ2-A	2.01 ± 0.42	80 ± 16
D-SJ2-B	2.64 ± 0.36	105 ± 14
D-SJ2-C	2.83 ± 0.21	112 ± 8
D-SJ2-D	2.57 ± 0.31	102 ± 12
D-SJ2-E	0.90 ± 0.17	36 ± 7
D-SJ2-F	2.05 ± 0.28	81 ± 11
D-SJ2-G	1.20 ± 0.27	48 ± 10

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 8,9 y 10, se puede observar que hay una tendencia marcada en que las concentraciones mayores se encuentran en los distritos de Chóchope, Lambayeque y Túcume obteniéndose una concentración moderada que exceden los 200 Bq/m³ que es el caso del distrito de Lambayeque.

A continuación se muestra el máximo y mínimo de las concentraciones.

Tabla 11

Máximo y mínimo del período de monitoreo en los distritos de la Provincia de Lambayeque

Máximo (Bq/m ³)	Mínimo (Bq/m ³)
367 ± 32	15 ± 3

Nota: Elaboración Propia

Se puede observar que en el período de medición realizada, el máximo corresponde a

D-L4-B, con 367 Bq/m³ y el mínimo a Mórrope y Salas con 15 Bq/m³

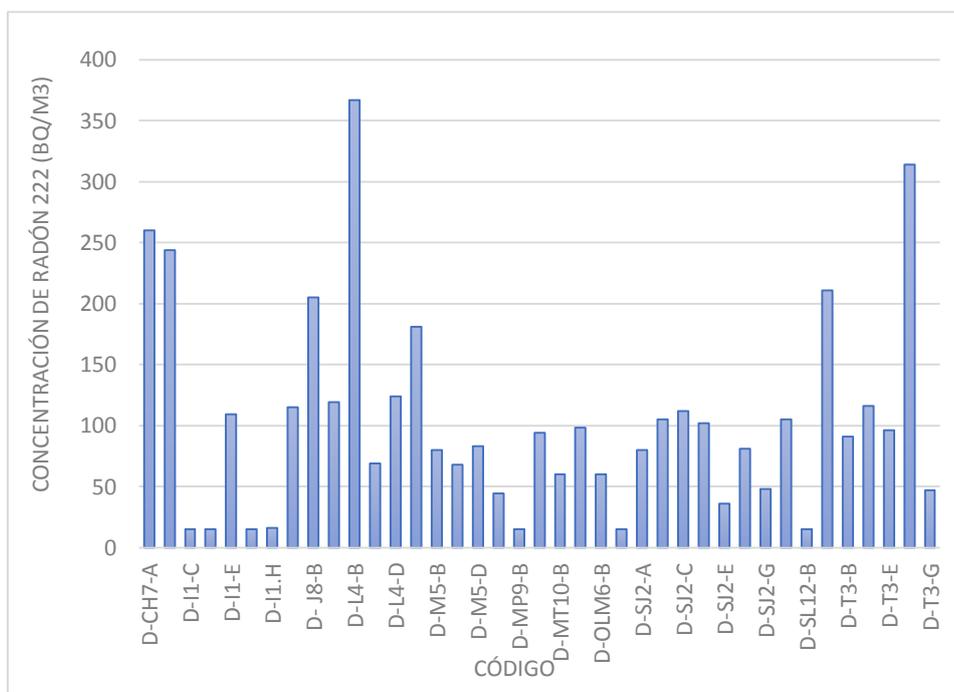


Figura 32. Resultados de la medición de concentración de Rn 222, realizada en los distritos de la Provincia de Lambayeque durante el período de monitoreo. *Elaboración Propia.*

En la Figura 33, se presenta el histograma del Logaritmo natural de los valores de

concentración de Radón obtenidas.

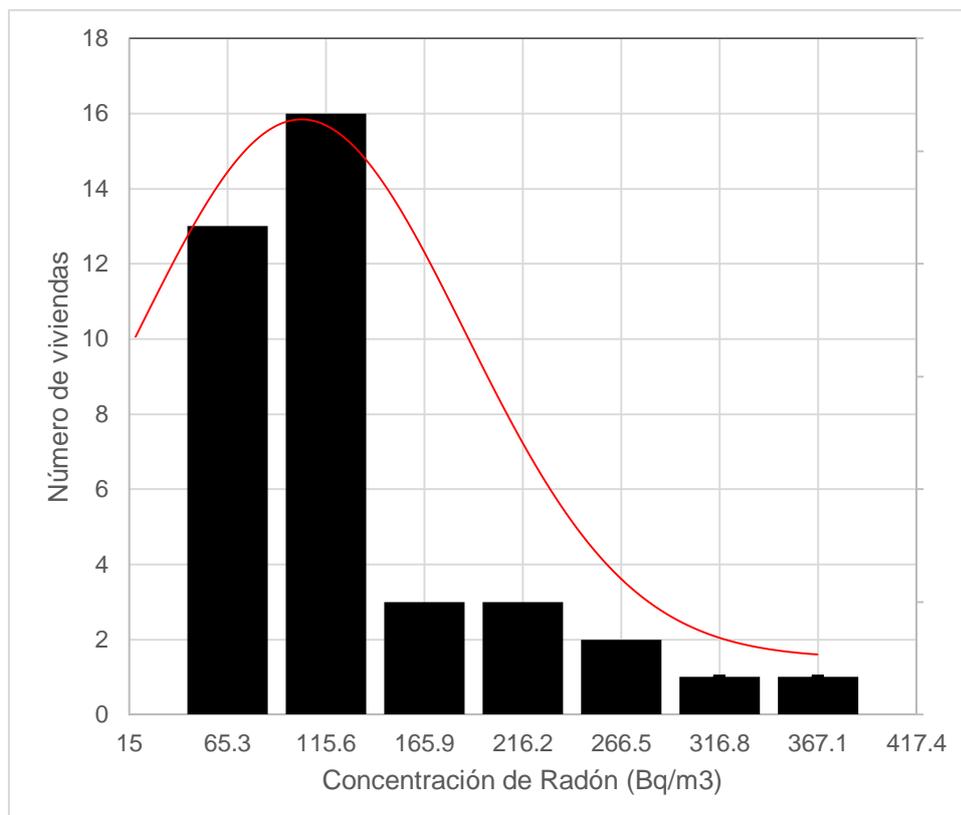


Figura 33. Histograma de los promedios de las concentraciones de Radón 222 en los distritos de la Provincia de Lambayeque. *Elaboración Propia.*

Distribución Log-normal

En la Tabla 12 se presentan los valores de la medida aritmética (promedio), los valores máximos y mínimos, mediana , media geométrica (MG) y desviación estándar geométrica (DEG) de las concentraciones de Radón en Bq/m³, para un total de 39 viviendas.

Tabla 12

Estadística del periodo de monitoreo en Bq/m³

Promedio	Max.	Min.	Mediana	MG	DEG
103,3	367,0	15,00	91	73,3	0,91

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 34, se presenta el histograma del Logaritmo natural de los valores de concentración de Radón obtenidas.

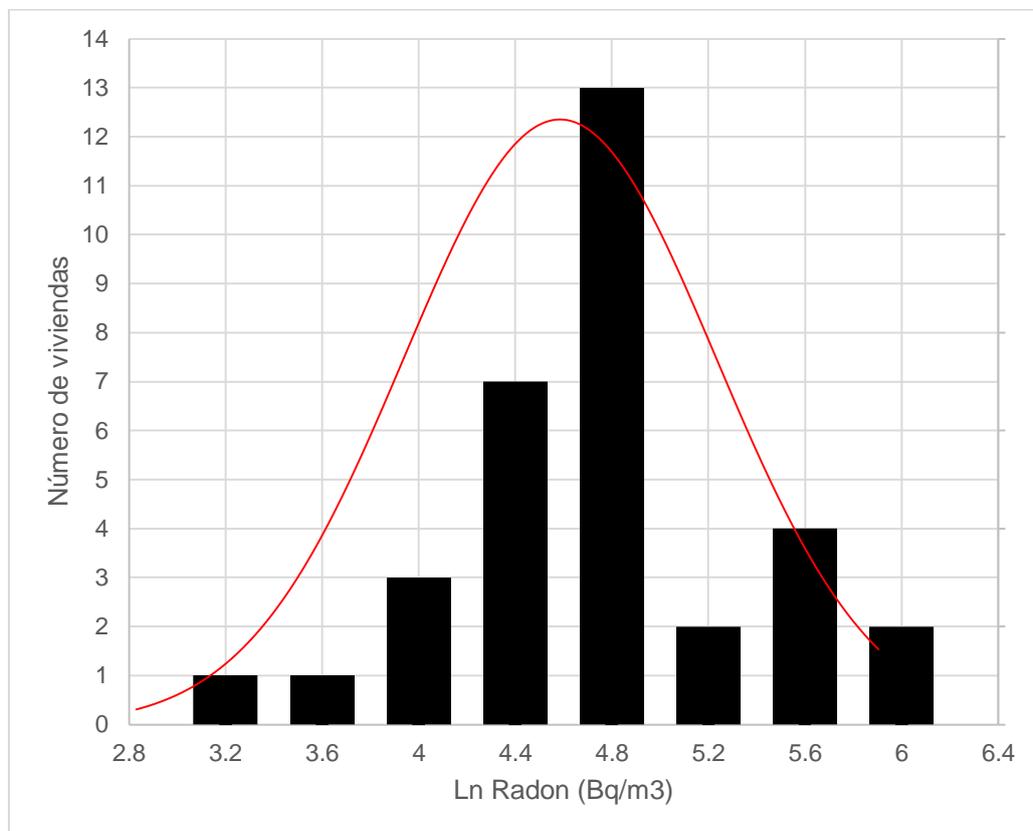


Figura 34. Histograma del Logaritmo natural de las concentraciones obtenidas. *Elaboración Propia*

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

Prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling

Haciendo uso de los gráfico probability plots y el P-value, se evalúa la normalidad de los datos. Hipótesis a contrastar:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal

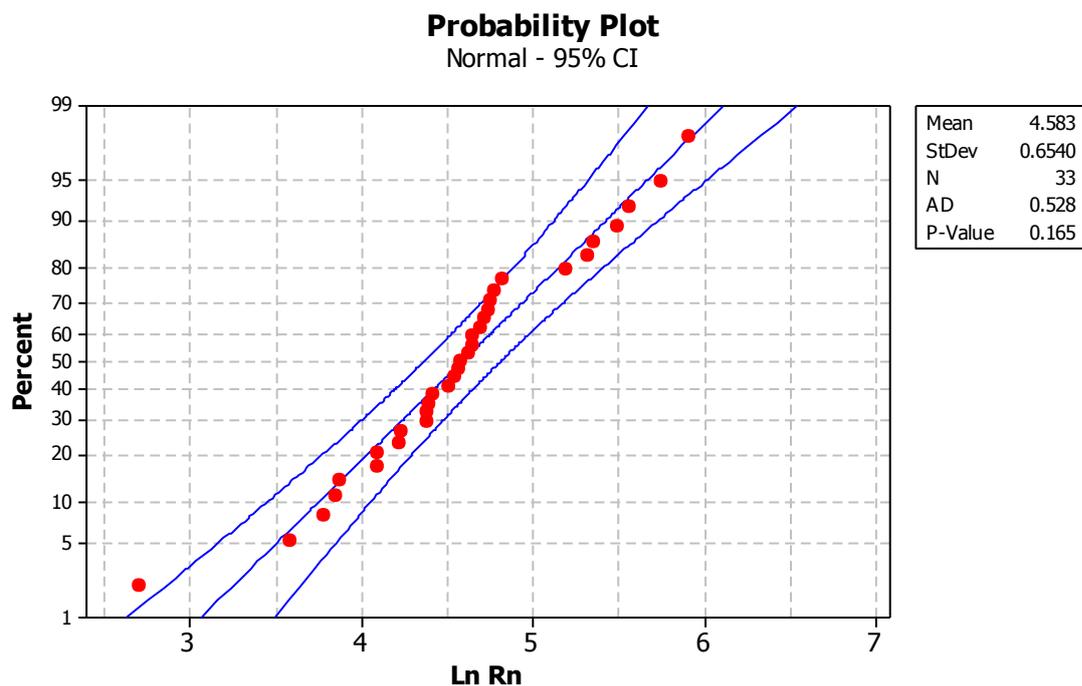


Figura 35: Prueba de Anderson – Darling para período de monitoreo. *Elaboración Propia.*

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

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

De la Figura se puede observar el P-Value igual a 0,165; valor que es mayor 0,05. Por tanto se acepta la hipótesis nula que cumple una distribución normal.

DISCUSIÓN

Los resultados encontramos que las diferencias obtenidas de Radón 222 entre las viviendas se deben básicamente a la antigüedad de su construcción, materiales empleados en la construcción de la vivienda, tipo de recubrimiento, ventilación, influyendo también el lugar donde está ubicada la vivienda. De estas variables, hemos encontrado que la condición más importante e influyente en la detección de Radón 222 es la ventilación de la vivienda o la habitación donde se ejecutó la medición, corroborando lo encontrado por Torres, S. (2015) indicando que en las viviendas de mayor ventilación los niveles de Radón 222 son menores, a diferencia de viviendas con poca ventilación.

El 15% del total de viviendas sobre pasan el Límite Máximo Permisible por Norma, esto corrobora la importancia de este trabajo por su aporte a la salud de la población en forma preventiva, en donde la ubicación de la casa o la localidad no es el único factor decisivo en la concentración de Radón 222 sino el tipo de vivienda y la ventilación.

El mapa de Radón 222 elaborado para la Provincia de Lambayeque, es una herramienta importante para varios propósitos, como definir claramente zonas de alto riesgo de Radón 222 con la finalidad de implementar criterios importantes para la futura implementación de un manual técnico para la construcción de viviendas incluyendo la prevención de Radón. Así como también informar a la población de medidas inmediatas para la reducción de niveles de Radón en sus viviendas.

..

CONCLUSIONES

De la investigación realizada en las viviendas unifamiliares de los distritos de la Provincia de Lambayeque de 2017, para la medición de concentración de Radón 222, se concluye:

1. La Concentración de Radón 222 medidas en viviendas de la ciudad de Lambayeque fue de 367 Bq/m³, en distrito de Túcume fue de 314 Bq/m³ y en el distrito de Chóchope fue de 260 Bq/m³, valores que superan al Límites Máximos Permisibles establecido por la normativa dada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), reglamento de protección radiológica D.S 009-97 EM.
2. La Concentración de Radón 222 fue mayor en viviendas de la ciudad de Lambayeque que supera promedios más elevados que el que recomienda la EPA (Agencia de protección Ambiental) cuyo límite es de 148 Bq/m³.
3. La mayor Concentración de Radón 222 fue determinada en viviendas con poca ventilación, ubicadas en las ciudades de Lambayeque, Túcume y Chóchope.
4. La mayor Concentración de Radón 222 fue determinada en viviendas ubicadas en ciudades de Lambayeque, Túcume y Chóchope, cuyas habitaciones fue de piso natural (piso de tierra) ó falso piso (contrapiso), con respecto a las que tienen piso enlucido.
5. El mapa de Radón 222 fue elaborado por primera vez para la Provincia de Lambayeque.
6. Se realizó una visita a los habitantes de las viviendas cuyos índices de Radón 222 sobrepasó los límites permisibles por norma, capacitándolos con la finalidad que puedan tomar medidas preventivas de reducción de este gas radioactivo en sus viviendas.

REFERENCIA BIBLIOGRÀFICAS.

Acosta, V, *et al* (2014). *Física Moderna*. México. Harla S.A.

Burcham, W. (2015). *Física Nuclear*. Reverte

Efstratios, G. Vogianis and Dimitrios, N. (2014). *Radon Sources and Associated Risk in Terms of Exposure and Dose*. *Front Public Health*. 2:207. Recueprado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4283434/>

Ferrer, A. (2003). *Física Nuclear y de Partículas*. Valencia, España. QUILES Artes Gráficas S. A.Universitat

Fleischer, R., Buford, P.; Walker, R., (1975). *Nuclear Tracks in Solids : Principles and Applications*. Los Angeles, London. The Regents the University of California Press. Recuperado de: https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Principles+and+Applications+Fleischer&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar

Frutos, B. (2009). Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas Radón en edificaciones. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España. Recuperado de: oa.upm.es/22535/1/BORJA_FRUTOS_VAZQUEZ.pdf

Instituto peruano de Energía Nuclear IPEN. (1997). *Reglamento de seguridad radiológica*. Recuperado de: http://www.ipen.gob.pe/transparencia/regulacion/normatividad/ds009_97em.pdf.

Accessed: 2017- 08- 12

Kodalpa Radon- Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications. Recuperado de www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf

Lantz, P., Mendez, D; Philbert M. (2013). *Radon, smoking, and lung cáncer: the need to refocus radón control policy*. US National Library of Medicine National Institutes of

Health103(3):443-7. Recuperado de:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3673501/>

Liza, R. (2017). *Mapeo de Niveles de radón 222 en el Distrito de San Martín de Porres (Lima – Perú)*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

Lottermoser, B. (2007) *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Berlin Heidelberg.

Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública.(2015).Recuperado de: apps.who.int/iris/bitstream/10665/161913/1/9789243547671_spa.pdf

Ortiz, J (2004). *Decaimiento Radiactivo*. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB

Organización Mundial de la Salud (2016). *El Radón y sus efectos en la salud*. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>

Otton, J (1992). *The geology of Radon*.US. Department of the Interior

Pereyra, P. (1991). *Aplicación de la técnica de huellas nucleares en dosimetría de partículas alfa*. (Tesis de bachiller). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima

Pereyra, P. (1998). *Detección de Rn222 en ambientes interiores utilizando la técnica de Huellas nucleares*. (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

Pereyra, P., López, M y Pérez, B. (2014). *Mediciones de la Concentración de Radón 222 en residencias de Lima, Perú*.

Pérez, B. (2015). *Estudio de la contaminación ambiental debido a elementos radiactivos naturales*. (Tesis de bachiller). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

Radiansa Consulting. (2012). *El gas radón: Un gas radiactivo de origen natural*. Recuperado de: <http://radiansa.com/es/radon/elgasradon.htm#queesradon>

Rojas, J. (2016). *Monitoreo de Radón en la zona sur de Lima*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

Zachary, L and Feng, Ch. (2012). *Handbook of Radon : Properties, Applications, and Health*.Hauppauge, N.Y. : Nova Science Publishers.

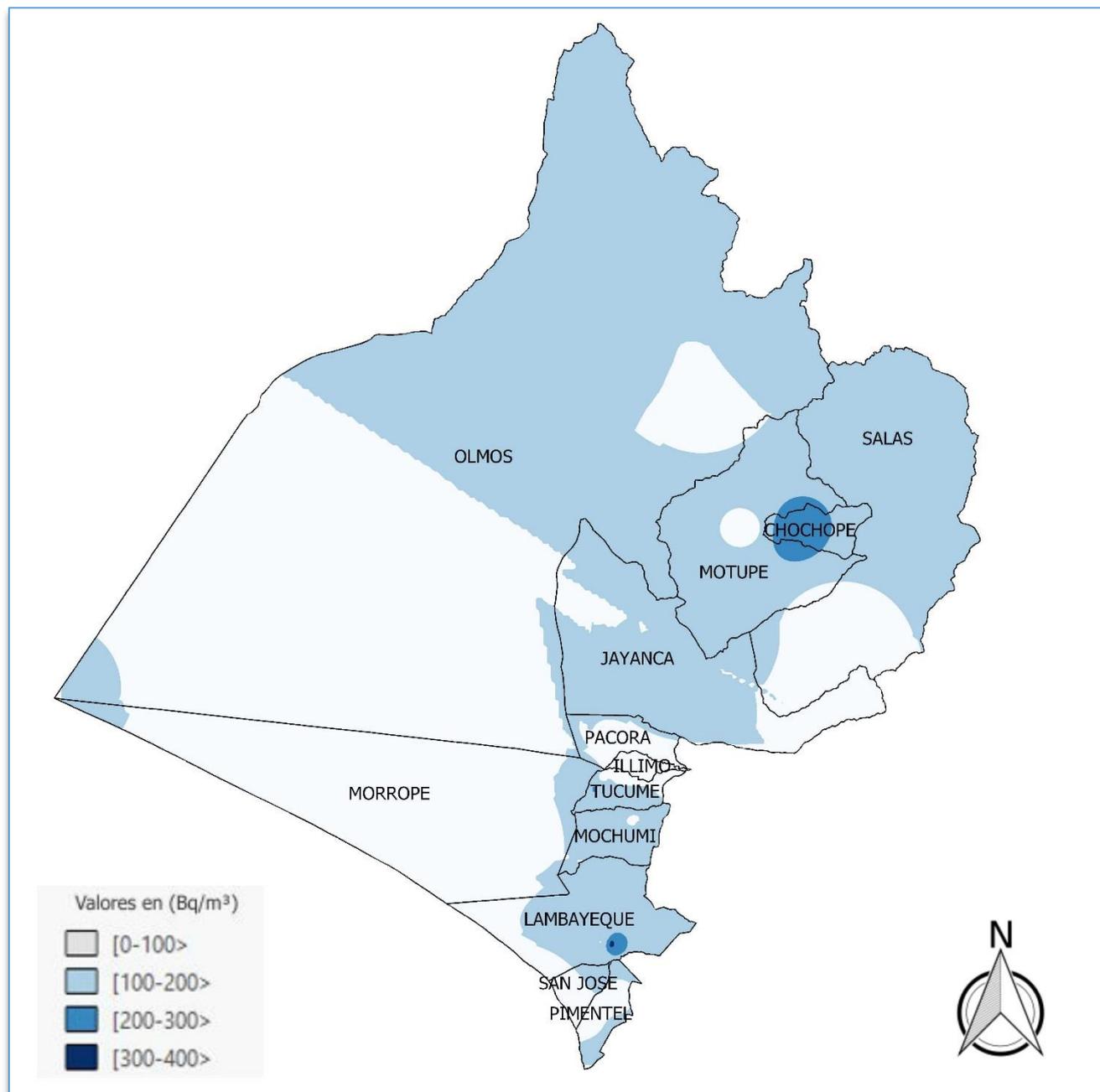
RECOMENDACIONES

A la culminación y al análisis de los resultados obtenidos en la medición de concentración de Radón 222 en las viviendas unifamiliares de los distritos de la Provincia se Lambayeque. Para futuras investigaciones recomendamos:

1. Queda pendiente el estudio entre la incidencia de enfermedades pulmonares y la concentración de radón en viviendas.
2. Curar los resquebrajamientos en suelos, paredes y techos, así como recubrir el suelo con mayólicas, porcelanatos para mitigar la presencia de Radón 222 en las viviendas. Medir nuevamente en las viviendas donde se encontró altas concentraciones.
3. Los sensores deben ser ubicados en un lugar donde no le afecte la radiación solar en forma directa para evitar la influencia de la radiación UV ambiental.
4. Los distritos de la Provincia de Lambayeque muestran una diferencia significativa en las concentraciones de Radón 222, mostrando interés para seguir monitoreando en futuras investigaciones.

ANEXO I

MAPA DE RADÓN 222 DE LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE



ANEXO II

UBICACIÓN DE LUGARES DE MEDICIÓN EN LOS DISTRITOS DE LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE CON EL GPS

Tabla 13*Ubicación GPS de los lugares de medición de los Distritos de la Provincia de Lambayeque*

Código	Longitud	Latitud
D-T3-A	-79.914080	-6.500260
D-T3- B	-79.904711	-6.486410
D-T3-C	-79.857540	-6.508290
D-T3-E	-79.859250	-6.508270
D-T3-F	-79.858550	-6.508960
D-T3-G	-79.859040	-6.509360
D-M5-A	-79.861680	-6.549198
D-M5-B	-79.862840	-6.544515
D-M5-C	-79.863080	-6.546738
D-M5-D	-79.862650	-6.547098
D-I1-C	-79.857500	-6.485290
D-I1-D	-79.855780	-6.473295
D-I1-E	-79.854360	-6.475685
D-I1-G	-79.854410	-6.473882
D-I1-H	-79.854510	-6.473365
D-P11-B	S 06°25'45.5"	WO 79°50' 20.4"
D-OLM6-A	-79.742440	-5.984205
D-OLM6-B	-79.741970	-5.987375
D-MT10-A	S 06°32'57.1"	WO 79°51' 42.1"
D-MT10-B	-79.708650	-6.154819

Nota. Elaboración Propia

Tabla 14*Ubicación GPS de los lugares de medición de los Distritos de la Provincia de Lambayeque*

Código	Longitud	Latitud
D-CH7-A	-79.651200	-6.162320
D-CH7-B	-79.648250	-6.158031
D-L4-A	-79.913460	-6.707925
D-L4-B	-79.895750	-6.706781
D-L4-C	-79.906660	-6.705151
D-L4-D	-79.905010	-6.703031
D-SL12-A	-79.696960	-6.298981
D-SL12-B	-79.604580	-6.273462
D-J8-A	-79.823080	-6.395711
D-J8-B	-79.823130	-6.395683
DMP9-A	-80.016670	-6.539257
DMP9-B	-80.016705	-6.539288
D-SJ2-A	-79.969050	-6.767614
D-SJ2-B	-79.970820	-6.768215
DSJ2-C	-79.966210	-6.769531
DSJ2-D	-79.967580	-6.766635
DSJ2-E	-79.970880	-6.768215
D-SJ2-F	-79.884860	-6.768295
D-SJ2-G	-79.968990	-6.768531

Nota. Elaboración Propia

ANEXO III

CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE MONITOREO DE LOS DISTRITOS DE LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE

Tabla 15*Características del lugar de monitoreo*

CÓDIGO	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE FUMADORES	VENTANAS	QUEDAN ABIERTAS	MATERIAL DE CONSTRUCC.	RECUBRIMIENTO	FISURAS	BUENA VENTILACIÓN	TIPO DE PISO
D-T3-A	3	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-T3-B	30	0	NO	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	NO	CEMENTO
D-T3-C	3	0	SI	SIEMPRE	LADRILLO	CEMENTO	NO	SI	CEMENTO
D-T3-E		0	NO	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	CEMENTO
D-T3-F	50	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	SI	NO	CEMENTO
D-T3-G	18	0	SI	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-M5-A	10	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-M5-B	4	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	MAYÓLICA

Nota. Elaboración Propia

Tabla 16
Características del lugar de monitoreo

CÓDIGO	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE FUMADORES	VENTANAS	QUEDAN ABIERTAS	MATERIAL DE CONSTRUCC.	RECUBRIMIENTO	FISURAS	BUENA VENTILACIÓN	TIPO DE PISO
D-M5-C	20	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-M5-D	1	0	NO	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	NO	MAYÓLICA
D-I1-A	3	0	SI	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	CEMENTO
D-I1-B	55	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-I1-C	35	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	NO	NO	CEMENTO
D-I1-D	26	0	SI	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	SI	NO	CEMENTO
D-I1-E	10	0	SI	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	NO	FALSO PISO
D-I1-G	15	0	SI	EN EL DIA	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	MAYÓLICA

Nota. Elaboración Propia

Tabla 17
Características del lugar de monitoreo

CÓDIGO	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE FUMADORES	VENTANAS	QUEDAN ABIERTAS	MATERIAL DE CONSTRUCC.	RECUBRIMIENTO	FISURAS	BUENA VENTILACIÓN	TIPO DE PISO
D-I1-H	35	0	SI	EN EL DIA	LADRILLO	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-P11-B	22	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	MAYÓLICA
D-OLM6-A	35	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	SI	SI	TIERRA Y ARENA
D-OLM6-B	40	0	SI	NUNCA	LADRILLO	CEMENTO	NO	NO	CEMENTO
D-MT10-A	21	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-MT10-B	55	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-CH7-A	3	0	NO	NUNCA	ADOBE	SIN ACABADO	NO	SI	TIERRA
D-CH7-B	40	0	SI	POR HORAS	ADOBE	SIN ACABADO	NO	NO	TIERRA

Nota. Elaboración Propia

Tabla 18*Características del lugar de monitoreo*

CÓDIGO	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE FUMADORES	VENTANAS	QUEDAN ABIERTAS	MATERIAL DE CONSTRUCC.	RECUBRIMIENTO	FISURAS	BUENA VENTILACIÓN	TIPO DE PISO
D-L4-A	13	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	SI	CEMENTO
D-L4-B	12	0	SI	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	NO	CEMENTO
D-L4-C	4	0	SI	SIEMPRE	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	MAYÓLICA
D-L4-D	50	0	SI	EN EL DIA	ADOBE	PINTURA	NO	SI	CEMENTO
D-SL12-A	9	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	SI	NO	CEMENTO
D-SL12-B	5	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	SI	NO	CEMENTO
D-J8-A	12	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	NO	CEMENTO
D-J8-B		0	SI	EN EL DIA	ADOBE	PINTURA	NO	SI	TIERRA

Nota. Elaboración Propia

Tabla 19*Características del lugar de monitoreo*

CÓDIGO	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE FUMADORES	VENTANAS	QUEDAN ABIERTAS	MATERIAL DE CONSTRUCC.	RECUBRIMIENTO	FISURAS	BUENA VENTILACIÓN	TIPO DE PISO
D-MP9-A	12	0	SI	POR HORAS	ADOBE	PINTURA	SI	NO	CEMENTO
D-MP9-B	14	0	NO	NUNCA	ADOBE	PINTURA	NO	NO	CEMENTO
D-SJ2-A	9	0	SI	EN EL DIA	LADRILLO	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-SJ2-B	25	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	CEMENTO
D-SJ2-C	17	0	NO	NUNCA	LADRILLO	SIN ACABADO	NO	NO	FALSO PISO
D-SJ2-D	32	0	SI	NUNCA	LADRILLO	PINTURA	NO	SI	CEMENTO
D-SJ2-E	40	0	SI	EN EL DIA	LADRILLO	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-SJ2-F	10	0	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	SI	SI	CEMENTO
D-SJ2-G	40	SI	SI	POR HORAS	LADRILLO	PINTURA	SI	SI	OCRE CEMENTO

Nota. Elaboración Propia

ANEXO IV

FICHA DE DATOS DE CADA VIVIENDA MONITOREADA

**FICHA DE UBICACIÓN
DETECTOR DE Rn 222**

Responsable:

--

Código de los detectores

Datos Generales:

Dirección				
Distrito	Teléfono			
Edad aprox. de la construcción (años) Número de habitantes 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	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 Aire de techo acondicionado		Extractor de aire	otro Nada
El sistema adicional está prendido	siempre	nunca	Solo de día	Solo de Por momentos
Material de construcción	ladrillos	adobe		drywall otros
Recubrimiento	pintura madera	papel	mayólica	otros

i el recubrimiento es pintura:

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

Otras características

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

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

Muchas gracias por su participación.

Contacto: María A. González Esqueche

Cel: 953643260

mgones_1026@hotmail.com

ANEXO V

TRIFOLIO DESTINADO PARA CAPACITACIÓN

DE POBLADORES

DETECTAR PARA PROTEGER!



En el interior, el Radón se puede encontrar en niveles más altos

¿Por qué es necesario realizar un estudio de concentración de Radón y sus hijos?

El radón 222 es un gas de origen natural que no tiene color, olor ni sabor, procedente de la desintegración de pequeñas cantidades de uranio presente en el suelo, rocas y agua; al escapar de forma natural hacia la superficie y el medio ambiente, cobra mayor importancia medir las concentraciones de radón 222 en las viviendas y lugares de trabajo. Su presencia es inevitable.

Desde la década de los 80's se han hecho diversos estudios, tratando de correlacionar la inhalación del Radón con la incidencia de cáncer en las vías respiratorias en diferentes partes del mundo.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) lo considera un agente cancerígeno (2016). Así como en el caso del hábito de fumar y el cáncer, los científicos necesitaron muchas décadas para establecer la relación entre estos. Algo similar es el factor Radón, de suma importancia, pues todos estamos expuestos por vivir, trabajar, estudiar en ambientes cerrados donde podría haber una alta concentración de estos elementos.

¿Por dónde ingresa el Radón?

Puede penetrar a través de grietas en cimientos, paredes, suelo, pisos de tierra, uniones de los muros o cavidades internas en las paredes, por el espacio que rodea a las tuberías, a través el agua, etc. El Radón se mueve hacia arriba, a través del suelo, hasta el aire que respiramos. Aunque el radón ha estado siempre presente en el aire, su concentración se ha incrementado significativamente en los últimos años por las construcciones cada vez más herméticas que buscan un mayor ahorro energético.



El Radón se mueve a través de los espacios de poros del suelo y fracturas de roca cerca de la superficie de la tierra por lo general escapa a la atmósfera

¿Cómo afecta el radón en nuestra salud?

La exposición al gas radón es la causa de miles de muertes al año, que pueden ser evitadas. Organizaciones de Salud Pública como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Asociación Americana del Pulmón (ALA), advierten del peligro de la exposición al gas radón.

Evidencias científicas y médicas, establecen que es el segundo factor de riesgo de contraer cáncer de pulmón después del tabaco y el primero en no fumadores.



Cuando al respirar, incorporamos radón a nuestro torrente respiratorio, las partículas altamente radiactivas, se adhieren al tejido pulmonar, donde irradian las células broncopulmonares.

¿Cómo reducir el nivel de Radón?

La ventilación en las habitaciones de las viviendas es fundamental y necesaria, siendo una de las medidas para reducir los niveles de este gas radioactivo. En espacios cerrados, puede inducir al desarrollo de cáncer de pulmón.

Otros procesos que también contribuyen a rebajar la concentración de este gas de origen natural hasta en un 50%:

- Mejorar la ventilación del forjado que no son de material noble.
- Instalar un sistema de extracción mecánica del radón en el sótano, el forjado o la solera.
- Evitar que el radón se filtre desde el sótano hasta las habitaciones sellando el suelo y las paredes.

Datos de Contacto

En caso se cualquier consulta hacerla por correo electrónico
mgones_1026@hotmail.com

Responsable

María A. González Esqueche
Sección Física – PUCP
Of. 305 – Tercer Piso

Telf 626 2000 an 4127

Monitoreo de Radón 222 en Viviendas

LAMBAYEQUE

