



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EXHALACIÓN DEL RADÓN EN DIFERENTES  
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero Ambiental

**AUTOR: XAVIER ISRAEL GUARTATANGA CAIVINAGUA**  
**TUTOR: ING. TONY JESÚS VILORIA ÁVILA, Ph.D.**

Cuenca - Ecuador  
2022

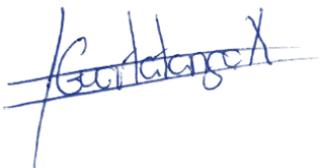
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Xavier Israel Guartatanga Caivinagua con documento de identificación N° 0105116859 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 12 de abril del 2022

Atentamente,



---

Xavier Israel Guartatanga Caivinagua

0105116859

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Xavier Israel Guartatanga Caivinagua con documento de identificación N° 0105116859, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo Experimental: “Análisis comparativo de la exhalación del radón en diferentes materiales de construcción”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de abril del 2022

Atentamente,



---

Xavier Israel Guartatanga Caivinagua

0105116859

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Tony Jesús Viloría Ávila con documento de identificación N° 0838936334, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EXHALACIÓN DEL RADÓN EN DIFERENTES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, realizado por Xavier Israel Guartatanga Caivinagua con documento de identificación N° 0105116859, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de abril del 2022

Atentamente,



---

Ing. Tony Jesús Viloría Ávila, Ph.D.

0838936334

## **DEDICATORIA**

La vida se compone de diferentes retos, entre ellos la finalización de la etapa universitaria, la misma que es parte de la formación personal, académica y profesional. Por este motivo y este gran logro dedico este trabajo a mis padres Silvio Guartatanga y Wilma Caivinagua quienes han sido los pilares muy esenciales durante toda la vida, que con sabios consejos y su amor incondicional supieron apoyarme hasta alcanzar la meta. A mi hermano Sebastián por ser mi compañero, amigo y guía. A mi cuñada Ligia y a mi sobrinito Maty por su inmenso cariño. También dedico este trabajo a María Cristina Astudillo Fajardo quien ha sido una persona muy importante a lo largo de todo este trayecto y agradezco por su sinceridad, transparencia y además de formar parte de mi familia, ser luz en mis caminos oscuros y enseñarme a ser perseverante y nunca renunciar a los sueños a pesar de los obstáculos que se no atraviesen en el camino.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la vida y llenarme de sabiduría para así poder afrontar cada adversidad que se nos presenta en el camino y alcanzar la meta propuesta.

A mi familia por ser un gran apoyo en todo momento, especialmente a mis padres quienes sembraron buenos valores para que pueda crecer como persona.

A mi tutor PhD. Tony Viloría, gracias a su gran conocimiento académico me ha brindado su tiempo y con mucha paciencia me ha sabido guiar durante el desarrollo de este trabajo experimental.

Al Ing. Marlon Javier Loayza, encargado del laboratorio de Radioactividad y Toxicología Ambiental, agradezco por su gran entrega desinteresada al desarrollo del presente estudio.

Al Ing. Fernando Calderón por su colaboración en la realización de este trabajo de titulación.

A mis amigos Marlon Loayza, Cristina Astudillo, Sandy Gaviláñez, Cristian Tapia por su apoyo incondicional.

## RESUMEN

El presente desarrollo de esta investigación ha dado lugar a realizar un análisis comparativo de la exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción debido a que son la segunda fuente de radón-222 en interiores y representan el 20% de la concentración total, donde la materia prima utilizada para la elaboración de los mismos contiene elementos radioactivos como radio-226, torio-232 y potasio-40 provenientes de la cadena de desintegración del uranio-238 que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, la cual llega a exposiciones que se encuentran fuera de los límites permisibles generando un alto riesgo de cáncer de pulmón en la población entre el 3 y 14% según la OMS. Para ello se seleccionaron 6 muestras de materiales de construcción, entre estos (Adobe, Bloque, Ladrillo, Cerámica, Granito y Mármol) de las cuales se tomaron 10 submuestras para el análisis respectivo. Se utilizó dos técnicas diferentes para la medición: Cup Technique para la medir los niveles de exhalación de los materiales antes mencionados y la Can Technique para determinar la concentración de radón-222 y radio-226 de los mismos, para ambos casos se usaron detectores sólidos de trazas nucleares LR-115 tipo 2. Es importante mencionar que para el material bloque fue necesario el recubrimiento con pintura, donde las submuestras fueron pintadas con diferentes capas de pintura, quedando de la siguiente manera: Submuestra 1,2,3 recubierta con una capa, submuestra 4,5,6 recubierta con dos capas, submuestra 7,8,9 recubierta con tres capas y la submuestra 10 no fue recubierta debido a que nos sirve como testigo para poder comparar los niveles de exhalación. En los materiales analizados se encontró que el Adobe y el Granito contienen altos niveles de exhalación por área y masa entre  $(0.24 \pm 0.04 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.106 \pm 0.017 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  para el adobe y  $(0.050 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.022 \pm 0.006 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  para el granito, mientras que los materiales Bloque (recubiertos con pintura) y cerámica contienen los

niveles más bajos entre ( $0.003 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ ,  $0.001 \pm 0.004 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ ) para el bloque con una capa de pintura, ( $0.041 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ ,  $0.017 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ ) para el bloque con dos capas de pintura, ( $0.030 \pm 0.011 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ ,  $0.013 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ ) para el bloque con tres capas de pintura, ( $0.030 \pm 0.007 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ ,  $0.011 \pm 0.003 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ ) para bloque sin pintura y ( $0.030 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ ,  $0.015 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ ). Para verificar que los materiales estudiados contienen elementos radioactivos se procedió al uso de la técnica de espectrometría gamma, para lo cual se empleó el equipo Gamma Trial con lo que se constató que las muestras contienen radio-226, torio-232 y potasio-40 en sus diferentes niveles de energía.

**Palabras clave:** radioactividad, exhalación, actividad, vida media, equilibrio Secular, radón-222, radio-226, cadena de desintegración, espectrometría gamma.

### ABSTRACT

The present development of this research has led to a comparative analysis of radon exhalation in different building materials because they are the second source of radon indoors and represent 20% of the total concentration, where the raw material used For the elaboration of the same, it contains radioactive elements such as radio-226, thorium-232 and potassium-40 from the decay chain of uranium-238 that is found naturally in the earth's crust, which reaches exposures that are found outside the permissible limits generating a high risk of lung cancer in the population between 3 and 14% according to the WHO. For this, 6 samples of construction materials were selected, among them (Adobe, Block, Brick, Ceramic, Granite and Marble) from which 10 subsamples were taken for the respective analysis. Two different techniques were used for the measurement: Cup Technique to measure the exhalation levels of the aforementioned materials and the Can Technique to determine the concentration of radon and radius of the same, for both

cases solid detectors of nuclear traces LR were used -115 type 2. It is important to mention that coating with paint was necessary for the block material, where the subsamples were painted with different layers of paint, being as follows: Subsample 1, 2,3 covered with one layer, subsample 4, 5,6 covered with two layers, subsample 7, 8,9 covered with three layers and subsample 10 was not covered because it serves as a control to be able to compare exhalation levels. In the analyzed materials, it was found that Adobe and Granite contain high levels of exhalation per area and mass between  $(0.24 \pm 0.04 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.106 \pm 0.017 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for adobe and  $(0.050 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.022 \pm 0.006 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for granite, while Block materials (coated with paint) and ceramic contain the lowest levels between  $(0.003 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.001 \pm 0.004 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for the block with one layer of paint,  $(0.041 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.017 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for the block with two layers of paint,  $(0.030 \pm 0.011 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.013 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for the block with three layers of paint,  $(0.030 \pm 0.007 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.011 \pm 0.003 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$  for block without paint and  $(0.030 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2, 0.015 \pm 0.005 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg})$ . To verify that the studied materials contain radioactive elements, the gamma spectrometry technique was used, for which the Gamma Trial equipment was used, which confirmed that the samples contain radio-226, thorium-232 and potassium-40.

**Keywords:** radioactivity, exhalation, activity, half-life, secular equilibrium, radon-222, radio-226, Decay Chain, gamma spectrometry.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Delimitación.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1 Delimitación Académica.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2 Delimitación Temporal.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Explicación del problema .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4.1 Objetivo General.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Marco Referencial.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Difusión de Gases .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Tipos de difusión .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1 Difusión Molecular.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2 Difusión de Knudsen.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Difusión del gas Radón-222.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Mecanismos de Difusión y Convección .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.1 Difusión .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.2 Convección.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Radioactividad.....</b>	<b>8</b>
<b>2.6 Naturaleza de la Radiación .....</b>	<b>9</b>
<b>2.6.1 Radiación Ionizante .....</b>	<b>9</b>
<b>2.6.2 Radiación no Ionizante .....</b>	<b>10</b>
<b>2.7 Radiación ionizante en el ambiente .....</b>	<b>10</b>
<b>2.7.1 Radiación Natural.....</b>	<b>11</b>
<b>2.7.2 Radiación Artificial.....</b>	<b>11</b>
<b>2.8 Dosimetría.....</b>	<b>12</b>
<b>2.8.1 Exposición interna.....</b>	<b>12</b>
<b>2.8.2 Exposición externa .....</b>	<b>12</b>
<b>2.8.3 Energía Alfa potencial .....</b>	<b>12</b>

2.8.4	Dosis anual absorbida.....	13
2.8.5	Dosis anual Equivalente.....	13
2.8.6	Dosis anual efectiva.....	14
2.9	Tipos de Radiación Ionizante.....	16
2.9.1	Radiaciones Corpusculares .....	16
2.9.2	Radiaciones Electromagnéticas .....	17
2.10	Decaimiento Radioactivo.....	18
2.10.1	Ley de Desintegración radioactiva .....	18
2.10.2	Cadenas de desintegración radioactiva.....	19
2.10.3	Actividad.....	20
2.10.4	Periodo de Semidesintegración .....	21
2.10.5	Vida Media .....	22
2.11	Tipos de Decaimiento.....	22
2.11.1	Decaimiento Alfa .....	22
2.11.2	Decaimiento Beta.....	22
2.11.3	Decaimiento Gamma.....	23
2.12	Radio-226 y Radón-222 .....	24
2.12.1	Radio .....	24
2.12.2	Radio-226 .....	24
2.12.3	Radón-222.....	26
2.12.4	Densidad de trazas .....	27
2.12.5	Concentración de radón-222 .....	28
2.12.6	Propiedades Físicas y Químicas.....	28
2.12.7	Índice Alfa.....	29
2.13	Fuentes de radón-222.....	30
2.13.1	Suelo .....	30
2.13.2	Aire Exterior.....	32
2.13.3	Agua de Consumo .....	32
2.13.4	Materiales de construcción.....	32
2.14	Desintegración del radón-222 .....	34
2.15	Transporte del radón-222.....	35
2.16	Emanación .....	36
2.16.1	Factores que afectan la Emanación del radón-222 .....	37
2.16.2	Tasa de emanación.....	38
2.17	Exhalación .....	38

2.17.1	Tasa de exhalación .....	39
2.17.2	Radón-222 integrado.....	40
2.17.3	Exhalación por área .....	40
2.17.4	Exhalación por masa.....	41
2.18	Equilibrio Secular .....	42
2.19	Efectos del radón-222 en la salud humana .....	42
2.20	Detectores sólidos de trazas nucleares SSNTD.....	44
2.20.1	Detectores LR-115 tipo II.....	44
2.20.2	Generación de trazas .....	45
2.21	Normativa .....	45
2.21.1	Ente regulador en Ecuador .....	45
2.21.2	Normativa Internacional .....	46
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>47</b>
3.	Marco Metodológico .....	47
3.1	Materiales y métodos .....	47
3.1.1	Diseño .....	47
3.2	Técnica de la lata invertida (Cup technique).....	48
3.2.1	Construcción de cámaras de difusión.....	48
3.2.2	Exposición en diferentes materiales de construcción.....	48
3.3	Técnica de la lata sellada (Can technique).....	50
3.3.1	Construcción de cámaras de difusión.....	50
3.3.2	Preparación de muestras pulverizadas .....	51
3.3.3	Exposición en materiales de construcción.....	52
3.3.4	Proceso de revelado de detectores LR-115.....	53
3.3.5	Tratamiento químico .....	53
3.3.6	Lavado y secado de detectores .....	54
3.3.7	Conteo de trazas nucleares.....	55
3.4	Medición de radioactividad en materiales de construcción mediante espectrometría gamma. .....	56
3.4.1	Preparación de la muestra .....	56
3.4.2	Análisis Radio-226 métrico .....	57
3.4.3	Calibración por energía.....	57
4.	Resultados.....	58
4.1	Concentración de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique.....	58

<b>4.2 Exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique.....</b>	<b>66</b>
4.2.1 Exhalación por área.....	73
4.2.2 Exhalación por masa.....	73
<b>4.3 Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can Technique .....</b>	<b>74</b>
4.3.1 Concentración de radio-226 .....	81
4.3.2 Análisis estadístico .....	81
<b>4.4 Dosis anual absorbida.....</b>	<b>87</b>
<b>4.5 Dosis anual equivalente .....</b>	<b>88</b>
<b>4.6 Dosis anual efectiva.....</b>	<b>89</b>
<b>4.7 Exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup Technique. ....</b>	<b>90</b>
4.7.1 Exhalación por área.....	90
4.7.2 Exhalación por masa.....	92
<b>4.8 Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup technique.....</b>	<b>103</b>
<b>4.9 Análisis estadístico .....</b>	<b>104</b>
<b>4.10. Dosis anual absorbida.....</b>	<b>120</b>
<b>4.11. Dosis anual equivalente .....</b>	<b>121</b>
<b>4.12. Dosis anual efectiva.....</b>	<b>123</b>
<b>5. Discusión .....</b>	<b>126</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>128</b>
<b>7. Recomendaciones .....</b>	<b>129</b>
<b>8. Referencias.....</b>	<b>133</b>
<b>9. Anexos .....</b>	<b>139</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Distancias de difusión media de los isótopos de Radón-222.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 2. Factores de ponderación de la radiación recomendados.....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 3. Factores de ponderación de tejidos recomendados.....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 4. Series de decaimiento naturales.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 5. Principales isótopos del radio-226. ....</b>	<b>24</b>

<b>Tabla 6. Propiedades físicas y químicas del radón-222 .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 7. Concentración de radio-226 y radón-222 en diferentes tipos de roca. ....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 8. Concentraciones de radón-222 presentes en materiales de construcción. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 9. Cadena de desintegración del radón-222. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 10. Factores que afectan la emanación del radón-222. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 11. Concentración de radón-222 en adobe (pulverizado) .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 12. Concentración de radón-222 en bloque (pulverizado).....</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 13. Concentración de radón-222 en ladrillo.....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 14. Concentración de radón-222 en cerámica.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 15. Concentración de radón-222 en granito.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 16. Concentración de radón-222 en Mármol .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 17. Exhalación de radón-222 en adobe (pulverizado) .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 18. Exhalación de radón-222 en bloque (pulverizado).....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 19. Exhalación de radón-222 en ladrillo (pulverizado).....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 20. Exhalación de radón-222 en cerámica (pulverizado).....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 21. Exhalación de radón-222-222 en granito (pulverizado) .....</b>	<b>71</b>
<b>Tabla 22. Exhalación de radón-222 en Mármol (pulverizado) .....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 23. Concentración de Radio-226 en adobe (pulverizado) .....</b>	<b>75</b>
<b>Tabla 24. Concentración de radio-226 en bloque (pulverizado).....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 25. Concentración de radio-226 en ladrillo (pulverizado).....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 26. Concentración de radio-226 en cerámica (pulverizado).....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 27. Concentración de radio-226 en granito.....</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 28. Concentración de radio-226 en mármol (pulverizado).....</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 29. Dosis anual absorbida, equivalente, efectiva en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabla 31. Exhalación de radón-222 en bloque con una capa de pintura (sólido).....</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 32. Exhalación de Radón-222 en bloque con dos capas de pintura (sólido).....</b>	<b>96</b>
<b>Tabla 33. Exhalación de radón-222 en bloque con tres capas de pintura (sólido) .....</b>	<b>97</b>
<b>Tabla 34. Exhalación de radón-222 en bloque sin pintura (sólido) .....</b>	<b>98</b>
<b>Tabla 35. Exhalación de radón-222 en ladrillo (sólido) .....</b>	<b>99</b>
<b>Tabla 36. Exhalación de radón-222 en cerámica (sólido).....</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 37. Exhalación de radón-222 en granito (sólido) .....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 38. Exhalación de radón-222 en mármol .....</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 39. Concentración de radio-226 en adobe (sólido) .....</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 40. Concentración de radio-226 en bloque con una capa de pintura (sólido).....</b>	<b>112</b>

Tabla 41. Concentración de radio-226 en bloque con dos capas de pintura (sólido) .....	113
Tabla 42. Concentración de radio-226 en bloque con tres capas de pintura (sólido) .....	114
Tabla 43. Concentración de radio-226 en bloque sin pintura (sólido) .....	115
Tabla 44. Concentración de radio-226 en ladrillo (sólido) .....	116
Tabla 45. Concentración de radio-226 en cerámica (sólido) .....	117
Tabla 46. Concentración de radio-226 en granito (sólido) .....	118
Tabla 47. Concentración de radio-226 en mármol.....	119
Tabla 48. Dosis anual absorbida, equivalente, efectiva en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup technique.....	125
Tabla 49. Análisis de la Concentración de radón-222 según diferentes Autores. ....	131
Tabla 50. Análisis de la Exhalación por área de radón-222 según diferentes Autores.....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de exposición natural y artificial.....	11
Figura 2. Tipos de radiación ionizante .....	16
Figura 3. Decaimiento radioactivo. Los átomos que poseen núcleos inestables se convertirán en núcleos estables a través de la emisión de radiación de partículas $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ ....	18
Figura 4. Ley de decaimiento radioactivo .....	19
Figura 5. Cadena de desintegración radioactiva del uranio-238 .....	20
Figura 6. Decaimiento Alfa.....	22
Figura 7. Decaimiento Beta .....	23
Figura 8. Decaimiento Gamma .....	23
Figura 9. Cadena de desintegración del radio-226.....	25
Figura 10. Vías de entrada del gas Radón-222 en una vivienda .....	31
Figura 11. Representación esquemática de la producción del radón-222 en el suelo y su entrada hacia una vivienda o edificio. ....	35
Figura 12. Esquema de emanación de radón-222.....	37
Figura 13. Transporte de radón-222 en suelo y materiales de construcción. ....	39
Figura 14. Equilibrio secular.....	42
Figura 15. Transporte de radón-222 en el sistema respiratorio.....	43
Figura 16. Detector LR-115 Tipo II.....	44
Figura 17. Mecanismo de daño de una partícula alfa en un polímero. ....	45

Figura 18. Elaboración de las cámaras de difusión.....	48
Figura 19. Configuración experimental para la medición de la tasa de exhalación. ....	49
Figura 20. Exposición de los detectores LR-115 Tipo II.....	50
Figura 21. Cámara de difusión para determinar concentración y exhalación de radón-222 .....	51
Figura 22. Procesamiento de muestras.....	52
Figura 23. Exposición de la muestra.....	53
Figura 24. Tratamiento químico de detectores.....	54
Figura 25. Proceso de lavado y secado de detectores .....	55
Figura 26. Técnica de conteo en un microscopio óptico. ....	56
Figura 27. Concentración de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique. ....	65
Figura 28. Distribución de las concentraciones de radón-222 en diferentes materiales de construcción .....	66
Figura 29. Exhalación por área.....	73
Figura 30. Exhalación por masa .....	74
Figura 31. Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can Technique.....	81
Figura 32. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....	83
Figura 33. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....	83
Figura 34. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....	84
Figura 35. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....	84
Figura 36. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....	85
Figura 37. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....	85
Figura 38. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....	86
Figura 39. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....	86
Figura 40. Tasa de dosis anual absorbida .....	88
Figura 41. Tasa de dosis anual equivalente.....	89
Figura 42. Tasa de dosis anual efectiva .....	90
Figura 43. Exhalación por área ( sólido).....	91
Figura 44. Exhalación por área ( bloque sólido).....	91
Figura 45. Exhalación por masa (sólido).....	92
Figura 46. Exhalación por masa (bloque sólido) .....	93

<b>Figura 47. Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup Technique.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 48. Concentración de radio-226 en (bloque sólido) mediante la técnica cup technique con diferentes capas de pintura.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 49. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 50. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 51. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones .....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 52. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones .....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 53. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 54. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 55. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 56. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 57. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 58. Tasa de dosis anual absorbida (sólido) .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 59. Tasa de dosis anual absorbida (bloque sólido).....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 60. Tasa de dosis anual equivalente (sólido).....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 61. Tasa de dosis anual equivalente (bloque sólido) .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 62. Tasa de dosis anual efectiva (sólido) .....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 63. Tasa de dosis anual efectiva (bloque sólido).....</b>	<b>124</b>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1. Coeficiente de difusión molecular.....</b>	<b>5</b>
<b>Ecuación 2. Difusión de Knudsen.....</b>	<b>5</b>
<b>Ecuación 3. Difusión de Knudsen para un poro cilíndrico .....</b>	<b>6</b>
<b>Ecuación 4. Ley de fick.....</b>	<b>7</b>
<b>Ecuación 5. Dosis Absorbida.....</b>	<b>13</b>
<b>Ecuación 6. Dosis anual equivalente.....</b>	<b>14</b>
<b>Ecuación 7. Dosis anual efectiva .....</b>	<b>15</b>
<b>Ecuación 8. Ley de Decaimiento radioactivo.....</b>	<b>19</b>
<b>Ecuación 9. Actividad radioactiva.....</b>	<b>21</b>
<b>Ecuación 10. Periodo de semidesintegración.....</b>	<b>21</b>
<b>Ecuación 11. Tiempo efectivo.....</b>	<b>25</b>
<b>Ecuación 12. Concentración de radio-226 .....</b>	<b>26</b>

<b>Ecuación 13. Densidad de trazas .....</b>	<b>27</b>
<b>Ecuación 14. Concentración de Radón-222 .....</b>	<b>28</b>
<b>Ecuación 15. Índice alfa.....</b>	<b>29</b>
<b>Ecuación 16. Generación y transporte de radón-222 .....</b>	<b>36</b>
<b>Ecuación 17. Tasa de exhalación .....</b>	<b>39</b>
<b>Ecuación 18. Radón-222 Integrado .....</b>	<b>40</b>
<b>Ecuación 19. Exhalación por área .....</b>	<b>41</b>
<b>Ecuación 20. Exhalación por masa.....</b>	<b>41</b>
<b>Ecuación 21. Equilibrio secular .....</b>	<b>42</b>
<b>Ecuación 22. Calibración por energía.....</b>	<b>57</b>

# CAPÍTULO I

## 1. Introducción

### 1.1 Problema

De acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación de Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) el radón-222 es considerado como elemento carcinógeno del grupo 1 y del Grupo A, afectando la salud de las personas a través de la inhalación de este gas; así como de sus productos de desintegración. Mientras que la Organización Mundial de la Salud lo ha declarado como uno de los principales agentes cancerígenos; siendo la segunda causa de cáncer de pulmón en fumadores y la primera en no fumadores. El radón-222 es un gas de origen natural que emana desde la corteza terrestre hacia cualquier lugar por lo que, se puede encontrar en diferentes materiales de construcción. Por sus propiedades físico-químicas se dispersan fácilmente en el ambiente generando un problema principalmente en lugares cerrados tales como fosas, edificios y viviendas que no cuentan con un sistema de ventilación adecuado. Las altas concentraciones de este elemento radioactivo en espacios con poca ventilación han generado mayor exposición a este gas, mientras mayor concentración y mayor tiempo de exposición exista mayores serán los daños en el organismo. La Comisión de Protección Radiológica (IRCP), establece como nivel de referencia para los hogares una concentración entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup> equivalente a una dosis anual efectiva de 17mSv, mientras que la misma concentración de radón-222 en edificios tendrá un valor que oscila entre los 500 y 1500 Bq/m<sup>3</sup> equivalente de 8mSv (ICRP, 2007). Por otro lado, los materiales de construcción son la segunda fuente de radón-222 en interiores. La concentración de radón-222 doméstico, no solo depende de la emisión de radón-222 (el cual es directamente proporcional a la concentración de radio-226), sino de factores tales como la concentración de uranio en el suelo sobre el cual está construida la

vivienda, y las propiedades físicas del mismo, la porosidad del material de construcción, la permeabilidad y la preparación de la superficie y el acabado de las paredes. Es frecuente encontrar entre los materiales de construcción productos con un contenido en radio-226 y torio de hasta 50 Bq/kg. Algunos, conteniendo subproductos de yeso y hormigón con alumbre bituminoso, pueden presentar, incluso, concentraciones superiores, la concentración en ladrillos y hormigón puede ser alta si los materiales básicos se han extraído de zonas con elevadas concentraciones de materiales radiactivos de origen natural (NORM) (Barenguer, 2004).

## **1.2 Delimitación**

### **1.2.1 Delimitación Académica**

Para la realización del presente estudio se recurrió al uso del laboratorio de radioactividad ambiental y toxicología de la carrera de Ingeniería Ambiental, así como también de la biblioteca virtual.

### **1.2.2 Delimitación Temporal**

Para la determinación de las concentraciones de radón-222 y sus progenies de los materiales de construcción (Adobe, Bloque, Ladrillo, Cerámica, Granito, Mármol) se seleccionaron aleatoriamente diez muestras de cada uno. El tiempo exposición de los detectores de trazas nucleares LR-115 fue de 45 días (Oufni, 2003).

## **1.3 Explicación del problema**

El radón-222, el torón y sus productos de desintegración de vida corta son la fuente más importante de radiación ionizante natural y su inhalación contribuye a una fracción importante alrededor del 50% de la dosis de radiación natural de fondo para los seres humanos. El radón-222 es un gas noble formado a partir del radio-226, que es un producto de desintegración del Uranio-238 junto con los isótopos del Torón 220. El gas radón-222, que tiene una vida media de 3.8 días, emana de

rocas y suelos y tiende a concentrarse en espacios cerrados como minas o casas subterráneas. En espacios reducidos tales como casas, sótanos y edificios de oficinas, el Radón-222 se acumula en los niveles más bajos y puede representar un contribuyente importante a la exposición a largo plazo de la población humana. La mayor concentración de estos gases en el interior se debe a la alta densidad, en comparación con el aire, y la baja presión dentro de la casa que en el exterior, que obliga a movilizar estos isótopos radiactivos del material de construcción, a través de grietas o huecos en las paredes y el piso. El radón-222 en sí no es peligroso ya que se elimina rápidamente a medida que exhalamos el aire que entra en los pulmones, pero sus elementos secundarios pueden ser peligrosos. Los productos de desintegración de vida media corta del radón-222 (polonio-212 y polonio-214) son elementos sólidos que por estar cargados eléctricamente se adhieren al polvo, para luego adherirse a las paredes del tracto respiratorio o los bronquios (P. Singh et al., 2015). Dentro de las afecciones que llega a generar una exposición considerable al gas radón-222 en espacios cerrados o pocos ventilados, tenemos la incidencia sobre el aparato respiratorio y consecuente de ello la posible generación de cáncer de pulmón que después del tabaco está considerado como la segunda causa más importante en la generación de dicha enfermedad en personas fumadoras, convirtiéndose en la primera causa de la generación de cáncer de pulmón en personas no fumadoras (Organización Mundial de la Salud, 2016).

¿Cuáles son los niveles de concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 en los diferentes materiales de construcción y el riesgo de adquirir cáncer de pulmón al estar expuesto a concentraciones altas?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar y analizar la exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Determinar los niveles de exhalación de radón-222 de los diferentes materiales de construcción.
- Medir la concentración de radón-222 y radio-226 en los diferentes materiales de construcción.
- Correlacionar estadísticamente los resultados obtenidos de los niveles de exhalación de radón-222 y concentración de radio-226 y radón-222 de las mismas.

## **CAPÍTULO II**

### **2. Marco Referencial**

#### **2.1 Difusión de Gases**

Se conoce como difusión al proceso por el cual las moléculas de gas se desplazan de forma aleatoria desde un sistema a otro. El comportamiento independiente de cada molécula y el movimiento aleatorio ocasiona la colisión con otras, teniendo como resultado el transporte hacia zonas de mayor o menor concentración (Westwater & Drickamer, 1957). Generalmente existe tres tipos de difusión de gases: difusión de Knudsen, difusión molecular y difusión superficial, las cuáles se encuentran relacionadas con el gradiente de presión o concentración (Sercombe, Vidal, Gallé, & Adenot, 2007).

#### **2.2 Tipos de difusión**

##### **2.2.1 Difusión Molecular**

Es el mecanismo por el cual las moléculas de diferentes especies de una mezcla de gases se distribuyen de manera uniforme hacia otro gas bajo la influencia de un gradiente y las colisiones moleculares dominan sobre las colisiones con las paredes del poro. En un medio poroso el

coeficiente de difusión molecular de un gas se define mediante la siguiente expresión (Sercombe et al., 2007):

$$D_m = \frac{\varepsilon}{\tau} * D_0 \quad (1)$$

*Ecuación 1. Coeficiente de difusión molecular*

*Donde:*

**$D_m$** : Coeficiente de difusión molecular

**$\varepsilon$** : porosidad de un medio

**$\tau$** : tortuosidad de la red porosa de un medio

**$D_0$** : Coeficiente de difusión de un gas en el aire (m<sup>2</sup>/s)

### **2.2.2 Difusión de Knudsen**

Este mecanismo ocurre cuando la densidad del gas es tan baja que las moléculas del gas colisionan principalmente entre las paredes del poro y no entre las propias moléculas. La difusividad de Knudsen depende del Radio-226 del poro y de la velocidad molecular (Masciarelli, Stancich, & Stoppani, 2012). En un medio poroso el coeficiente de difusión se define de la siguiente forma:

$$D_k = \frac{\varepsilon}{\tau} * D_{poro} \quad (2)$$

*Ecuación 2. Difusión de Knudsen*

*Donde:*

**$D_k$** : Coeficiente de difusión molecular

$\varepsilon$ : porosidad de un medio

$\tau$ : tortuosidad de la red porosa de un medio

$D_{poro}$ : Coeficiente de difusión de un gas en un poro cilíndrico de Radio-226 r.

Mientras que para un poro cilíndrico de radio r, el coeficiente de difusión tiene la siguiente expresión:

$$D_{poro} = \frac{2r}{3} \left( \frac{8RT}{\pi * M_i} \right)^{1/2} \quad (3)$$

*Ecuación 3. Difusión de Knudsen para un poro cilíndrico*

*Donde:*

$r$ : radio del poro

$R$ : ley ideal de los gases

$T$ : temperatura absoluta (K)

$M$ : peso molecular de un gas (g/mol)

### **2.3 Difusión del gas Radón-222**

Según (S. yang Feng et al., 2019) las partículas alfa del Radón-222 se emiten desde medios porosos hacia la atmósfera mediante procesos de difusión y convección. Cuando el Radón-222 se desplaza existe una distancia promedio de difusión antes de que el núcleo desaparezca, esa distancia se encuentra representada por  $\sqrt{D\tau}$ , donde  $\tau$  es la vida media del isótopo, de tal manera que para suelos secos la distancia es de 1.6 m, mientras para suelos húmedos con altas concentraciones de agua la distancia es de 1.6 cm (Tabla 1) (J. Rojas, 2016).

Tabla 1. Distancias de difusión media de los isótopos de Radón-222. Fuente: (Durrani, Saaed & Radomir, 1997)

Medio	$\sqrt{D\tau_{\text{Radón-222}}}$ (cm)	$\sqrt{D\tau_{\text{Radón-220}}}$ (cm)	Constante de Difusión D (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Aire	220	2.85	10 <sup>-1</sup>
Suelo poroso	115	2	5 x 10 <sup>-2</sup>
Agua	2.2	0.0285	10 <sup>-5</sup>
Suelo poroso saturado	1.5	0.020	5 x 10 <sup>-6</sup>

## 2.4 Mecanismos de Difusión y Convección

### 2.4.1 Difusión

La difusión se encuentra gobernada por la primera ley de Fick y se entiende como el proceso de movimiento del gas debido a diferencias de concentraciones, desde un área de alta concentración a otra de baja concentración y relaciona el flujo del fluido a través del área en el medio con su gradiente de concentración (Guevara, 2019).

$$j_d = -D_e * \nabla C \quad (4)$$

Ecuación 4. Ley de fick

Donde:

$j_d$ : densidad de flujo difusivo de actividad de Radón-222 por unidad de área ( $Bq * m^2 * s^{-1}$ )

$C$ : Concentración de Radón-222  $\left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$

**D:** Coeficiente de difusión efectivo ( $m^2 * s^{-1}$ ). El signo negativo se debe porque al ser un fluido tiende a transportarse de lugares de mayor a menor concentración, en dirección opuesta a la del gradiente creciente de concentración.

### **2.4.2 Convección**

Es el movimiento del fluido en el que se encuentra el gas por gradientes de temperaturas o presiones. Este es el mecanismo predominante en los suelos sobre los que se asientan las viviendas (Linares, 2015)

## **2.5 Radioactividad**

El descubrimiento de la Radio-226 actividad se remonta a principios del siglo XX en el año de 1896 cuando el científico francés Henri Becquerel durante su investigación sobre fluorescencia observa el revelado de placas que permanecían guardadas en una caja de cartón conjuntamente con sales de Uranio. A esto se suman otros descubrimientos de gran importancia como el de Röntgen en 1897 que a través de investigaciones sobre rayos catódicos descubre los rayos X. Para el año de 1898 Pierre y Marie Curie profundizan la investigación descrita por Becquerel, encontrando un elemento denominado Torio, el cual emitía una radiación similar al del Uranio y ubica otros compuestos a los que denominó Polonio y Radio-226. Las emisiones producidas por estos componentes naturales, conocidos como Radionucleidos, constituyen lo que se conoce como Radioactividad (Hernández Mendoza, 2011). Por lo tanto la Radioactividad se denomina como la emisión espontánea de energía de partículas de sustancias Radioactivas que emiten radiaciones ionizantes desde el núcleo de los átomos en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio (Roglá, 2004). Una de las características de estas sustancias radica en la desintegración constante en otras, emitiendo radiación y liberando energía, las mismas que provocan reacciones químicas con el material que están interactuando y tienen la capacidad de modificar el ADN, generando

cambios en las células reproductoras mediante la ruptura de los enlaces químicos (Ferrer, 2009). La unidad que representa la Radioactividad es el electrón voltio (eV), y su cuantificación se encuentra en función de la fuerza de radiación y la cantidad de energía liberada, de acuerdo al tipo de radiaciones se pueden clasificar en: alfa, beta, gamma, neutrones y electromagnéticas (Sambache Lisintuña, 2019).

## **2.6 Naturaleza de la Radiación**

En este Universo muy extenso podemos encontrar diversas fuentes de radiación en el cual los seres humanos se encuentran expuestos a diferentes niveles, no solamente de aquellas que se originan de fuentes naturales como el Radón-222 (suelo), el sol y rocas, sino también de fuentes artificiales que ocasiona este tipo de radiación como centrales nucleares etc. (Arellano, 2015). Según (Hoyos & Flores, 2013) las radiaciones se pueden clasificar de acuerdo a tres criterios: según su fuente, según su naturaleza y según su efecto biológico. Otras actividades laborales que involucran la explotación, perforación, actividades mineras incrementan la exposición a las radiaciones de origen natural por lo que es de mucha importancia su estudio y aplicación de la protección Radiológica. Las principales series de decaimiento que provocan una exposición directa y afecta a la salud humana son los Radionúclidos (U-238, Th-232, K-40) (World Nuclear Association, 2016).

### **2.6.1 Radiación Ionizante**

De acuerdo a la OMS las radiaciones ionizantes son aquellas energías que se liberan de los átomos, se propagan en forma de ondas electromagnéticas y contemplan (rayos gamma, rayos X) o partículas alfa, beta o neutrones. Poseen una longitud de onda menor y una mayor energía que da origen a átomos llamados iones (Sambache Lisintuña, 2019). Los elementos inestables que se desintegran y emiten radiaciones ionizantes se denominan Radionúclidos, los mismos que se

caracterizan de acuerdo con el tipo de radiación que emiten, la energía de radiación y la semivida. La actividad, utilizada como medida de la cantidad de un Radionúclido, se expresa en una unidad llamada becquerel (Bq): un becquerel corresponde a una desintegración por segundo. La semivida es el tiempo necesario para que la actividad de un Radionúclido disminuya por la desintegración a la mitad de su valor inicial o también se puede definir como el tiempo que tarda la mitad de sus átomos en desintegrarse, y puede variar desde una fracción de segundo a millones de años (Organización Mundial de la Salud, 2016).

### **2.6.2 Radiación no Ionizante**

Son aquellas radiaciones electromagnéticas que no tienen la capacidad de desprender electrones de los átomos. Son ocasionadas por las bajas frecuencias del espectro electromagnético pasando por las radiofrecuencias utilizadas en las telecomunicaciones hasta la luz ultravioleta. Las principales fuentes de radiación no ionizantes están presentes en las antenas emisoras de radio y televisión, antenas de telefonía celular, microondas (Andrade Daniel & Contreras Carlos, 2014). Se caracterizan por poseer una longitud de onda mayor y menor energía, las cuales no producen ionización con la materia (Programa de las naciones Unidas para el medio Ambiente, 2016).

### **2.7 Radiación ionizante en el ambiente**

De acuerdo a la UNSCEAR las radiaciones ionizantes presentes en el ambiente provienen de fuentes naturales como la radiación procedente del espacio ultraterrestre o el gas Radón-222 que se emite desde las rocas de la Tierra y de fuentes artificiales tales como procedimientos de diagnóstico médico etc. (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2018).

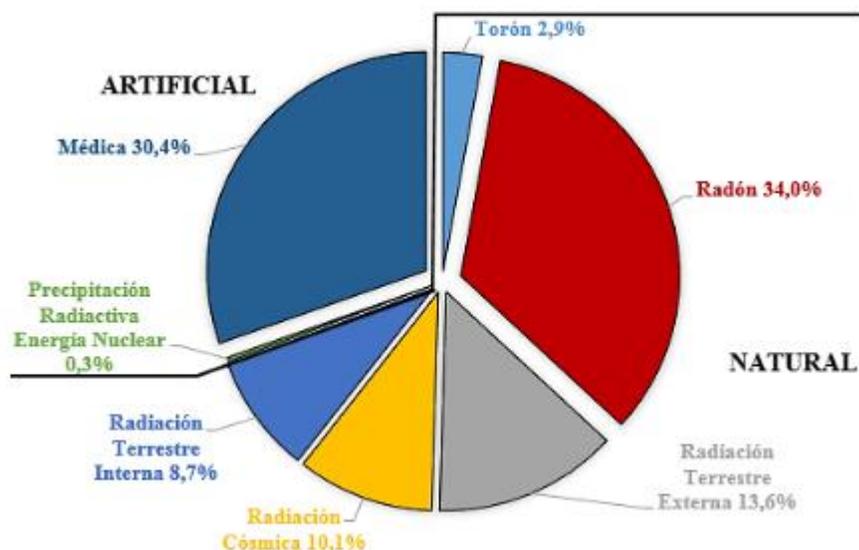


Figura 1. Fuentes de exposición natural y artificial

Fuente: (Quindós Poncela et al., 2004)

### 2.7.1 Radiación Natural

Este tipo de radiaciones se encuentran presentes en todo el medio ambiente, como ejemplo podemos mencionar los elementos radiactivos presentes en los alimentos de consumo diario, otra fuente natural en el que se ubican las radiaciones son el agua; generalmente son muy difíciles de controlar y evitar a que el público se expongan a ellas (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2019). Sin embargo el Radón-222 es la mayor fuente de radiación natural en el ambiente y conjuntamente con las otras fuentes mencionadas emiten una dosis de 3mSv al año (Sánchez, 2020).

### 2.7.2 Radiación Artificial

Son radiaciones provenientes de aparatos inventados por el hombre, los mismos que se utilizan en procedimientos médicos como la radiología y fisioterapia. Dentro de las fuentes de radiación artificial podemos destacar las centrales nucleares de aplicación energética, rayos X, descubiertos

por el físico Roëntgen en 1895 y aplicaciones dentro de la industria como esterilización de alimentos, control de plagas (Consejo de Seguridad Nuclear, 2015).

## **2.8 Dosimetría**

Son magnitudes físicas que se utilizan dentro de la radiología y sirven para correlacionar los efectos reales o potenciales de la radiación sobre la materia (Ubeda et al., 2015).

### **2.8.1 Exposición interna**

Es aquella que se produce cuando un radionúclido es inhalado o ingerido y entra a través del torrente sanguíneo en cantidad superior a un nivel predeterminado. Esta exposición cesa de manera espontánea cuando se elimina por completo el radionúclido del cuerpo mediante algún tratamiento (Organización Mundial de la Salud, 2016)

### **2.8.2 Exposición externa**

Esta exposición se produce cuando los isótopos radioactivos presentes en el aire ya sea en forma de polvo, líquido o aerosoles se adhieren a la piel o ropa, la misma que se puede eliminar del organismo mediante lavado. Por otro lado las personas también pueden estar expuestas a la radiación ionizante en hogares, lugares de trabajo o entornos médicos (pacientes, cuidadores, voluntarios) y la irradiación externa se detiene únicamente cuando la fuente de radiación permanece blindada o la persona salga del campo de irradiación (Organización Mundial de la Salud, 2016).

### **2.8.3 Energía Alfa potencial**

La energía alfa potencial es la sumatoria de energía total de partículas alfa que se emite durante el proceso de desintegración de los descendientes del Radón-222 y torón hasta llegar al Pb-210

(Organismo Internacional de Energía Atómica, 2007); esta energía se representa en Julios (J) o en  $J/m^3$  (B. Feng et al., 2019).

#### 2.8.4 Dosis anual absorbida

La dosis anual absorbida es una magnitud física que expresa la cantidad de energía transmitida sobre un material por unidad de masa. En protección radiológica se utiliza para estimar el daño de un tejido u órgano ocasionado por la radiación y la unidad de medida es el sievert (Sv) (Andisco, Blanco, & Buzzi, 2014).

$$D_{Rn} = C_{Rn} * D * H * F * T \left[ \frac{mSv}{año} \right] \quad (5)$$

*Ecuación 5. Dosis Absorbida*

*Donde:*

***C<sub>Rn</sub>***: Concentración de radón-222  $\left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$

***D***: Factor de conversión  $(9 * 10^{-6}) \left[ \frac{mSv * m^3}{h * Bq} \right]$

***H***: Factor de ocupancia [0.40]

***F***: Factor de Equilibrio [0.40]

***T***: Tiempo de ocupancia  $(24 * 365) \left[ \frac{h}{y} \right]$

#### 2.8.5 Dosis anual Equivalente

La dosis equivalente se define como la magnitud que determina el daño biológico de un órgano o tejido resultante de cualquier tipo de radiación ionizante. La dosis equivalente es proporcional a la dosis absorbida multiplicada por un factor de ponderación (Tabla 2) (ICRP, 2007).

$$H = D_{Rn} * W_R \left[ \frac{mSv}{año} \right] \quad (6)$$

*Ecuación 6. Dosis anual equivalente*

*Donde:*

$D_{Rn}$ : Dosis anual absorbida  $\left[ \frac{mSv}{y} \right]$

$W_r$ : Factor de ponderación de la radiación

*Tabla 2. Factores de ponderación de la radiación recomendados. Fuente:(ICRP, 2007)*

Tipo de Radiación	Factor de ponderación de la radiación
	$W_R$
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión, iones pesados	20
Neutrones	Energía del neutrón

### 2.8.6 Dosis anual efectiva

La dosis efectiva es la magnitud que expresa la probabilidad de efectos estocásticos en determinados órganos y tejidos irradiados. Por lo tanto la dosis efectiva es igual al producto de la dosis equivalente por un factor de ponderación del tejido (Tabla 3) (Andisco et al., 2014).

$$E = D_{Rn} * W_T \left[ \frac{mSv}{año} \right] \quad (7)$$

*Ecuación 7. Dosis anual efectiva*

*Donde:*

$D_{Rn}$ : Dosis anual absorbida  $\left[ \frac{mSv}{y} \right]$

$W_T$ : Factor de ponderación del tejido

*Tabla 3. Factores de ponderación de tejidos recomendados. Fuente: (ICRP, 2007)*

Tejido	$W_T$	$\Sigma W_T$
Médula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de tejidos	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0.04	0.16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0.01	0.04
	Total	1.00

## 2.9 Tipos de Radiación Ionizante

### 2.9.1 Radiaciones Corpusculares

#### 2.9.1.1 Radiación Alfa

Según (Roig, 2013) son partículas pesadas emitidas con mayor energía, se encuentran estructuradas por cuatro núcleos de helio y están cargados por dos protones y dos neutrones. Este tipo de radiación tiene un rango corto en el aire (1-2cm), es poco penetrante y puede ser absorbida completamente por el papel o la piel. La exposición a este tipo de radiaciones puede resultar peligrosa al ingresar al cuerpo por inhalación o ingestión, debido a que las grandes exposiciones pueden afectar a tejidos cercanos de los diferentes órganos como el revestimiento del pulmón o estómago (IAEA, 2004).

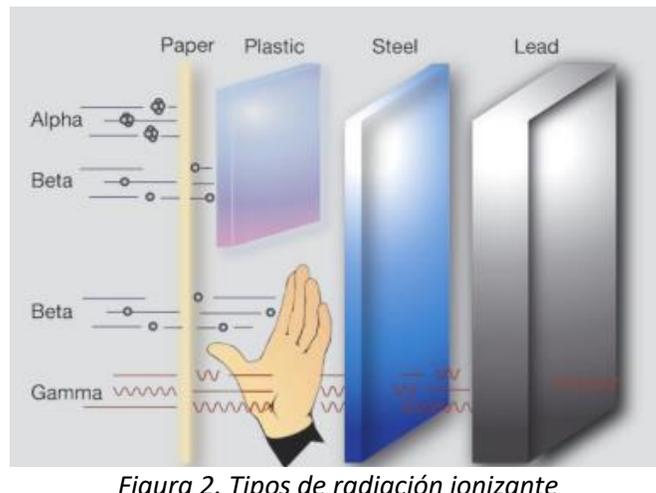


Figura 2. Tipos de radiación ionizante

Fuente: (IAEA, 2004).

#### 2.9.1.2 Radiación Beta

Este tipo de radiaciones se encuentra constituida por electrones del núcleo que son emitidos por sustancias radiactivas a velocidades cercanas a la luz, provenientes de la descomposición del neutrón (neutrón= 1 protón + 1 electrón + 1 neutrino). Tienen origen en isótopos ricos en

neutrones, generalmente son elementos que se producen en centrales nucleares o mediante reacciones nucleares naturales (Federación de enseñanza de comisiones obreras de Andalucía, 2009).

### *2.9.1.3 Neutrones*

Son radiaciones cuyas partículas que poseen baja carga eléctrica y tienen un nivel alto de penetración cuando entran en contacto con la materia. No generan ionización de forma directa pero al interactuar con los átomos pueden liberar rayos alfa, beta o gamma (Serrano Pérez, 2019).

## **2.9.2 Radiaciones Electromagnéticas**

### *2.9.2.1 Radiación Gamma*

Las radiaciones gamma son radiaciones electromagnéticas que se originan en el núcleo del átomo durante procesos de transición energética; es decir las emisiones de partículas alfa o beta generadas en el núcleo pasan de un estado de alta energía a un estado de baja energía (Cherry, Upton, Lodde, & Porter, 2010). Una de las características de estas radiaciones es la cantidad de energía que se encuentra entre los KeV y los MeV (García Pérez, 2013).

### *2.9.2.2 Rayos X*

De acuerdo a (Hoyos & Flores, 2013) los rayos X son radiaciones electromagnéticas ionizantes de onda corta con alta energía que no poseen carga eléctrica y viajan en línea recta a la velocidad de la luz. Tienen la capacidad de atravesar el cuerpo humano proyectando algunas estructuras óseas y órganos en diagnósticos médicos. La energía absorbida por los rayos X se concentra en los tejidos y puede producir ciertos efectos biológicos como alteraciones en las estructuras de ADN generando células cancerosas (Agencia Internacional de Energía Atómica, 2021).

## 2.10 Decaimiento Radioactivo

Se denomina decaimiento radioactivo al proceso nuclear de transición espontánea de energía originada por la inestabilidad en el núcleo; es decir el núcleo pasa de un estado energético inicial a un estado energético final más estable a través de las emisiones de partículas o radiaciones electromagnéticas (DiGregorio, 2021).

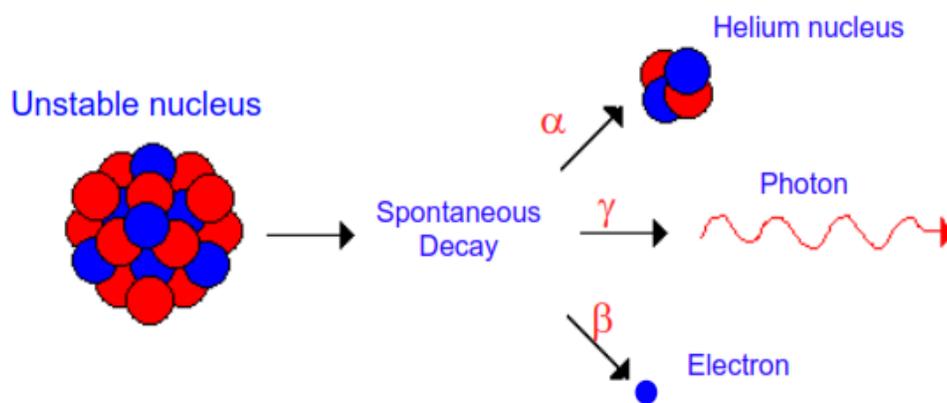


Figura 3. Decaimiento radioactivo. Los átomos que poseen núcleos inestables se convertirán en núcleos estables a través de la emisión de radiación de partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

Fuente: (Rajalakshmi, 2014)

### 2.10.1 Ley de Desintegración radioactiva

Esta ley se fundamenta en la desintegración de un núcleo radioactivo en una unidad de tiempo denominada vida media ( $\tau$ ). El proceso de desintegración se encuentra ligado al grado de inestabilidad del núcleo anterior, el cual se expresa como periodo de semidesintegración ( $t_{1/2}$ ) que conjuntamente a la constante de desintegración ( $\lambda$ ) permite definir la velocidad a la que se desintegra el isótopo radioactivo. Para observar el número de núcleos de un elemento radiactivo que no se desintegra en un periodo de tiempo se ocupa la ley de desintegración radioactiva que está definida por la siguiente expresión matemática (Liza Neciosup, 2017):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Ecuación 8. Ley de Decaimiento radioactivo

Donde:

$N(t)$ : Número de núcleos en un intervalo de tiempo

$N_0$ : Número de núcleos presentes en el tiempo  $t=0$

$\lambda$ : Constante de desintegración

$t$ : tiempo de desintegración

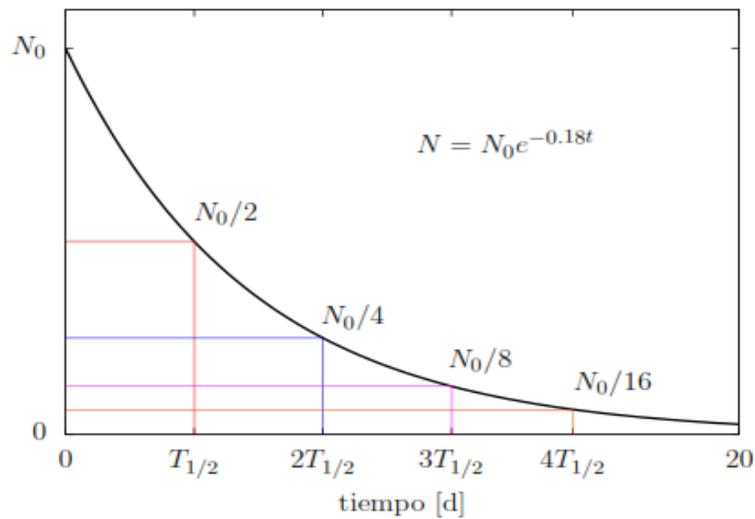


Figura 4. Ley de decaimiento radioactivo

Fuente: (Mendoza, 2009)

### 2.10.2 Cadenas de desintegración radioactiva

En la naturaleza existen tres tipos de series radioactivas ( $^{238}\text{U}$ ), ( $^{235}\text{U}$ ), ( $^{232}\text{Th}$ ). Estas series decaen en otros núcleos radioactivos (hijas) hasta alcanzar otro núcleo estable ( $^{206}\text{Pb}$ ).

Tabla 4. Series de decaimiento naturales. Fuente:(IAEA, 2004)

Serie	Isótopo Inicial	$t_{1/2}$ [años]	Producto Final
Torio	$^{232}\text{Th}$	$1.40 * 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
Actinio	$^{235}\text{U}$	$7.04 * 10^8$	$^{207}\text{Pb}$
Uranio	$^{238}\text{U}$	$1.47 * 10^9$	$^{206}\text{Pb}$

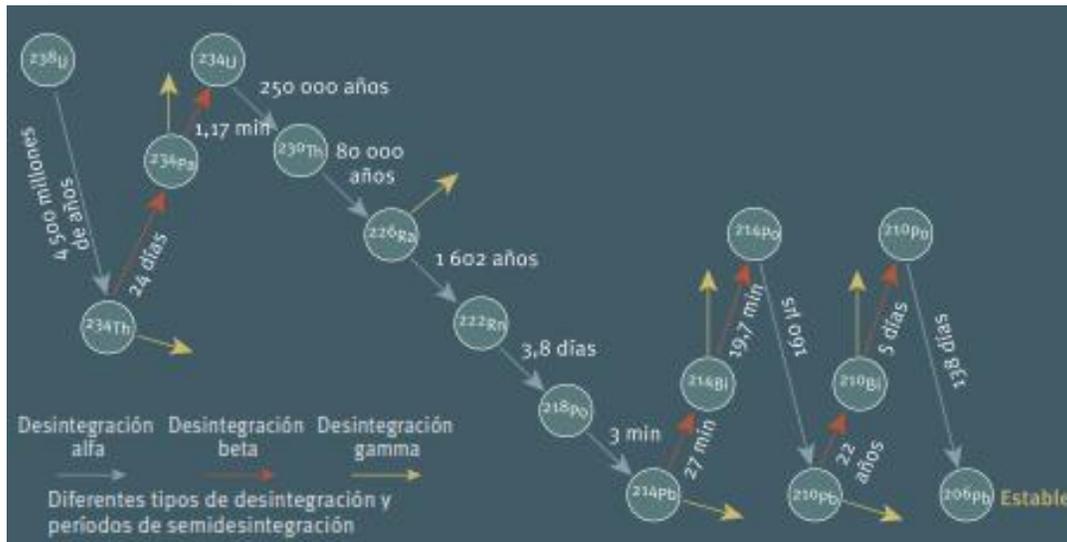


Figura 5. Cadena de desintegración radioactiva del uranio-238

Fuente: (Programa de las naciones Unidas para el medio Ambiente, 2016)

### 2.10.3 Actividad

La actividad de una sustancia radioactiva se define como la cantidad de átomos que se desintegran en una unidad de tiempo. Su unidad de medida es el Becquerelio (Bq), 1 becquerel equivale a una desintegración por segundo y se expresa como (Guzmán, 2017):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (9)$$

*Donde:*

$dN$ : número de desintegraciones

$N$ : número de núcleos que no se desintegran

$\lambda$ : Constante de desintegración

#### 2.10.4 Periodo de Semidesintegración

Se denomina periodo de semidesintegración al tiempo necesario para que el número de núcleos se reduzca a la mitad y se expresa de la siguiente manera (Montoya, 2020):

$$N(t) = \frac{N_0}{2}$$

$$N_0 e^{-\lambda t} = \frac{N_0}{2}$$

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (10)$$

*Donde:*

$N$ : Número de núcleos que no se desintegran

$N_0$ : Número de núcleos iniciales

$\lambda$ : Constante de desintegración

$T_{1/2}$ : Tiempo de semidesintegración

### 2.10.5 Vida Media

La vida media se define como el tiempo óptimo para que los átomos se reduzcan en un factor e, es inversamente proporcional a la constante de desintegración y está estrechamente relacionado con el periodo de semidesintegración (Raya, 2017).

## 2.11 Tipos de Decaimiento

### 2.11.1 Decaimiento Alfa

El decaimiento alfa es el mecanismo por el cual un núcleo inestable emite partículas de Helio conformado por dos protones y dos neutrones que dan origen a un nuevo elemento y se denota a través de la siguiente expresión (Sagir, 2019):

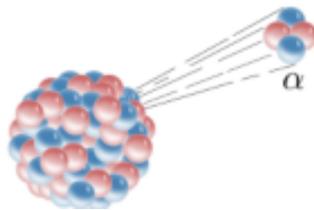
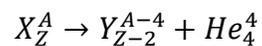


Figura 6. Decaimiento Alfa

Fuente: (Vallejo, 2019)

### 2.11.2 Decaimiento Beta

Durante el proceso de desintegración beta el núcleo inestable emite una partícula beta hasta que los protones y neutrones alcancen el equilibrio, dando origen a otro elemento conformado por un electrón o positrón (Sagir, 2019).



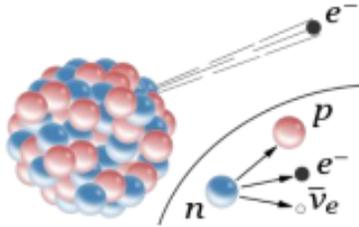


Figura 7. Decaimiento Beta

Fuente: (Vallejo, 2019)

### 2.11.3 Decaimiento Gamma

El decaimiento gamma tiene lugar luego de la desintegración de partículas alfa o beta, donde el núcleo excitado regresa a su estado inicial a través la emisión de un fotón cuyo número atómico y masa no cambia (Sagir, 2019).

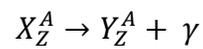


Figura 8. Decaimiento Gamma

Fuente: (Vallejo, 2019)

## 2.12 Radio-226 y Radón-222

### 2.12.1 Radio

El radio es un elemento radioactivo de color blanco plateado presente en toda la corteza terrestre ubicado en el grupo IIA de la tabla periódica, descubierto en 1898 por Marie y Pierre Curie (Gad, 2014) y tiene alrededor de 25 isótopos diferentes donde su semivida se encuentra en un rango desde los nanosegundos hasta miles de años (Tabla 5) y sólo cuatro se encuentran en la naturaleza (radio-223, radio-224, radio-226, radio-228) (Rodríguez, 2013).

*Tabla 5. Principales isótopos del radio-226. Fuente: (De Francisco, 2017)*

Isótopos	Vida media	Núcleo padre	Núcleo hijo	Tipo de decaimiento
<b>Radio-223</b>	11 días	Torio-227	Radón-219	Alfa
<b>Radio-224</b>	3.7 días	Torio-228	Radón-220	Alfa
<b>Radio-226</b>	1.6 años	Torio-230	Radón-222	Alfa
<b>Radio-228</b>	5.7 años	Torio-232	Radón-228	Beta/Gamma

### 2.12.2 Radio-226

El radio-226 es emisor de partículas alfa con una vida media de 1.6 años proveniente de la cadena de desintegración del uranio-238 el mismo que luego decae en radón-222, polonio-218 y polonio-214 (Suárez, Gonzáles, & San Martín, 1987)

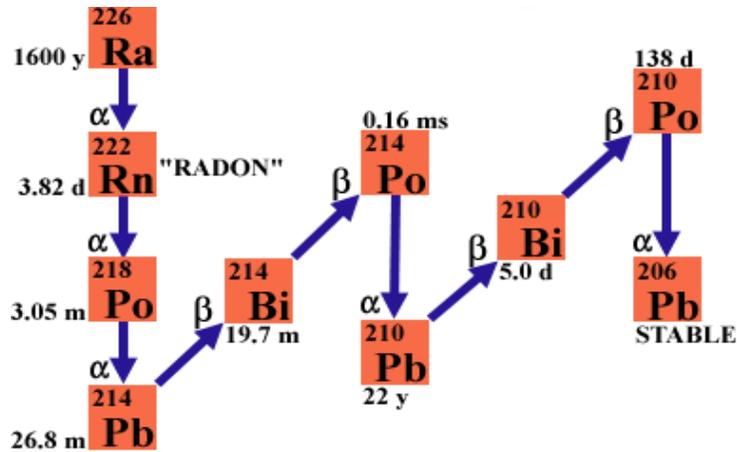


Figura 9. Cadena de desintegración del radio-226

Fuente: (M. Rojas, Quintero, Cervantes, & Gaso, 2018)

Para calcular la concentración de radio-226 es necesario determinar el tiempo efectivo que se expresa a través de la siguiente ecuación matemática (Campos, Costa, Nisti, & Mazzilli, 2017).

$$T_e = d - \frac{1}{\lambda} * (1 - e^{-\lambda*d}) [d] \quad (11)$$

Ecuación 11. Tiempo efectivo

Donde:

**d**: tiempo de exposición [días]

**λ**: constante de decaimiento del radón-222 [ $\frac{1}{h}$ ]; el valor de la constante es de  $7 \times 10^{-3} (h^{-1})$

Para nuestro estudio la variable d, representa el tiempo al que se encuentra expuesto el detector (75días), 30 días hasta que alcance el equilibrio secular y 45 días como tiempo real que se expone el detector.

Una vez determinado el valor del tiempo efectivo se calcula la concentración de radio-226 mediante la siguiente fórmula (Saad, Al-Awami, & Hussein, 2014):

$$C_{Ra} = \frac{\rho * h * A}{K * T_e * M} \left[ \frac{Bq}{Kg} \right] \quad (12)$$

*Ecuación 12. Concentración de radio-226*

*Donde:*

$\rho$ : Densidad de trazas  $\left[ \frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right]$

$h$ : Altura de la muestra hasta el detector [ $m$ ]

$A$ : Área de la muestra [ $m^2$ ]

$K$ : Factor de calibración  $\left[ \frac{\text{trazas} * m^3}{Bq * cm^2 * d} \right]$

$T_e$ : Tiempo efectivo [ $d$ ]

$M$ : Masa de la muestra [ $Kg$ ]

Para determinar el valor de la concentración de radio-226, previamente debemos conocer la densidad de trazas mediante la (ecuación 4), también es importante determinar la altura, la misma que tiene un valor de 0.08m y representa la distancia entre la muestra y el detector LR-115. El área de la muestra corresponde a  $3.84 \times 10^{-3} m^2$  y  $M$  que es la masa de la muestra es de 0.1 Kg.

### **2.12.3 Radón-222**

El radón es un gas inerte de origen natural producto de sucesivos decaimientos a partir del uranio-238 el cual se desintegra en radio-226 presente en todo tipo de rocas y suelo el mismo que decae en el isótopo radón-222 (Shakir Khan, Naqvi, Azam, & Srivastava, 2011). El radón-222 es un elemento radioactivo inoloro, incoloro e insípido a temperatura ambiente que emite partículas alfa y se encuentra ubicado en los gases nobles dentro de la tabla periódica (Alonso, 2015), tiene una

vida media de 3.8 días aproximadamente, es soluble agua, posee alta movilidad debido a su estado gaseoso y decae en progenies de vida corta como el polonio-218, Plomo-214, bismuto-214, polonio-214 y progenies de vida larga como el plomo-210, bismuto-210, polonio-210, los cuáles emiten partículas alfa, beta y gamma y al ser inhalados se depositan en los pulmones ocasionando el cáncer de pulmón (Torres, 2016). Dentro de la naturaleza existen otros dos isótopos radioactivos de origen natural del elemento radón-222 que también son emisores de partículas alfa que son el radón-220 conocido como torón cuya vida media es de 55.6 s y radón-219 denominado actinón el cual posee una vida media de 4 s y son productos de las cadenas radioactivas del torio-232 y uranio-235 (Yousef, Saleh, El-Farrash, & Hamza, 2016).

#### 2.12.4 Densidad de trazas

Para el cálculo de la densidad de trazas se da uso de la ecuación descrita por (Awad, Al-Rubaye, Jebur, & Hadi, Abbas Fadhel, 2020).

$$\rho = \frac{N_T}{n \cdot A} \left[ \frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right] \quad (13)$$

*Ecuación 13. Densidad de trazas*

*Donde:*

**$\rho$ :** Densidad de trazas del detector

**$N_T$ :** Número total de trazas en el detector

**$n$ :** Número total de campos de visión

**$A$ :** Área de campos de visión [ $\text{cm}^2$ ]

### 2.12.5 Concentración de radón-222

La concentración de Radón-222 es la medida utilizada para representar la cantidad de partículas alfa que se generan debido a la desintegración del radón por metro cúbico de aire y matemáticamente se expresa de la siguiente forma (Hady, Abojassim, & Mohammed, 2016):

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{K * T} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] \quad (14)$$

*Ecuación 14. Concentración de Radón-222*

*Donde:*

$\rho$ : Densidad de trazas  $\left[ \frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right]$

$T$ : Tiempo de exposición [días]

$K$ : Factor de calibración  $\left[ \frac{\text{trazas} * \text{m}^3}{\text{Bq} * \text{cm}^2 * \text{d}} \right] = 0.019$

El factor de calibración ideal para detectores de membrana según (Verma & Shakir Khan, 2014) es de 0.019.

### 2.12.6 Propiedades Físicas y Químicas

*Tabla 6. Propiedades físicas y químicas del radón-222. Fuente: (González Esqueche, 2018)*

<b>Propiedades físicas y químicas</b>	<b>Valor</b>
Número de masa	222
Número atómico	86
Punto de fusión	-71°C

Punto de ebullición	-68.1°C
Densidad a 20°C	9.96 x 10 <sup>-3</sup> g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en agua a 20°C	230 cm <sup>3</sup> /l
Vida media	3.8 días
Actividad específica	1.3 x 10 <sup>2</sup> Bq/g
Energía de decaimiento	5.49 MeV

### 2.12.7 Índice Alfa

El índice potencial alfa según (Awhida et al., 2016) se utiliza para determinar el nivel máximo de exposición de radón-222 procedente de diferentes materiales de construcción; se tiene que considerar que la actividad del radio-226 de un material de construcción no supere el valor de 200 Bq/kg ya que es posible que la exhalación de radón-222 genere concentraciones de radón en interiores superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>. Por el contrario cuando la actividad de radio-226 sea inferior 100 Bq/kg, es poco probable que la exhalación de radón-222 en materiales de construcción provoque concentraciones de radón-222 en interiores superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> (Righi & Bruzzi, 2006). Para determinar el índice alfa se utiliza la siguiente ecuación (Nordic, 2000)

$$I_{\alpha} = \frac{C_{ra}}{200} \left[ \frac{Bq}{Kg} \right] \quad (15)$$

*Ecuación 15. Índice alfa*

*Donde:*

*C<sub>ra</sub>*: Concentración de radio-226 en materiales de construcción  $\left[ \frac{Bq}{Kg} \right]$

## **2.13 Fuentes de radón-222**

El radón-222 es un radioisótopo natural que tiene origen en el subsuelo producto del decaimiento del uranio-238 que al desintegrarse forma el isótopo de radio-226 el mismo que se concentra en la corteza terrestre hasta decaer en gas radón-222 y emanar a la superficie, el cual se incorpora al aire desde donde puede ser inhalado en concentraciones que pueden resultar ser peligrosas debido a que se puede incorporar a las vías respiratorias y causar cáncer de pulmón (Carrasco & Cuadrado, 2016). De acuerdo al (ICRP Publication 50, 1988) la concentración de radón-222 en condiciones ideales no debe exceder los 200 Bq/m<sup>3</sup>. Entre las principales fuentes de radón-222 tenemos:

### **2.13.1 Suelo**

Es la principal fuente de emisión natural de radón-222, teniendo mayor influencia sobre construcciones aisladas y plantas bajas de edificios. Las concentraciones en el suelo de radio-226 se encuentran entre los 10 y 50 Bq/Kg, las mismas que al desintegrarse en radón-222 generan concentraciones entre 10000 y 50000 Bq/m<sup>3</sup> (Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanjuán, 2011). El radón-222 se desplaza por el suelo mediante los procesos de convección y difusión molecular, dependiendo de las propiedades como son: porosidad, permeabilidad o la presencia de fallas o grietas y pueden atravesar las viviendas mediante los cerramientos que se encuentren en contacto con el suelo, paredes, incluso por las cañerías del baño (Figura 10) (Sun, Guo, & Cheng, 2004). Las principales concentraciones de radio-226 en los diferentes tipos de roca se pueden apreciar en la (Tabla 7).

Tabla 7. Concentración de radio-226 y radón-222 en diferentes tipos de roca. Fuente:  
(UNSCEAR, 2000)

Tipo de Roca	Concentración (Bq/Kg)	
	Radio-226	Radón-222
Granito	78	111
Basalto	11	10
Caliza	45	60
Arcilla, arena	60	50
Metamórfica ígnea	50	60
Metamórfica sedimentaria	37	49

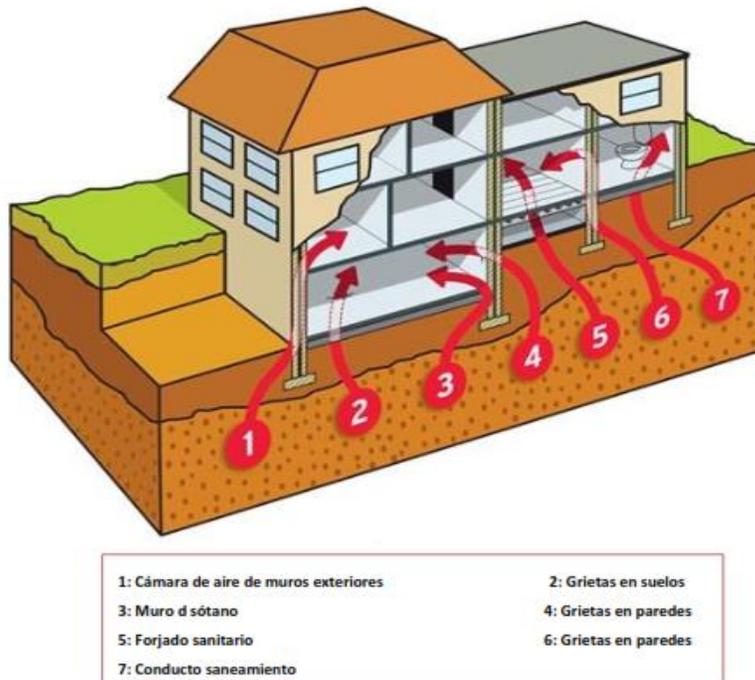


Figura 10. Vías de entrada del gas Radón-222 en una vivienda

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear, 2015)

### **2.13.2 Aire Exterior**

El radón-222 debido a su baja concentración al llegar al aire se difunde rápidamente ya que este elemento del clima actúa como factor de disolución. Las concentraciones de radón-222 oscilan entre 1 y 100 Bq/m<sup>3</sup> mientras que el valor promedio es de 10 Bq/m<sup>3</sup> dependiendo de la exhalación del suelo. Por otro lado existen determinados factores que condicionan las concentraciones de radón-222, entre estos se encuentran las condiciones meteorológicas que son: temperatura del suelo y aire, presión atmosférica, humedad y velocidad del viento (Alonso, 2015).

### **2.13.3 Agua de Consumo**

Una vez que el radón-222 emana desde los diferentes tipos de roca puede disolverse en aguas subterráneas desde donde se transporta hacia estanques, manantiales, ríos, librándose en la atmósfera, contribuyendo al aumento de la concentración en espacios cerrados. El agua proveniente de pozos perforados en rocas con alto contenido de radón-222 tiene concentraciones que varían entre 100 KBq/m<sup>3</sup> y 100 MBq/m<sup>3</sup> con un promedio mundial de 10 KBq/m<sup>3</sup> (Noverques, 2016).

### **2.13.4 Materiales de construcción**

Son la segunda fuente de radón-222 en interiores y representan el 20% de la concentración total y están formados con materia prima que contienen elementos radioactivos como: radio-226-, torio-232, potasio-40, dentro de estos materiales (Tabla 8) podemos encontrar ladrillo, cerámica, hormigón, cemento, yeso, adobe (Noverques, 2016). La cantidad de radón-222 que aporta esta fuente se encuentra entre los 10 Bq/m<sup>3</sup> y 20 Bq/m<sup>3</sup>, las mismas que se están fuera de los límites aceptables de 400 Bq/m<sup>3</sup> para edificios existentes y 200 Bq/m<sup>3</sup> en edificios nuevos en el caso de que no existiera aportaciones de radón-222 proveniente del suelo (Piedecausa et al., 2011). Estas

concentraciones varían de acuerdo a factores como la concentración de radio-226 del material, porosidad, la preparación de la superficie y el acabado exterior (García Pérez, 2013).

*Tabla 8. Concentraciones de radón-222 presentes en materiales de construcción. Fuente: (Najam, Tawfiq, & Mahmood, 2013)*

<b>Material de construcción</b>	<b>Concentración de Radón-222</b> $\left[\frac{Bq}{m^3}\right]$	<b>Exhalación de Radón-222 por área</b> $\left[\frac{Bq}{h * m^2}\right]$	<b>Exhalación de Radón-222 por masa</b> $\left[\frac{Bq}{h * Kg}\right]$
Cemento blanco	156.74	0.94	0.26
Yeso	165.5	1	0.28
Cemento	205.5	1.24	0.35
Ladrillo	166.55	1.01	0.28
Bloques de concreto	251.58	1.52	0.43
Piedra	121.95	0.72	0.21
Cerámica	174.12	1.05	0.3
Porcelana	270.04	1.63	0.46
Mármol negro	209.04	1.26	0.36
Cerámicas orgánicas	217.77	1.31	0.37
Granito rojo	383.3	2.3	0.65

Mármol blanco	200.27	1.21	0.34
Adobe	35.28	0.24	0.10

## 2.14 Desintegración del radón-222

Como pudimos observar en los apartados anteriores el radón-222 es un radioisótopo proveniente de la cadena de desintegración del radio-226 presente en la corteza terrestre y su concentración va a depender esencialmente del tipo de suelo y roca. La serie de decaimiento del radón-222 va desde el polonio-218 hasta llegar a un elemento más estable como el plomo-206 (Liza Neciosup, 2017). En la (Tabla 9) se puede apreciar la cadena de desintegración del radón-222.

*Tabla 9. Cadena de desintegración del radón-222. Fuente: (Torres, 2016)*

Isótopo	Tipo de Radiación	Energía alfa (MeV)	Vida media	Constante de desintegración
Radón-222	Alfa	5.49	3.82 días	$1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Polonio-218	Alfa	6	3.09 minutos	$0.228 \text{ min}^{-1}$
Plomo-214	Beta	6.87	26.8 minutos	$0.0259 \text{ min}^{-1}$
Bismuto-214	Beta		19.9 minutos	$0.0352 \text{ min}^{-1}$
Polonio-214	Alfa	7.69	164.3 $\mu\text{s}$	$2.77 \times 10^5 \text{ min}^{-1}$
Plomo-210	Beta		22.23 años	$3.15 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$
Bismuto-210	Beta		5.012 días	$9.63 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$
Polonio-210	Alfa	5.40	138.38 días	$3.44 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$
Plomo-206	estable			

## 2.15 Transporte del radón-222

El transporte del gas radón-222 depende de factores como la porosidad y la permeabilidad. Una vez que el gas escapa desde el suelo y avanza hasta los poros del mismo se produce el proceso que se denomina emanación, mientras que los átomos presentes en el espacio intersticial se transportan a través de un medio poroso hacia la superficie mediante mecanismos de convección o advección, originada por la diferencia de presión, y la difusión, generada por el gradiente de concentración del gas, estos mecanismos poseen características propias como: la red de poros, porosidad abierta, tortuosidad, contenido de humedad en los poros (Linares, 2015). Una vez que los átomos alcanzan la superficie del suelo el radón-222 se libera hacia la atmósfera mediante un proceso conocido como exhalación (Guevara, 2019). En la (Figura 11) se aprecia el esquema de transporte de Radón-222.

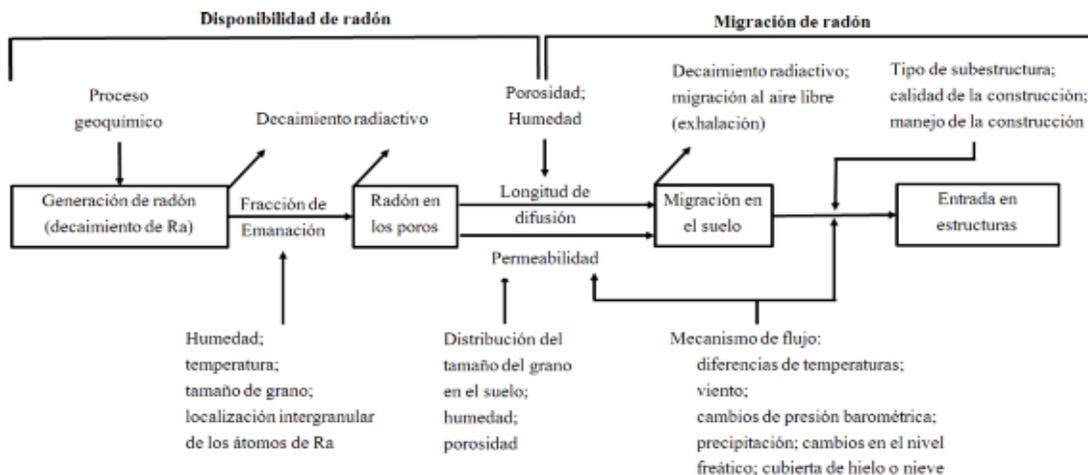


Figura 11. Representación esquemática de la producción del radón-222 en el suelo y su entrada hacia una vivienda o edificio.

Fuente: (Nazaroff, 1992)

Para describir la generación y transporte de radón-222 mediante un modelo matemático, se utiliza la ecuación diferencial parcial en estado estacionario de dos dimensiones en un medio poroso y se expresa de la siguiente manera (Torres, 2016):

$$D_e \nabla^2 C + \frac{k}{\varepsilon * \mu} \nabla p \nabla C + G - \lambda C = 0 \quad (16)$$

*Ecuación 16. Generación y transporte de radón-222*

*Donde:*

$D_e$ : coeficiente efectivo de difusión [ $m^2/s$ ]

$C$ : Concentración de radón-222 [ $\frac{Bq}{m^3}$ ]

$K$ : permeabilidad del suelo [ $m^2$ ]

$\varepsilon$ : porosidad del suelo

$\mu$ : viscosidad dinámica del gas en el suelo [ $Pa * s$ ]

$p$ : Presión relativa de la fase gaseosa en el suelo [ $Pa$ ]

$\lambda$ : Constante de desintegración del Radón-222 [ $s^{-1}$ ]

$G$ : Tasa de generación del radón-222 [ $\frac{Bq}{m^3 * s}$ ]

## 2.16 Emanación

Este proceso sucede cuando los átomos del gas radón-222 escapan de los gránulos hacia el espacio intersticial que existen entre estos. El escape del radón-222 se origina a partir de la energía con que salen expulsados durante la desintegración del radio-226, a este efecto se le conoce como proceso de retroceso (Figura 12), el cual varía en el agua y aire debido a que las distancias de

retroceso son diferentes a las distancias en sólidos lo que hace suponer que dependiendo del medio en que se encuentre el gas radón-222, va a tener la capacidad de escapar o no (Noverques, 2016). Para poder caracterizar el comportamiento físico del radón-222 en los diferentes materiales es esencial definir el coeficiente de emanación  $\epsilon$  que varía entre 0, cuando no escapa del material, y 1 cuando escapa del material, como la fracción de átomos de radón-222-222 generados mediante el decaimiento radioactivo del radio-226 que emigran desde los gránulos del material hacia el espacio intersticial (Bossew, 2003).

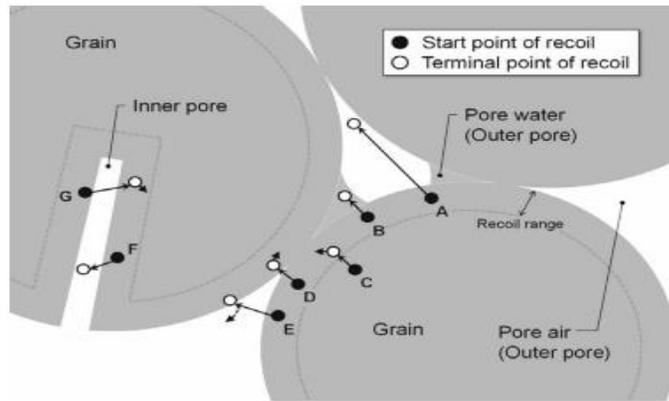


Figura 12. Esquema de emanación de radón-222

Fuente: (Sakoda et al., 2011)

### 2.16.1 Factores que afectan la Emanación del radón-222

En la (Tabla 10) se detallan los principales factores que afectan la emanación del radón-222.

Tabla 10. Factores que afectan la emanación del radón-222. Fuente: (Sakoda, Ishimori, & Yamaoka, 2011)

Factores Directos	Factores Indirectos	Factores Físicos
-------------------	---------------------	------------------

---

Retroceso alfa de las superficies exteriores de los granos.	Difusión en los poros interiores de los granos.	Distribución del radio-226 en granos.
Retroceso alfa de las superficies internas de los granos.	Absorción en las superficies internas de los granos.	Tamaño y forma del grano.
Difusión en el grano.	Incrustación en un grano adyacente.	Contenido de humedad.
	Liberación basada en función después de la incrustación	Presión atmosférica
		Tamaño del poro exterior
		Tamaño del poro interno
		Daño por radiación
		Densidad sólida

---

### 2.16.2 Tasa de emanación

Se define como el número de átomos de radón por segundo por kg de material seco (átomos  $s^{-1} * kg^{-1}$ ) que escapan desde las partes sólidas del material y que está disponible para transportar a una escala mayor que el diámetro de poro característico del material (Hidrovo, 2015).

### 2.17 Exhalación

Es un proceso que se origina cuando los átomos del gas radón-222 son transportados hacia la superficie del suelo los mismos que emiten hacia la atmósfera una vez que son transportados desde

la fuente de origen (Figura 13). El mecanismo de liberación a la atmósfera se define a través de la tasa de exhalación  $\phi$ , es decir la concentración de radón-222 liberada por unidad de superficie en un tipo determinado. Esta tasa de exhalación viene expresada en (Bq/m<sup>2</sup>/s) y depende de factores como: coeficiente de emanación, porosidad, tamaño del grano, humedad. También hay que considerar las condiciones meteorológicas como: presión atmosférica, temperatura, viento, humedad y lluvias (Noverques, 2016).

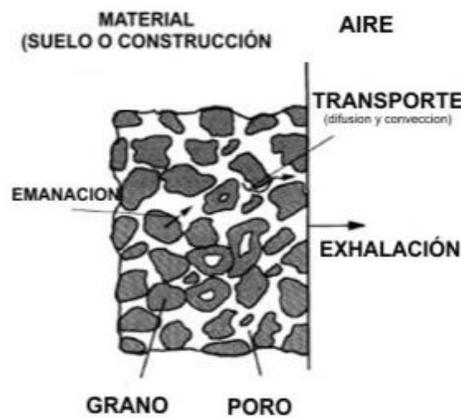


Figura 13. Transporte de radón-222 en suelo y materiales de construcción.

Fuente: (Porstendorfer, 1984)

### 2.17.1 Tasa de exhalación

La tasa de exhalación se define como la cantidad neta de radón-222 que se escapa de la muestra por unidad de tiempo (Hidrovo, 2015) y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$E = \lambda * \frac{3600s}{1h} * J \quad (17)$$

Ecuación 17. Tasa de exhalación

Donde:

**E:** Tasa de exhalación  $\left[\frac{Bq}{h}\right]$

**J:** Emanación de radón-222  $\left[\frac{\text{átomos}}{s}\right]$

**$\lambda$ :** Constante de desintegración del radón-222  $\left[\frac{1}{h}\right]$ ; el valor de la constante es de  $7 \times 10^{-3} \text{ (h}^{-1}\text{)}$

La exhalación también puede estar en función del área y de la masa, pero antes se debe determinar el radón-222 integrado, el cual relaciona la concentración de radón-222 con el tiempo (J. Singh, Singh, Singh, & Bajwa, 2009).

### 2.17.2 Radón-222 integrado

$$C = \frac{\rho}{d * K} * t \left[ \frac{Bq * h}{m^3} \right] \quad (18)$$

*Ecuación 18. Radón-222 Integrado*

*Donde:*

**d:** Tiempo de exposición [días]= 45

**$\rho$ :** Densidad de trazas  $\left[\frac{\text{trazas}}{cm^2}\right]$

**K:** Factor de calibración  $\left[\frac{\text{trazas} * m^3}{Bq * cm^2 * d}\right] = \frac{1}{30}$

**t:** Tiempo de exposición [h]= 1080

### 2.17.3 Exhalación por área

La exhalación por área se define como el proceso de liberación hacia la atmósfera de la concentración de radón-222 por unidad de área en un tiempo determinado.

$$E_A = \frac{C * V * \lambda}{A * [t + 1/\lambda * (e^{-\lambda*t} - 1)]} \quad (19)$$

*Ecuación 19. Exhalación por área*

#### 2.17.4 Exhalación por masa

La exhalación por masa se define como el proceso de liberación hacia la atmósfera de la concentración de radón-222 por unidad de masa en un tiempo determinado.

$$E_M = \frac{C * V * \lambda}{M * [t + 1/\lambda * (e^{-\lambda*t} - 1)]} \quad (20)$$

*Ecuación 20. Exhalación por masa*

*Donde:*

**C:** Radón-222 integrado  $\left[\frac{Bq \cdot h}{m^3}\right]$

**V:** Volumen efectivo  $[m^3]$

**$\lambda$ :** Constante de desintegración del radón-222  $\left[\frac{1}{h}\right]$ ; el valor de la constante es de  $7 \times 10^{-3} \text{ (h}^{-1}\text{)}$

**A:** Área de la muestra  $[m^2]$

**M:** Masa de la muestra  $[Kg]$

**t:** tiempo de exposición  $[h]$

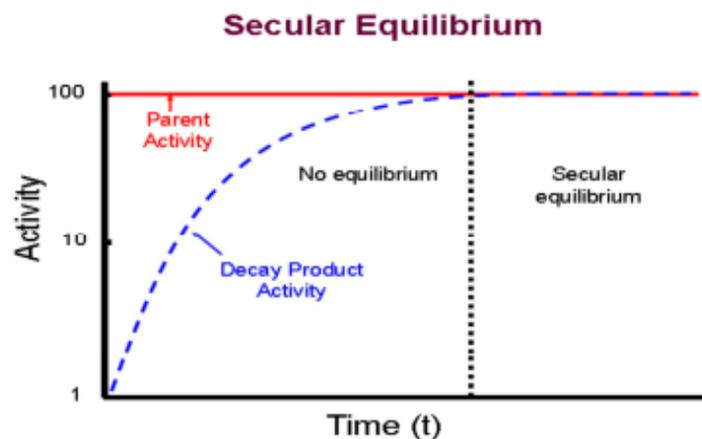
En nuestra investigación se ocupa un volumen efectivo de  $(0.0001943 \text{ m}^3)$ , el cual se encuentra en función del área de la muestra  $(3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2)$ , la masa de la muestra es de 0.1 kg y el tiempo de exposición corresponde a 45 días (1080 h).

## 2.18 Equilibrio Secular

El equilibrio secular es un proceso por el cual la actividad de desintegración de un elemento radioactivo (Padre) es igual a la actividad de decaimiento del (radionúclido hijo), estas actividades con el pasar del tiempo y en condiciones determinadas alcanzarán un equilibrio (Figura 14) debido a que la actividad del padre disminuye mientras que la actividad del hijo se incrementa. Es común encontrar este tipo de equilibrio en cadenas radioactivas naturales como la del uranio y torio y se expresa mediante la siguiente ecuación (Zhang, Burman, & Amols, 2014):

$$\lambda_1 * N_1 = \lambda_2 * N_2 \quad (21)$$

*Ecuación 21. Equilibrio secular*



*Figura 14. Equilibrio secular*

*Fuente: (Kadhim, 2013)*

## 2.19 Efectos del radón-222 en la salud humana

Como se ha mencionado anteriormente el radón-222 es considerado como elemento radioactivo por su naturaleza y se difunde a través de la superficie terrestre por mecanismos de convección y difusión hasta llegar a la atmósfera. Una vez que llega a la superficie atmosférica se mezcla con el aire y es inhalado por las personas, pero la mayoría que se exhala no se llega a acumular en las

vías respiratorias ya que el tiempo de vida media es mayor al tiempo de respiración. Los descendientes del radón-222 que causan daño en el sistema respiratorio son: polonio-218, plomo-214, bismuto-214 y polonio-214 los cuales se consideran elementos radioactivos que poseen una vida media corta que se encuentra en un rango desde una fracción de segundos hasta 27 minutos. Una de las características de estos elementos es que se pueden densificar en superficies sólidas y líquidas, por otro lado tienen la capacidad de unirse a otros productos en forma de aerosol o incluso fijarse en partículas de aire como átomos libres e ingresar por las vías respiratorias (Figura 15). Una vez que se alojan en los pulmones, las partículas liberan energía alfa ocasionando daño en los bronquios; justo en ese instante las células afectadas tienen un alto potencial de generar cáncer (Hidrovo, 2015). De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (2009) las estimaciones sobre cáncer de pulmón que se atribuyen a este gas oscila entre un 3% y 14%, por lo que los diferentes organismos como la Agencia de Protección Ambiental (EPA), Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Asociación Americana del pulmón (ALA) advierten sobre la exposición al gas radón-222.

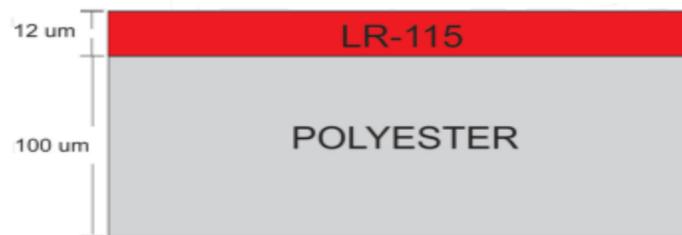


*Figura 15. Transporte de radón-222 en el sistema respiratorio (verde)*

Fuente: (Hidrovo, 2015)

## 2.20 Detectores sólidos de trazas nucleares SSNTD

La incidencia de partículas nucleares sobre diferentes materiales dieléctricos, generan daños a los que se conoce como trazas nucleares en sólidos. Estas trazas, producidas por el paso de las partículas pueden ser huellas estables o latentes y permanecer durante muchos años hasta ser reveladas mediante un proceso químico (Toribio, 2018).



*Figura 16. Detector LR-115 Tipo II*

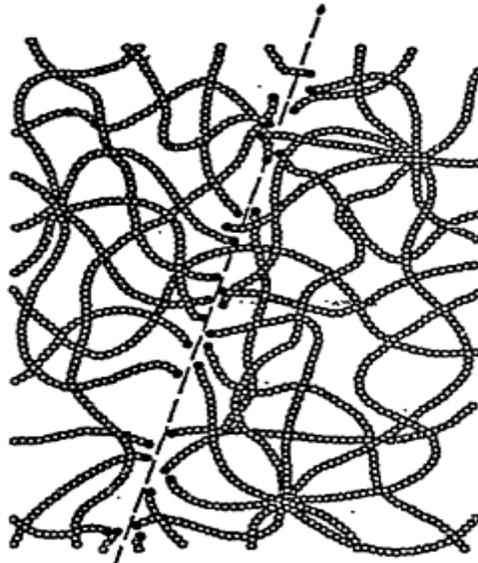
*Fuente: (J. Rojas, 2016)*

### 2.20.1 Detectores LR-115 tipo II

Los detectores sólidos de trazas nucleares LR-115 tipo II como se muestra en la (Figura 16) consiste en una base de poliéster de 100 µm de espesor recubierta con una película delgada de 12 µm de color rojo de nitrato de celulosa ( $C_6H_8O_9N_2$ ). Este detector es muy útil para el registro directo de partículas alfa que penetran a través de la película delgada formando pequeñas trazas que se puede observar a través del microscopio electrónico (Parajuli, Thapa, Shah -30 -, & Shah, 2015).

### 2.20.2 Generación de trazas

Una vez que las partículas alfa son emitidas por el radón-222 e interactúan con el ambiente, generan colisiones produciendo efectos de ionización y excitación (Figura 17), estas partículas al entrar en contacto con el sólido puede causar estos efectos y crear centros de tensión estables que luego reaccionan al grabado químico. En los polímeros, las partículas alfa rompen las cadenas poliméricas al interactuar con el material dando origen a radicales libres que reaccionan con el Hidróxido de Sodio (NaOH) a una mayor velocidad que en las zonas donde no se ocasionaron las rupturas de las cadenas (J. Rojas, 2016).



*Figura 17. Mecanismo de daño de una partícula alfa en un polímero.*

*Fuente: (Bhagwat, 1993)*

## 2.21 Normativa

### 2.21.1 Ente regulador en Ecuador

En la actualidad el Ecuador no tiene constituido una normativa para el control de la radiación del gas radón-222 de origen natural que se concentra principalmente en viviendas, lugares de trabajo

como edificios, centros educativos, industrias, lugares de recreación. El único documento existente que regula el control de uso de radiaciones ionizantes de origen natural es el Decreto creado el 8 de marzo de 1979 para Seguridad radiológica, controlando la dosificación al que debe estar expuesto un organismo frente a materiales radioactivos (Reglamento de Seguridad Radiológica, 1979).

### **2.21.2 Normativa Internacional**

#### *2.21.2.1 Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica*

De acuerdo al anexo B publicado por la UNSCEAR la dosis anual estimada por inhalación al aire libre de Radón-222 no debe superar 1.1 mSv/año (UNSCEAR, 2000).

#### *2.21.2.2 Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)*

En el informe n° 65 recomienda controlar la exposición tanto en viviendas como en lugares de trabajo (mediante la intervención y un control más regular). Los niveles establecidos se describen a continuación (Consejo de Seguridad Nuclear, 2015).

Viviendas entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup>

Lugares de trabajo entre 500 y 1500 Bq/m<sup>3</sup>

#### *2.21.2.3 Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom)*

Los niveles de exposición son:

En edificios existentes la dosis efectiva es de 20 mSv/año, concentración de Radón-222 de 400 Bq/m<sup>3</sup>.

En construcciones futuras la dosis efectiva es de 10 mSv/año, concentración de Radón-222 de 200 Bq/m<sup>3</sup>.

#### 2.21.2.4 *Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)*

En situaciones de exposición crónica al Radón-222 recomienda niveles de acción a partir de los que intervenir:

Viviendas entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup>

Lugares de trabajo entre 1000 Bq/m<sup>3</sup>.

#### 2.21.2.5 *Agencia de Protección ambiental (USEPA)*

La EPA recomienda iniciar acciones de remedio en concentraciones entre 70 y 150 Bq/m<sup>3</sup> (Consejo de Seguridad Nuclear, 2015).

## CAPÍTULO III

### 3. Marco Metodológico

#### 3.1 Materiales y métodos

##### 3.1.1 Diseño

Este estudio se realizó en campo y otra parte en el laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y las muestras de los materiales de construcción fueron tomadas de manera aleatoria. En primera instancia se seleccionaron 6 muestras principales, que comprenden (Adobe, Bloque, Ladrillo, Cerámica, Granito y Mármol) de las cuales se establecieron 10 sub-muestras para su respectivo análisis mediante las técnicas “*Cup Technique*” o técnica de lata invertida y “*Can Technique*” o técnica de lata, las mismas que se detallan a continuación.

## 3.2 Técnica de la lata invertida (Cup technique)

### 3.2.1 Construcción de cámaras de difusión

Para determinar la concentración del gas radón-222 en los diferentes materiales de construcción se aplicó la técnica conocida como “*Cup Technique*” o técnica de lata invertida, la cual está compuesta por un tubo plástico de PVC de geometría cilíndrica de 10 cm de altura y 7 cm de diámetro, como se muestra en la (Figura 18) (Amrani & Cherouati, 1999).



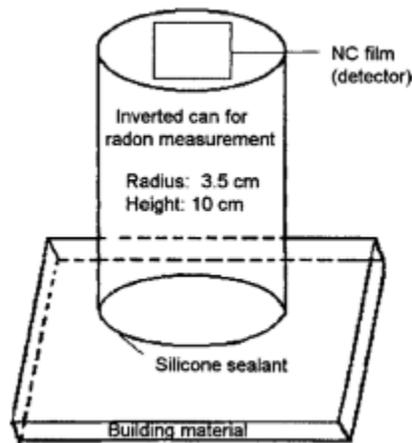
Figura 18. Elaboración de las cámaras de difusión

Fuente: Autor

### 3.2.2 Exposición en diferentes materiales de construcción

Para poder determinar la concentración de radio-226 y la exhalación del radón-222 se empleó detectores sólidos de trazas nucleares (SSNTD) LR-115 tipo II, de dimensiones de 2 cm de largo y 1 cm de ancho el cual presenta un color rojo y está recubierto por una película delgada de 12  $\mu\text{m}$  de nitrato de celulosa ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_9\text{N}_2$ ) y 100  $\mu\text{m}$  de poliéster. El detector se colocó en la parte interna superior de la cámara de difusión invertida debido a que la parte sensible (nitrato de celulosa) debe quedar en dirección a la muestra sólida (material de construcción) para que las partículas alfa y progenies del radón-222 emitidas impacten sobre el detector y generen huellas latentes (Figura

19), las mismas que serán contabilizadas mediante un microscopio óptico luego de pasar por un proceso químico de revelado (Parajuli et al., 2015).



*Figura 19. Configuración experimental para la medición de la tasa de exhalación.*

*Fuente: (Chen et al., 1993)*

Luego de que se colocaron correctamente los detectores, se procedió a ubicar las cámaras de difusión sobre la superficie del material a evaluar y finalmente las cámaras son selladas herméticamente con silicona con la finalidad de que la concentración de radón-222 no se escape por los espacios entre la cámara y la superficie del material. Durante las primeras 4 semanas se fijó un imán conjuntamente a una lata metálica para cubrir el detector con el fin de que se exponga con la muestra y alcance el equilibrio secular (Ilustración 20-a. b.). Una vez que ha transcurrido este tiempo se procede a retirar el imán y se expone el detector durante 45 días para que se generen las partículas alfa y descendientes del radón-222 (Chen, Weng, & Chu, 1993).



a.



b.

Figura 20. Exposición de los detectores LR-115 Tipo II

a. Cámaras de difusión con lámina metálica b. Cámaras de difusión con imán

Fuente: Autor

### 3.3 Técnica de la lata sellada (Can technique)

#### 3.3.1 Construcción de cámaras de difusión

Para evaluar la concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 se recurrió a la técnica denominada “*Can Technique*” o técnica de lata, que está conformada por un tubo plástico de PVC de forma cilíndrica de 10 cm de altura y 7 cm de diámetro, como se aprecia en la (Figura 21) (Shakir Khan et al., 2011).

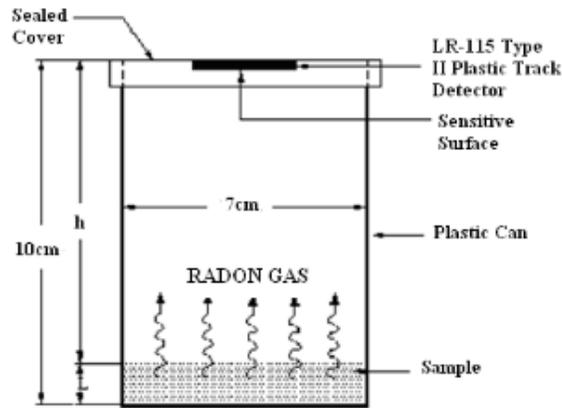
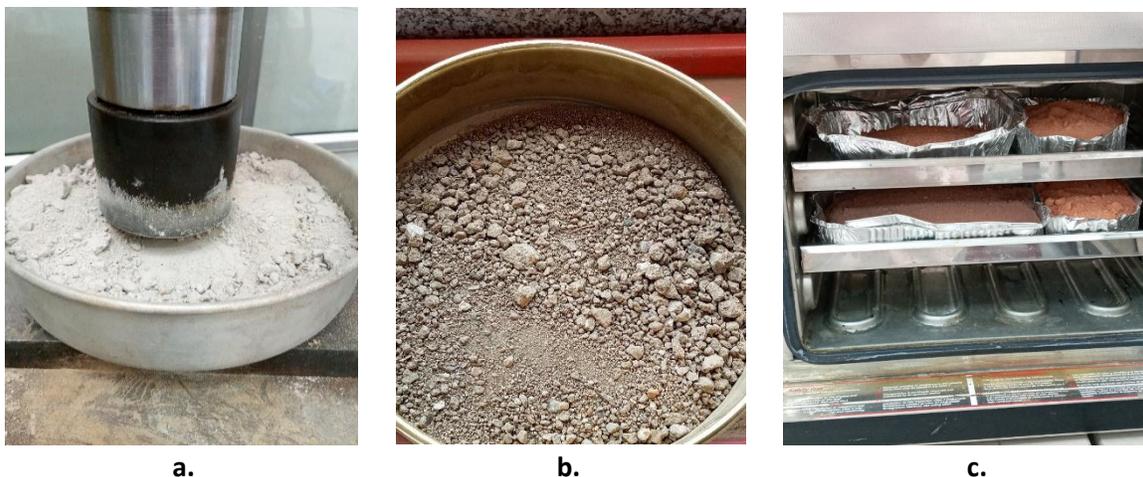


Figura 21. Cámara de difusión para determinar concentración y exhalación de radón-222

Fuente: (Shakir Khan et al., 2011)

### 3.3.2 Preparación de muestras pulverizadas

Para el análisis de las concentraciones de radio-226, radón-222 y la exhalación en los diferentes materiales de construcción es necesario preparar la muestra, para lo cual se tritura en una prensa hidráulica hasta obtener la materia prima en forma de polvo fino para posteriormente ser tamizadas a través de una malla pequeña de 80  $\mu\text{m}$  para eliminar el tamaño del grano más grande y hacerlos más homogéneos. Finalmente se secan al aire libre y luego se coloca en una estufa a una temperatura de 100  $^{\circ}\text{C}$  con el fin de eliminar completamente la humedad (Figura 22-a. b. c.) (Parajuli et al., 2015).



*Figura 22. Procesamiento de muestras.*

*a. Triturado de las muestras b. Tamizado de las muestras. Deshidratación de las muestras*

*Fuente: Autor*

### **3.3.3 Exposición en materiales de construcción**

Para la medición de las concentraciones de radio-226, radón-222 y la exhalación en los diferentes materiales de construcción se realizan directamente con la materia prima en forma de polvo fino, se pesa 100 gr de muestra en una balanza analítica y luego se coloca en las cámaras de difusión construidas anteriormente. Finalmente se cierran las cámaras de difusión con las tapas respectivas en las cuáles se coloca el detector sólido LR-115 con vista hacia la muestra y pueda alcanzar el equilibrio secular. De la misma manera durante las 4 primeras semanas se coloca un imán junto a una lata metálica para evitar que el detector se exponga a la muestra. Ya transcurrido este tiempo se procede a retirar el imán y se expone el detector durante 45 días para que se generen las partículas alfa y descendientes del Radón-222-222 (Ilustración 23 - a. b.) (Mahur, Shakir Khan, Naqvi, Prasad, & Azam, 2008).



a.



b.

*Figura 23. Exposición de la muestra*

*a. Pesado de la muestra b. Colocación de la muestra en las cámaras de difusión*

### 3.3.4 Proceso de revelado de detectores LR-115

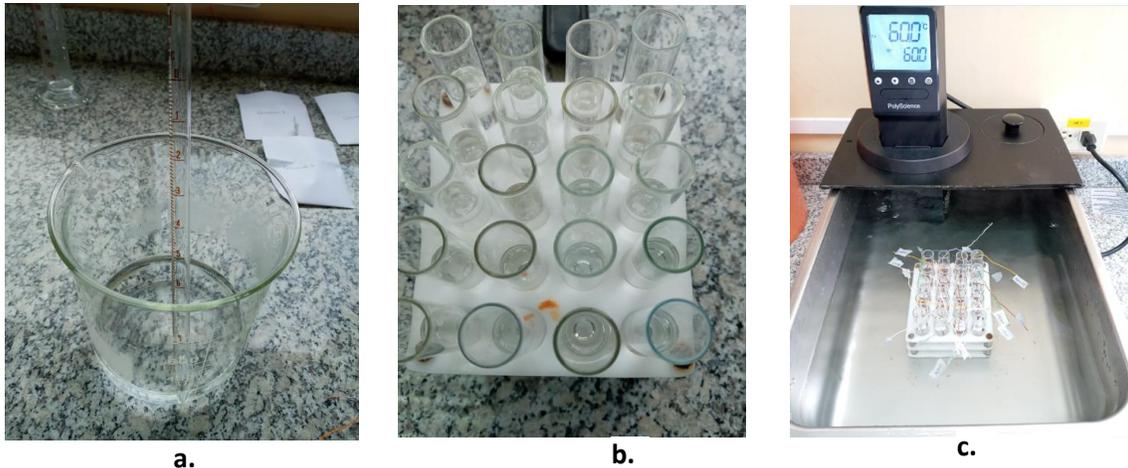
Una vez que transcurre los 75 de exposición de los detectores, se someten a un proceso de grabado químico, el cual nos permite contabilizar de mejor manera las trazas que se forman. Este procedimiento de revelado se detalla a continuación (P. Singh et al., 2015)

### 3.3.5 Tratamiento químico

- Encender el baño maría hasta alcanzar una temperatura de 60 °C.
- Identificar los detectores para evitar confusiones.
- Colocar los detectores sobre los porta detectores.
- Prepara una solución de hidróxido de sodio 2.5 N y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- En cada gradilla colocar una cantidad de 10 ml por cada tubo de ensayo y luego pasar a baño maría hasta alcanzar una temperatura constante.

- Colocar los detectores en los tubos de ensayo por un tiempo de 90 minutos (Figura 24 -a).

### 3.3.6 Lavado y secado de detectores

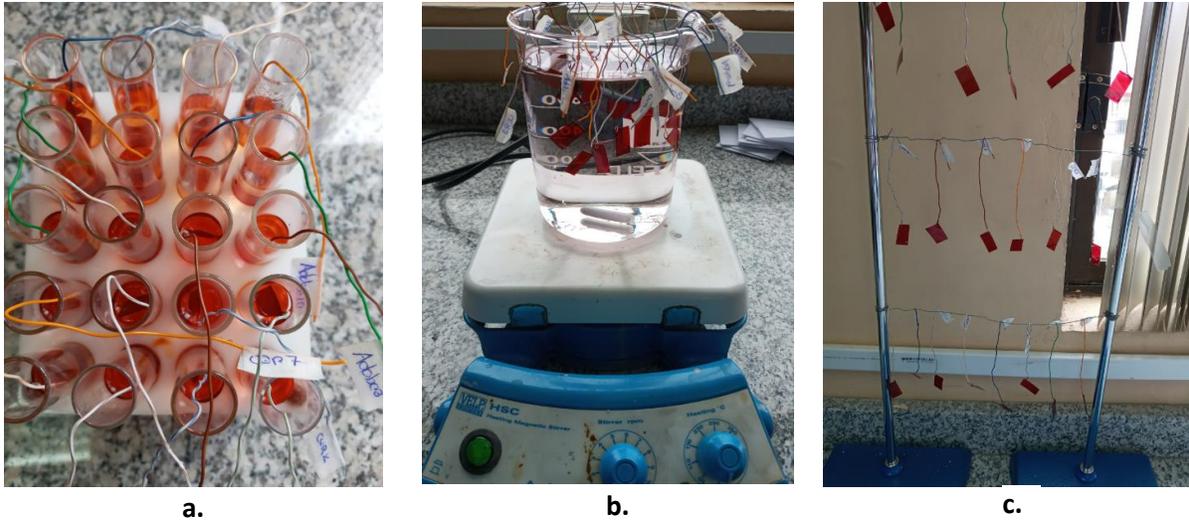


*Figura 24. Tratamiento químico de detectores*

*a. Solución de Na (OH) 2.5N b. Colocación de Na (OH) en tubos de ensayo c. Proceso de baño maría*

*Fuente: Autor*

- Retirar los detectores y colocarlos en un vaso de precipitación con agua destilada para lavarlos mediante un sistema de agitación en el agitador magnético a (3rpm), durante 20 min.
- Colocar los detectores en un vaso de precipitación con agua destilada, durante 2 minutos.
- Una vez finalizado el proceso de lavado se debe dejar secar los detectores al aire libre por un tiempo de 60 minutos (Ilustración 25- a. b. c.).



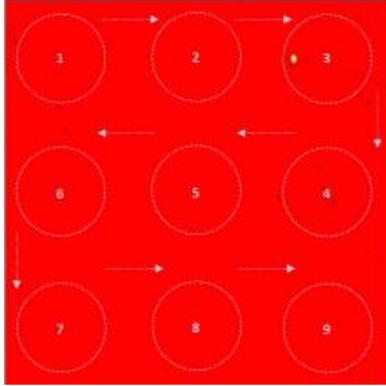
*Figura 25. Proceso de lavado y secado de detectores*

*a. Solución de Na (OH) después de baño maría b. Lavado de detectores c. Secado de detectores*

*Fuente: Autor*

### **3.3.7 Conteo de trazas nucleares**

Una vez que se ha realizado el revelado químico de los detectores LR-115, se procedió a determinar el área del campo de visión donde el valor obtenido es de  $0.00283 \text{ cm}^2$  y un total de 70 campos de visión. Finalmente las muestras son contabilizadas a través de un microscopio óptico con un lente de 40X de acuerdo a la técnica citada por (Durrani, Saaed & Radomir, 1997) (Figura 26).



*Figura 26. Técnica de conteo en un microscopio óptico.*

*Fuente: (Durrani, Saaed & Radomir, 1997)*

### **3.4 Medición de radioactividad en materiales de construcción mediante espectrometría gamma.**

Para determinar la radioactividad en los diferentes materiales de construcción se utilizó un espectrómetro gamma (TRIAL), el cual está diseñado para medir la actividad de los Radio-226núclidos naturales (radio-226, torio-232, potasio-40) de acuerdo a la energía de radiación que emite cada uno.

#### **3.4.1 Preparación de la muestra**

- Una vez que se ha recolectado las muestras se procede a triturar y homogenizar hasta alcanzar un tamaño de 1mm.
- Con la ayuda de una estufa, las muestras se someten al proceso de secado a una temperatura de 110°C.
- Luego se recogen las muestras y se almacenan dentro de fundas de polietileno ziploc y se codifican para evitar errores (Ravisankar et al., 2012).

### 3.4.2 Análisis Radiométrico

- Antes de proceder con la medición se debe limpiar el contenedor marinelli con el fin de eliminar cualquier impureza que pueda alterar la muestra.
- Para obtener un mejor espectro es importante limpiar cuidadosamente el detector de plomo.
- Luego colocamos las diferentes muestras en los contenedores marinelli hasta la altura máxima.
- Finalmente se mide el fondo espectral por un tiempo de 86400s y se verifica que el voltaje al cual funciona el detector sea el adecuado, de acuerdo al manual del equipo (Al-Sulaiti et al., 2011).

### 3.4.3 Calibración por energía

Previo a la medición, es importante realizar la calibración del espectrómetro gamma con la finalidad de determinar la relación entre el canal del analizador y la energía del radionúclido a través de la siguiente expresión matemática:

$$E_{\gamma} = A + B * Ch \quad (22)$$

*Ecuación 22. Calibración por energía*

*Donde:*

**A,B:** Constantes determinadas durante la calibración.

**Ch:** Número del canal espectral

Para la calibración por energía se utilizó fuentes estándar de radiación gamma (Cesio-137 y Potasio-40) donde los espectros deben contener picos bien definidos, con un tiempo de medición

correspondiente a 86400s (24h), posterior a esto se obtuvo los espectros de las diferentes muestras (Ver Anexo A).

## **CAPÍTULO IV**

### **4. Resultados**

#### **4.1 Concentración de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique.**

Previo a la exposición de los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo, es importante mencionar que las submuestras correspondientes a ladrillo y mármol no fueron tomadas en cuenta tanto para la técnica can Technique como para la técnica Cup Technique, debido a que los valores determinados presentan una anomalía bastante considerable en comparación al resto de muestras; uno de los supuestos que provocó estas irregularidades en los datos es la fuga del gas radón-222 a través de los espacios que no se sellaron correctamente durante la fase de construcción de la cámara de difusión. Otra suposición que se plantea es el origen de los materiales ya que para la elaboración de los mismos la materia prima puede ser extraída de diferentes lugares que pueden contener altas o bajas concentraciones de radio-226.

Tabla 11. Concentración de radón-222 en adobe (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radón-222
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Adobe	1	321 ± 18	1620 ± 90	1900 ± 110
Adobe	2	279 ± 17	1410 ± 80	1650 ± 100
Adobe	3	391 ± 20	1970 ± 100	2310 ± 120
Adobe	4	277 ± 17	1400 ± 80	1640 ± 100
Adobe	5	380 ± 19	1920 ± 100	2240 ± 120
Adobe	6	350 ± 19	1770 ± 90	2070 ± 110
Adobe	7	368 ± 19	1860 ± 100	2170 ± 110
Adobe	8	385 ± 20	1940 ± 100	2270 ± 120
Adobe	9	254 ± 16	1280 ± 80	1500 ± 90
Adobe	10	355 ± 19	1790 ± 100	2100 ± 110
<b>Máximo</b>		<b>391 ± 20</b>	<b>1970 ± 100</b>	<b>2300 ± 120</b>
<b>Mínimo</b>		<b>277 ± 17</b>	<b>1280 ± 80</b>	<b>1500 ± 90</b>
<b>Promedio</b>		<b>355 ± 19</b>	<b>1700 ± 90</b>	<b>1980 ± 110</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>277</b>	<b>253.08</b>	<b>296.00</b>

Tabla 12. Concentración de radón-222 en bloque (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radón-222
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Bloque	1	218 ± 15	1100 ± 80	1290 ± 90
Bloque	2	31 ± 6	160 ± 30	180 ± 30
Bloque	3	263 ± 16	1330 ± 80	1550 ± 100
Bloque	4	494 ± 22	2490 ± 110	2920 ± 130
Bloque	5	246 ± 16	1240 ± 80	1450 ± 90
Bloque	6	109 ± 10	550 ± 50	640 ± 60
Bloque	7	229 ± 15	1160 ± 80	1350 ± 90
Bloque	8	95 ± 10	480 ± 50	560 ± 60
Bloque	9	333 ± 18	1680 ± 90	1970 ± 110
Bloque	10	108 ± 10	550 ± 50	640 ± 60
<b>Máximo</b>		<b>494 ± 22</b>	<b>2490 ± 110</b>	<b>2920 ± 130</b>
<b>Mínimo</b>		<b>31 ± 6</b>	<b>1100 ± 80</b>	<b>180 ± 30</b>
<b>Promedio</b>		<b>108 ± 10</b>	<b>160 ± 30</b>	<b>1260 ± 90</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>135.85</b>	<b>685.80</b>	<b>802.11</b>

Tabla 13. Concentración de radón-222 en ladrillo

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas $\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	Concentración radón-222 $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Ladrillo	1	12 ± 3	61 ± 17	70 ± 20
Ladrillo	2	7 ± 3	35 ± 13	41 ± 16
Ladrillo	3	25 ± 5	130 ± 30	150 ± 30
Ladrillo	4	20 ± 4	101 ± 23	120 ± 30
Ladrillo	5	19 ± 4	96 ± 22	110 ± 77
Ladrillo	6	13 ± 4	66 ± 18	80 ± 21
Ladrillo	7	24 ± 5	120 ± 30	140 ± 30
Ladrillo	8	21 ± 5	106 ± 23	120 ± 30
Ladrillo	9	24 ± 5	120 ± 30	140 ± 30
Ladrillo	10	35 ± 6	180 ± 30	210 ± 30
<b>Máximo</b>		<b>35 ± 6</b>	<b>180 ± 30</b>	<b>210 ± 35</b>
<b>Mínimo</b>		<b>7 ± 3</b>	<b>35 ± 13</b>	<b>41 ± 16</b>
<b>Promedio</b>		<b>20 ± 4</b>	<b>101 ± 23</b>	<b>120 ± 30</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7.93</b>	<b>40.03</b>	<b>46.82</b>

Tabla 14. Concentración de radón-222 en cerámica

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radón-222
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Cerámica	1	29 ± 5	150 ± 30	170 ± 30
Cerámica	2	66 ± 8	330 ± 40	390 ± 50
Cerámica	3	46 ± 7	230 ± 30	270 ± 40
Cerámica	4	28 ± 5	140 ± 30	170 ± 30
Cerámica	5	20 ± 4	100 ± 23	120 ± 30
Cerámica	6	22 ± 5	110 ± 24	130 ± 30
Cerámica	7	28 ± 5	140 ± 30	170 ± 30
Cerámica	8	33 ± 6	170 ± 30	200 ± 30
Cerámica	9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cerámica	10	31 ± 6	160 ± 30	180 ± 30
<b>Máximo</b>		<b>66 ± 8</b>	<b>330 ± 40</b>	<b>390 ± 50</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>30 ± 6</b>	<b>150 ± 30</b>	<b>180 ± 30</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>17.10</b>	<b>86.35</b>	<b>101.005</b>

Tabla 15. Concentración de radón-222 en granito

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radón-
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	222 $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Granito	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Granito	2	356 ± 19	1800 ± 100	2100 ± 110
Granito	3	343 ± 19	1730 ± 90	2030 ± 110
Granito	4	587 ± 24	2960 ± 120	3470 ± 140
Granito	5	256 ± 16	1290 ± 80	1510 ± 100
Granito	6	448 ± 21	2260 ± 110	2650 ± 130
Granito	7	282 ± 17	1420 ± 80	1670 ± 100
Granito	8	157 ± 13	790 ± 60	930 ± 70
Granito	9	333 ± 18	1680 ± 90	1970 ± 110
Granito	10	244 ± 16	1230 ± 80	1440 ± 90
<b>Máximo</b>		<b>587 ± 24</b>	<b>2960 ± 120</b>	<b>3470 ± 140</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>301 ± 17</b>	<b>1520 ± 90</b>	<b>1780 ± 100</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>158.53</b>	<b>800.25</b>	<b>935.97</b>

Tabla 16. Concentración de radón-222 en Mármol

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radon-
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$^{222}$ $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$
Mármol	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Mármol	2	23 ± 5	116 ± 24	140 ± 30
Mármol	3	15 ± 4	76 ± 20	90 ± 23
Mármol	4	10 ± 3	50 ± 16	60 ± 19
Mármol	5	17 ± 4	86 ± 21	100 ± 24
Mármol	6	17 ± 4	86 ± 21	100 ± 24
Mármol	7	16 ± 4	81 ± 20	90 ± 24
Mármol	8	10 ± 3	50 ± 16	60 ± 19
Mármol	9	13 ± 4	66 ± 18	77 ± 21
Mármol	10	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
<b>Máximo</b>		<b>23 ± 5</b>	<b>116 ± 24</b>	<b>140 ± 30</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>12 ± 3</b>	<b>61 ± 17</b>	<b>70 ± 20</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7.40</b>	<b>37.35</b>	<b>43.69</b>

En las tablas (11-16) se puede observar el valor correspondiente a la densidad de trazas para cada material de construcción, misma que sirve para el cálculo de las magnitudes relacionadas con la exhalación de radón-222 y concentraciones de radio-226, donde la muestra con mayor densidad de trazas corresponde al adobe con un valor de **1700 ± 90 trazas/cm<sup>2</sup>**, mientras que la muestra con menor densidad de trazas corresponde a la cerámica con un valor de **150 ± 30 trazas/cm<sup>2</sup>**. En la figura 27 se puede apreciar los niveles de concentraciones promedio de las cuatro muestras analizadas, destacando en primer lugar al adobe con un valor promedio de **1980 ± 110 Bq/m<sup>3</sup>**, luego le sigue el granito con un valor promedio de **1780 ± 100 Bq/m<sup>3</sup>**, posterior a este le precede el bloque con un valor promedio de **1260 ± 90 Bq/m<sup>3</sup>**, y finalmente la cerámica con un valor promedio de **180 ± 30 Bq/m<sup>3</sup>**.

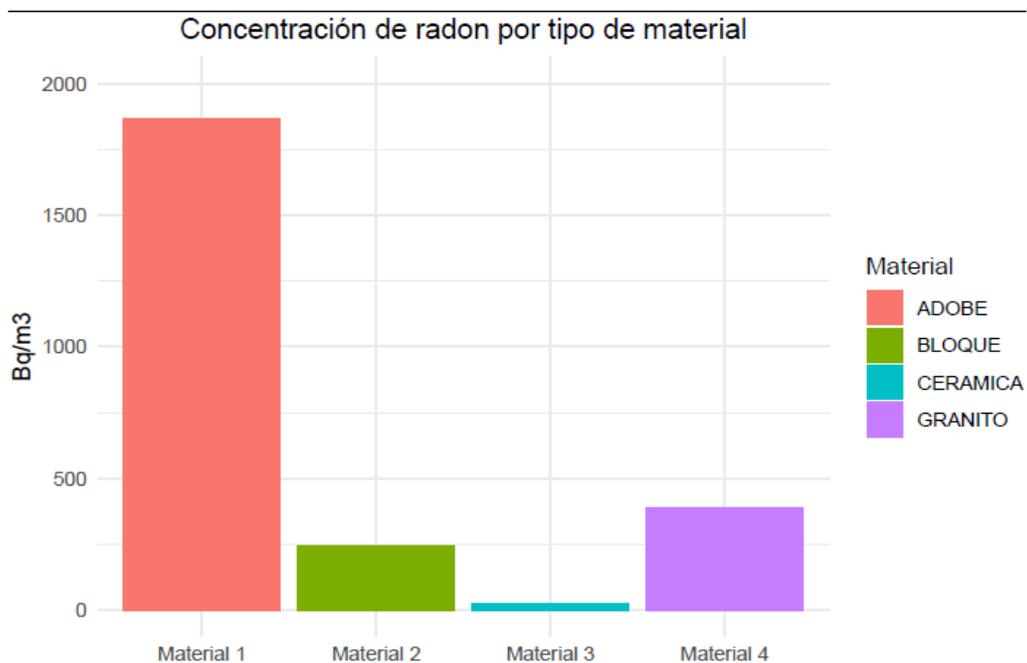


Figura 27. Concentración de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique.

Fuente: Autor

Para comparar las concentraciones de radón-222 respecto a las muestras de (Adobe, Bloque, Cerámica y Granito) se utilizó el diagrama de caja y bigote, el cual nos permite visualizar de mejor manera la distribución de los datos. En la figura 28 se visualiza que existe una diferencia significativa entre las concentraciones de las muestras, siendo el adobe con mayor concentración, seguida por el granito y bloque, precedido finalmente por la cerámica que contiene la menor concentración.

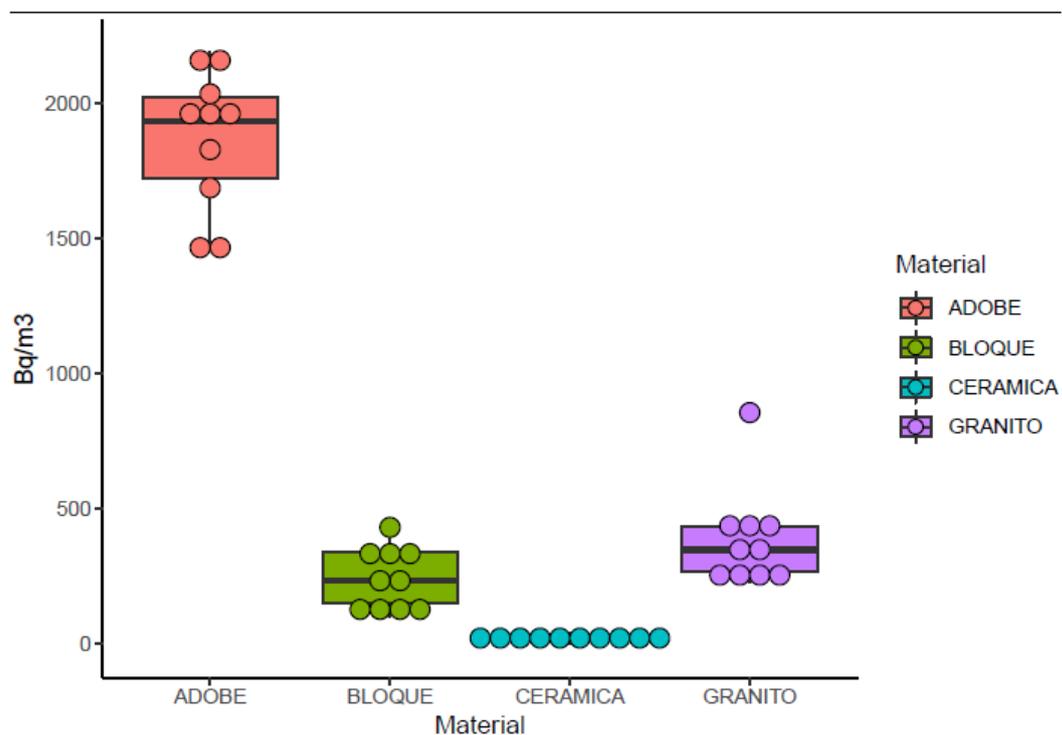


Figura 28. Distribución de las concentraciones de radón-222 en diferentes materiales de construcción

Fuente: Autor

#### 4.2 Exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique.

Tabla 17. Exhalación de radón-222 en adobe (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado C $\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	por área EA $\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	por masa EM $\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Adobe	1	116E4 ± 19E4	0.24 ± 0.04	0.107 ± 0.018
Adobe	2	101E4 ± 16E4	0.21 ± 0.03	0.093 ± 0.015
Adobe	3	142E4 ± 22E4	0.30 ± 0.05	0.131 ± 0.021
Adobe	4	101E4 ± 16E4	0.21 ± 0.03	0.092 ± 0.015
Adobe	5	140E4 ± 22E4	0.30 ± 0.05	0.127 ± 0.020
Adobe	6	127E4 ± 20E4	0.30 ± 0.04	0.117 ± 0.019
Adobe	7	134E4 ± 21E4	0.30 ± 0.04	0.123 ± 0.020
Adobe	8	140E4 ± 22E4	0.30 ± 0.05	0.129 ± 0.021
Adobe	9	92E4 ± 15E4	0.19 ± 0.03	0.085 ± 0.014
Adobe	10	129E4 ± 21E4	0.30 ± 0.04	0.119 ± 0.019
<b>Máximo</b>		<b>142E4 ± 22E4</b>	<b>0.30 ± 0.05</b>	<b>0.129 ± 0.020</b>
<b>Mínimo</b>		<b>92E4 ± 15E4</b>	<b>0.19 ± 0.03</b>	<b>0.085 ± 0.014</b>
<b>Promedio</b>		<b>122E4 ± 19E4</b>	<b>0.25 ± 0.04</b>	<b>0.112 ± 0.017</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>18E4</b>	<b>0.044</b>	<b>0.002</b>

Tabla 18. Exhalación de radón-222 en bloque (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Bloque	1	79E4 ± 13E4	0.16 ± 0.03	0.700 ± 0.012
Bloque	2	11E4 ± 3E4	0.023 ± 0.010	0.010 ± 0.040
Bloque	3	96E4 ± 15E4	0.20 ± 0.03	0.088 ± 0.015
Bloque	4	18E5 ± 3E5	0.40 ± 0.06	0.16 ± 0.03
Bloque	5	89E4 ± 14E4	0.19 ± 0.03	0.082 ± 0.014
Bloque	6	40E4 ± 7E4	0.080 ± 0.017	0.036 ± 0.007
Bloque	7	83E4 ± 14E4	0.17 ± 0.03	0.076 ± 0.013
Bloque	8	34E4 ± 6E4	0.070 ± 0.015	0.032 ± 0.007
Bloque	9	121E4 ± 19E4	0.25 ± 0.04	0.111 ± 0.018
Bloque	10	39E4 ± 7E4	0.080 ± 0.017	0.040 ± 0.007
<b>Máximo</b>		<b>121E4 ± 19E4</b>	<b>0.40 ± 0.06</b>	<b>0.16 ± 0.03</b>
<b>Mínimo</b>		<b>11E4 ± 3E4</b>	<b>0.023 ± 0.010</b>	<b>0.010 ± 0.040</b>
<b>Promedio</b>		<b>77 E4 ± 13E4</b>	<b>0.16 ± 0.03</b>	<b>0.070 ± 0.012</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>50E4</b>	<b>0.099</b>	<b>0.193</b>

Tabla 19. Exhalación de radón-222 en ladrillo (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Ladrillo	<b>1</b>	44E3 ± 14E3	0.009 ± 0.008	0.004 ± 0.004
Ladrillo	<b>2</b>	25E3 ± 10E3	0.005 ± 0.008	0.002 ± 0.004
Ladrillo	<b>3</b>	91E3 ± 23E3	0.019 ± 0.009	0.008 ± 0.004
Ladrillo	<b>4</b>	73E3 ± 20E3	0.015 ± 0.009	0.007 ± 0.004
Ladrillo	<b>5</b>	69E3 ± 19E3	0.014 ± 0.009	0.006 ± 0.004
Ladrillo	<b>6</b>	47E3 ± 15E3	0.010 ± 0.008	0.004 ± 0.004
Ladrillo	<b>7</b>	87E3 ± 22E3	0.018 ± 0.009	0.008 ± 0.004
Ladrillo	<b>8</b>	76E3 ± 20E3	0.016 ± 0.009	0.007 ± 0.004
Ladrillo	<b>9</b>	87E3 ± 22E3	0.018 ± 0.009	0.0080 ± 0.0040
Ladrillo	<b>10</b>	13E4 ± 3E4	0.030 ± 0.010	0.012 ± 0.004
<b>Máximo</b>		<b>13E4 ± 3E4</b>	<b>0.030 ± 0.010</b>	<b>0.012 ± 0.004</b>
<b>Mínimo</b>		<b>253E3 ± 10E3</b>	<b>0.005 ± 0.008</b>	<b>0.002 ± 0.004</b>
<b>Promedio</b>		<b>73E3 ± 20E3</b>	<b>0.015 ± 0.009</b>	<b>0.007 ± 0.004</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>30E4</b>	<b>0.006</b>	<b>0.0026</b>

Tabla 20. Exhalación de radón-222 en cerámica (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Cerámica	1	105E3 ± 25E3	0.022 ± 0.009	0.0097 ± 0.0042
Cerámica	2	24E4 ± 5E4	0.050 ± 0.012	0.022 ± 0.006
Cerámica	3	17E4 ± 4E4	0.035 ± 0.011	0.015 ± 0.005
Cerámica	4	102E3 ± 24E3	0.021 ± 0.009	0.0093 ± 0.0042
Cerámica	5	73E3 ± 20E3	0.015 ± 0.009	0.0067 ± 0.0039
Cerámica	6	80E3 ± 21E3	0.017 ± 0.009	0.0073 ± 0.0040
Cerámica	7	102E3 ± 24E3	0.021 ± 0.009	0.0093 ± 0.0042
Cerámica	8	120E3 ± 30E3	0.025 ± 0.010	0.011 ± 0.004
Cerámica	9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cerámica	10	11E4 ± 3E4	0.023 ± 0.010	0.0104 ± 0.0042
<b>Máximo</b>		<b>24E4 ± 5E4</b>	<b>0.050 ± 0.012</b>	<b>0.022 ± 0.006</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>11E3 ± 3E3</b>	<b>0.023 ± 0.010</b>	<b>0.0101 ± 0.0042</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>62E3</b>	<b>0.012</b>	<b>0.0053</b>

Tabla 21. Exhalación de radón-222-222 en granito (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Granito	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Granito	2	129E4 ± 21E4	0.30 ± 0.04	0.119 ± 0.019
Granito	3	125E4 ± 20E4	0.30 ± 0.04	0.115 ± 0.019
Granito	4	21E5 ± 3E5	0.40 ± 0.07	0.20 ± 0.03
Granito	5	93E4 ± 15E4	0.19 ± 0.03	0.085 ± 0.014
Granito	6	16E5 ± 3E5	0.30 ± 0.05	0.150 ± 0.024
Granito	7	102E4 ± 16E4	0.21 ± 0.04	0.094 ± 0.016
Granito	8	57E4 ± 10E4	0.119 ± 0.022	0.052 ± 0.010
Granito	9	121E4 ± 19E4	0.25 ± 0.04	0.111 ± 0.018
Granito	10	90E4 ± 14E4	0.18 ± 0.03	0.081 ± 0.014
<b>Máximo</b>		<b>21E5 ± 3E5</b>	<b>0.40 ± 0.07</b>	<b>0.150 ± 0.024</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>109E4 ± 18E4</b>	<b>0.23 ± 0.04</b>	<b>0.100 ± 0.017</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>58E4</b>	<b>0.11</b>	<b>0.051</b>

Tabla 22. Exhalación de radón-222 en Mármol (pulverizado)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Mármol	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Mármol	2	84E3 ± 21E3	0.017 ± 0.009	0.0077 ± 0.0040
Mármol	3	54E3 ± 16E3	0.011 ± 0.009	0.005 ± 0.004
Mármol	4	36E3 ± 13E3	0.008 ± 0.009	0.003 ± 0.004
Mármol	5	62E3 ± 20E3	0.013 ± 0.009	0.006 ± 0.004
Mármol	6	62E3 ± 20E3	0.013 ± 0.009	0.006 ± 0.004
Mármol	7	58E3 ± 20E3	0.012 ± 0.009	0.005 ± 0.004
Mármol	8	36E3 ± 13E3	0.008 ± 0.008	0.003 ± 0.004
Mármol	9	47E3 ± 15E3	0.010 ± 0.008	0.004 ± 0.004
Mármol	10	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
<b>Máximo</b>		<b>84E3 ± 21E3</b>	<b>0.017 ± 0.009</b>	<b>0.0077 ± 0.0040</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>44E3 ± 14E3</b>	<b>0.010 ± 0.008</b>	<b>0.004 ± 0.004</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>30E3</b>	<b>0.005</b>	<b>0.0024</b>

#### 4.2.1 Exhalación por área

En las tablas (17-22) se exponen los datos obtenidos para la exhalación por área, mientras que en la figura 29 apreciamos que predomina el adobe con un valor de exhalación de  $0.25 \pm 0.04 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ , seguido por el granito con un valor de  $0.23 \pm 0.04 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ , posterior a este le sigue el bloque con un valor de  $0.16 \pm 0.03 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$  y finalmente encontramos a la cerámica con el menor valor de exhalación de  $0.023 \pm 0.010 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ .

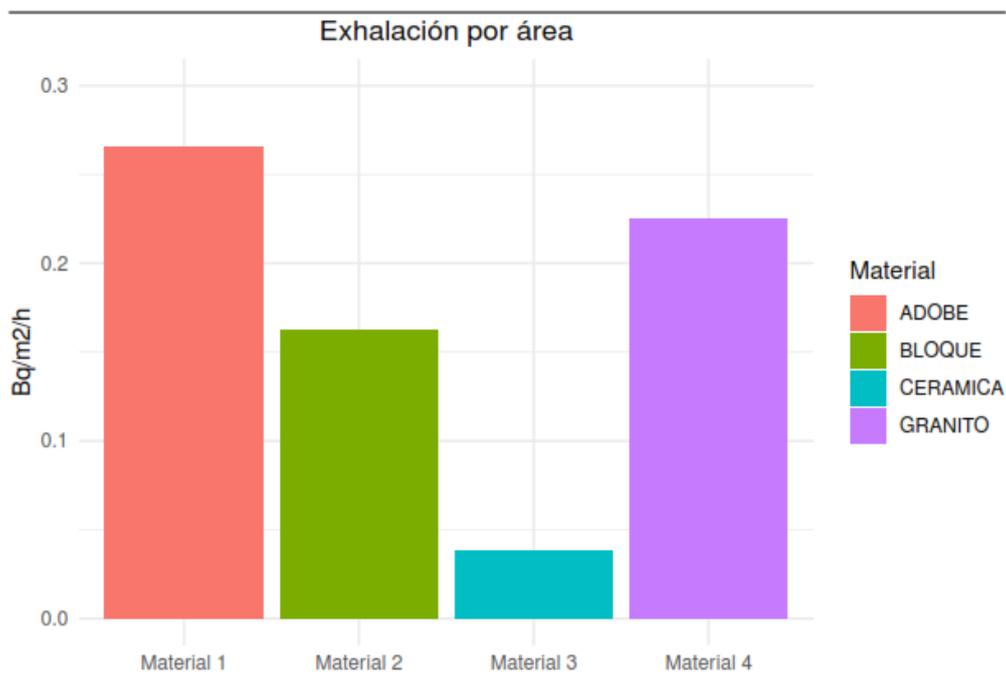


Figura 29. Exhalación por área

Fuente: Autor

#### 4.2.2 Exhalación por masa

Para la exhalación por masa los resultados obtenidos se presentan detalladamente en las (tablas 17-22) y en la figura 30 se observa que la mayor exhalación se presenta en el adobe con un valor de  $0.11 \pm 0.02 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ , mientras que para el granito se obtuvo un valor de  $0.100 \pm 0.017 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ , de la misma manera el bloque tuvo un valor de  $0.070 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ , y para la cerámica con el menor valor de  $0.0101 \pm 0.0042 \text{ Bq/h}\cdot\text{Kg}$ .

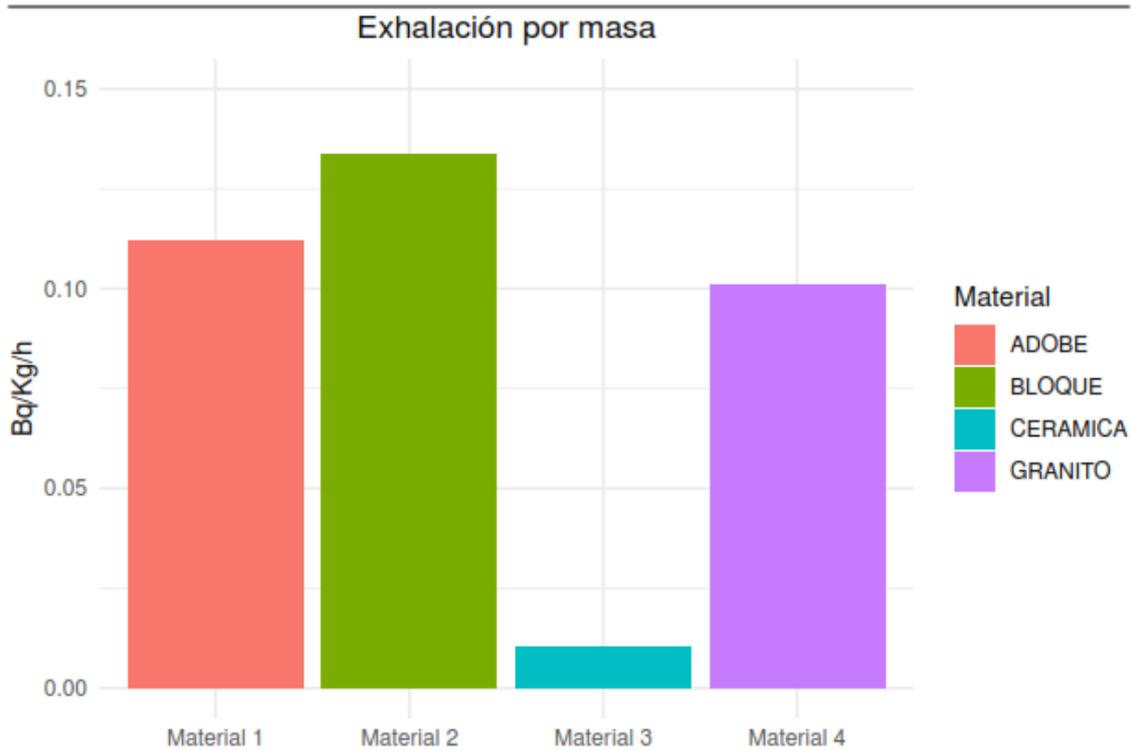


Figura 30. Exhalación por masa

Fuente: Autor

#### 4.3 Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can Technique

Tabla 23. Concentración de Radio-226 en adobe (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Adobe	1	321 ± 18	1620 ± 90	23 ± 4
Adobe	2	279 ± 17	1410 ± 80	20 ± 3
Adobe	3	391 ± 20	1970 ± 100	30 ± 4
Adobe	4	277 ± 17	1400 ± 80	20 ± 3
Adobe	5	380 ± 19	1920 ± 100	30 ± 4
Adobe	6	350 ± 19	1770 ± 90	30 ± 4
Adobe	7	368 ± 19	1860 ± 100	30 ± 4
Adobe	8	385 ± 20	1940 ± 100	30 ± 4
Adobe	9	254 ± 16	1280 ± 80	20 ± 3
Adobe	10	355 ± 19	1790 ± 100	20 ± 4
<b>Máximo</b>		<b>391 ± 20</b>	<b>1970 ± 100</b>	<b>30 ± 4</b>
<b>Mínimo</b>		<b>277 ± 17</b>	<b>1620 ± 90</b>	<b>20 ± 3</b>
<b>Promedio</b>		<b>355 ± 19</b>	<b>1700 ± 90</b>	<b>24 ± 4</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>277</b>	<b>253.08</b>	<b>3.57</b>

Tabla 24. Concentración de radio-226 en bloque (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Bloque	1	218 ± 15	1100 ± 80	16 ± 3
Bloque	2	31 ± 6	160 ± 30	2.2 ± 0.5
Bloque	3	263 ± 16	1330 ± 80	19 ± 3
Bloque	4	494 ± 22	2490 ± 110	35 ± 6
Bloque	5	246 ± 16	1240 ± 80	18 ± 3
Bloque	6	109 ± 10	550 ± 50	7.8 ± 1.4
Bloque	7	229 ± 15	1160 ± 80	16 ± 3
Bloque	8	95 ± 10	480 ± 50	6.8 ± 1.2
Bloque	9	333 ± 18	1680 ± 90	24 ± 4
Bloque	10	108 ± 10	550 ± 50	7.7 ± 1.4
<b>Máximo</b>		<b>494 ± 22</b>	<b>2490 ± 110</b>	<b>35.27 ± 6</b>
<b>Mínimo</b>		<b>31 ± 6</b>	<b>1100 ± 80</b>	<b>2.21 ± 0.5</b>
<b>Promedio</b>		<b>108 ± 10</b>	<b>160 ± 30</b>	<b>15 ± 3</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>135.85</b>	<b>685.80</b>	<b>9.70</b>

Tabla 25. Concentración de radio-226 en ladrillo (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Ladrillo	1	12 ± 3	61 ± 17	0.9 ± 0.3
Ladrillo	2	7 ± 3	35 ± 13	0.5 ± 0.2
Ladrillo	3	25 ± 5	130 ± 30	1.8 ± 0.4
Ladrillo	4	20 ± 4	101 ± 23	1.4 ± 0.4
Ladrillo	5	19 ± 4	96 ± 22	1.4 ± 0.4
Ladrillo	6	13 ± 4	66 ± 18	0.9 ± 0.3
Ladrillo	7	24 ± 5	120 ± 30	1.7 ± 0.4
Ladrillo	8	21 ± 5	106 ± 23	1.5 ± 0.4
Ladrillo	9	24 ± 5	120 ± 30	1.7 ± 0.4
Ladrillo	10	35 ± 6	180 ± 30	2.5 ± 0.6
<b>Máximo</b>		<b>35 ± 6</b>	<b>180 ± 30</b>	<b>2.5 ± 0.6</b>
<b>Mínimo</b>		<b>7 ± 3</b>	<b>35 ± 13</b>	<b>0.5 ± 0.2</b>
<b>Promedio</b>		<b>20 ± 4</b>	<b>101 ± 23</b>	<b>1.4 ± 0.4</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7.93</b>	<b>40.03</b>	<b>0.5</b>

Tabla 26. Concentración de radio-226 en cerámica (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Cerámica	1	29 ± 5	150 ± 30	2.1 ± 0.5
Cerámica	2	66 ± 8	330 ± 40	4.7 ± 0.9
Cerámica	3	46 ± 7	230 ± 30	3.3 ± 0.7
Cerámica	4	28 ± 5	140 ± 30	2.0 ± 0.5
Cerámica	5	20 ± 4	100 ± 23	1.4 ± 0.4
Cerámica	6	22 ± 5	110 ± 24	1.6 ± 0.4
Cerámica	7	28 ± 5	140 ± 30	2.0 ± 0.5
Cerámica	8	33 ± 6	170 ± 30	2.4 ± 0.5
Cerámica	9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cerámica	10	31 ± 6	160 ± 30	2.2 ± 0.5
<b>Máximo</b>		<b>66 ± 8</b>	<b>330 ± 40</b>	<b>4.7 ± 0.91</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>30 ± 6</b>	<b>150 ± 30</b>	<b>2.2 ± 0.5</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>17.10</b>	<b>86.35</b>	<b>1.22</b>

Tabla 27. Concentración de radio-226 en granito

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Granito	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Granito	2	356 ± 19	1800 ± 100	25 ± 4
Granito	3	343 ± 19	1730 ± 90	24 ± 4
Granito	4	587 ± 24	2960 ± 120	42 ± 6
Granito	5	256 ± 16	1290 ± 80	18 ± 3
Granito	6	448 ± 21	2260 ± 110	32 ± 5
Granito	7	282 ± 17	1420 ± 80	20 ± 3
Granito	8	157 ± 13	790 ± 60	11.2 ± 1.7
Granito	9	333 ± 18	1680 ± 90	24 ± 4
Granito	10	244 ± 16	1230 ± 80	17 ± 3
<b>Máximo</b>		<b>587 ± 24</b>	<b>2960 ± 120</b>	<b>42 ± 6.52</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>301 ± 17</b>	<b>1520 ± 90</b>	<b>21 ± 3</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>158.53</b>	<b>800.25</b>	<b>11.32</b>

Tabla 28. Concentración de radio-226 en mármol (pulverizado)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Mármol	1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Mármol	2	23 ± 5	116 ± 24	1.6 ± 0.4
Mármol	3	15 ± 4	76 ± 20	1.1 ± 0.3
Mármol	4	10 ± 3	50 ± 16	0.7 ± 0.3
Mármol	5	17 ± 4	86 ± 21	1.2 ± 0.4
Mármol	6	17 ± 4	86 ± 21	1.2 ± 0.4
Mármol	7	16 ± 4	81 ± 20	1.1 ± 0.3
Mármol	8	10 ± 3	50 ± 16	0.7 ± 0.3
Mármol	9	13 ± 4	66 ± 18	0.9 ± 0.3
Mármol	10	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
<b>Máximo</b>		<b>23 ± 5</b>	<b>116 ± 24</b>	<b>1.64 ± 0.42</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0.</b>
<b>Promedio</b>		<b>12 ± 3</b>	<b>61 ± 17</b>	<b>0.9 ± 0.3</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7.40</b>	<b>37.35</b>	<b>0.53</b>

### 4.3.1 Concentración de radio-226

Los valores obtenidos para las concentraciones de radio-226 para las muestras analizadas se establecen en las tablas (23-28), en la figura 31 se visualizan los valores promedio donde destaca el adobe con la mayor concentración de  $24 \pm 4$  Bq/kg, para el granito se obtuvo un valor de  $21 \pm 3$  Bq/kg y para el bloque un valor de  $15 \pm 3$  Bq/kg y por último se encuentra la cerámica con el menor valor de  $2.2 \pm 0.5$  Bq/kg.

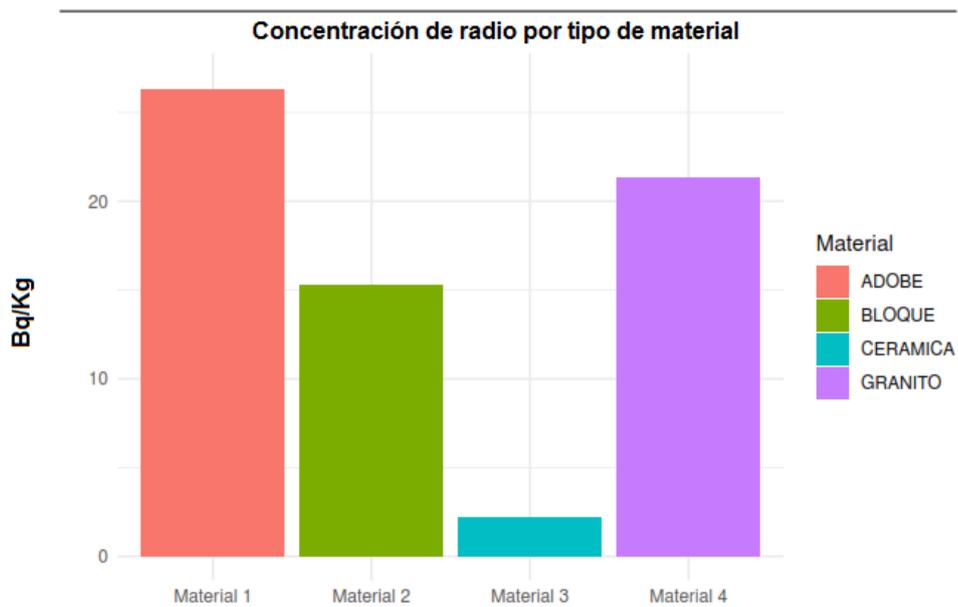


Figura 31. Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can Technique

Fuente: Autor

### 4.3.2 Análisis estadístico

Para determinar la correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 de las muestras se realizó un análisis estadístico mediante la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis con la ayuda del software R-Studio; esta prueba se aplica para 2 o más grupos independientes y determina si existe diferencia significativa entre los mismos.

### Hipótesis

**H0:** No existe diferencia estadísticamente significativa en la exhalación de los materiales de construcción.

**H0:** La exhalación no depende del material de construcción.

**H1:** Existe diferencia estadísticamente significativa en la exhalación de los materiales de construcción.

**H1:** La exhalación depende del material de construcción.

Al aplicar esta prueba no paramétrica en R-Studio el valor de significancia P dio un resultado de  $2.045 \exp(-0.7)$  por lo que se aceptan las hipótesis del investigador y se concluye que si existe diferencia significativa en la exhalación en los materiales de construcción y que son dependientes del tipo de material.

Por otro lado, para afirmar la relación entre la concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 por masa y área se realizó una regresión lineal para cada material; donde el factor de correlación igual a 1 y se concluye que, dependiendo de las concentraciones de radio-226, los materiales de construcción exhalarán más o menos gas radón-222. A continuación, se presentan las correlaciones para cada material.

**a. Adobe**

En la figura 32 y 33 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área.

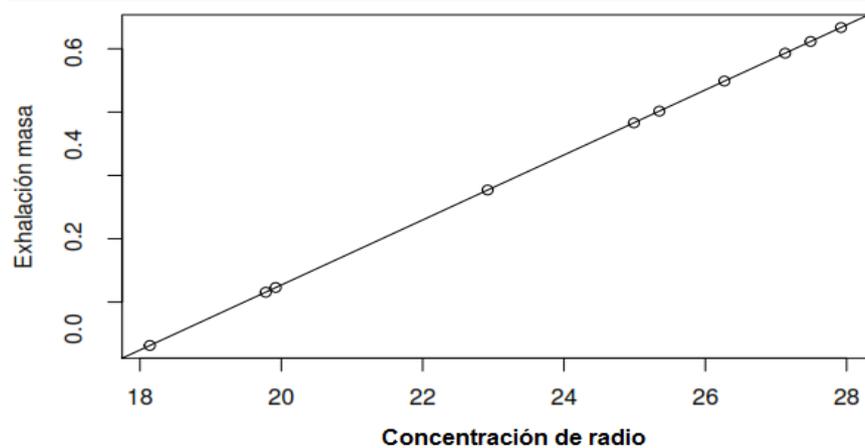


Figura 32. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

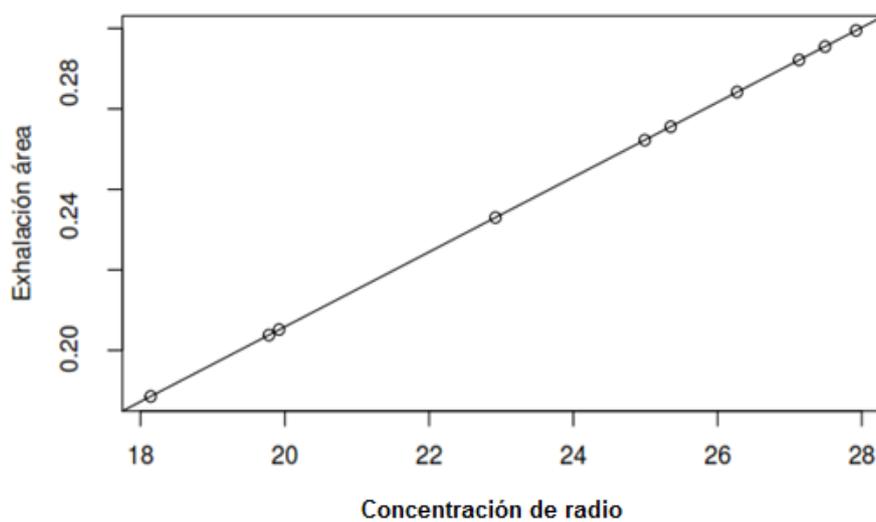


Figura 33. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

**b. Bloque**

En la figura 34 y 35 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área.

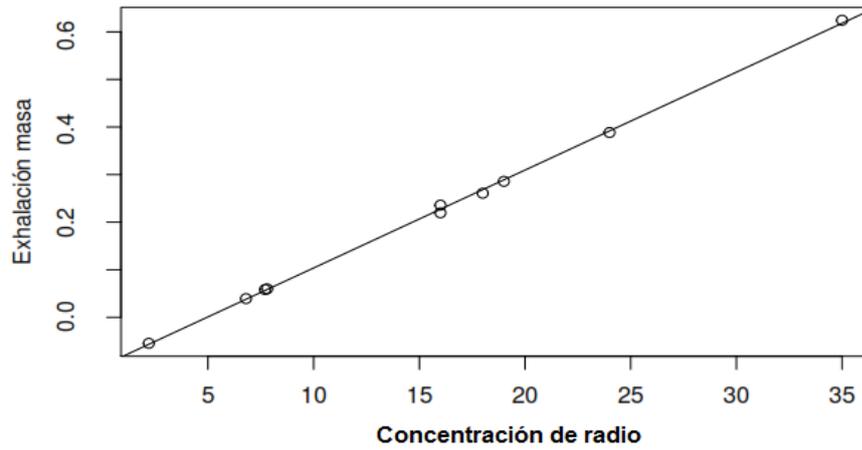


Figura 34. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

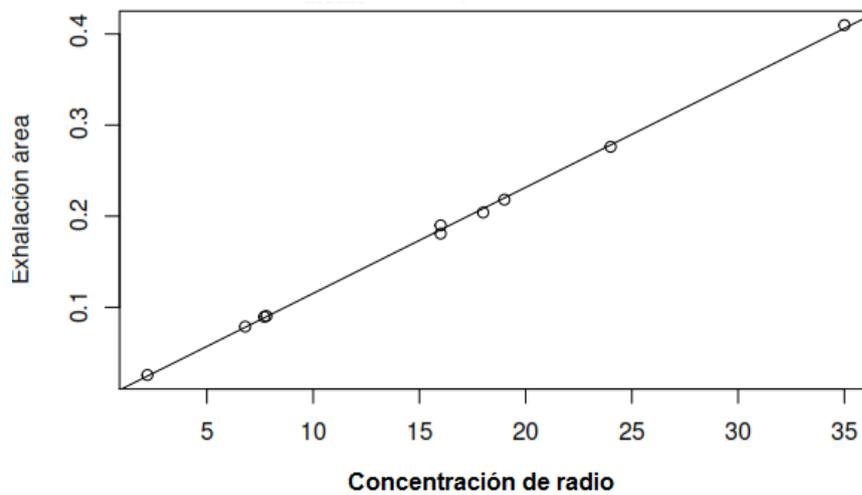


Figura 35. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

### c. Cerámica

En la figura 36 y 37 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área.

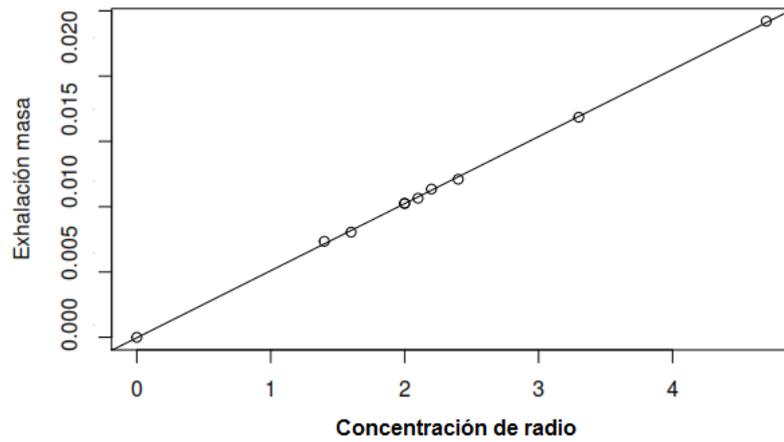


Figura 36. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

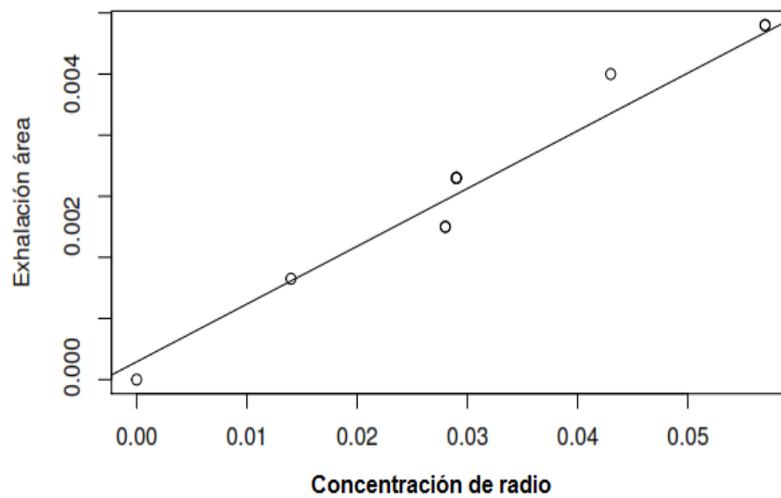


Figura 37. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

#### d. Granito

En la figura 38 y 39 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área.

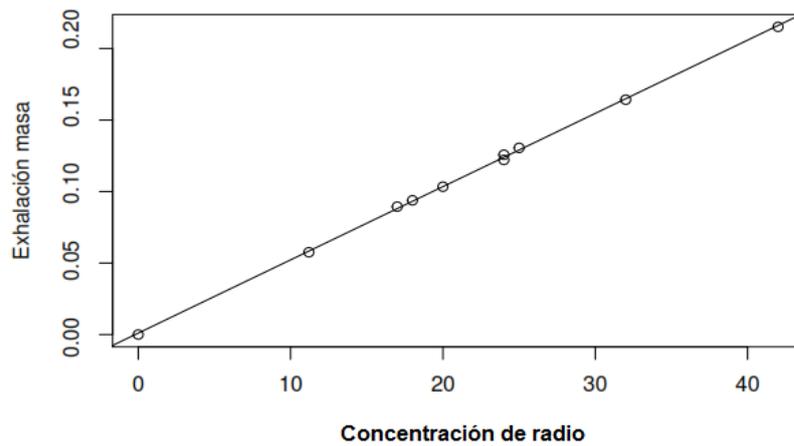


Figura 38. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

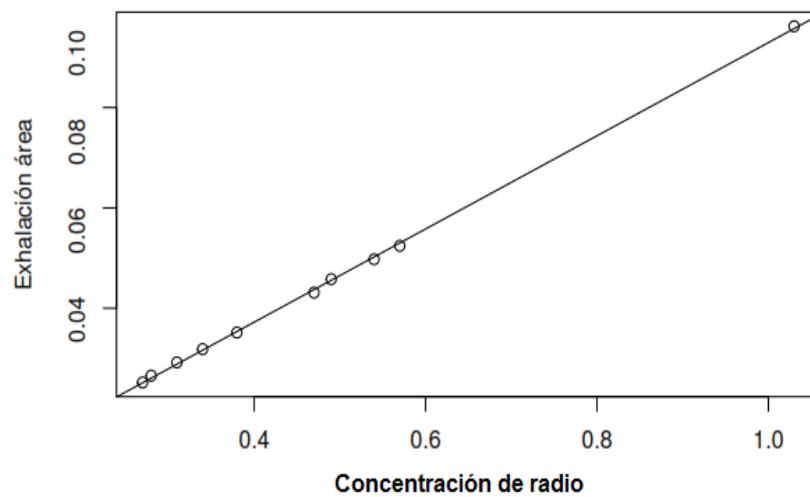


Figura 39. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

Tabla 29. Dosis anual absorbida, equivalente, efectiva en diferentes materiales de construcción mediante la técnica can technique

Material	Concentración	Dosis	Dosis	Dosis
	Radón-222 $\left[\frac{Bq}{m^3}\right]$	Absorbida (mSv/año)	Equivalente (mSv/año)	Efectiva (mSv/año)
Adobe	<b>1980 ± 110</b>	<b>25.0 ± 1.4</b>	<b>500 ± 30</b>	<b>3.0 ± 0.2</b>
Bloque	<b>1260 ± 90</b>	<b>15.8 ± 1.1</b>	<b>318 ± 22</b>	<b>1.9 ± 0.1</b>
Ladrillo	<b>120 ± 30</b>	<b>1.5 ± 0.3</b>	<b>30.0 ± 6.67</b>	<b>0.18 ± 0.04</b>
Cerámica	<b>180 ± 30</b>	<b>2.3 ± 0.4</b>	<b>45.1 ± 8.2</b>	<b>0.3 ± 0.1</b>
Granito	<b>1780 ± 100</b>	<b>22.4 ± 1.3</b>	<b>449 ± 30</b>	<b>2.69 ± 0.16</b>
Mármol	<b>70 ± 20</b>	<b>0.9 ± 0.3</b>	<b>17.7 ± 5.2</b>	<b>0.11 ± 0.03</b>

#### 4.4 Dosis anual absorbida

De acuerdo a los resultados obtenidos, la tasa de dosis anual absorbida se visualiza en la figura 40 donde predomina el adobe con un valor promedio de **25.0 ± 1.4 mSv/año**, seguido por el granito con un valor promedio de **22.4 ± 1.3 mSv/año**, a continuación, le precede el bloque con un valor promedio de **15.8 ± 1.1 mSv/año**, finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de **2.3 ± 0.4 mSv/año**.

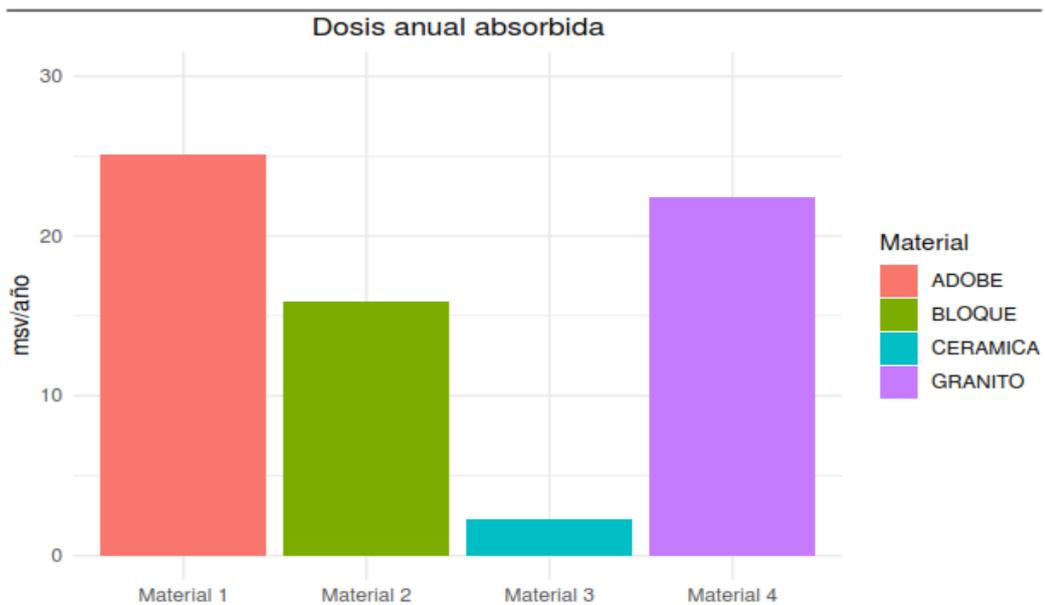


Figura 40. Tasa de dosis anual absorbida

Fuente: Autor

#### 4.5 Dosis anual equivalente

En el caso la tasa de dosis anual equivalente se observa en la figura 41 donde predomina el adobe con un valor promedio de  $500 \pm 30 \text{ mSv/año}$ , seguido por el granito con un valor promedio de  $449 \pm 30 \text{ mSv/año}$ , a continuación, le precede el bloque con un valor promedio de  $318 \pm 22 \text{ mSv/año}$ , finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de  $45.1 \pm 8.2 \text{ mSv/año}$ .

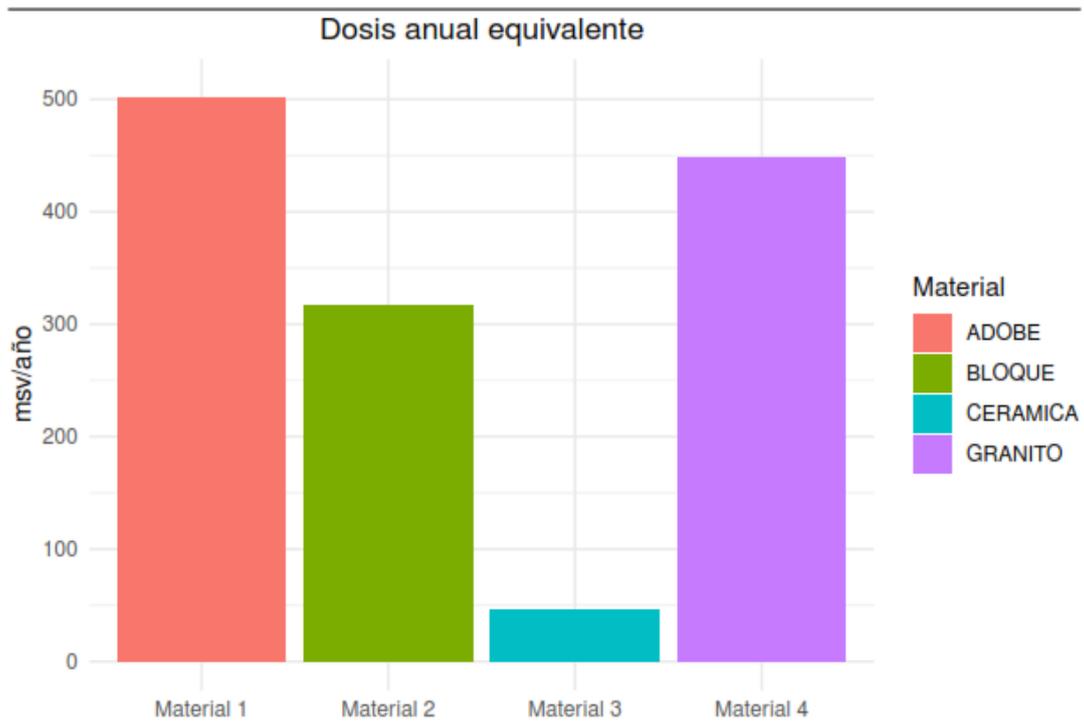


Figura 41. Tasa de dosis anual equivalente

Fuente: Autor

#### 4.6 Dosis anual efectiva

Para la tasa de dosis anual efectiva se observa en la figura 42 donde predomina el adobe con un valor promedio de  $3.0 \pm 0.2$  mSv/año, seguido por el granito con un valor promedio de  $2.69 \pm 0.16$  mSv/año, a continuación, le precede el bloque con un valor promedio de  $1.9 \pm 0.1$  mSv/año, finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de  $0.3 \pm 0.1$  mSv/año.

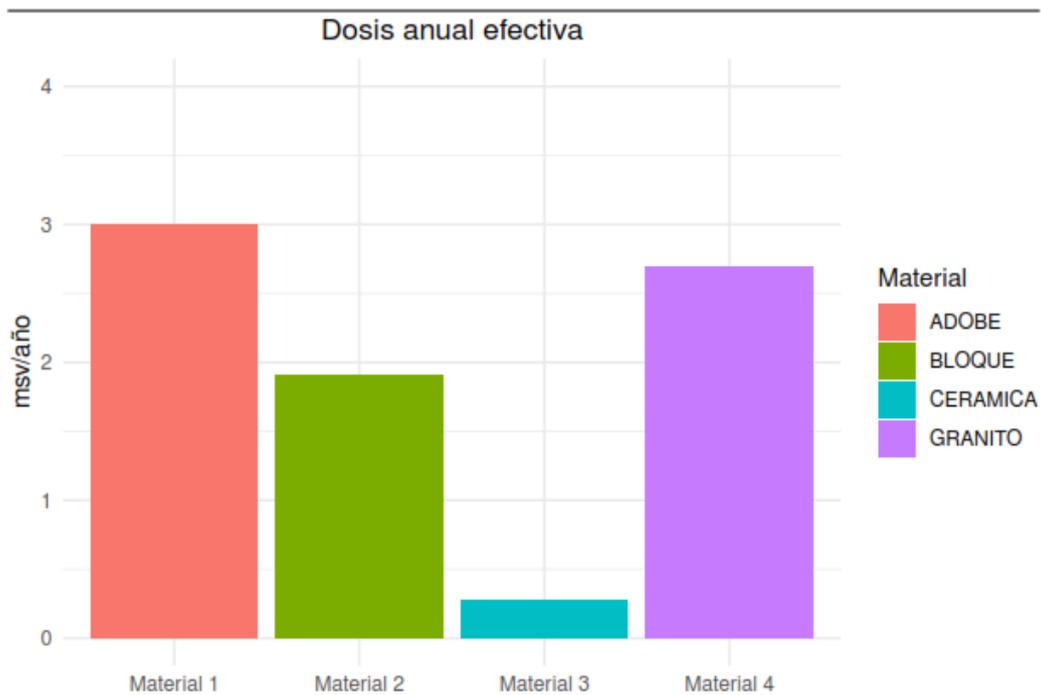


Figura 42. Tasa de dosis anual efectiva

Fuente: Autor

#### 4.7 Exhalación de radón-222 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup Technique.

##### 4.7.1 Exhalación por área

En las tablas (30-38) se exponen los datos obtenidos para la exhalación por área, mientras que en la figura 43 apreciamos que predomina el adobe con un valor de exhalación de  $0.24 \pm 0.04 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ , seguido por el granito con un valor de  $0.050 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$  y finalmente encontramos a la cerámica con el menor valor de exhalación de  $0.003 \pm 0.009 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ . En la figura 44 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a  $0.041 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ , seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de  $0.030 \pm 0.011 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ , finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con

un valor de  $0.030 \pm 0.007 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ . Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de  $0.030 \pm 0.012 \text{ Bq/h}\cdot\text{m}^2$ .

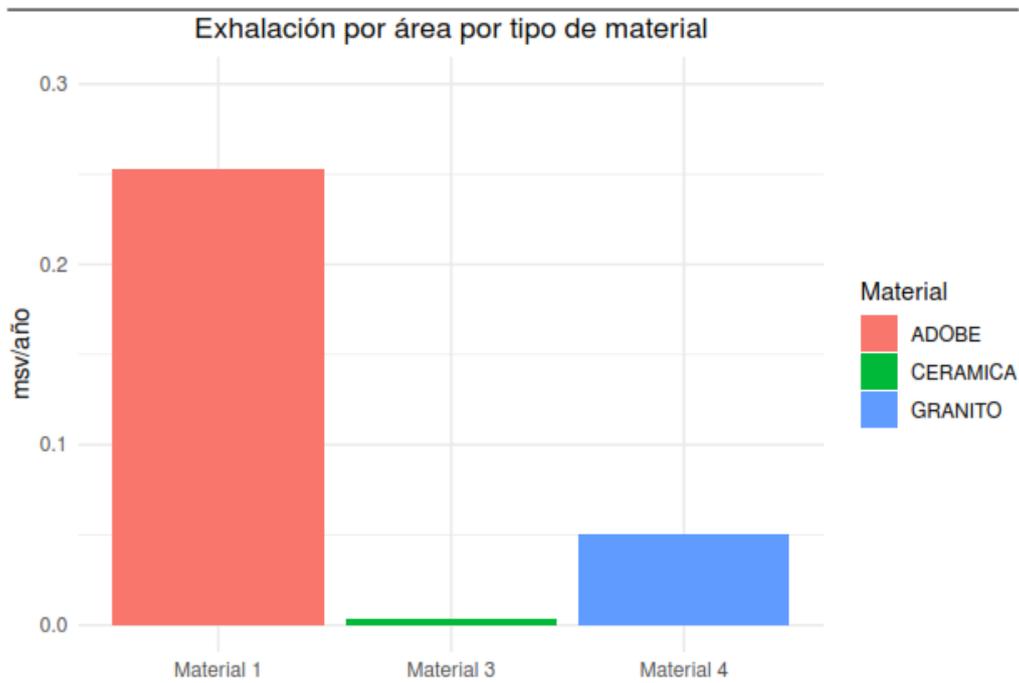


Figura 43. Exhalación por área (sólido)

Fuente: Autor

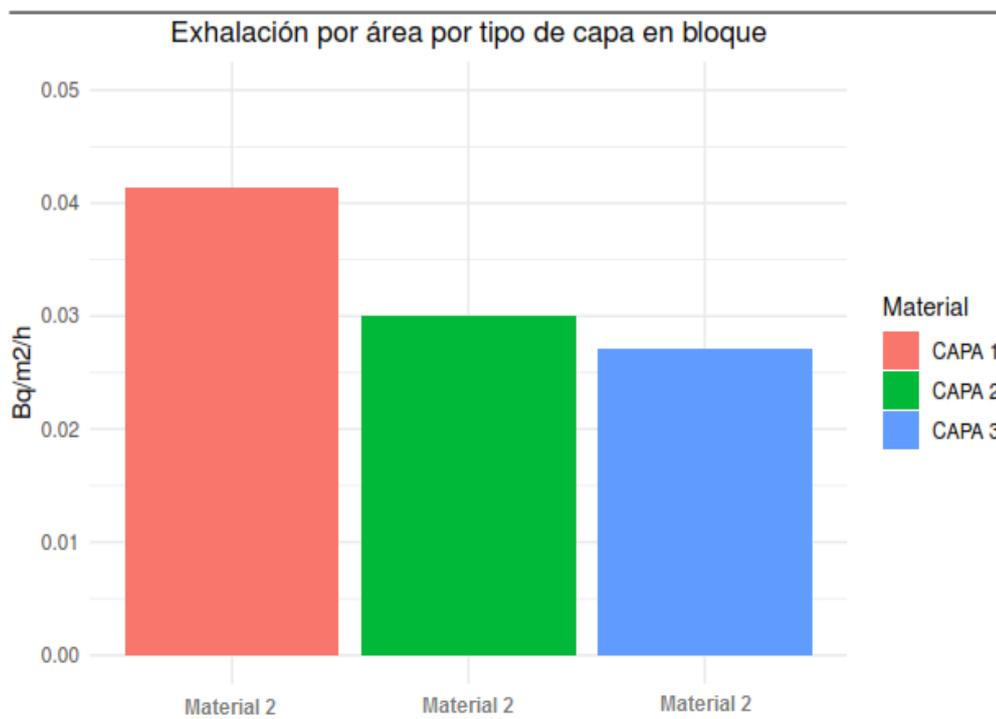


Figura 44. Exhalación por área (sólido)

Fuente: Autor

#### 4.7.2 Exhalación por masa

Para la exhalación por masa los resultados obtenidos se presentan detalladamente en las (tablas 30-38) y en la figura 45 se observa que la mayor exhalación se presenta en el adobe con un valor de  $0.106 \pm 0.017 \text{ Bq/h*Kg}$ , mientras que para el granito se obtuvo un valor de  $0.022 \pm 0.006 \text{ Bq/h*Kg}$  y para la cerámica con el menor valor de  $0.001 \pm 0.004 \text{ Bq/h*Kg}$ . En la figura 46 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a  $0.017 \pm 0.005 \text{ Bq/h*m}^2$ , seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de  $0.013 \pm 0.005 \text{ Bq/h*m}^2$ , finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con un valor de  $0.011 \pm 0.003 \text{ Bq/h*m}^2$ . Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de  $0.015 \pm 0.005 \text{ Bq/h*m}^2$ .

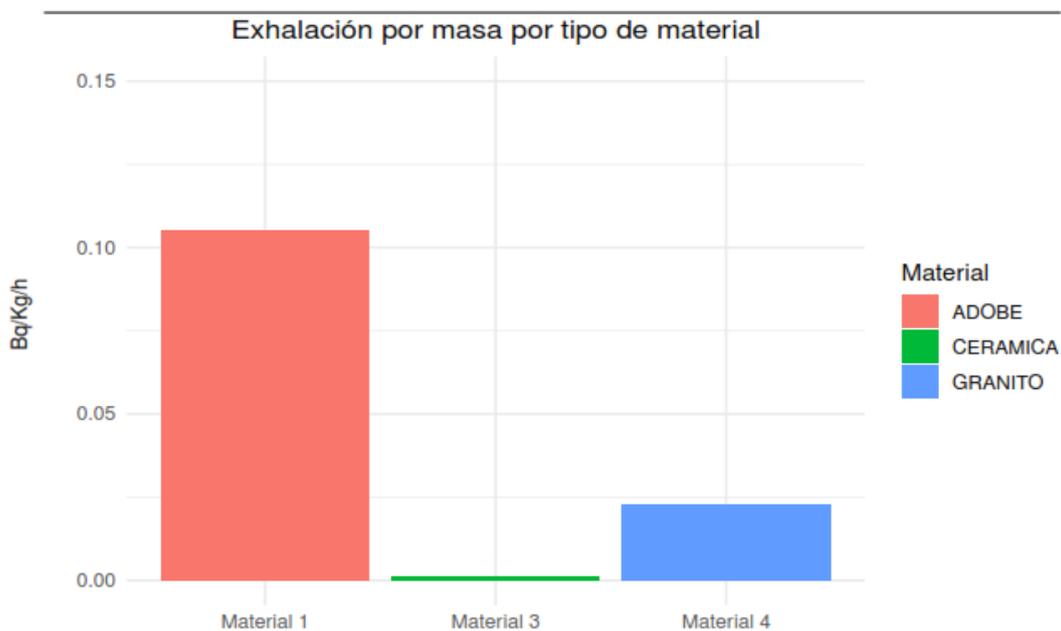
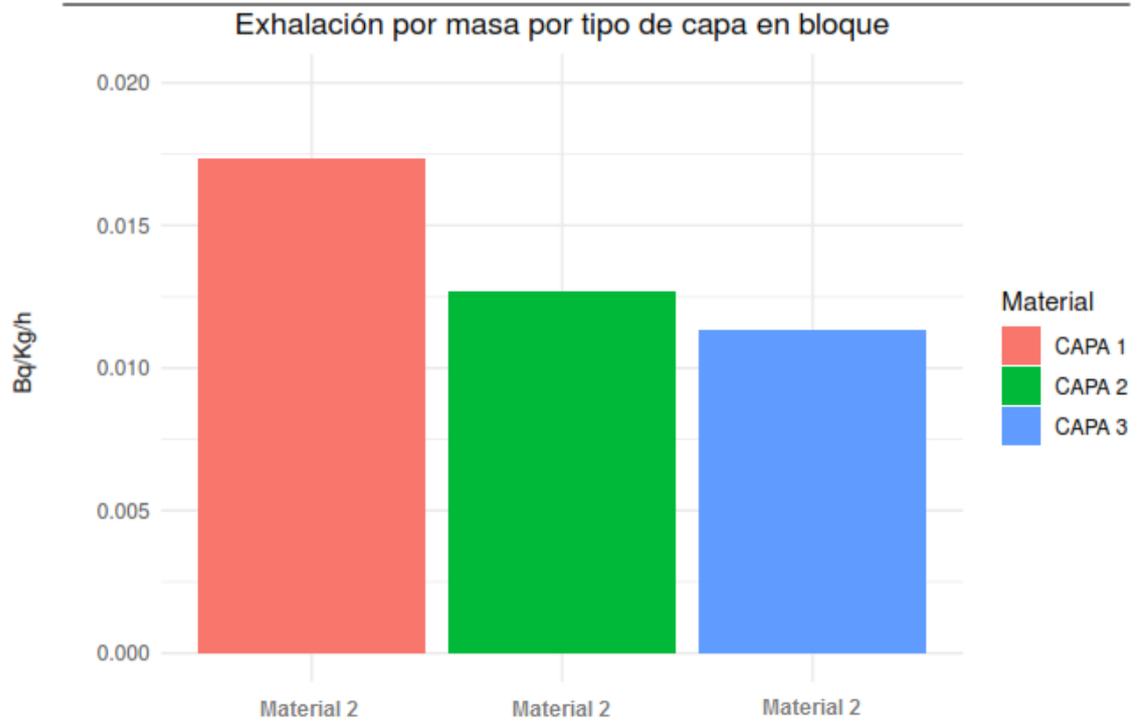


Figura 45. Exhalación por masa (sólido)

Fuente: Autor



*Figura 46. Exhalación por masa (bloque sólido)*

*Fuente: Autor*

Tabla 30. Exhalación de radón-222 en adobe (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de	Exhalación de radón-222
		Integrado C	radón-222 por área EA	por masa EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Adobe	1	135E4 ± 21E4	0.30 ± 0.05	0.124 ± 0.003
Adobe	2	91E4 ± 15E4	0.19 ± 0.03	0.080 ± 0.0021
Adobe	3	119E4 ± 20E4	0.250 ± 0.041	0.110 ± 0.003
Adobe	4	120E4 ± 20E4	0.250 ± 0.041	0.110 ± 0.003
Adobe	5	104E4 ± 17E4	0.216 ± 0.036	0.100 ± 0.0024
Adobe	6	131E4 ± 21E4	0.30 ± 0.04	0.120 ± 0.0030
Adobe	7	113E4 ± 18E4	0.23 ± 0.04	0.100 ± 0.003
Adobe	8	123E4 ± 20E4	0.30 ± 0.04	0.113 ± 0.003
Adobe	9	125E4 ± 20E4	0.30 ± 0.04	0.115 ± 0.003
Adobe	10	90E4 ± 15E4	0.190 ± 0.032	0.080 ± 0.0021
<b>Máximo</b>		<b>135 E4 ± 21E4</b>	<b>0.30 ± 0.05</b>	<b>0.124 ± 0.003</b>
<b>Mínimo</b>		<b>90E4 ± 15E4</b>	<b>0.190 ± 0.032</b>	<b>0.080 ± 0.0021</b>
<b>Promedio</b>		<b>115E4 ± 18E4</b>	<b>0.24 ± 0.04</b>	<b>0.106 ± 0.017</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>20E4</b>	<b>0.043</b>	<b>0.014</b>

Tabla 31. Exhalación de radón-222 en bloque con una capa de pintura (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado C $\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	por área EA $\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	por área EM $\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Bloque	1	26E4 ± 5E4	0.06 ± 0.014	0.024 ± 0.006
Bloque	2	21E4 ± 4E4	0.045 ± 0.013	0.020 ± 0.006
Bloque	3	91E3 ± 23E3	0.019 ± 0.010	0.008 ± 0.005
<b>Máximo</b>		<b>91E4 ± 23E4</b>	<b>0.06 ± 0.014</b>	<b>0.024 ± 0.006</b>
<b>Mínimo</b>		<b>21E3 ± 4E3</b>	<b>0.019 ± 0.010</b>	<b>0.008 ± 0.005</b>
<b>Promedio</b>		<b>19E4 ± 4E4</b>	<b>0.041 ± 0.012</b>	<b>0.017 ± 0.005</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7E4</b>	<b>0.016</b>	<b>0.006</b>

Tabla 32. Exhalación de Radón-222 en bloque con dos capas de pintura (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222 por	Exhalación de radón-222 por
		Integrado C	área EA	área EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Bloque	4	19E4 ± 4E4	0.040 ± 0.012	0.017 ± 0.005
Bloque	5	12E4 ± 3E4	0.030 ± 0.011	0.011 ± 0.005
Bloque	6	94E3 ± 23E3	0.020 ± 0.010	0.010 ± 0.005
<b>Máximo</b>		<b>19E4 ± 4E4</b>	<b>0.040 ± 0.012</b>	<b>0.017 ± 0.005</b>
<b>Mínimo</b>		<b>94E3 ± 23E3</b>	<b>0.020 ± 0.010</b>	<b>0.010 ± 0.005</b>
<b>Promedio</b>		<b>14E4 ± 3E4</b>	<b>0.030 ± 0.011</b>	<b>0.013 ± 0.005</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>4E3</b>	<b>0.008</b>	<b>0.003</b>

Tabla 33. Exhalación de radón-222 en bloque con tres capas de pintura (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222 por	Exhalación de radón-222 por
		Integrado C	área EA	área EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Bloque	7	87E4 ± 3E3	0.018 ± 0.010	0.008 ± 0.005
Bloque	8	22E3 ± 4E4	0.050 ± 0.013	0.020 ± 0.006
Bloque	9	62E3 ± 3 E3	0.013 ± 0.010	0.006 ± 0.004
<b>Máximo</b>		<b>26E4 ± 5E4</b>	<b>0.050 ± 0.013</b>	<b>0.020 ± 0.006</b>
<b>Mínimo</b>		<b>62E3 ± 18E3</b>	<b>0.013 ± 0.010</b>	<b>0.006 ± 0.004</b>
<b>Promedio</b>		<b>15E4 ± 3E4</b>	<b>0.030 ± 0.007</b>	<b>0.011 ± 0.003</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>7E4</b>	<b>0.016</b>	<b>0.006</b>

Tabla 34. Exhalación de radón-222 en bloque sin pintura (sólido)

		Exposición de radón-222 Integrado	Exhalación de radón-222 por área	Exhalación de radón-222 por área
Material	Muestra	C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Bloque	10	16E4 ± 3E4	0.030 ± 0.012	0.015 ± 0.005

Tabla 35. Exhalación de radón-222 en ladrillo (sólido)

Material	Muestra	Exposición de Rn-222 Integrado	Exhalación de Rn-222 por área	Exhalación de Rn-222 por masa
		C $\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	EA $\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	EM $\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Ladrillo	1	12E4 ± 3E4	0.025 ± 0.011	0.011 ± 0.005
Ladrillo	2	11E4 ± 3E4	0.023 ± 0.009	0.010 ± 0.005
Ladrillo	3	14E3 ± 8E3	0.003 ± 0.010	0.001 ± 0.004
Ladrillo	4	58E43 ± 20E3	0.012 ± 0.010	0.005 ± 0.004
Ladrillo	5	62E3 ± 18E3	0.013 ± 0.015	0.006 ± 0.004
Ladrillo	6	30E4 ± 6E4	0.06 ± 0.011	0.030 ± 0.007
Ladrillo	7	12E4 ± 3E4	0.024 ± 0.014	0.011 ± 0.005
Ladrillo	8	28E4 ± 5E4	0.060 ± 0.009	0.030 ± 0.006
Ladrillo	9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Ladrillo	10	76E3 ± 20E3	0.016 ± 0.011	0.007 ± 0.004
<b>Máximo</b>		<b>30E4 ± 6E4</b>	<b>0.06 ± 0.011</b>	<b>0.030 ± 0.007</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>11E4 ± 3E4</b>	<b>0.024 ± 0.009</b>	<b>0.010 ± 0.005</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>10E4</b>	<b>0.019</b>	<b>0.010</b>

Tabla 36. Exhalación de radón-222 en cerámica (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado C $\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	por área EA $\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	por masa EM $\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Cerámica	1	14E3 ± 8E3	0.003 ± 0.009	0.001 ± 0.004
Cerámica	2	25E3 ± 10E3	0.005 ± 0.009	0.002 ± 0.004
Cerámica	3	14E3 ± 8E3	0.003 ± 0.009	0.001 ± 0.004
Cerámica	4	11E3 ± 6E3	0.002 ± 0.009	0.001 ± 0.004
Cerámica	5	25E3 ± 10E3	0.005 ± 0.009	0.002 ± 0.004
Cerámica	6	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cerámica	7	14E3 ± 8E3	0.003 ± 0.009	0.001 ± 0.004
Cerámica	8	22E3 ± 9E3	0.005 ± 0.009	0.002 ± 0.004
Cerámica	9	11 3 ± 6E3	0.002 ± 0.009	0.001 ± 0.004
Cerámica	10	7E3 ± 5E3	0.002 ± 0.009	0.001 ± 0.004
<b>Máximo</b>		<b>25E3 ± 10E3</b>	<b>0.005 ± 0.009</b>	<b>1.161 ± 0.004</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>14E3 ± 8E3</b>	<b>0.003 ± 0.009</b>	<b>0.001 ± 0.004</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>13E3</b>	<b>0.015</b>	<b>0.006</b>

Tabla 37. Exhalación de radón-222 en granito (sólido)

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado	por área	por masa
		C	EA	EM
		$\left[ \frac{Bq}{m^3} * h \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$	$\left[ \frac{Bq}{h * Kg} \right]$
Granito	1	14E4 ± 3E4	0.030 ± 0.012	0.013 ± 0.005
Granito	2	16E4 ± 3E4	0.030 ± 0.013	0.015 ± 0.005
Granito	3	24E4 ± 5E4	0.050 ± 0.011	0.022 ± 0.006
Granito	4	14E4 ± 3E4	0.030 ± 0.014	0.013 ± 0.005
Granito	5	27E4 ± 5E4	0.060 ± 0.014	0.025 ± 0.006
Granito	6	29E4 ± 5E4	0.060 ± 0.012	0.030 ± 0.006
Granito	7	19E4 ± 4E4	0.040 ± 0.021	0.018 ± 0.005
Granito	8	53E4 ± 10E4	0.110 ± 0.014	0.050 ± 0.009
Granito	9	25E4 ± 5E4	0.050 ± 0.012	0.023 ± 0.006
Granito	10	17E4 ± 4E4	0.040 ± 0.013	0.016 ± 0.005
<b>Máximo</b>		<b>53E4 ± 10E4</b>	<b>0.110 ± 0.014</b>	<b>0.050 ± 0.009</b>
<b>Mínimo</b>		<b>14E4 ± 3E4</b>	<b>0.030 ± 0.012</b>	<b>0.013 ± 0.005</b>
<b>Promedio</b>		<b>24E4 ± 5E4</b>	<b>0.050 ± 0.009</b>	<b>0.022 ± 0.006</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>11E4</b>	<b>0.022</b>	<b>0.010</b>

Tabla 38. Exhalación de radón-222 en mármol

Material	Muestra	Exposición de radón-222	Exhalación de radón-222	Exhalación de radón-222
		Integrado C $\left[\frac{Bq}{m^3} * h\right]$	por área EA $\left[\frac{Bq}{h * m^2}\right]$	por masa EM $\left[\frac{Bq * h}{h * Kg}\right]$
Mármol	1	65E3 ± 18E3	0.014 ± 0.010	0.006 ± 0.004
Mármol	2	58E3 ± 17E3	0.012 ± 0.014	0.005 ± 0.004
Mármol	3	25E3 ± 48E3	0.050 ± 0.010	0.023 ± 0.006
Mármol	4	87E3 ± 22E3	0.018 ± 0.010	0.008 ± 0.005
Mármol	5	98E3 ± 24E3	0.020 ± 0.009	0.009 ± 0.005
Mármol	6	18E3 ± 8E3	0.004 ± 0.009	0.002 ± 0.004
Mármol	7	33E3 ± 12E3	0.007 ± 0.010	0.003 ± 0.004
Mármol	8	94E3 ± 23E3	0.020 ± 0.011	0.009 ± 0.005
Mármol	9	13E4 ± 3E4	0.030 ± 0.092	0.012 ± 0.005
Mármol	10	11E3 ± 6E3	0.002 ± 0.010	0.001 ± 0.004
<b>Máximo</b>		<b>25E3 ± 48E3</b>	<b>0.050 ± 0.010</b>	<b>0.023 ± 0.006</b>
<b>Mínimo</b>		<b>11E3 ± 6E3</b>	<b>0.002 ± 0.010</b>	<b>0.001 ± 0.004</b>
<b>Promedio</b>		<b>85E3 ± 22E3</b>	<b>0.018 ± 0.009</b>	<b>0.008 ± 0.005</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>70E3</b>	<b>0.013</b>	<b>0.006</b>

#### 4.8 Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup technique.

Los valores obtenidos para las concentraciones de radio-226 para las muestras analizadas se establecen en las tablas (39-47), en la figura 47 se visualizan los valores promedio donde destaca el adobe con la mayor concentración de  $2.26 \pm 0.17$  Bq/kg, para el granito se obtuvo un valor de  $0.467 \pm 0.005$  Bq/kg y por último se encuentra la cerámica con el menor valor de  $0.02 \pm 0.004$  Bq/kg. En la figura 48 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a  $0.38 \pm 0.05$  Bq/Kg, seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de  $0.26 \pm 0.04$  Bq/Kg, finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con un valor de  $0.25 \pm 0.004$  Bq/Kg. Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de  $0.33 \pm 0.05$  Bq/Kg.

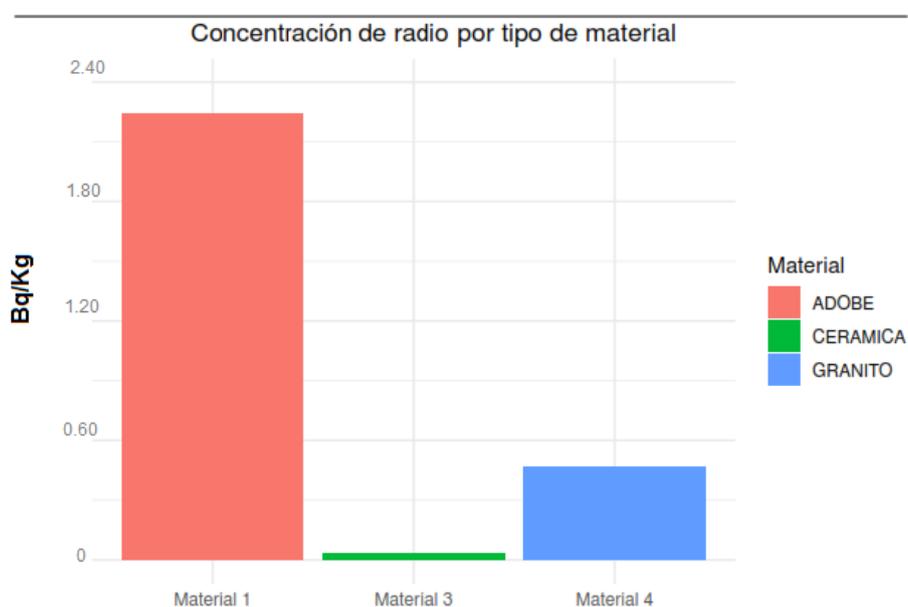


Figura 47. Concentración de radio-226 en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup Technique

Fuente: Autor

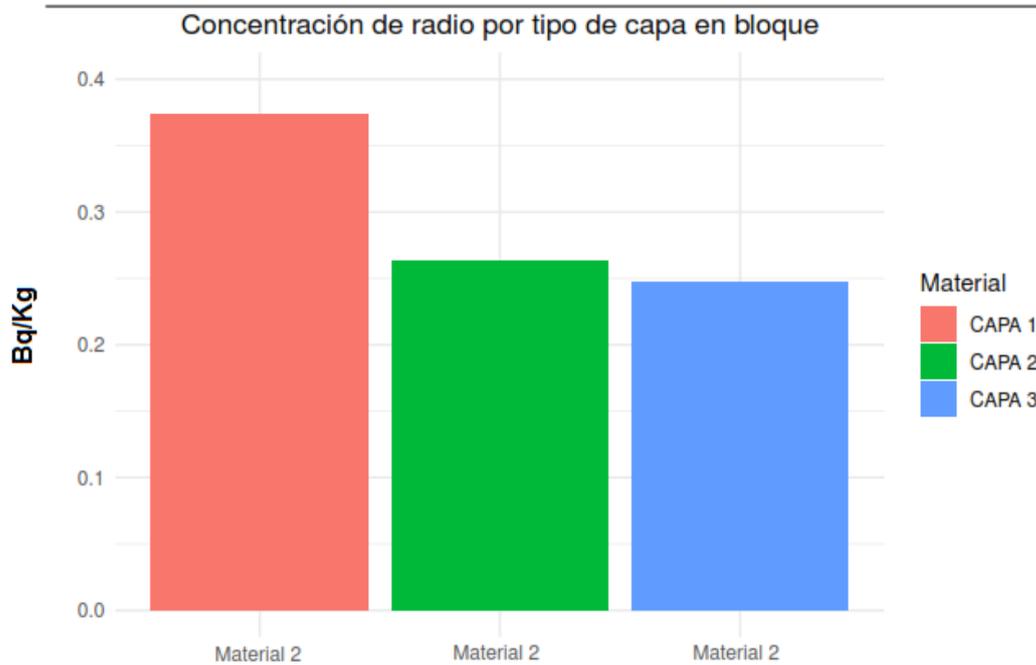


Figura 48. Concentración de radio-226 en (bloque sólido) mediante la técnica cup technique con diferentes capas de pintura.

Fuente: Autor

#### 4.9 Análisis estadístico

Para determinar la correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 de las muestras se realizó un análisis estadístico mediante la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis con la ayuda del software R-Studio; esta prueba se aplica para 2 o más grupos independientes y determina si existe diferencia significativa entre los mismos.

#### Hipótesis

**H0:** No existe diferencia estadísticamente significativa en la exhalación de los materiales de construcción.

**H0:** La exhalación no depende del material de construcción.

**H1:** Existe diferencia estadísticamente significativa en la exhalación de los materiales de construcción.

**H1:** La exhalación depende del material de construcción.

**Donde:**

Al aplicar esta prueba no paramétrica en R-Studio el valor de significancia P dio un resultado de  $2.045 \times 10^{-7}$  por lo que se aceptan las hipótesis del investigador y se concluye que si existe diferencia significativa en la exhalación en los materiales de construcción y que son dependientes del tipo de material.

Por otro lado, para afirmar la relación entre la concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 por masa y área se realizó una regresión lineal para cada material; donde el factor de correlación igual a 1 y se concluye que, dependiendo de las concentraciones de radio-226, los materiales de construcción exhalarán más o menos gas radón-222. A continuación, se presentan las correlaciones para cada material.

**a. Adobe**

En la figura 49 y 50 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de Radio-226 y exhalación de masa y área.

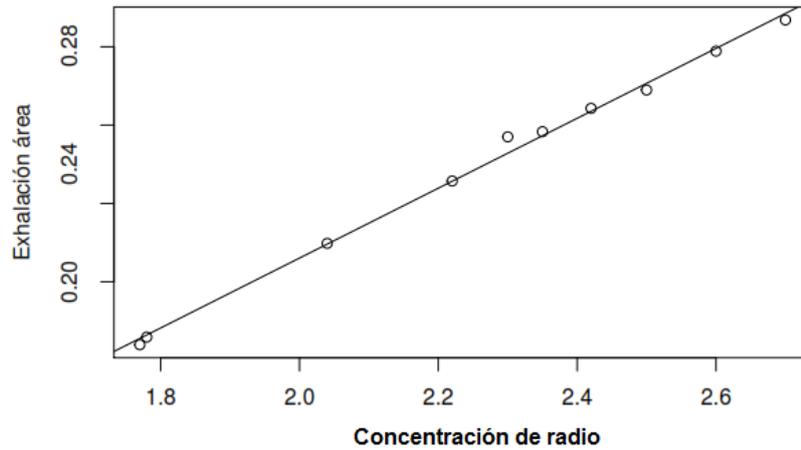


Figura 49. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

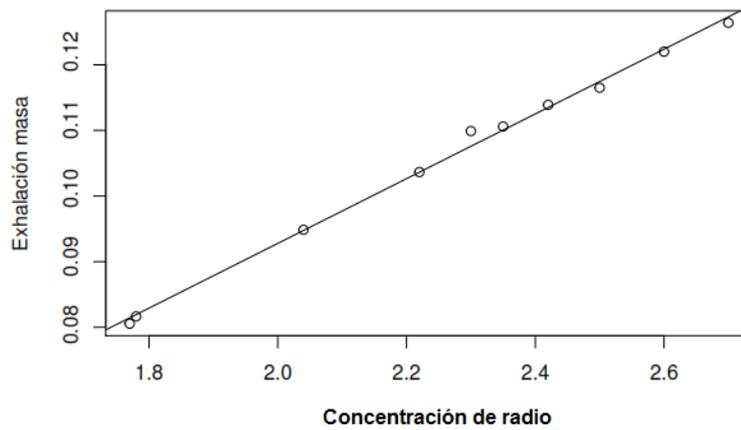


Figura 50. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

### b. Bloque con una capa de pintura

En la figura 51 se puede apreciar el factor de correlación igual a 1 entre la concentración de Radio-226 del bloque y la exhalación de radón-222 por área y masa del mismo.

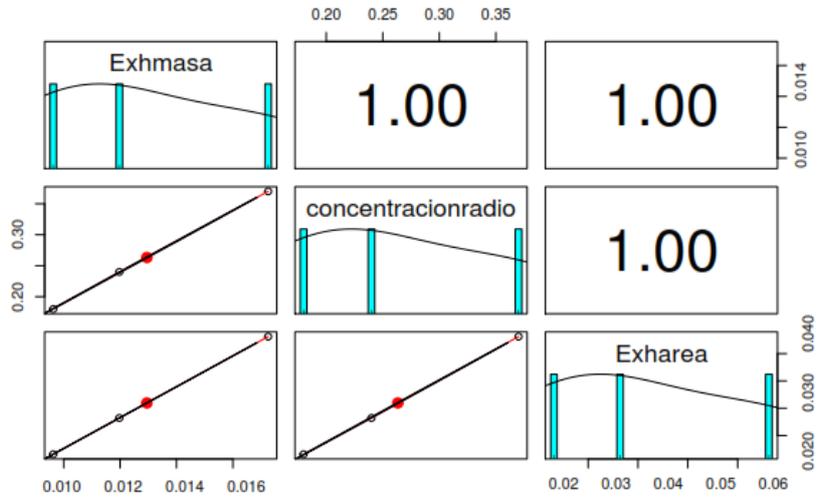


Figura 51. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones

Fuente: Autor

### c. Bloque con dos capas de pintura

En la figura 52 se puede apreciar el factor de correlación igual a 1 entre la concentración de radio-226 del bloque y la exhalación de radón-222 por área y masa del mismo.

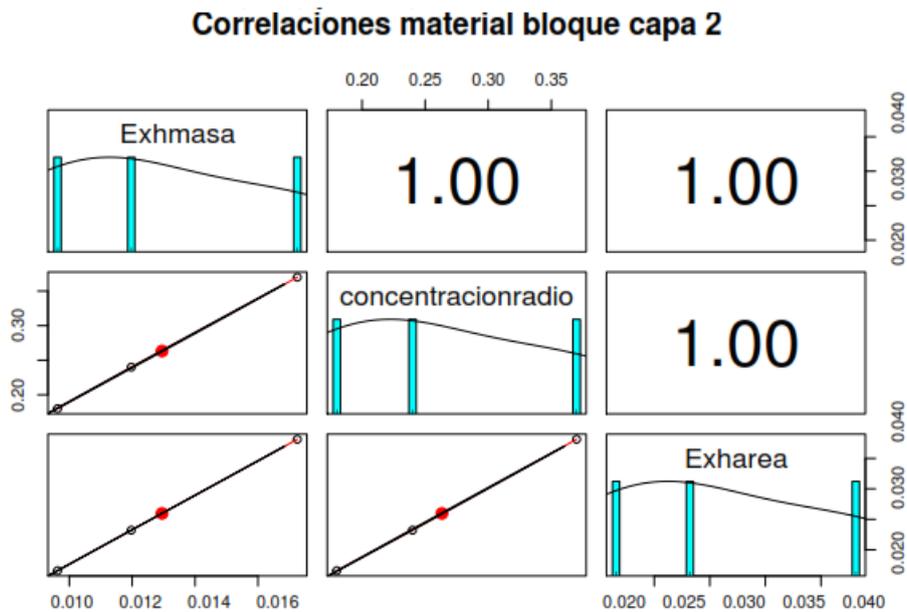


Figura 52. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones

Fuente: Autor

#### d. Bloque con tres capas de pintura

En la figura 53 se puede apreciar el factor de correlación igual a 1 entre la concentración de radio-226 del bloque y la exhalación de radón-222 por área y masa del mismo.

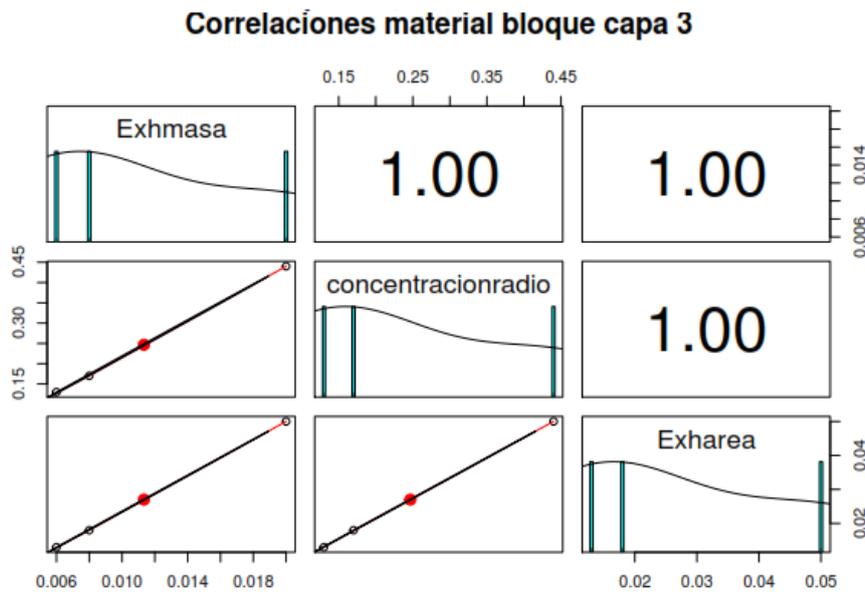


Figura 903. Correlaciones entre concentraciones de radio-226 y exhalaciones

Fuente: Autor

#### e. Cerámica

En la figura 54 y 55 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área

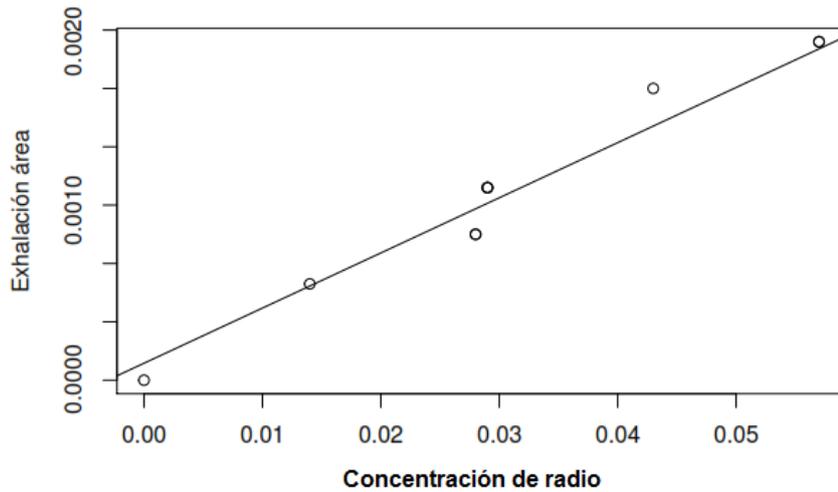


Figura 54. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

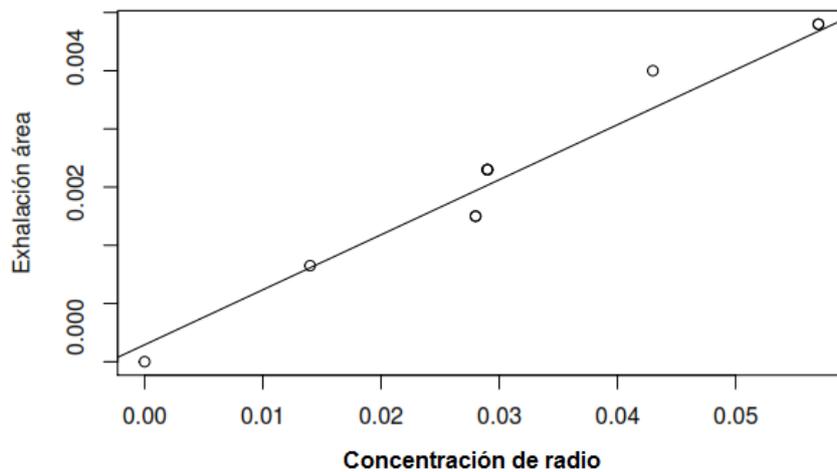


Figura 55. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

#### f. Granito

En la figura 56 y 57 se observa que la dispersión de datos es lineal por lo que el factor de correlación es igual 1 y se afirma que existe una correlación entre la concentración de radio-226 y exhalación de masa y área.

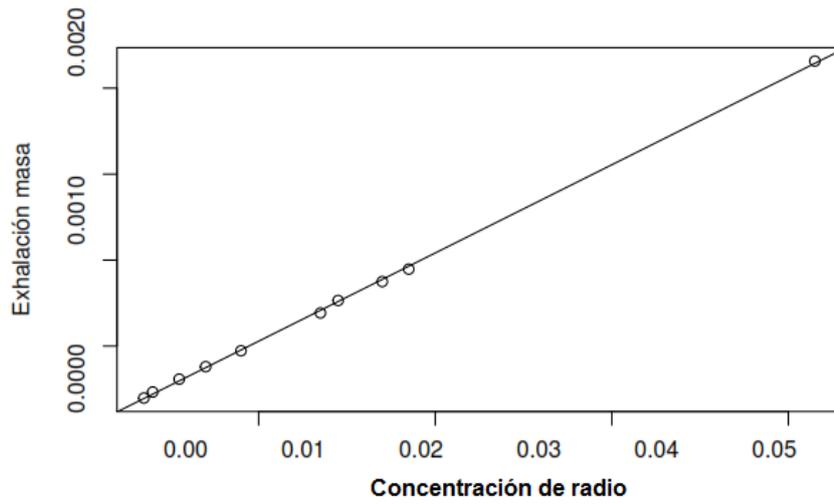


Figura 56. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por masa

Fuente: Autor

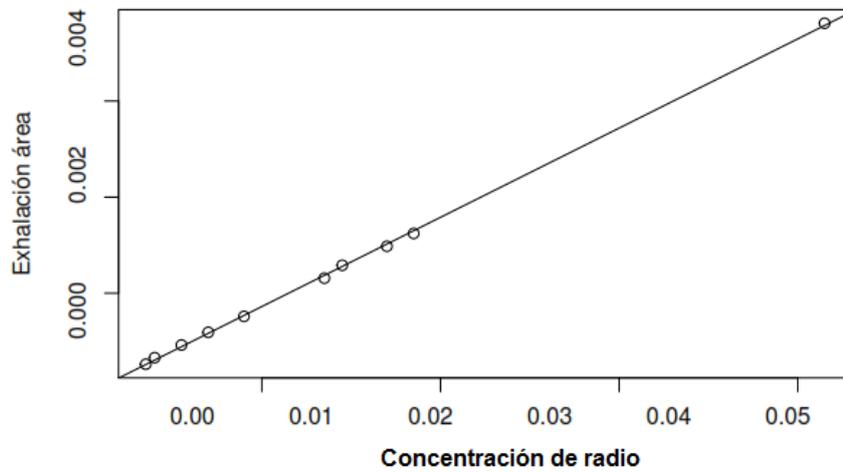


Figura 57. Regresión lineal entre concentración de radio-226 y exhalación por área

Fuente: Autor

Tabla 39. Concentración de radio-226 en adobe (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Adobe	1	372 ± 19	1880 ± 100	2.7 ± 0.4
Adobe	2	250 ± 16	1260 ± 80	1.78 ± 0.13
Adobe	3	327 ± 18	1650 ± 90	2.3 ± 6.0
Adobe	4	329 ± 18	1660 ± 90	2.35 ± 0.18
Adobe	5	286 ± 17	1440 ± 90	2.04 ± 0.15
Adobe	6	360 ± 19	1820 ± 100	2.6 ± 0.2
Adobe	7	310 ± 18	1570 ± 90	2.22 ± 0.17
Adobe	8	338 ± 18	1710 ± 90	2.42 ± 0.19
Adobe	9	345 ± 19	1740 ± 90	2.5 ± 0.2
Adobe	10	247 ± 16	1250 ± 80	1.77 ± 0.13
<b>Máximo</b>		<b>372 ± 19</b>	<b>1880 ± 100</b>	<b>2.7 ± 0.4</b>
<b>Mínimo</b>		<b>247 ± 16</b>	<b>1250 ± 80</b>	<b>1.77 ± 0.13</b>
<b>Promedio</b>		<b>316 ± 90</b>	<b>1600 ± 90</b>	<b>2.26 ± 0.17</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>43.12</b>	<b>217.69</b>	<b>0.31</b>

Tabla 40. Concentración de radio-226 en bloque con una capa de pintura (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Bloque	1	73 ± 9	370 ± 40	0.52 ± 0.06
Bloque	2	59 ± 8	300 ± 40	0.42 ± 0.05
Bloque	3	25 ± 5	130 ± 30	0.18 ± 0.04
<b>Máximo</b>		<b>73 ± 9</b>	<b>370 ± 40</b>	<b>0.52 ± 0.10</b>
<b>Mínimo</b>		<b>17 ± 4</b>	<b>90 ± 20</b>	<b>0.18 ± 0.03</b>
<b>Promedio</b>		<b>42 ± 6</b>	<b>210 ± 30</b>	<b>0.38 ± 0.05</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>20.15</b>	<b>100.77</b>	<b>0.14</b>

Tabla 41. Concentración de radio-226 en bloque con dos capas de pintura (sólido)

<b>Material</b>	<b>Muestra</b>	<b>N° de Trazas</b>	<b>Densidad de Trazas</b> $\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	<b>Concentración radio-226</b> $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Bloque	4	52 ± 7	260 ± 40	0.37 ± 0.05
Bloque	5	34 ± 6	170 ± 30	0.24 ± 0.04
Bloque	6	26 ± 5	130 ± 30	0.18 ± 0.04
<b>Máximo</b>		<b>52 ± 7</b>	<b>260 ± 40</b>	<b>0.37 ± 0.05</b>
<b>Mínimo</b>		<b>26 ± 5</b>	<b>130 ± 30</b>	<b>0.18 ± 0.04</b>
<b>Promedio</b>		<b>37 ± 6</b>	<b>187 ± 33</b>	<b>0.26 ± 0.04</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>10.87</b>	<b>54.36</b>	<b>0.077</b>

Tabla 42. Concentración de radio-226 en bloque con tres capas de pintura (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Bloque	7	24 ± 5	120 ± 30	0.17 ± 0.03
Bloque	8	61 ± 8	310 ± 40	0.44 ± 0.06
Bloque	9	17 ± 4	90 ± 20	0.13 ± 0.03
<b>Máximo</b>		<b>61 ± 8</b>	<b>310 ± 40</b>	<b>0.44 ± 0.06</b>
<b>Mínimo</b>		<b>17 ± 4</b>	<b>90 ± 20</b>	<b>0.13 ± 0.03</b>
<b>Promedio</b>		<b>34 ± 6</b>	<b>173 ± 30</b>	<b>0.25 ± 0.04</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>19.30</b>	<b>97.41</b>	<b>0.14</b>

Tabla 43. Concentración de radio-226 en bloque sin pintura (sólido)

<b>Material</b>	<b>Muestra</b>	<b>N° de Trazas</b>	<b>Densidad de Trazas</b> $\left[ \frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2} \right]$	<b>Concentración radio-226</b> $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{Kg}} \right]$
Bloque	10	$45 \pm 5$	$230 \pm 30$	$0.33 \pm 0.05$

Tabla 44. Concentración de radio-226 en ladrillo (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Ladrillo	1	33 ± 6	170 ± 30	0.24 ± 0.04
Ladrillo	2	30 ± 5	150 ± 30	0.212 ± 0.014
Ladrillo	3	4 ± 2	20 ± 10	0.03 ± 0.03
Ladrillo	4	16 ± 4	80 ± 20	0.11 ± 0.03
Ladrillo	5	17 ± 4	90 ± 20	0.13 ± 0.06
Ladrillo	6	82 ± 9	410 ± 50	0.58 ± 0.04
Ladrillo	7	32 ± 6	160 ± 30	0.23 ± 0.06
Ladrillo	8	78 ± 9	390 ± 50	0.551 ± 0.007
Ladrillo	9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Ladrillo	10	21 ± 5	110 ± 20	0.16 ± 0.04
<b>Máximo</b>		<b>82 ± 9</b>	<b>410 ± 50</b>	<b>0.58 ± 0.010</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>31 ± 6</b>	<b>160 ± 30</b>	<b>0.226 ± 0.001</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>27.94</b>	<b>141.04</b>	<b>0.20</b>

Tabla 45. Concentración de radio-226 en cerámica (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Cerámica	1	4 ± 2	20 ± 10	0.029 ± 0.014
Cerámica	2	7 ± 3	40 ± 13	0.057 ± 0.019
Cerámica	3	4 ± 2	20 ± 10	0.029 ± 0.014
Cerámica	4	3 ± 2	20 ± 10	0.028 ± 0.012
Cerámica	5	7 ± 3	40 ± 13	0.057 ± 0.019
Cerámica	6	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Cerámica	7	4 ± 2	20 ± 10	0.029 ± 0.014
Cerámica	8	6 ± 2	30 ± 12	0.043 ± 0.017
Cerámica	9	3 ± 2	20 ± 10	0.028 ± 0.012
Cerámica	10	2 ± 1	10 ± 10	0.014 ± 0.010
<b>Máximo</b>		<b>7 ± 3</b>	<b>40 ± 13</b>	<b>0.057 ± 0.019</b>
<b>Mínimo</b>		<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>	<b>0 ± 0</b>
<b>Promedio</b>		<b>4 ± 2</b>	<b>20 ± 10</b>	<b>0.029 ± 0.014</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>2</b>	<b>11.16</b>	<b>0.015</b>

Tabla 46. Concentración de radio-226 en granito (sólido)

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Granito	1	38 ± 6	190 ± 30	0.27 ± 0.05
Granito	2	44 ± 7	220 ± 30	0.31 ± 0.06
Granito	3	65 ± 8	330 ± 40	0.47 ± 0.05
Granito	4	40 ± 6	200 ± 30	0.28 ± 0.06
Granito	5	75 ± 9	380 ± 40	0.54 ± 0.06
Granito	6	79 ± 9	400 ± 50	0.57 ± 0.05
Granito	7	53 ± 7	270 ± 40	0.38 ± 0.09
Granito	8	145 ± 12	730 ± 61	1.03 ± 0.06
Granito	9	69 ± 8	350 ± 40	0.49 ± 0.05
Granito	10	48 ± 7	240 ± 40	0.34 ± 0.06
<b>Máximo</b>		<b>145 ± 12</b>	<b>730 ± 61</b>	<b>1.03 ± 0.17</b>
<b>Mínimo</b>		<b>38 ± 6</b>	<b>190 ± 30</b>	<b>0.27 ± 0.06</b>
<b>Promedio</b>		<b>66 ± 8</b>	<b>330 ± 40</b>	<b>0.467 ± 0.005</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>31.51</b>	<b>159.06</b>	<b>0.22</b>

Tabla 47. Concentración de radio-226 en mármol

Material	Muestra	N° de Trazas	Densidad de Trazas	Concentración radio-226
			$\left[\frac{\text{Trazas}}{\text{cm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}}\right]$
Mármol	1	18 ± 4	90 ± 20	0.13 ± 0.03
Mármol	2	16 ± 4	80 ± 20	0.11 ± 0.06
Mármol	3	69 ± 8	350 ± 40	0.49 ± 0.08
Mármol	4	24 ± 5	120 ± 30	0.17 ± 0.05
Mármol	5	27 ± 5	140 ± 30	0.20 ± 0.03
Mármol	6	5 ± 2	30 ± 10	0.04 ± 0.02
Mármol	7	9 ± 3	50 ± 20	0.07 ± 0.04
Mármol	8	26 ± 5	130 ± 30	0.18 ± 0.05
Mármol	9	37 ± 6	190 ± 30	0.30 ± 0.01
Mármol	10	3 ± 2	20 ± 10	0.03 ± 0.03
<b>Máximo</b>		<b>69 ± 8</b>	<b>350 ± 40</b>	<b>0.49 ± 0.08</b>
<b>Mínimo</b>		<b>3 ± 2</b>	<b>20 ± 10</b>	<b>0.03 ± 0.03</b>
<b>Promedio</b>		<b>23 ± 5</b>	<b>120 ± 20</b>	<b>0.170 ± 0.001</b>
<b>Desviación Estándar</b>		<b>19.23</b>	<b>97.10</b>	<b>0.13</b>

#### 4.10. Dosis anual absorbida

Según los resultados obtenidos, la tasa de dosis anual absorbida se visualiza en la figura 58 donde predomina el adobe con un valor promedio de  $23.6 \pm 3.9$  mSv/año, seguido por el granito con un valor promedio de  $4.9 \pm 1.0$  mSv/año, finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de  $0.3 \pm 0.2$  mSv/año. En la figura 59 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a  $2.3 \pm 0.8$  mSv/año, seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de  $1.7 \pm 0.6$  mSv/año, finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con un valor de  $1.5 \pm 0.6$  mSv/año. Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de  $2.0 \pm 0.7$  mSv/año.

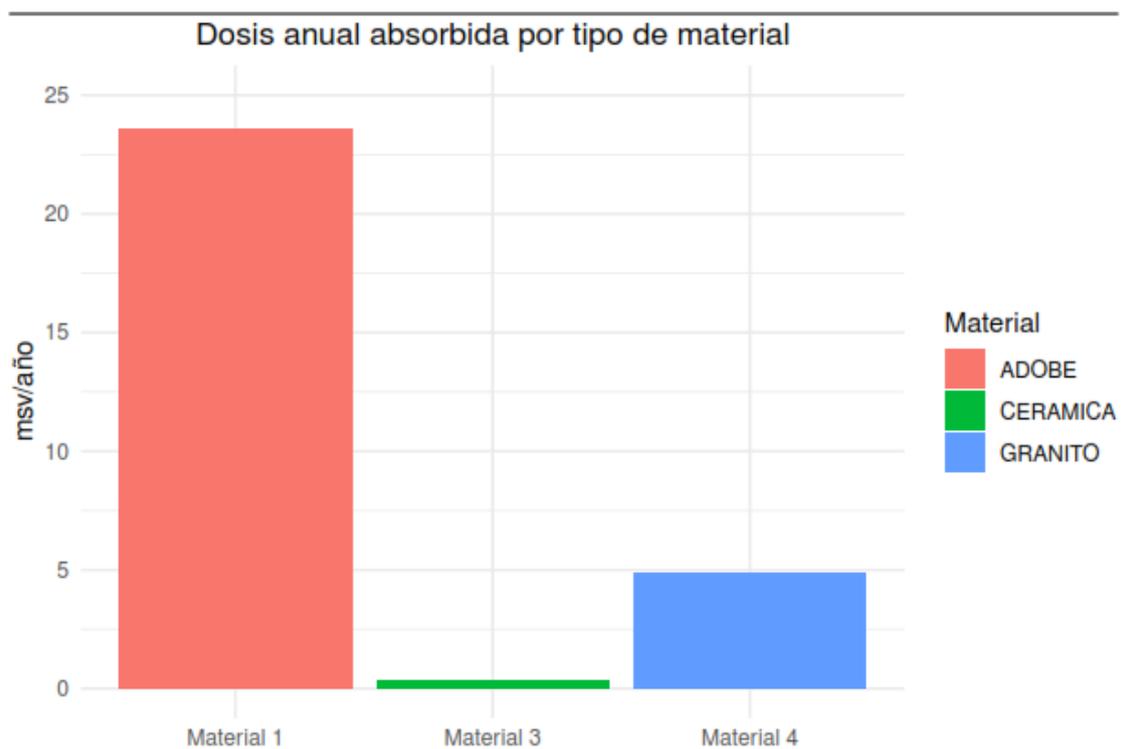


Figura 58. Tasa de dosis anual absorbida (sólido)

Fuente: Autor

Fuente: Autor

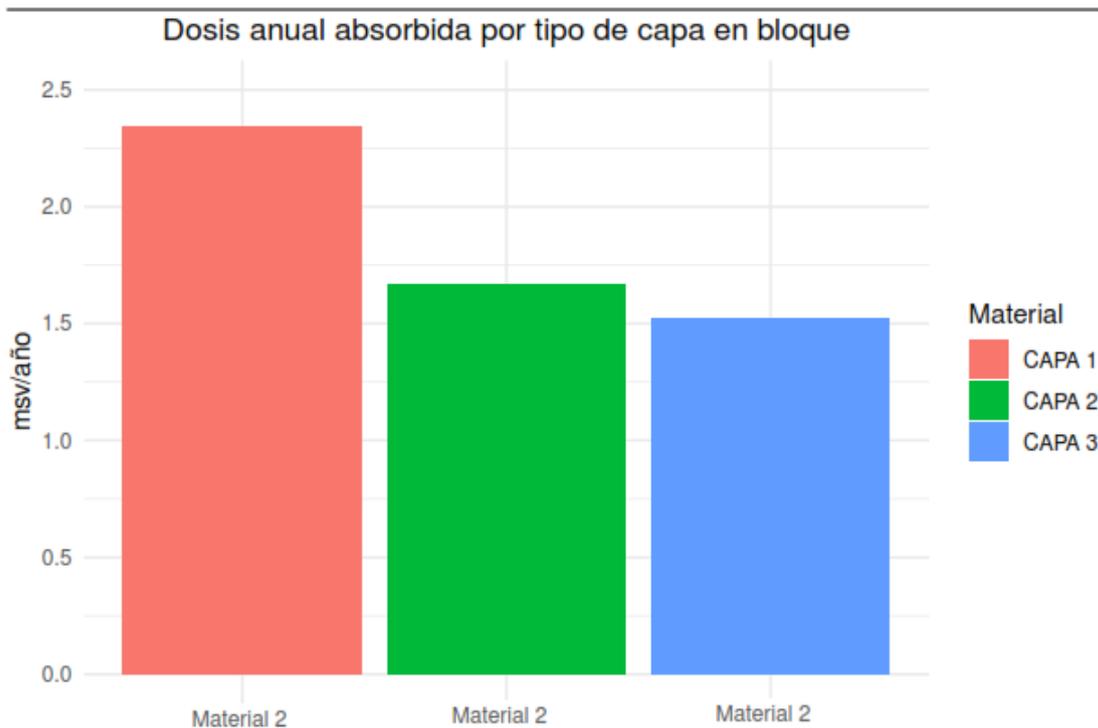
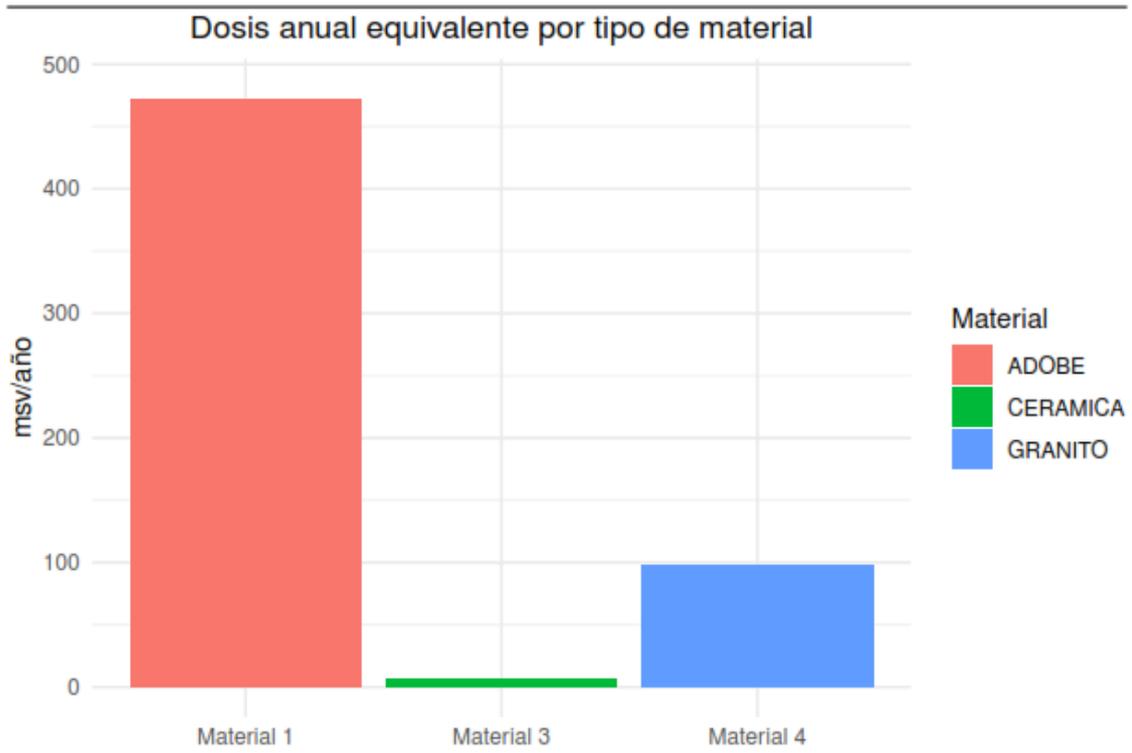


Figura 59. Tasa de dosis anual absorbida (bloque sólido)

Fuente: Autor

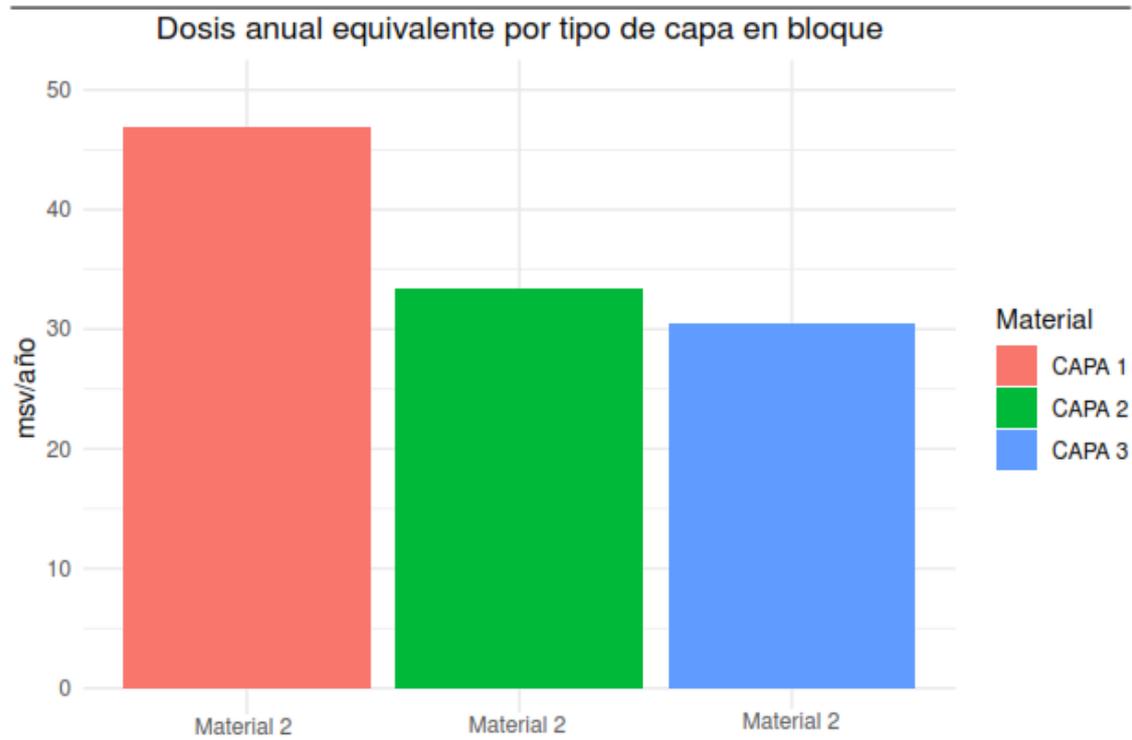
#### 4.11. Dosis anual equivalente

En el caso la tasa de dosis anual equivalente se observa en la figura 60 donde predomina el adobe con un valor promedio de **471 ± 80 mSv/año**, seguido por el granito con un valor promedio de **98 ± 20 mSv/año**, a continuación, le precede el bloque con un valor promedio de **62 ± 14 mSv/año**, finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de **6 ± 3 mSv/año**. En la figura 61 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a **46.8 ± 16.3 mSv/año**, seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de **33.4 ± 12.6 mSv/año**, finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con un valor de **30.4 ± 11.7 mSv/año**. Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de **40 ± 15 mSv/año**.



*Figura 60. Tasa de dosis anual equivalente (sólido)*

*Fuente: Autor*



*Figura 61. Tasa de dosis anual equivalente (bloque sólido)*

*Fuente: Autor*

#### 4.12. Dosis anual efectiva

Para la tasa de dosis anual efectiva se observa en la figura 62 donde predomina el adobe con un valor promedio de  $2.8 \pm 0.5$  mSv/año, seguido por el granito con un valor promedio de  $0.590 \pm 0.120$  mSv/año, a continuación, le precede el bloque con un valor promedio de  $0.20 \pm 0.08$  mSv/año, finalmente se encuentra la cerámica con el menor valor promedio de  $0.035 \pm 0.020$  mSv/año. En la figura 63 podemos observar el material bloque con diferentes capas de pintura, donde se destaca el bloque con una capa de pintura cuyo valor corresponde a  $0.30 \pm 0.10$  mSv/año, seguido por el bloque con dos capas de pintura con un valor de  $0.20 \pm 0.08$  mSv/año, finalmente encontramos al bloque con tres capas de pintura con un valor de  $0.17 \pm 0.07$  mSv/año. Es importante mencionar que el bloque que no posee recubrimiento de pintura presenta un valor de  $0.20 \pm 0.09$  mSv/año.

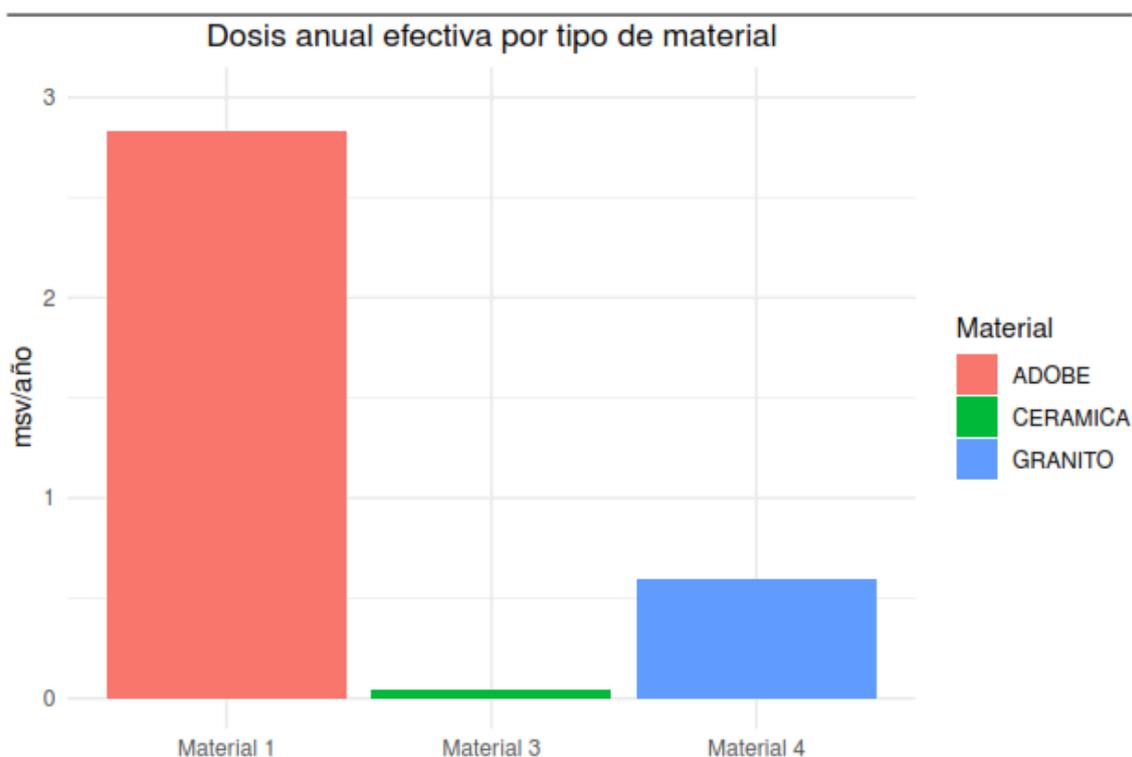
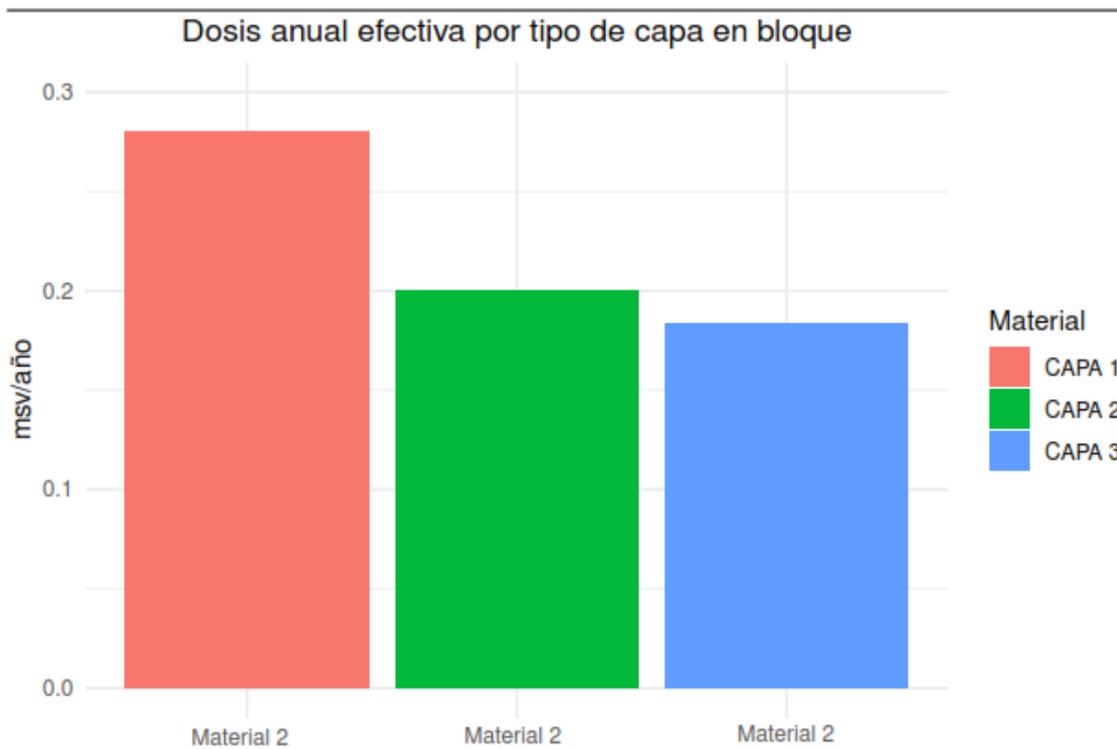


Figura 62. Tasa de dosis anual efectiva (sólido)

Fuente: Autor



*Figura 63. Tasa de dosis anual efectiva (bloque sólido)*

*Fuente: Autor*

Tabla 48. Dosis anual absorbida, equivalente, efectiva en diferentes materiales de construcción mediante la técnica cup technique

Material	Concentración radón-			
	222 $\left[\frac{Bq}{m^3}\right]$	Dosis Absorbida (mSv/año)	Dosis Equivalente (mSv/año)	Dosis Efectiva (mSv/año)
Adobe	1870 ± 100	23.6 ± 3.9	471 ± 80	2.8 ± 0.5
Bloque 1 capa de pintura	267 ± 37	2.3 ± 0.8	46.8 ± 16.3	0.30 ± 0.10
Bloque 2 capas de pintura	187 ± 33	1.7 ± 0.6	33.4 ± 12.6	0.20 ± 0.08
Bloque 3 capas de pintura	173 ± 30	1.5 ± 0.6	30.4 ± 11.7	0.17 ± 0.07
Bloque sin pintura	230 ± 30	2.0 ± 0.7	40 ± 15	0.20 ± 0.09
Ladrillo	160 ± 30	2.3 ± 0.6	47 ± 11	0.280 ± 0.070
Cerámica	20 ± 10	0.3 ± 0.2	6 ± 3	0.035 ± 0.020
Granito	330 ± 40	4.9 ± 1.0	98 ± 20	0.590 ± 0.120
Mármol	120 ± 20	1.7 ± 0.5	35 ± 9	0.210 ± 0.050

## 5. Discusión

(Amrani & Cherouati, 1999). En su estudio denominado “*Radon exhalation rate in building materials using plastic track detectors*” determinó el radón-222 emitido por materiales de construcción mediante una técnica simple y confiable “Cup technique”, que consiste en colocar el uso de detectores plásticos de nitrato de celulosa (LR-115) en la parte superior de la tapa de la cámara. Las muestras fueron colocadas en una cámara de difusión cerrada de dimensiones conocidas donde las huellas de las partículas alfa de radón-222 que migran desde el material de construcción hacia el espacio quedan registradas en el detector LR-115. Para poder visualizar las trazas, los detectores fueron sometidos a un proceso de grabado químico en una solución de Na (OH) 2.5N. Finalmente se determinó la tasa de exhalación la cual varía debido al contenido de uranio y radio-226, además de propiedades físicas como la porosidad. También se ha estudiado el efecto de emanación de radón-222 en los revestimientos de paredes (pinturas, tapices) donde la tasa de exhalación es más baja en paredes con pintura en comparación con paredes sin pinturas, en el caso de las concentraciones de radón-222 para el cemento y el ladrillo serían elevadas si se usaran juntas en la construcción.

(Chen et al., 1993). En su estudio denominado “*Radon exhalation rate from various building materials*” para la determinación de las tasas de exhalación de radón-222 en materiales de construcción utilizó detectores de pistas alfa que contiene nitrato de celulosa. El flujo de radón-222 emitido se midió colocando la cámara de difusión invertida en la parte superior del material de construcción. La película de nitrato de celulosa se colocó dentro de la cámara y se dejó aproximadamente durante 14-21 días hasta que alcance el equilibrio secular, la cual registró huellas debido a las partículas alfa de radio-226 que migra desde el material de construcción hacia el espacio de aire dentro de la cámara. Para el revelado de los detectores se utilizó una solución de Na (OH) 2.5N.

Con la ayuda de un microscopio se contabilizaron las huellas grabadas en el detector. Posteriormente se determinaron las exhalaciones teniendo como resultados al mármol con la tasa más baja de exhalación debido a que las muestras eran bastante delgadas y algunas fueron sometidas a tratamientos térmicos de 1100 °C o recibieron un tratamiento superficial especial para agregar esmalte o aglutinante adhesivo. Por otro lado la concentración de radio-226 el mármol presentó una actividad baja a pesar de que tiene alta porosidad en comparación con el granito que posee una tasa de exhalación muy elevada. Las exhalaciones difieren de cada material aunque tengan la misma cantidad de uranio debido a los tratamientos superficiales que reciben cada uno, es el caso de la cerámica que es un material aislante para la exhalación. . En las tablas 49 y 50 se presentan los resultados realizados por otros autores sobre la determinación de concentración de radón-222 en diferentes materiales de construcción.

La tasa de exhalación de radón-222 se midió en algunos materiales de construcción citados con anterioridad, los cuales son de uso común en la construcción de viviendas, de los cuales se tomaron 10 submuestras de cada tipo. Los valores de la tasa de exhalación en diferentes materiales de construcción varían de un material a otro debido a la presencia de uranio y radio, por otro lado hay que tomar en cuenta las propiedades físicas como la porosidad. La concentración media varía entre 180 Bq/m<sup>3</sup> a 1980 Bq/m<sup>3</sup> y los valores correspondientes a las exhalaciones entre 0.0030 Bq/h\*m<sup>2</sup> a 0.24 Bq/h\*m<sup>2</sup>. El adobe presenta la mayor tasa media de exhalación (0.24 Bq/h\*m<sup>2</sup>) mientras que la cerámica presenta valores de (0.003 Bq/h\*m<sup>2</sup>) y el bloque con valores entre (0.0030 a 0.0041 Bq/h\*m<sup>2</sup>) debido a que está recubierto con diferentes capas de pintura, la cual actúa como aislante para detener la emanación de radón de las superficies de construcción.

## 6. Conclusiones

El presente estudio ha tenido como principal objetivo determinar las concentraciones y exhalaciones de radón-222 y el riesgo de contraer cáncer de pulmón al estar expuestos a materiales de construcción que contengan una alta concentración de radio-226, debido a que la materia prima utilizada para la elaboración de los mismos provienen de la corteza terrestre en la que se encuentra presente de forma natural el uranio ya sea en altas o bajas concentraciones. Por otro lado es importante determinar la dosis efectiva al que se encuentran expuestas las personas, es así que mediante la aplicación de dos técnicas diferentes y el uso de detectores pasivos de trazas nucleares LR-115 tipo 2 se ha estimado las concentraciones de radón-222, radio-226 y exhalación del mismo. En primer lugar para determinar la exhalación de radón-222 en los materiales se utilizó la técnica “Cup Technique” la cual nos presenta valores donde predomina el adobe con un valor de **1870±310 Bq/m<sup>3</sup>** seguida por el granito con un valor de **390±80 Bq/m<sup>3</sup>**, luego encontramos al bloque con diferentes capas de pintura con valores de **310±67 Bq/m<sup>3</sup>** con una capa de pintura, **220±53 Bq/m<sup>3</sup>** con dos capas de pintura, **200±47 Bq/m<sup>3</sup>** con tres capas de pintura, **270±60 Bq/m<sup>3</sup>** sin pintura y finalmente la cerámica con un valor de **20±10 Bq/m<sup>3</sup>**; los cuales se encuentran dentro de los límites permisibles a excepción del adobe; de acuerdo al ICRP el valor máximo de concentración de este isótopo es de 200-600 Bq/m<sup>3</sup> en viviendas y 500-1500 Bq/m<sup>3</sup> en lugares de trabajo, lo cual presenta un riesgo radiológico. Con respecto a la tasa de dosis efectiva anual se ha obtenido resultados donde predomina el adobe con un valor de **2.8±0.5 mSv/año** seguida por el granito con un valor de **0.59±0.12 mSv/año**, luego encontramos al bloque con un valor de **0.30±0.10 mSv/año** con una capa de pintura, **0.20±0.08 mSv/año** con dos capas de pintura, **0.17±0.07 mSv/año** con tres capas de pintura, **0.20±0.09 mSv/año** sin pintura y finalmente la cerámica con un valor de **0.035±0.020 mSv/año**; los mismos que se

encuentran por debajo de los límites establecidos por el ICRP donde menciona una dosis efectiva anual de 20 mSv/año. Haciendo referencia a las exhalaciones, el bloque presenta menores concentraciones de radón-222 con respecto al adobe debido a que se encuentra revestido con tres capas de pintura. En el segundo caso para determinar las concentraciones de radón-222 y radio-226 se utilizó la técnica “Can technique” la cual consiste en pulverizar las muestras, incrementándose así la exhalación de los mismos, donde predomina el adobe con un valor de **1980±110 Bq/m<sup>3</sup>** seguida por el granito con un valor de **1780±100 Bq/m<sup>3</sup>**, luego encontramos al bloque con un valor de **1260±90 Bq/m<sup>3</sup>** y finalmente la cerámica con un valor de **180±30 Bq/m<sup>3</sup>**; los cuales se encuentran sobre los límites permisibles a excepción de la cerámica. En lo referente a las concentraciones de radio-226 los valores se encuentran por debajo los límites excepción del adobe en materiales sólidos, ya que la UNSCEAR establece un valor de 0.48 Bq/Kg, mientras que en los materiales pulverizados los valores de las concentraciones de radio se encuentran sobre los límites permisibles.

## **7. Recomendaciones**

Al encontrar altas concentraciones de radón-222 en los materiales de construcción, se recomienda realizar análisis geológicos para determinar la existencia de uranio y depende de los resultados proceder con las medidas preventivas y correctivas para evitar que este gas emane desde la superficie hacia el lugar donde se prevea la construcción de la vivienda o edificio. Con respecto a la infraestructura se recomienda que el diseño tenga una ventilación adecuada y se emplee materiales que posean una baja concentración de este gas. También es importante dotar de equipos de protección personal para los trabajadores que manipulen estos materiales durante el proceso de elaboración de los mismos, para evitar el riesgo de contraer cáncer de pulmón a largo plazo. Finalmente es necesario crear una normativa a nivel nacional, con ayuda de alguna entidad pública que

regule y controle las concentraciones del radón-222 y sus descendientes, tomando en cuenta el alto impacto que tiene sobre la salud cuando la exposición no está debidamente controlada.

Tabla 49. Análisis de la Concentración de radón-222 según diferentes Autores.

<b>Concentración radón-222</b>						
$\left[\frac{Bq}{m^3}\right]$						
<b>Material</b>	*(Elzain, 2015)	**(Al-Azmi, Okeyode, Alatise, & Mustapha, 2018)	*** (Amrani & Cherouati, 1999)	*(Challan & A Labib, 2017)	<b>Promedio</b>	*** Autor
<b>Adobe</b>	-----	----	----	----		1980 ± 110
<b>Bloque</b>	197 ± 54	----	133	24.52	162.50	1260 ± 90
<b>Cerámica</b>	128 ± 39	1012.9	75	59.17	318.54	180 ± 30
<b>Granito</b>	-----	1008.6	82	319.97	470.19	1780 ± 100

\* CR-39  
 \*\* ALPHA GUARD  
 \*\*\* LR-115

Tabla 50. Análisis de la Exhalación por área de radón-222 según diferentes Autores.

Exhalación por área de radón-222							
$\left[ \frac{Bq}{h * m^2} \right]$							
Material	*(Elzain, 2015)	** (Al-Azmi et al., 2018)	**** (Amrani & Cherouati, 1999)	**** (Keller, Hoffmann, & Feigenspan, 2001)	*(Challan & A Labib, 2017)	Promedio	*** Autor
Adobe	-----	----	----	-----	----		0.254 ± 0.04
Bloque	0.369 ± 48	----	0.116	-----	0.145	0.21	0.161 ± 0.03
Cerámica	0.240 ± 35	3.99	0.71	-----	0.350	1.322	0.023 ± 0.010
Granito	-----	5.38	0.65	0.25	0.582	1.715	0.227 ± 0.04

\* CR-39  
 \*\* ALPHA GUARD  
 \*\*\* LR-115  
 \*\*\*\* ESPECTROSCOPIA ALF

## 8. Referencias

- Agencia Internacional de Energía Atómica. (2021). Rayos X. Retrieved from [https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/patient-information-x-rays/index.htm#PIG\\_FAQ01](https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/patient-information-x-rays/index.htm#PIG_FAQ01)
- Al-Azmi, D., Okeyode, I. C., Alatise, O. O., & Mustapha, A. O. (2018). Setup and procedure for routine measurements of radon exhalation rates of building materials. *Radiation Measurements*, 112(January), 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.03.001>
- Al-Sulaiti, H., Alkhomashi, N., Al-Dahan, N., Al-Dosari, M., Bradley, D. A., Bukhari, S., ... Santawamaitre, T. (2011). Determination of the natural Radio-226activity in Qatari building materials using high-resolution gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 652(1), 915–919. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.020>
- Alonso, H. E. (2015). El Radón-222 en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Amrani, D., & Cherouati, D. E. (1999). *Radon exhalation rate in building materials using plastic track detectors*. S-\_. 242(2), 269–271.
- Andisco, D., Blanco, S., & Buzzi, A. E. (2014). Dosimetría en Radio-226logía. *Revista Argentina de Radio-226logía*, 78(2), 114–117. <https://doi.org/10.1016/j.rard.2014.06.010>
- Andrade Daniel & Contreras Carlos. (2014). *Medición y análisis del nivel de exposición a radiaciones no ionizantes (RNI) en ambientes indoor en la ciudad de cuenca, dentro del espectro Radio-226eléctrico en la banda de frecuencia de telefonía celular* (Universidad Politécnica Salesiana). Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7092/1/UPS-CT003850.pdf>
- Arellano, M. A. (2015). *Análisis de la frecuencia de la exposición a radiación ionizante en pacientes hospitalizados de Septiembre del 2013 hasta Marzo del 2014 en el servicio de neonatología del hospital Isidro Ayora*. Universidad Nacional de Loja.
- Awad, E. I., Al-Rubaye, S., Jebur, A. L., & Hadi, Abbas Fadhel, N. I. (2020). Measurement of Alpha Activity in Several Types of Iraqi Ceramic and Cement in the Iraqi Markets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 987(1), 9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012010>
- Awhida, A., Ujić, P., Vukanac, I., Đurašević, M., Kandić, A., Čeliković, I., ... Kolarž, P. (2016). Novel method of measurement of radon exhalation from building materials. *Journal of Environmental Radio-226activity*, 164, 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.009>
- Barenguer, M. J. (2004). NTP 440: Radón-222 en ambientes interiores.
- Bhagwat, A. M. (1993). *Solid State Nuclear Track Detection: Theory and Applications*. Retrieved from

[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/25/019/25019093.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/019/25019093.pdf)

- Bossew, P. (2003). The radon emanation power of building materials, soils and rocks. *Applied Radiation and Isotopes*, 59(5–6), 389–392. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.07.001>
- Campos, M. P., Costa, L. J. P., Nisti, M. B., & Mazzilli, B. P. (2017). Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate. *Journal of Environmental Radio-226activity*, 172, 232–236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.04.002>
- Carrasco, J., & Cuadrado, C. (2016). Measurement of the Concentration of <sup>222</sup>Rn in Residences and Workplaces in the Riobamba City. *XVI International Symposium on Solid State Dosimetry*, 3(September), 1–14.
- Chen, C., Weng, P., & Chu, T. (1993). *BUILDING MATERIALS*. (December 1992), 613–619.
- Cherry, R., Upton, A., Lodde, G., & Porter, S. (2010). Radiaciones ionizantes. In *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2015). *Radiación natural y artificial - CSN*. Retrieved from <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>
- De Francisco, I. (2017). *Determinación de los Radio-226isótopos de Polonio - 210 y Radio-226 - 226 en aguas de consumo y continentales*. Universidad de Valladolid.
- DiGregorio, D. E. (2021). Discovery of Radio-226activity. *Encyclopedia of Nuclear Energy*, (i), 9–18. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12168-2>
- Durrani, Saeed, A., & Radomir, I. (1997). Radon measurements by etched track detectors : applications in radiation protection, earth sciences, and the environment / editors, Saeed A. Durrani, Radomir Ilić. In *Radon measurements by etched track detectors : applications in radiation protection, earth sciences, and the environment*. River Edge, NJ: World Scientific.
- Elzain, A. E. A. (2015). Radon exhalation rates from some building materials used in Sudan. *Indoor and Built Environment*, 24(6), 852–860. <https://doi.org/10.1177/1420326X14537285>
- Federación de enseñanza de comisiones obreras de Andalucía. (2009). Introducción Definiciones Clasificación de las radiaciones Radiaciones ionizantes. Retrieved from <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd5396.pdf>
- Feng, B., Tang, Q., Zhang, H., Chen, B., Qiu, S., & Zhuo, W. (2019). Measurement of the potential alpha energy concentration of radon progeny by using liquid scintillation counting method. *Radiation Protection Dosimetry*, 184(3–4), 5. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz069>
- Feng, S. yang, Wang, H. qing, Cui, Y., Ye, Y. jun, Li, X. yang, Xie, D., ... Yang, R. (2019). Monte Carlo method for determining radon diffusion coefficients in porous media. *Radiation Measurements*, 126(July 2018). <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.106130>
- Ferrer, G. (2009). El Radón-222. Tratamiento jurídico de un enemigo invisible. In E. C.

- Universitario (Ed.), *El Radón-222. Tratamiento jurídico de un enemigo invisible* (p. 41). Alicante.
- Gad, S. C. (2014). Radium. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*, 4, 44–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00918-0>
- García Pérez, M. (2013). *PERMEABILIDAD AL GAS RN-222 222 EN DIFERENTES LÁMINAS LÁ MINAS USADAS* (Universidad de Cantabria). Retrieved from <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3154/Monica Garcia Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González Esqueche, M. A. (2018). *MEDICIÓN DEL NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE RADÓN-222-222 EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES DE LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE - 2017* (Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”). Retrieved from <http://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/UNPRG/6043/BC-1517 GONZALES ESQUECHE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guevara, C. (2019). *Measurement of radon 222 in Metropolitan Lima using three types of monitors with nuclear trace detectors*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Guzmán, A. (2017). *Validación de un método para la determinación y cuantificación de Sr-90 por centelleo líquido y Cerenkov en matrices de leche en polvo*. Universidad de Costa Rica.
- Hady, H. N., Abojassim, A. A., & Mohammed, Z. B. (2016). Study of radon levels in fruits samples using LR-115 type II detector. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(6), 446–451. <https://doi.org/10.3923/jest.2016.446.451>
- Hernández Mendoza, H. (2011). *Desarrollo de nuevas técnicas para determinar actínidos en excretas por espectrometría de masas y técnicas Radio-226 métricas* (Universidad Complutense de Madrid). Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/19714948.pdf>
- Hidrovo, D. (2015). *DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXHALACIÓN MÁXIMO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MÁS USADOS EN EL CANTÓN RIOBAMBA*. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.
- Hoyos, M., & Flores, P. (2013). Tipos de radiacion, Aplicaciones, Beneficios Y Riesgos. *Revista de Actualización Clínica*, 37, 1798–1803.
- IAEA. (2004). *Radiation , People and*.
- ICRP. (2007). *Publicación 103 Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radio-226 lógica*.
- ICRP Publication 50. (1988). *Lung cancer risk from exposures to radon daughters*.
- Kadhim, N. F. (2013). *Radio-226 active Equilibrium*. (April), 202–207. <https://doi.org/10.2174/9781608051939113010024>
- Keller, G., Hoffmann, B., & Feigenspan, T. (2001). Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Science of the Total Environment*, 272(1–3), 85–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00669-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00669-6)
- Linares, P. (2015). *Characterization of concrete in relation to gas diffusion and its correlation with radon*. Universidad Politécnica de Madrid.

- Liza Neciosup, R. A. (2017). *Mapeo de los niveles de Radón-222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima-Perú) en el periodo 2015-2016*. Retrieved from <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8656>
- Mahur, A. K., Shakir Khan, M., Naqvi, A. H., Prasad, R., & Azam, A. (2008). Measurement of effective radium content of sand samples collected from Chhatrapur beach, Orissa, India using track etch technique. *Radiation Measurements*, 43(SUPPL.1), 520–522. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.04.051>
- Masciarelli, R., Stancich, S., & Stoppani, F. (2012). Cátedra de Ing. De las Reacciones. *Transferencia de Materia*, 1–31.
- Mendoza, E. (2009). *Determinación de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{40}\text{K}$  en suelos de diferentes zonas de Colombia a través de espectroscopía de rayos  $\gamma$* . Universidad Industrial de Santander.
- Montoya, J. (2020). *Exposición de Detectores LR115 y CR39 a diferentes distancias respecto a una pared*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Najam, L. A., Tawfiq, N. F., & Mahmood, R. H. (2013). Radon Concentration in Some Building Materials in Using CR-39 Track Detector. *International Journal of Physics*, 1(3), 73–76. <https://doi.org/10.12691/ijp-1-3-3>
- Nazaroff, W. W. (1992). Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, 30(2), 137–160. <https://doi.org/10.1029/92RG00055>
- Nordic. (2000). *Naturally Occurring Radio-226activity in the Nordic Countries – Recommendations in the Nordic Countries –*.
- Noverques, A. (2016). *Development of methodologies for conducting radon-222 exhalation measurements*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2007). *Glosario de seguridad tecnológica del oiea*.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2019). Protección Radio-226lógica del público | OIEA. Retrieved from <https://www.iaea.org/es/temas/publico>
- Organizacion Mundial de la Salud. (2009). El Radón-222 y sus efectos en la salud. Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- Organización Mundial de la Salud. (2016). Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>
- Oufni, L. (2003). *Determination of the radon diffusion coefficient and radon exhalation rate in Moroccan quaternary samples using the SSNTD technique*. 256(3), 581–586.
- Parajuli, P., Thapa, D., Shah -30 -, B. R., & Shah, B. R. (2015). Study of Radon Exhalation Rate in Soil Samples of Kathmandu Valley Using Passive Detector LR115. *Www.Ijcps.Org International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 4(4), 2319–6602. Retrieved from [www.ijcps.org](http://www.ijcps.org)
- Piedecausa, B., Chinchón, S., Morales, M. Á., & Sanjuán, M. Á. (2011). *Natural Radio-*

- 226activity of building materials. Application to concrete. Part II. Internal radiation: radon gas.* 82(946), 17. Retrieved from [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27055/1/Radiactividad natural de los materiales de construcci3n\\_Parte 1.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/27055/1/Radiactividad%20natural%20de%20los%20materiales%20de%20construcci3n_Parte%201.pdf)
- Porstendorfer, J. (1984). Behaviour of radon daughter products in indoor air. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 7, pp. 107–113. <https://doi.org/10.1093/rpd/7.1-4.107>
- Programa de las naciones Unidas para el medio Ambiente. (2016). Radiaci3n Efectos y fuentes. Retrieved from file:///C:/Users/Pc/Downloads/-Radiation\_Effects\_and\_sources-2016Radiation\_-\_Effects\_and\_Sources\_SP.pdg.pdf.pdf
- Quind3s Poncela, L. S., Fern3ndez, P. L., G3mez Arozamena, J., Sainz, C., Fern3ndez, J. A., Suarez Mahou, E., ... Casc3n, M. C. (2004). Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International*, 29(8), 1091–1096. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00102-8)
- Rajalakshmi, A. (2014). *a G B*. Retrieved from <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/services/knowledge/radiation-and-health/chap02.pdf>
- Ravisankar, R., Vanasundari, K., Chandrasekaran, A., Rajalakshmi, A., Suganya, M., & Vijayagopal, P. (2012). Measurement of natural Radio-226activity in building materials of Namakkal , Tamil Nadu , India using gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(4), 699–704. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.12.001>
- Raya, P. (2017). *Aportaci3n del Servicio de Protecci3n Radio-226l3gica a la Seguridad y Salud del Personal Expuesto a Radiaciones Ionizantes en la Universidad de C3rdoba*. Universidad de C3rdoba.
- Reglamento de Seguridad Radio-226l3gica. (1979). *Reglamento de Seguridad Radio-226l3gica*.
- Righi, S., & Bruzzi, L. (2006). Natural Radio-226activity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radio-226activity*, 88(2), 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.01.009>
- Rodr3guez, J. (2013). *CUANTIFICACI3N DE LA ACTIVIDAD DE RAD3N-222 ( 222 Rn ) Y RADIO-226 ( 226 Ra ) APLICANDO LA T3CNICA DE CENTELLEO L3QUIDO EN AGUAS TERMALES DEL CERRO PACHO , LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA*. Universidad de el Salvador.
- Rogl3, R. N. L. (2004). La radiactividad. *Revista de La Academia de Ciencias Exactas, F3sicas, Qu3micas y Naturales de Zaragoza*, (1–59), 47–60. <https://doi.org/0370-3207>
- Roig, F. (2013). Radiaciones : Aplicaciones y riesgos para la salud Indice F3sica de las radiaciones. Retrieved from <https://www.uv.es/aprjuv/quaderns/3/Roig-RADIACIONES.pdf>
- Rojas, J. (2016). *Monitoreo de Rad3n-222 222 en la zona sur de Lima*. Universidad Pontificia Cat3lica del Per3.
- Rojas, M., Quintero, P., Cervantes, N., & Gaso, P. (2018). *Quantification of decay*

*products Pb-214 and Bi-214 before and after reaching secular equilibrium with the Ra-226.*

- Saad, A. F., Al-Awami, H. H., & Hussein, N. A. (2014). Radon exhalation from building materials used in Libya. *Radiation Physics and Chemistry*, *101*, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.03.030>
- Sagir, M. (2019). An Introduction to the Concept of Radio-226active Decay and Radio-226activity in Nuclear Chemistry. *Neural Theories of Mind*, *9*. <https://doi.org/10.4324/9781003064367-1>
- Sakoda, A., Ishimori, Y., & Yamaoka, K. (2011). A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, *69*(10), 1422–1435. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.06.009>
- Sambache Lisintuña, J. A. (2019). ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE RADÓN-222 “Rn-222” DISUELTO EN LAS AGUAS TERMALES DE LA CIUDAD DE BAÑOS DE AGUA SANTA (Universidad de las Américas). Retrieved from <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/10893/1/UDLA-EC-TIAM-2019-15.pdf>
- Sánchez, E. (2020). *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
- Sercombe, J., Vidal, R., Gallé, C., & Adenot, F. (2007). Experimental study of gas diffusion in cement paste. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.12.003>
- Serrano Pérez, E. C. (2019). *Dosis equivalente de los operadores de medidores nucleares de densidad y humedad debida a la fuente de neutrones, usando detectores pasivos de policarbonato CR-39 TM* (Universidad de Cuenca). Retrieved from <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/32951/1/Trabajo de Titulación.pdf>
- Shakir Khan, M., Naqvi, A. H., Azam, A., & Srivastava, D. S. (2011). Radium and radon exhalation studies of soil. *Iranian Journal of Radiation Research*, *8*(4), 5.
- Singh, J., Singh, H., Singh, S., & Bajwa, B. S. (2009). Uranium, radium and radon exhalation studies in some soil samples using plastic track detectors. *Indian Journal of Physics*, *83*(8), 1147–1153. <https://doi.org/10.1007/s12648-009-0094-z>
- Singh, P., Singh, P., Singh, S., Sahoo, B. K., Sapra, B. K., & Bajwa, B. S. (2015). A study of indoor radon, thoron and their progeny measurement in Tosham region Haryana, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *8*(2), 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.01.008>
- Suárez, J., Gonzáles, J., & San Martín, M. (1987). *TOTAL RADIO-226CHEMICAL ANALYSIS, RADIO-226-226 AND RADIO-226-224*. Madrid.
- Sun, K., Guo, Q., & Cheng, J. (2004). The effect of some soil characteristics on soil radon concentration and radon exhalation from soil surface. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *41*(11), 1113–1117. <https://doi.org/10.1080/18811248.2004.9726337>
- Toribio, J. (2018). *MEDICIÓN DE LA PROGENIE DEL RADÓN-222 EN MUESTRAS*

*DE POLVO AMBIENTAL*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Torres, S. (2016). *Mapeo de Radón-222 222 en interiores en el Distrito de los Olivos (Lima-Perú) del 2015 al 2016*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Ubeda, C., Nocetti, D., Alarcón, R., Inzulza, A., Calcagno, S., Castro, M., ... Torres, B. (2015). Magnitudes y unidades para dosimetría a pacientes en Radio-226 diagnóstico e intervencionismo. *Revista Chilena de Radio-226logía*, 21(3), 6. [https://doi.org/10.1016/s0717-201x\(16\)30004-5](https://doi.org/10.1016/s0717-201x(16)30004-5)

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2018). Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas. In *UNSCEAR 2018 Report* (Vol. 18). Retrieved from <https://undocs.org/pdf?symbol=es/A/73/46>

UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. In *Journal of Radio-226logical Protection* (Vol. 21). <https://doi.org/10.1088/0952-4746/21/1/609>

Vallejo, A. (2019). *Implementación De Normas De Seguridad Y Protección Radio-226lógica En El Bunker Del Laboratorio De Técnicas Nucleares Según Los Estándares Internacionales*. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13954/1/86T00087.pdf>

Verma, D., & Shakir Khan, M. (2014). Assessment of indoor radon, thoron and their progeny in dwellings of Bareilly city of Northern India using track etch detectors. *Romanian Journal of Physics*, 59(1-2), 172-182.

Westwater, J. W., & Drickamer, H. G. (1957). The Mathematics of Diffusion. *Journal of the American Chemical Society*, 79(5), 1267-1268. <https://doi.org/10.1021/ja01562a072>

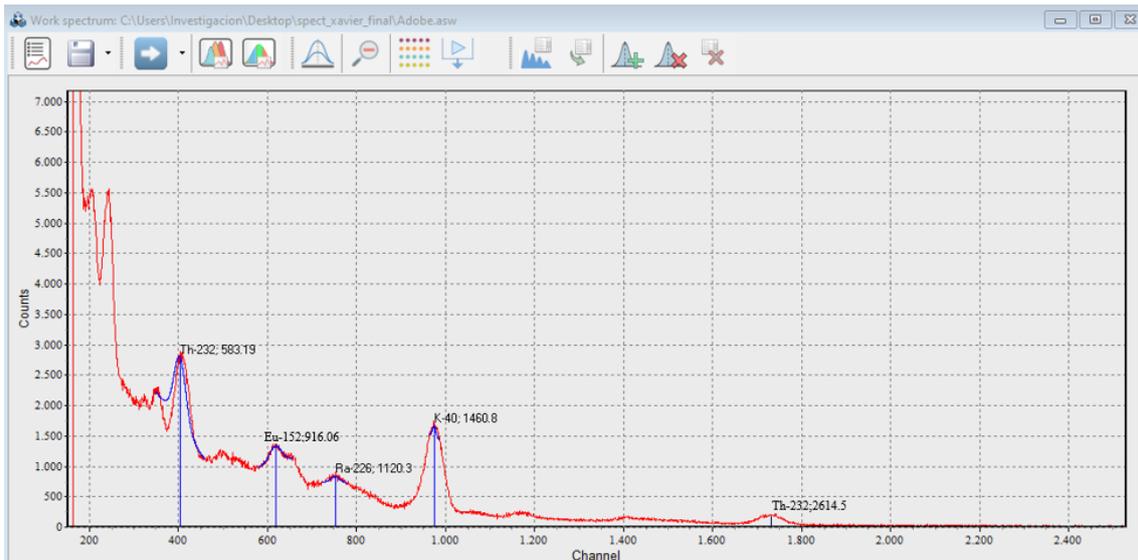
World Nuclear Association. (2016). Materiales radiactivos de ocurrencia natural NORM - Asociación Nuclear Mundial. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-Radio-226active-materials-norm.aspx>

Yousef, H. A., Saleh, G. M., El-Farrash, A. H., & Hamza, A. (2016). Radon exhalation rate for phosphate rocks samples using alpha track detectors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(1), 41. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.09.002>

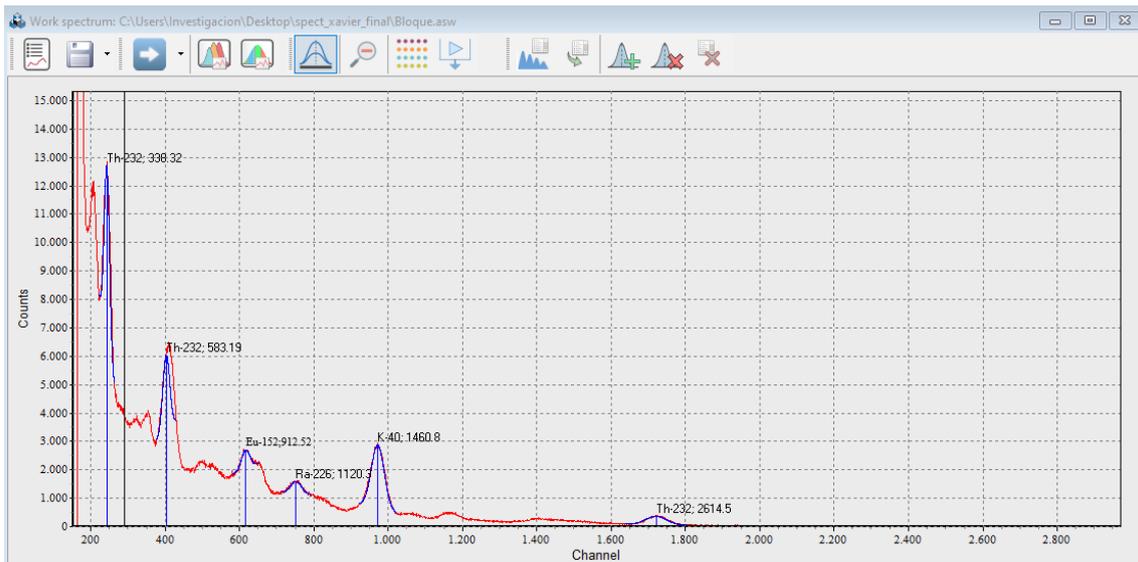
Zhang, Q., Burman, C., & Amols, H. (2014). *Transient and secular Radio-226active equilibrium revisited*. (July). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1407.3038>

## **9. Anexos**

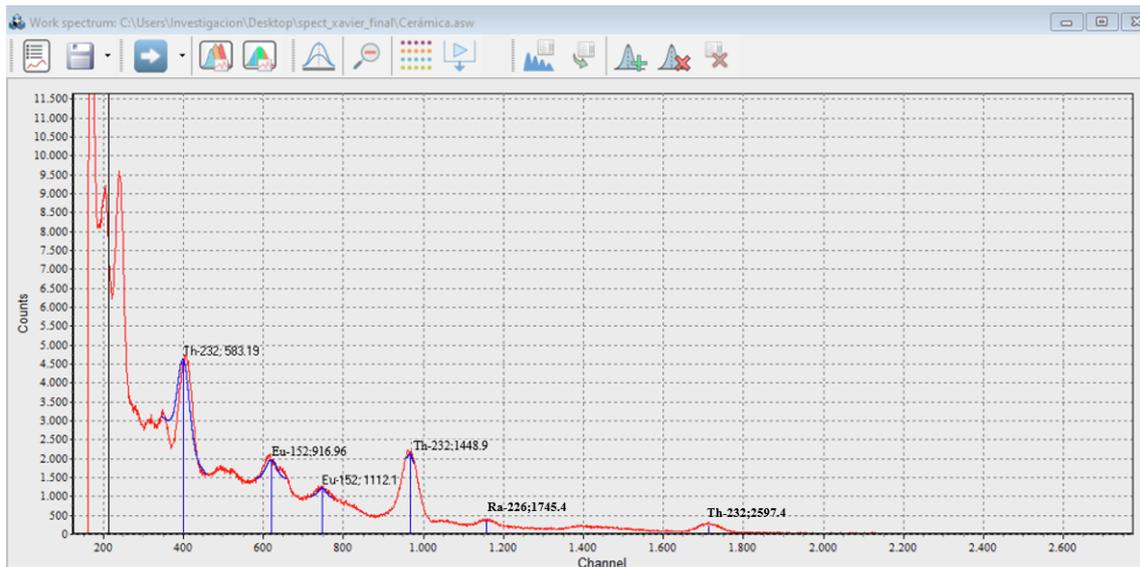
### **a) Espectro del adobe y sus elementos radioactivos**



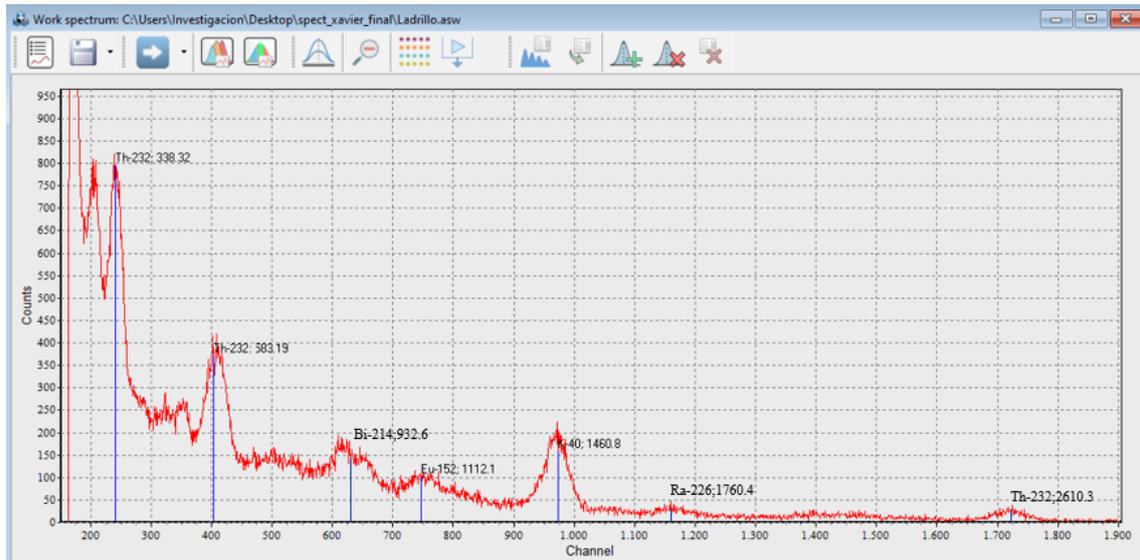
**b) Espectro del bloque y sus elementos radioactivos**



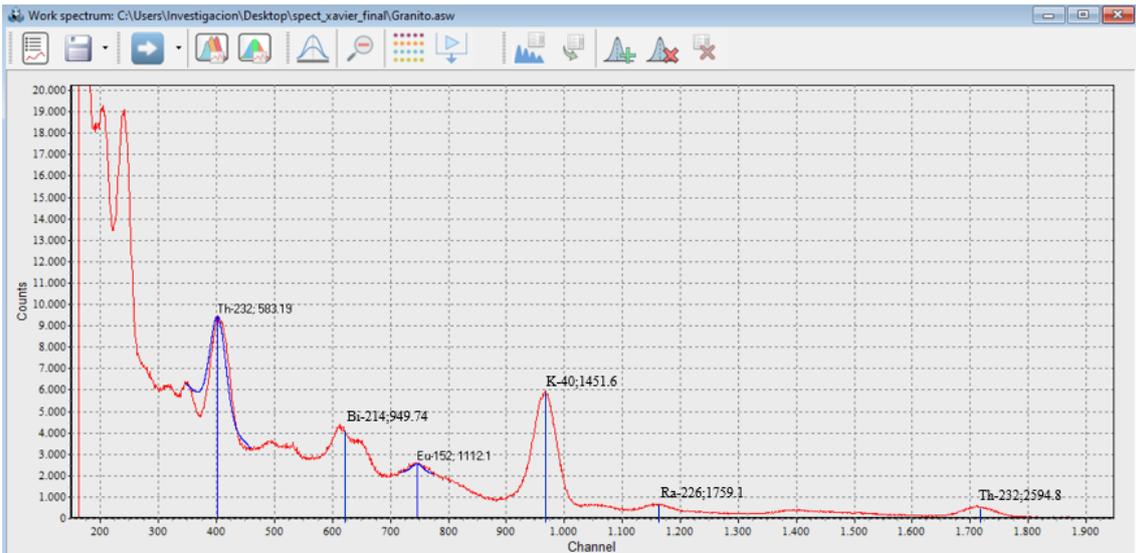
**c) Espectro de la Cerámica y sus elementos radioactivos**



**d) Espectro del Ladrillo y sus elementos radioactivos**



**e) Espectro del granito y sus elementos radioactivos**



**f) Espectro del mármol y sus elementos radioactivos**

