



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE QUIMICA

“REDUCCIÓN DE 222-Rn EN VIVIENDAS DEL “BARRIO CAPULISPAMBA” CANTÓN MOCHA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, PREVIA SU DOSIMETRÍA”

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar el grado académico de:

QUÍMICA

**AUTORAS: ALEJANDRA DEL CONSUELO CALUÑA PADILLA
JOHANA CAROLINA OBANDO YUMISACA**

DIRECTOR: DR. BOLÍVAR EDMUNDO FLORES HUMANANTE

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Caluña Padilla, Alejandra del Consuelo, Obando Yumisaca, Johana Carolina.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotras, Caluña Padilla, Alejandra del Consuelo, Obando Yumisaca, Johana Carolina., declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autoras asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 05 de marzo de 2021



Caluña Padilla Alejandra del Consuelo

CI: 180488259-3



Obando Yumisaca Johana Carolina

CI: 065023872-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **REDUCCIÓN DE 222-Rn EN VIVIENDAS DEL “BARRIO CAPULISPAMBA” CANTÓN MOCHA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, PREVIA SU DOSIMETRÍA**, realizado por las señoritas: **ALEJANDRA DE CONSUELO CALUÑA PADILLA Y JOHANA CAROLINA OBANDO YUMISACA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Jorge Efrén Silva Yumi PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: JORGE EFREN SILVA YUMI	2021-03-05
Dr. Bolívar Edmundo Flores Humanante DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	BOLIVAR EDMUNDO FLORES HUMANANTE <small>Firmado digitalmente porBOLIVAR EDMUNDO FLORES HUMANANTE DN: cn=BOLIVAR EDMUNDO FLORES HUMANANTE o=EC o=SECURITY DATA S.A. 1 ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION Motivo:Soy el autor de este documento Ubicación: Fecha:2021-03-10 08:50:05:00</small>	2021-03-05
Dr. Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: EDMUNDO RODRIGO CALUNA SANCHEZ	2021-03-05

DEDICATORIA

A mis padres Hugo y Consuelo, quienes con su constante esfuerzo y sacrificio me han permitido cumplir esta meta, por creer siempre en mí, por su amor incondicional, su gran apoyo y sus acertados consejos. A mi hermana Renata por enseñarme a ver la vida de manera distinta, por su cariño y por alegrarme cada día con sus ocurrencias.

Alejandra

A Dios por guiar cada paso de mi formación académica y permitirme cumplir esta meta que en algún momento parecía inalcanzable, por darme la fuerza para superar aquellas situaciones en las que sentí desfallecer. A mis padres y hermano por el apoyo incondicional brindado durante toda mi vida, por demostrarme que nada es imposible.

Johana

AGRADECIMIENTO

A Dios, por cuidar de mí durante esta travesía, por darme sabiduría y paciencia para afrontar los momentos difíciles y por brindarme salud y fortaleza para no decaer en el camino hacia esta meta.

No existen palabras suficientes para expresar el enorme agradecimiento y admiración hacia mis padres, por su esfuerzo y comprensión, por alentarme y velar por mí como lo han hecho durante todos estos años.

A la familia Caluña López, por apoyarme y abrirme las puertas de su hogar durante mi vida universitaria.

Al Dr. Bolívar Flores, director de este trabajo de investigación, Dr. Edmundo Caluña, miembro del tribunal y Dr. Julio Idrovo, por compartirnos sus valiosos conocimientos y opiniones.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por recibirme en sus aulas y formarme no solo académicamente sino también como ser humano.

Alejandra

Agradezco a mis padres, Víctor Obando y Cecilia Yumisaca, por el esfuerzo y amor entregado a diario con el fin de impulsarme a conseguir mis objetivos, por ser esa inspiración que hace surgir lo mejor que hay en mí. A mi hermano y toda mi familia por demostrarme su confianza y cariño en los momentos más duros.

A mis amigas y compañeros, en particular a Amanda, por tantos años de amistad y complicidad, por su apoyo moral que me ha acompañado tanto en mi vida personal y universitaria.

A los docentes de la Facultad de Ciencias, especialmente, a nuestro tutor Dr. Bolívar Flores por su predisposición a guiarnos en todas las etapas de la realización de este proyecto.

Johana

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.1	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1.	Antecedentes de la investigación.....	5
1.2.	Bases teóricas.....	7
1.2.1.	<i>Radiactividad</i>	7
1.2.1.1	<i>Radiactividad natural</i>	7
1.2.2.	<i>Radiación ionizante</i>	8
1.2.3.1.	<i>Descubrimiento y características generales</i>	8
1.2.3.2.	<i>Propiedades físicas</i>	9
1.2.3.3.	<i>Propiedades químicas</i>	10
1.2.3.4	<i>Formación del radón</i>	10
1.2.4.	<i>Cadenas de decaimiento radiactivo</i>	11
1.2.5.	<i>Fuentes de radón</i>	13
1.2.5.1.	<i>Suelo</i>	13
1.2.5.2.	<i>Materiales de construcción</i>	14
1.2.5.3.	<i>Agua</i>	15
1.2.6.	<i>Emanación y transporte de radón del suelo</i>	15
1.2.6.1.	<i>Liberación del radón</i>	16
1.2.6.2.	<i>Transporte del radón</i>	17
1.2.7.	<i>Radón en ambientes interiores</i>	18
1.2.8.	<i>Efectos en la salud humana</i>	20
1.2.8.1.	<i>El radón y el cáncer de pulmón</i>	21
1.2.8.2.	<i>El radón y otras enfermedades</i>	22

1.2.9.	<i>Dosis efectiva</i>	23
1.2.10.	<i>Detección de radón en ambientes interiores</i>	23
1.2.10.1.	<i>Detector de radón usado en la investigación</i>	24
1.2.11.	<i>Técnicas de reducción de los niveles de radón en interiores</i>	25
1.3.	Bases conceptuales	28
1.3.2.	<i>Radioisótopo</i>	28
1.3.3.	<i>Concentración de radón</i>	28
1.3.4.	<i>Desintegración alfa</i>	28
1.3.5.	<i>Tiempo de vida media ($t_{1/2}$)</i>	28
1.3.6.	<i>Bequerel (Bq)</i>	29
1.3.7.	<i>Sievert (Sv)</i>	29
1.3.8.	<i>Remediación</i>	29
1.3.9.	<i>Construcción antigua</i>	29
1.3.10.	<i>Construcción mixta</i>	29
1.4.	Base legal	29

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	31
2.1.	Tipo de investigación	31
2.2.	Determinación del área de estudio	31
2.3.	Población y tamaño de muestra	33
2.4.	Selección de la muestra	33
2.5.	VARIABLES	34
2.6.	Diseño del experimento	34
2.7.	Metodología	37
2.7.1.	<i>Requisitos de las unidades experimentales</i>	37
2.7.2.	<i>Proceso del experimento</i>	37
2.7.3.	<i>Esquema del experimento</i>	39
2.8.	Materiales y equipos	41

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
3.1.	Análisis estadístico inferencial	45
3.2.	Primera medición de la concentración de radón en los tres tipos de vivienda	46
3.2.1.	<i>Prueba de normalidad</i>	48
3.2.2.	<i>Distribución T-student</i>	49
3.3.	Remediación y segunda medición de radón en los tres tipos de vivienda	51
3.3.1.	<i>ANOVA bifactorial con replicación</i>	53
3.3.2.	<i>Prueba de Tukey</i>	55
3.4.	Dosis anual efectiva	58
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Características generales del radón	9
Tabla 2-1:	Propiedades físicas del radón	10
Tabla 3-1:	Concentración de uranio en diferentes tipos de roca	13
Tabla 4-1:	Concentración de uranio en algunos minerales	14
Tabla 5-1:	Actividad de ²²⁶ Ra en materiales de construcción comunes.	15
Tabla 6-1:	Características del detector digital de radón- Corentium Home	25
Tabla 7-1:	Particularidades de diferentes tipos de papel tapiz	27
Tabla 1-2:	ANOVA para el modelo bifactorial con replica	36
Tabla 2-2:	Combinaciones del diseño cuasi- experimental.....	36
Tabla 3-2:	Ficha para la recolección de datos de viviendas antiguas.....	39
Tabla 4-2:	Ficha para la recolección de datos de viviendas de bloque.	40
Tabla 5-2:	Ficha para la recolección de datos de viviendas mixtas.	40
Tabla 1-3:	Mediciones de radón en el interior de las viviendas de construcción antigua.	46
Tabla 2-3:	Mediciones de radón en el interior de las viviendas de bloque.	46
Tabla 3-3:	Mediciones de radón en el interior de las viviendas de construcción mixta.	47
Tabla 4-3:	Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	48
Tabla 5-3:	Prueba T- student para los datos de la primera medición de radón en el interior de los tres tipos de vivienda	49
Tabla 6-3:	Comparación de la concentración inicial y final de radón en viviendas antiguas..	51
Tabla 7-3:	Comparación de la concentración inicial y final de radón de las viviendas de bloque.....	51
Tabla 8-3:	Comparación de la concentración inicial y final de radón de las viviendas mixtas.	52
Tabla 9-3:	Modelo bifactorial con replicaciones para los datos de las mediciones de radón. .	54
Tabla 10-3:	Datos para el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo.	54
Tabla 11-3:	ANOVA para el modelo bifactorial con replicación.	55
Tabla 12-3:	Promedio de las concentraciones obtenidas con las técnicas de remediación.....	55
Tabla 13-3:	Análisis Tukey	56
Tabla 14-3:	Comparaciones o pruebas de rango múltiples para las técnicas de remediación. .	56
Tabla 15-3:	Porcentajes de reducción.....	57
Tabla 16-3:	Estimación de dosis anual efectiva.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Dosis anual de radiación recibida por una persona a partir de diferentes fuentes. .8
Figura 2-1:	Esquemas de desintegración del a) ^{232}Th , b) ^{235}U , c) ^{238}U 12
Figura 3-1:	Emanación y exhalación de radón hacia la atmosfera..... 16
Figura 4-1:	Liberación de los átomos de radón del sustrato. 17
Figura 5-1:	Puntos comunes de entrada del radón hacia el interior de las viviendas. 19
Figura 6-1:	Vías de exposición a la radiación ionizante producida por los PDR. 20
Figura 7-1:	Medidor de gas radón Corentium Home..... 24
Figura 1-2:	Ubicación del barrio Capulispamba en el cantón Mocha..... 32
Figura 2-2:	Barrio Capulispamba..... 32
Figura 3-2:	Modelo de instalación del detector 37
Figura 4-2:	Esquema Experimental..... 39
Figura 5-2:	Papel Tapiz..... 41
Figura 6-2:	Pintura esmalte 41
Figura 7-2:	Masilla en polvo..... 42
Figura 8-2:	Rodillos de felpa 42
Figura 9-2:	Brochas de cerdas sintéticas 43
Figura 10-2:	Espátulas 43
Figura 11-2:	Goma blanca..... 44
Figura 12-2:	Detectores de Radón..... 44

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Flujograma del análisis estadístico inferencial de la investigación.	45
Gráfico 2-3: Representación de las primeras mediciones en los tres tipos de viviendas evaluadas.....	47
Gráfico 3-3: Datos iniciales de la concentración de radón en las viviendas estudiadas vs media permisible de radón.....	50
Gráfico 4-3: Datos de la concentración final de radón en las viviendas evaluadas vs media permisible de radón.	52

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: SOCIALIZACIÓN DEL PROYECTO

ANEXO B: PRIMERA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN.

ANEXO C: SELLADO DE GRIETAS

ANEXO D: AIREACIÓN

ANEXO E: TAPIZADO

ANEXO F: PINTADO

ANEXO G: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN- AIREACIÓN

ANEXO H: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN-TAPIZADO

ANEXO I: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN - PINTADO

ANEXO J: LECTURAS DEL DETECTOR POST REMEDIACIÓN.

RESUMEN

El propósito de este estudio fue reducir los niveles de 222-Rn en viviendas del “barrio Capulispamba”, cantón Mocha, provincia de Tungurahua, previa su medición. Para este fin, usando detectores digitales corentium home se midió la concentración de radón en habitaciones de 36 viviendas de diferente material de construcción (antiguas, bloque y mixtas), además, se emplearon tres técnicas de remediación (aireación, tapizado y pintado). Se realizó una primera medición por triplicado, se seleccionó aquellas habitaciones con mayor concentración de radón por vivienda, en estas, se sellaron las grietas de las paredes y se ejecutaron las técnicas de remediación, posteriormente, se efectuó una segunda medición para verificar la reducción planteada. Los promedios de las concentraciones iniciales de radón obtenidos fueron: $542,139 Bq/m^3$ para infraestructuras antiguas, $386,667 Bq/m^3$ para aquellas de bloque y $258,222 Bq/m^3$ para mixtas, posterior a la remediación, dichos promedios disminuyeron notablemente. Se obtuvo un porcentaje de reducción del 82,507% con el método de aireación, 85,167% con el tapizado y 82,520% con el pintado. Se determinó que la dosis anual efectiva por inhalación antes de los tratamientos se encontraba entre $13,850 mSv/Y$ y $6,795 mSv/Y$, mientras que, después de estos fue de $2,285 mSv/Y$, $1,661 mSv/Y$ y $1,134 mSv/Y$, en los tres tipos de vivienda respectivamente. Se concluyó que las tres técnicas de remediación empleadas redujeron la concentración de radón por debajo del valor máximo propuesto por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de $150 Bq/m^3$, siendo el tapizado con el que mejores resultados se obtuvo, además, la dosis anual efectiva alcanzada fue menor al límite de acción de $3 mSv/Y$ sugerido por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Finalmente, se recomienda realizar investigaciones sobre la radiactividad procedente de los materiales de construcción, suelo y agua presentes en la zona estudiada para determinar las causas de los elevados niveles de radón detectados.

Palabras clave: <QUÍMICA> <RADÓN (Rn)> <RADÓN EN INTERIORES> <CÁNCER PULMONAR> <DOSIS ANUAL EFECTIVA> <AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL (EPA)> <MOCHA (CANTÓN)>.



Firmado electrónicamente por:
HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA

0631-DBRAI-UPT-2021

2021-02-10

SUMMARY

The objective of this study was to reduce the levels of ^{222}Rn in homes in the “Capulispamba neighborhood”, Mocha canton, Tungurahua province. Corentium home digital detectors were used, the radon concentration was measured in rooms of 36 houses of various construction materials (old, block wall and mixed). Also, three remediation techniques were used (aeration, upholstery and painting). The first measurement was carried out in triplicate, those rooms with the highest radon concentration per dwelling were selected, in these, the cracks in the walls were sealed and the remediation techniques were executed, subsequently, a second measurement was made to verify the proposed reduction. The averages of the initial radon concentrations obtained were: $542,139 \text{ Bq/m}^3$ for old infrastructures, $386,667 \text{ Bq/m}^3$ for those of block and $258,222 \text{ Bq/m}^3$ for mixed, after the remediation, these averages decreased notably. A reduction percentage of 82.507% was obtained with the aeration method, 85.167% with the upholstery and 82.520% with the painting. It was determined that the effective annual inhalation dose before the treatments was between $13,850 \text{ mSv / Y}$ and $6,795 \text{ mSv / Y}$, while after these it was $2,285 \text{ mSv / Y}$, $1,661 \text{ mSv / Y}$, $1,134 \text{ mSv / Y}$, in the three types of housing, respectively. It was concluded that the three remediation techniques used reduced the radon concentration below the maximum value proposed by the Environmental Protection Agency (EPA) of 150 Bq/m^3 , being the upholstery with which the best results were obtained. Besides, the effective annual dose reached was less than the action limit of 3 mSv / Y suggested by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Finally, it is recommended to carry out investigations on the radioactivity coming from the construction materials, soil, and water present in the studied area to determine the causes of the high levels of radon detected.

Keywords: <CHEMISTRY>, <RADON (Rn) >, <RADON INDOORS>, <LUNG CANCER>, <ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) >, <MOCHA (CANTON) >

INTRODUCCIÓN

La población constantemente está expuesta a radiaciones ionizantes. Este tipo de radiación no solo proviene de fuentes artificiales producidas por actividades realizadas por el hombre, sino que nuestro entorno también las produce y se conoce como fondo radiactivo natural. Este fondo consiste en radiaciones cósmicas que se originan por procesos nucleares en el exterior de la tierra y radiación emitida por nuestro organismo, proveniente fundamentalmente de isotopos de carbono y potasio, aunque, también se debe considerar la inhalación o ingesta de gases radioactivos y la radiación emitida por la corteza terrestre, la cual varía dependiendo de la distribución de los elementos que la conforman, dentro de los cuales el radón es uno de los principales contribuyentes (Real Ferrer, 2003, p. 13-28).

El 222-Radón (^{222}Rn) es un gas incoloro, inodoro e insípido que se forma durante la desintegración radiactiva, con emisión de partículas alfa, del ^{226}Ra que a su vez proviene del ^{238}U presente en las rocas, los suelos de origen volcánico y granítico y en el agua que los atraviesa. Por su característica gaseosa fluye desde el subsuelo hacia la atmosfera donde tiende a acumularse en espacios cerrados, más aún cuando existe poca ventilación como ocurre al interior de las edificaciones.

El suelo y los materiales de construcción son las principales fuentes que contribuyen a la presencia de radón en el interior de las viviendas. La concentración de este gas proveniente del suelo depende de varios factores, entre los que destacan la permeabilidad y la cantidad de radio presente. En cuanto a los materiales de construcción, su aporte en la emisión de radón, a parte de la concentración de radio en los mismos, se debe a la porción del elemento producido que se libera del material, su porosidad y el acabado de las paredes (OMS, 2015, p.3-89).

El interés acerca de la concentración de radón en espacios interiores se dio debido a la relación encontrada en varios estudios epidemiológicos, entre este y el desarrollo de cáncer de pulmón, razón por la cual, en 1986 la Organización Mundial de la Salud (OMS) anuncio su carácter cancerígeno, mismo que fue corroborado en 1988 por la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) al concluir que existen evidencias científicas suficientes para declararlo como tal (Real Ferrer, 2003, p. 13-28), de manera que, ha sido clasificado como un carcinógeno del Grupo 1, categoría que posee 120 agentes cancerígenos, como es el caso del asbesto, benceno y otros (IARC, 2020), además, es considerado como la segunda causa más importante en la aparición de dicha enfermedad después del tabaco y se le atribuye entre un 3% y 14% del total de casos a nivel mundial. Dentro de nuestro organismo, el radón y sus productos de desintegración de vida

corta (PDR) se depositan en el sistema respiratorio y pueden interactuar con los tejidos pulmonares causando alteraciones en el ADN que desencadenan el apareamiento de cáncer en esta zona. En cualquier nivel de exposición a radón se consigue afectar el ADN, ya que, una sola partícula alfa puede causar daños (OMS, 2015, p.3-89).

Debido a los problemas que provoca la exposición, no solo a radón sino a todas las radiaciones ionizantes, investigaciones realizadas por diferentes instituciones alrededor del mundo como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) han permitido establecer normativas que tienen por objetivo mantener las exposiciones tan bajas como sea posible y que la dosis percibida por parte de los individuos no sobrepase ciertos límites (Real Ferrer, 2003, p. 13-28). En cuanto al radón, varios organismos a nivel mundial han establecido límites para su concentración en el interior tanto de viviendas construidas como de viviendas nuevas o en construcción, en caso de superar los valores propuestos se deben tomar medidas adecuadas que permitan reducir el nivel del gas hasta los límites establecidos como aceptables.

En el cantón Mocha existen viviendas construidas con diferentes materiales que proporcionan una baja protección frente a este gas, algunas de ellas cuentan con sótanos que al no estar edificados de manera adecuada permiten su ingreso con mayor facilidad. Para reducir los niveles de radón a los recomendados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de 150 Bq/m^3 existen técnicas que la población desconoce como el pintado, aireación y tapizado, las cuales son accesibles, de sencilla implementación y además han demostrado su efectividad para reducir el ingreso del gas al inmueble. De ahí la importancia de educar a la sociedad sobre este tema y de ejecutar una dosimetría en otros sectores, para que, en caso de ser necesario se tomen medidas correctivas que ayuden a disminuir los niveles de radón, de modo que, las personas puedan prevenir en cierto grado el cáncer pulmonar.

Formulación del problema

¿Con la aplicación de los métodos de aireación, tapizado y pintado en viviendas de diferente material de construcción ubicadas en el barrio Capulispamba, cantón Mocha provincia de Tungurahua se reducen los niveles de radón?

JUSTIFICACIÓN

En nuestro país los estudios referentes al gas ^{222}Rn son escasos debido al bajo interés que éste representa tanto para la población como para los entes gubernamentales. En cuanto a la provincia de Tungurahua, Ambato es el único cantón donde se ha estudiado y determinado que la concentración de radón en interiores es elevada (Ramos Flores, 2008), (Colcha Ortiz, 2005), de modo que, es importante estudiar otras zonas de esta provincia que pueden presentar el mismo problema. Por ello, hemos planteado realizar este estudio en el barrio Capulispamba perteneciente al cantón Mocha, cuyo suelo está constituido mayoritariamente por depósitos de origen volcánico, rocas metamórficas, máficas y granitoides, mismas que pueden llegar a ser ricas en uranio (Barros y Pérez., 2012, p.32-34), además, estos suelos son franco arenosos (textura gruesa) lo cual facilita la emanación del gas hacia la atmósfera (Gobierno Municipal de Mocha, 2016, pp.37-44), en adición, las viviendas de dicho sector no cuentan con las medidas de protección adecuadas frente al ingreso del radón, de manera que sus habitantes son propensos a inhalar este contaminante y desarrollar enfermedades del sistema respiratorio.

Para llevar a cabo este proyecto se plantea la ejecución de una medición que permita detectar niveles elevados de este gas para su posterior reducción empleando 3 técnicas de remediación, aireación, tapizado y pintado. Para alcanzar los objetivos planteados contamos con el aval de nuestro tutor y el acceso tanto a los materiales que se emplearon en la remediación como a las viviendas donde se tomaron los datos; las mediciones se realizaron con equipos Corentium Home que proporcionan medidas fiables de los niveles de radón en tiempo real. Este proyecto tiene relevancia social ya que permite mejorar la calidad del aire en el interior de las viviendas del barrio Capulispamba reduciendo en cierto grado la posibilidad de que sus habitantes desarrollen cáncer pulmonar, además, los datos obtenidos con la medición permitirán establecer la dosis efectiva anual a la que estos están expuestos.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo general

Reducir los niveles de 222-Rn en viviendas del “barrio Capulispamba” Cantón Mocha, Provincia de Tungurahua, previa su medición.

Objetivos específicos

- Monitorear la concentración de radón en habitaciones de viviendas del barrio Capulispamba, perteneciente al cantón Mocha usando dosímetros en tiempo real.
- Emplear las técnicas de aireación, tapizado o pintado en aquellas habitaciones que superen el límite recomendado por la EPA.
- Determinar la dosis anual efectiva a la cual están expuestos los habitantes antes y después de la remediación.

HIPÓTESIS

Hipótesis nula

- Las técnicas de tapizado, aireación y pintado no reducen los niveles de radón en habitaciones de viviendas del barrio Capulispamba, cantón Mocha, Provincia de Tungurahua hasta el límite propuesto por la EPA de 150Bq/m³.

Hipótesis alternativa

- Las técnicas de tapizado, aireación y pintado reducen los niveles de radón en habitaciones de viviendas del barrio Capulispamba, cantón Mocha, Provincia de Tungurahua hasta el límite propuesto por la EPA de 150Bq/m³.

CAPÍTULO I

1.1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la investigación

El interés por la presencia de radón en el interior de las viviendas nace en 1984, cuando sonaron las alarmas de radiación de la central nuclear de Limerick en Pensilvania, ya que, el cabello y vestimenta del ingeniero Stanley Watras, nuevo trabajador de la central, estaban impregnados con productos de la desintegración de dicho elemento, el personal de seguridad empezó una investigación alrededor de este hecho logrando darse cuenta de que la contaminación no se produjo en la central nuclear sino en su vivienda, la cual estaba ubicada sobre una formación geológica y en su sótano albergaba una concentración de radón de 100.000 Bq/m^3 que equivale al riesgo de fumar 135 cajas de tabacos por día (Seisdedos Domínguez, 2016, pp.11-18).

Debido al interés desarrollado por determinar los niveles de radón en el interior de las viviendas y su remediación para evitar riesgos en la salud de la población, en Ecuador se han realizado los siguientes estudios:

En el 2006, se realizó una investigación en la parroquia Victoria del Portete del cantón Cuenca, en la cual se midieron los niveles de radón en viviendas de construcción mixtas (madera-cemento-estuco-ladrillo, (madera-cemento-estuco-bloque), (madera-cemento-ladrillo), (madera-cemento-bloque), bahareque (un piso), bahareque (dos pisos) y adobe, se eligieron 5 muestras por cada material de construcción dando un total de 35 viviendas. Las mediciones se tomaron en el dormitorio y un fondo en el suelo de cada construcción mediante la técnica de Detectores de Trazas Nucleares en Estado Sólido (SSNTD) dando como resultado un valor promedio de 795 Bq/m^3 que es superior al límite recomendado por la EPA y UNSCEAR. Esto se debe a la presencia de una veta de uranio en la zona por lo cual el uso de la tierra como material de construcción contribuye al aumento de los niveles de radón (Pichisaca Córdova, 2006).

En el año 2010, en la parroquia Victoria del Portete, se aplicaron las técnicas de aireación, pintado y tapizado en viviendas de cemento armado con el fin de reducir los niveles de radón, usando para la detección de este gas la técnica SSNTD. Se logró una reducción de 66% con el tratamiento de aireación, dando un valor de $620,32 \text{ Bq/m}^3$, 63% con el pintado obteniendo $573,26 \text{ Bq/m}^3$, y 61% con el tapizado con $584,91 \text{ Bq/m}^3$. Se determinó que existe mínima diferencia entre los tratamientos. Si bien, consiguieron reducir significativamente los niveles de radón, no lograron disminuirlos hasta los valores establecidos por la EPA Y UNSCCEAR (Cárdenas Herrera, 2010).

En la misma parroquia en el 2018, se evaluaron 30 viviendas de diferente material de construcción (adobe, madera, bloque, ladrillo y mixtas) (6 viviendas de cada tipo), donde, con ayuda de equipos digitales Corentium Home se detectaron niveles de radón en un rango de 790 Bq/m³, 505 Bq/m³, 719 Bq/m³, 599 Bq/m³ y 497 Bq/m³ respectivamente. Se aplicaron dos técnicas de remediación, aireación y tapizado. Se ejecutaron dos mediciones, la primera se realizó por triplicado en cada vivienda antes de la implementación de los tratamientos, la remediación se realizó en las habitaciones con el valor más alto de radón por vivienda, la segunda medición tuvo como fin verificar la reducción de los niveles de este gas a los establecidos por la EPA. Se logró una disminución del 83.85% con la aireación y un 85.30% con el tapizado en los cinco tipos de viviendas, además, se realizó el cálculo de la dosis anual absorbida por los residentes, dando como resultado 1.14 mSv/γ, valor que se encuentra por debajo del límite de 1.2 mSv/γ permitido por la EPA (Arteaga Cepa y Lliguin Vallejo, 2018., pp.38-56).

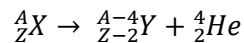
En el 2005, se realizó otro estudio de este tipo, esta vez en las ciudadelas Ingahurco e Ingahurco bajo del cantón Ambato, donde se llevó a cabo la medición de radón en 4 habitaciones de un hogar, siendo estas el dormitorio, baño, cocina y sala. Para la detección se usó la técnica experimental SSNTD mediante cámaras de radón que estaban compuestas por una caja de polietileno cerrada con dos tapas, en el interior de dicha caja se colocaron los detectores marca Kodac tipo LR-115 con policarbonato aluminizado. La medición se realizó por un periodo de 60 días, luego de ese tiempo los dosímetros se analizaron en el laboratorio utilizando para el revelado una solución de NaOH 0,1 N a 60 grados centígrados por 110 minutos, luego se realizó un conteo de partículas en el microscopio. Se obtuvo una concentración de Rn en la ciudadela Ingahurco alto de 2222,65 Bq/m³ y en la ciudadela Ingahurco bajo de 2622,19 Bq/m³, lo que permitió establecer que en ambas ciudadelas existente elevada concentración de radón, lo cual no solo se puede deber a los materiales de construcción sino también a la posible presencia de uranio en el suelo (Colcha Ortiz, 2005).

En el barrio La Macarena-Ambato, en el 2008 se detectó concentraciones de radón entre 237 Bq/m³ y 905 Bq/m³ en 12 habitaciones de cemento armado. Para disminuir estos niveles se utilizó tratamientos de aireación, pintado y tapizado, sellando previamente las grietas existentes en las paredes. Los equipos empleados en el estudio fueron el espesímetro y multicanal, mientras que, para las mediciones de radón se usó la técnica de Detectores de Trazas Nucleares en Estado Solido (SSNTD). La aireación (realizada por 8 horas seguidas), la pintura de esmalte y el papel tapiz vinílico lograron reducir los niveles de radón en 84.02 %, 84.21% y 89.61%, respectivamente, obteniéndose concentraciones que se encuentran dentro del rango establecido por la EPA de 150 Bq/m³ y UNSCEAR de 200 Bq/m³ (Ramos Flores, 2008).

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Radiactividad

La radiactividad es un fenómeno espontáneo que se genera en átomos cuyos núcleos son inestables, consiste en una transformación o desintegración de un núcleo en otro más estable, proceso que va acompañado de la emisión de energía en forma de radiaciones ionizantes, mismas que pueden ser de tipo alfa, beta o gamma; se habla de radiación alfa (α) cuando un núcleo pesado con partículas sobrantes libera dos protones y dos neutrones (núcleos de helio) para regular su exceso de masa, este proceso tiene la siguiente forma:



Por otra parte, cuando el número total de partículas es el adecuado pero existen demasiados neutrones, uno de estos se transforma en protón con la emisión de un electrón y un antineutrino, lo que se conoce como radiación beta negativa (β^-), en contraste, cuando hay un exceso de protones, se da la transformación de uno de ellos en neutrón emitiendo un positrón y un neutrino, denominándose radiación beta positiva (β^+). Después de la emisión de radiación alfa o beta, el núcleo puede quedar en estado excitado, por lo que, para adquirir el estado basal emite rayos gamma (γ), los cuales son fotones (sin carga ni masa) similares a los de los rayos X y a los de la luz común, pero con energías (del orden de los Mev) mayores a estos (Cavedon, 2005, p.10-15).

1.2.1.1 Radiactividad natural

A la radiación ionizante artificial producida por el hombre, se suma aquella que se produce de forma natural en el medio que nos rodea, como es el caso de la radiación cósmica o radiación proveniente del exterior y aquella que se origina por la presencia de materiales radiactivos en la corteza terrestre, al igual que la radiactividad artificial ésta también puede llegar a causar efectos negativos sobre la salud, además, es considerada como la principal fuente de radiación ionizante a la que está expuesta una persona, de hecho, se estima que representa alrededor del 90 % de la radiación total recibida por la población en su vida cotidiana. (Frutos, 2009, pp.48-57).

El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las Radiación Atómica (UNSCEAR) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), mencionan que la dosis media de radiación efectiva que recibe cualquier persona al año es en promedio 3,71 mSv, de los cuales 2,40 mSv se deben a la radiación natural proveniente tanto de exposición interna (ingestión e inhalación) como externa (rayos cósmicos) (Dorado, 2010, pp.4-13). En la siguiente figura se muestra la proporción de radiación recibida por la población a partir de diferentes fuentes:

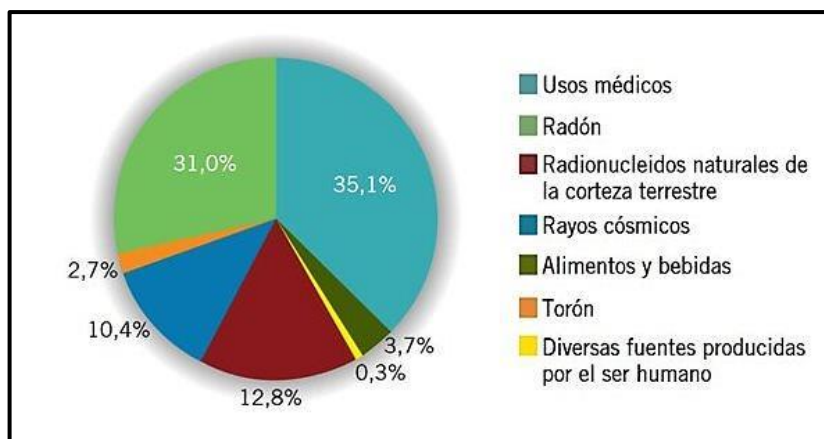


Figura 1-1: Dosis anual de radiación recibida por una persona a partir de diferentes fuentes.

Fuente: (Dorado, 2010, p.4-13)

1.2.2. Radiación ionizante

Se define como un tipo de energía emitida por átomos inestables en forma de partículas (α , β , neutrones) o de ondas electromagnéticas (rayos X y gamma), como su nombre lo indica, tiene la energía necesaria para arrancar electrones de los átomos durante su paso por la materia formando iones y radicales libres (OMS, 2016b).

Las radiaciones ionizantes causan daños en el ADN, ya sea mediante efecto directo como es el caso las partículas alfa, protones y neutrones que actúan directamente sobre dicho ácido nucleico transfiriéndole su energía, o, mediante efecto indirecto (rayos X, gamma y electrones) al interactuar con moléculas intermedias como el agua de la célula generando radicales libres altamente reactivos que posteriormente afectarán al ADN; independientemente del tipo de interacción, las radiaciones ionizantes causan modificaciones en la estructura molecular mediante fracturas en una o ambas cadenas, ruptura de los puentes de hidrogeno, cambios estructurales de las bases nitrogenadas, daños en el azúcar, entre otros. Es así que, los efectos causados por las radiaciones ionizantes sobre el ácido desoxirribonucleico llevan a la aparición de efectos mutagénicos y oncogénicos producto del anormal desarrollo de las células (Puerta Ortiz y Morales Aramburo., 2020, pp.61-71).

1.2.3. El radón

1.2.3.1. Descubrimiento y características generales

El radón es un elemento gaseoso radiactivo que pertenece a la familia de gases nobles, tiene tres radioisótopos, mismos que fueron descubiertos en las décadas de los ochenta y noventa, es así que, su isótopo denominado torón (^{220}Rn) por provenir del torio, fue observado por primera vez en 1899 por los científicos británicos Ernest Rutherford y Frederick Soddy, quienes lo llamaron

“emanación”, posteriormente, en el año 1900 el físico alemán Friedrich Ernest Dorn encontró el isótopo radón (^{222}Rn) como producto de descomposición del radio por lo cual lo denominó “emanación de radio”, seguidamente, en 1903 fue descubierto el actinón (^{219}Rn) por el químico francés André-Louis Debierne quien observó que el actinio también emitía una emanación a la cual nombró “emanación de actinio” (Tene, 2017, pp.5-16); (Schüttmann, 1988, pp.160-162).

En 1904 el químico británico William Ramsay concluyó en una de sus investigaciones que las emanaciones de radón, torio y actinio descubiertas en años anteriores son isótopos del mismo elemento (Laughlin, 2012, pp.2-7). Ramsay junto al químico inglés Robert Whytlaw-Gray lo aislaron y determinaron su densidad, además, descubrieron que es el gas más pesado que se conoce y lo llamaron “nitón” (Thornton y Burdette., 2013, p.804). En 1912 la Comisión Internacional de Pesos Atómicos aceptó al radón, hasta ese momento conocido como nitón, como nuevo elemento; finalmente, en 1923 la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) y el Comité Internacional de Elementos Químicos aprobaron el uso de los nombres radón, torón y actinón para denominar a sus isótopos (Laughlin, 2012, pp.2-7).

Tabla 1-1: Características generales del radón

Característica	Equivalencia
Símbolo	Rn
Numero atómico	86
Masa atómica	222,02 uma
Bloque /Periodo / Grupo	p / 6 / 18
Configuración electrónica	[Xe] $4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$

Fuente: (Generalic, 2020)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

1.2.3.2. *Propiedades físicas*

El radón se encuentra generalmente en estado gaseoso, es inodoro e insípido; en estado líquido y gaseoso es incoloro mientras que en estado sólido presenta una tonalidad rojo-anaranjada, debido a defectos cristalinos derivados de la desintegración de sus átomos (Garzòn, 1992, p.77-80).

Tabla 2-1: Propiedades físicas del radón

Propiedad	Equivalencia
Temperatura de ebullición	-62°C
Temperatura de fusión	-71°C
Densidad (0°C y 1 atm)	9.73 kg/m ³
Solubilidad en agua (20°C y 1 atm)	230x10 ⁶ m ³ /kg
Solubilidad en glicerina (20°C y 1 atm)	13.2 x10 ⁶ m ³ /kg
Solubilidad en aceite (20°C y 1 atm)	29 x10 ⁶ m ³ /kg
Solubilidad en alcohol etílico (20°C y 1 atm)	7.4 x10 ⁶ m ³ /kg

Fuente:(Berenguer, 1999, p.2)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

El radón posee alta solubilidad en agua, pero esta decrece rápidamente con la temperatura. En compuestos orgánicos, a excepción de la glicerina, tiende a formar clatratos aumentando su solubilidad. Por otra parte su naturaleza gaseosa permite que se difunda fácilmente a través de diferentes medios; su coeficiente de difusión para el aire es $D=1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, mientras que para el agua es de $D=1.13 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, por tanto su difusión será más difícil en este último medio (LAR, 2011).

1.2.3.3. Propiedades químicas

Al ser el radón un gas noble carece de actividad química frente a otros elementos de la tabla periódica, sin embargo, a pesar de su inercia, si se fuerzan las condiciones experimentales, es posible obtener algunos compuestos químicos o agregados de radón basados en fuerzas de Van der Waals, los cuales suelen ser muy lábiles (Garzón, 1992, p.77-80).

1.2.3.4 Formación del radón

El radón es un gas de origen natural que se forma en la corteza terrestre como parte de tres cadenas de desintegración radiactiva, denominadas series del uranio, torio y actinio, elementos que se encuentran en pequeñas cantidades en el suelo y las rocas, éstos son los denominados átomos padres ya que se desintegran y transforman varias veces convirtiéndose en un átomo de radio que posteriormente dará lugar al radón; el tiempo de vida media de este último favorece su movilización hacia la atmósfera, donde se dispersa y se descompone formando sustancias radiactivas conocidas como progenie o hijas del radón, llegando finalmente a la formación de un átomo de plomo estable. A lo largo de estas desintegraciones radiactivas se libera radiación en forma de partículas alfa de alta energía y partículas beta (ATSDR, 2012, pp.12-13).

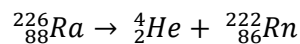
Como se ha mencionado, los isótopos del radón se forman a partir del radio por medio de una emisión alfa, de manera que la cantidad de radón es proporcional al radio existente en la superficie terrestre.

1.2.4.Cadenas de decaimiento radiactivo

Cada cadena de decaimiento radiactivo muestra una secuencia de núcleos con tiempos de vida media muy variables que van desde microsegundos hasta años, dichos núcleos son inestables, por tanto, se desintegran perdiendo energía mediante la emisión de radiación tantas veces como sea necesario hasta alcanzar estabilidad.

El radón posee tres isótopos naturales radón (^{222}Rn), torón (^{220}Rn) y actinón (^{219}Rn), éstos son radiactivos y forman parte de las cadenas de decaimiento del ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U (figura 2) respectivamente, además, son los únicos elementos gaseosos de sus respectivas cadenas radiactivas (LAR, 2011).

El radioisótopo más estable y abundante del elemento radón es el ^{222}Rn ($T_{1/2}=3.82$ días), el cual se forma a partir del ^{226}Ra ($T_{1/2}= 1602$ años), mediante una desintegración α .



Este supone aproximadamente el 80% del radón total, sus productos de desintegración forman una serie de radionúclidos de vida media corta (decaen a ^{210}Pb) y de vida media larga que decaen hasta ^{206}Pb (LAR, 2011). A su vez, el ^{219}Rn es el que posee la vida media más corta de los tres isótopos, siendo esta de 3.96 segundos, así mismo, el ^{220}Rn tiene una semivida de 55.6 segundos, estos dos isótopos se encuentran en cantidades muchos menores que el ^{222}Rn por tanto pueden ser considerados intrascendentes en cuanto a riesgo (Tene, 2017, pp.5-16). Debido a su abundancia y tiempo de vida media este trabajo se centra en el estudio del radioisótopo ^{222}Rn , mismo que llamaremos “radón”.

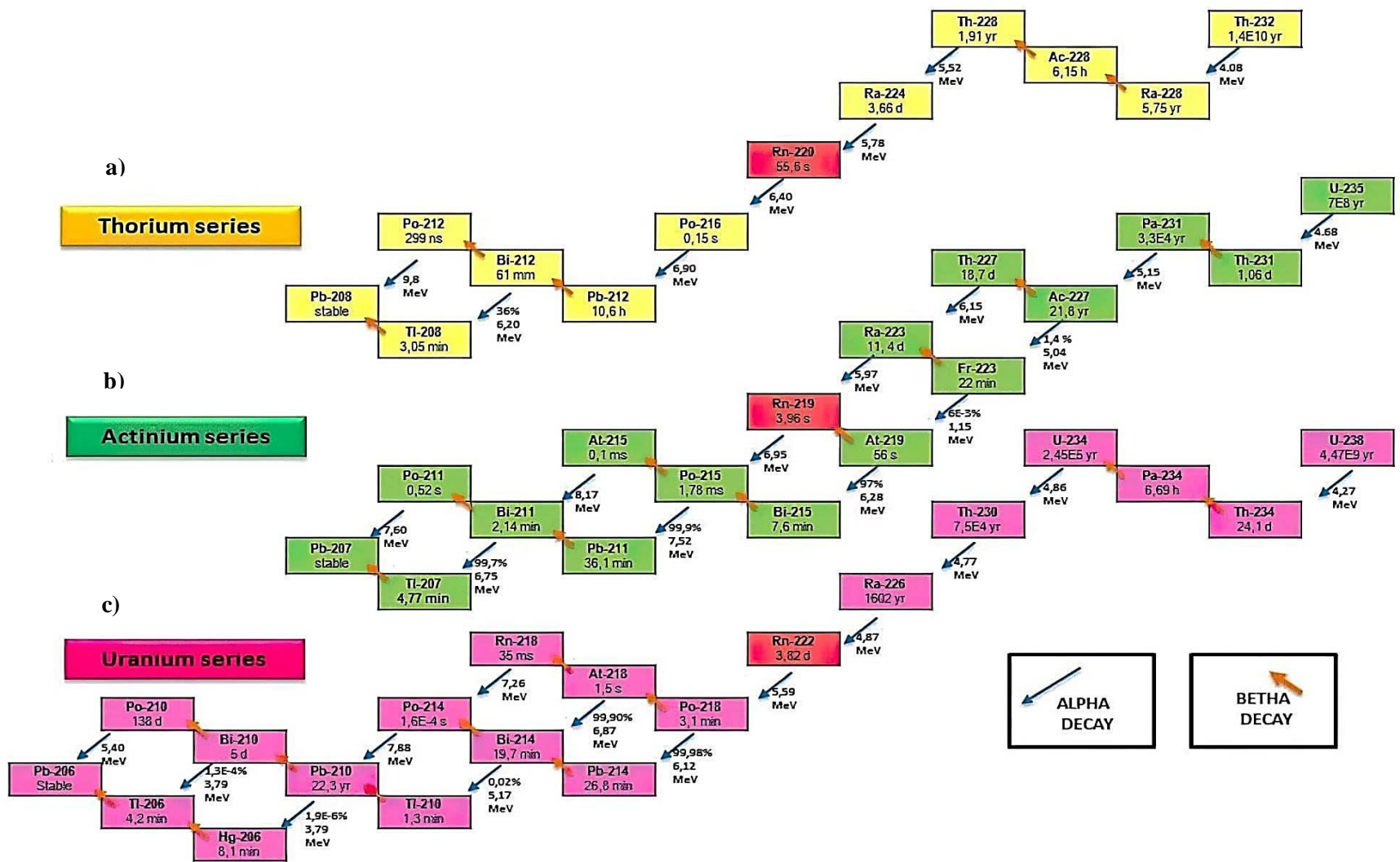


Figura 2-1: Esquemas de desintegración del a) ^{232}Th , b) ^{235}U , c) ^{238}U

Fuente: (Tene, 2017, pp.5-16).

1.2.5. Fuentes de radón

1.2.5.1. Suelo

Ésta es la fuente más importante de radón en viviendas de un solo piso, la cantidad de gas que puede ingresar en una construcción depende de características como la permeabilidad y humedad del suelo, además de la concentración de uranio y radio en éste; es importante tener en cuenta las características geológicas del terreno ya que como se observa en las tablas 3-1 y 4-1 la concentración de uranio está ligada al tipo de rocas y minerales presentes en la corteza terrestre (Frutos, 2009, pp.48-57).

En relación a la concentración de uranio presente tanto en rocas como en minerales, la cantidad de radón que ingresa en una vivienda es mayor cuando ésta se encuentra construida sobre suelos ricos en rocas intrusivas efusivas ácidas como el granito, sobre todo si este está envejecido o resquebrajado, de igual manera dicha cantidad se verá incrementada si en el suelo existen minerales como el zircón o la monacita (Barros y Pérez., 2012, p.32-34).

Tabla 3-1: Concentración de uranio en diferentes tipos de roca

Tipo de roca		U ²³⁸ (ppm)
Rocas ígneas	Basálticas (composición máfica)	1.0
	Intrusivas efusivas básicas	0.6
	Intrusivas efusivas intermedias	2
	Intrusivas efusivas ácidas (granito)	5.9
Rocas sedimentarias	Arenas	1.5
	Arcillas	3.5
	Calizas, dolomitas, sideritas	1.5
	Yesos	0.1
Rocas metamórficas	Pizarras	2.5
	Mármoles	0.5
	Gneis	3

Fuente:(Frutos, 2009, p.48-57); (Barros y Pérez., 2012, p.32-34)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 4-1: Concentración de uranio en algunos minerales

Mineral	U ²³⁸ (ppm)
Cuarzo (SiO ₂)	1.7
Feldspatos (K,Na,Ca,Ba,NH ₄)(Si, Al) ₄ O ₈	2.7
Moscovita (KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂)	11.8
Apatita (Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH))	65
Titanita (CaTiSiO ₅)	280
Zircón (ZrSiO ₄)	1330
Monacitas (CePO ₄ ; LaPO ₄ ; NdPO ₄ ; SmPO ₄)	3000

Fuente: (Frutos, 2009, p.48-57)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

La provincia de Tungurahua está situada en el callejón interandino localizado entre las cordilleras oriental y occidental, cuyo subsuelo está formado principalmente por depósitos de origen volcánico, rocas metamórficas, máficas y granitoides (Ministerio de transporte y obras públicas, 2012, p.3). No obstante, la mayoría de los suelos del cantón Mocha situado en la provincia mencionada, son de textura gruesa (arenoso) y moderadamente gruesa (franco arenoso y franco limoso), lo que les da una alta permeabilidad y porosidad (Gobierno Municipal de Mocha, 2016, pp.37-44).

1.2.5.2. Materiales de construcción

Constituyen la segunda fuente más importante de radón en viviendas de un solo piso, generalmente estos se elaboran a partir de materias provenientes del suelo y por tanto con probable presencia de radio, en la tabla 5-1 se muestra la actividad de ²²⁶ Ra en algunos materiales de construcción (Frutos, 2009, pp.48-57).

Esta fuente de radón no suele ser muy representativa, de hecho, se estima que los materiales de construcción aportan solo alrededor del 20% de la concentración total de radón en una vivienda, lo que representa una concentración entre 10 Bq/m³ y 20 Bq/m³ (Piedecausa y Chinchón Payá., 2011, pp.38-39).

Tabla 5-1: Actividad de ^{226}Ra en materiales de construcción comunes.

Material	^{226}Ra (Bq/kg)
Arena	30.5
Yeso	35.9
Hormigón	29.9
Cemento tipo I (cemento normal)	25.1
Ladrillo tipo I (artesanal)	55.1

Fuente: (Frutos, 2009, p.48-57)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

1.2.5.3. Agua

Al ser un gas muy soluble en agua el radón que escapa de las rocas y minerales puede incorporarse en las corrientes hídricas subterráneas y llegar al interior de las viviendas como parte del agua de consumo, lo cual puede suponer un incremento en su concentración ya que cuando el agua sale del grifo se libera una parte de los gases disueltos, de igual manera pasa durante la ducha debido a que este queda libre por efecto del movimiento y aumento de temperatura del agua (la solubilidad del Rn disminuye con el incremento de temperatura); se considera que esta fuente de radón representa un menor riesgo en comparación con las señaladas anteriormente (Loayza, 2018, p.21).

La presencia de radón es considerablemente superior en aguas subterráneas al no poder liberar fácilmente este gas hacia la atmósfera como es el caso de las aguas superficiales (Piedecausa y Chinchón Payá., 2011, p.38-39).

1.2.6. Emanación y transporte de radón del suelo

La emanación, consiste en el mecanismo por el cual se da la liberación de radón de la matriz donde se encuentra hacia los poros del terreno, mientras que dentro del transporte o movilidad interviene el proceso de exhalación, el cual hace referencia a la cantidad de radón que escapa hacia la atmósfera desde los espacios porosos (figura 3-1), de estos dos mecanismos depende la concentración de radón en el ambiente (García, 2016, pp.25-47).

Cabe señalar que la exhalación del radón desde el suelo hacia la atmósfera se ve influenciada por distintos factores como:

-La permeabilidad y porosidad del terreno, de ahí que, suelos altamente permeables y porosos permiten mayor movilidad del radón, se debe tener en cuenta que, en rocas o suelos con baja cantidad de uranio pero con alta porosidad y permeabilidad dicho gas se desplazará y alcanzará la superficie con facilidad, mientras que en suelos menos permeables (arcillas) pero con un contenido de uranio mayor, es posible que la exhalación se vea reducida (García, 2016, pp.25-47).

-Influyen también las condiciones meteorológicas del lugar, es así que, la presencia de bajas presiones atmosféricas, altas velocidades de viento y un incremento de temperatura causan un aumento de exhalación, por otra parte, efectos contrarios a los mencionados y la existencia de lluvia y humedad provocan una disminución de esta, lo que lleva a un aumento de la concentración de radón en el terreno durante el invierno, que será liberada durante el verano. (Piedecausa y Chinchón Payá., 2011, p.38-39).

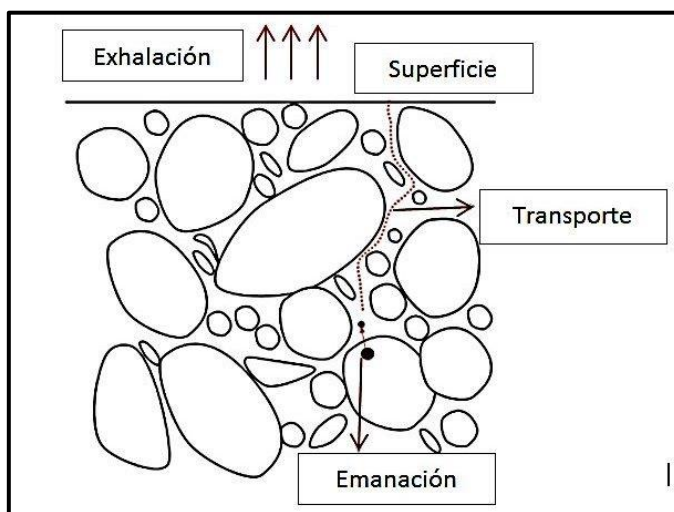


Figura 3-1: Emanación y exhalación de radón hacia la atmósfera.

Fuente: (Tene, 2017, pp.5-16)

1.2.6.1. Liberación del radón

También denominada emanación. Los átomos de uranio contenidos en los minerales, rocas y suelos generan átomos de radio y estos a su vez dan lugar al radón mediante la liberación de una partícula alfa formada por dos protones y dos neutrones, lo que produce el llamado efecto de retroceso del átomo de radón formado, este efecto hace que el radón se mueva en dirección opuesta a la cual fue liberada la partícula alfa (figura 4-1), con una energía de retroceso de 86Kev. De la dirección del retroceso depende que el átomo de radón se libere hacia los poros del suelo o se mueva más hacia el interior del sustrato; en este proceso también juega un papel importante la localización del átomo de

radio en el grano ya que mientras más cerca de la superficie se encuentre mayor probabilidad de que el radón formado se libere del sustrato (García, 2016, pp.25-47).

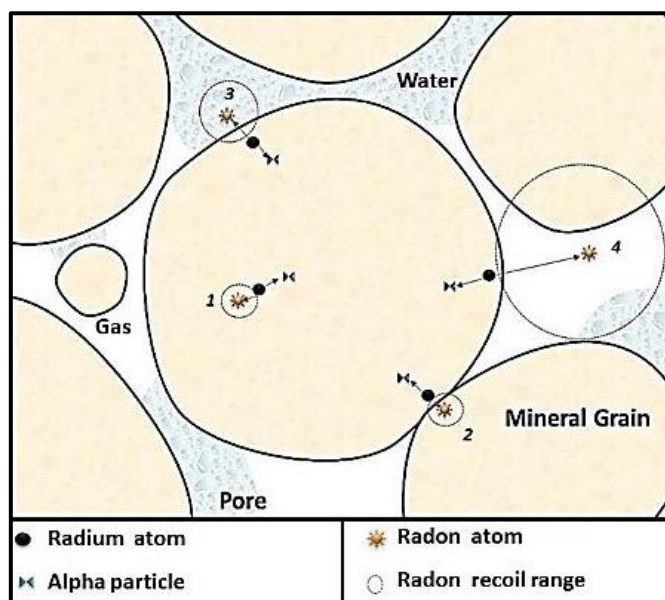


Figura 4-1: Liberación de los átomos de radón del sustrato.

Fuente: (Tene, 2017, pp.5-16)

La distancia de retroceso del átomo de radón depende de la matriz donde se forme, en minerales comunes dicha distancia es de 0.02 a 0.07 μm , en aire 0.63 μm y en agua 0.1 μm (Nazaroff 1992, pp.137-160). De manera que, solo los átomos formados cerca de la superficie del grano pueden ser liberados, de hecho, solo del 10 al 50% de átomos de radón emanan hacia los espacios porosos, si existe agua en los poros el radón permanecerá en estos, caso contrario, si los poros contienen aire el radón los recorre por completo e incluso puede adherirse a otro grano (García, 2016, pp.25-47).

1.2.6.2. Transporte del radón

El movimiento o desplazamiento del radón en un medio se da a través de dos mecanismos:

Difusión: Consiste en la migración de las moléculas de radón desde una zona de alta concentración a una donde esta sea menor, como resultado del movimiento lento de las moléculas hasta llegar al equilibrio (Nazaroff 1992, pp.137-160). Suponiendo que el radón actúa como un fluido sigue la ley de Fick que menciona que el flujo migra hacia regiones con concentraciones menores, con una magnitud proporcional al gradiente de concentración del radón, de manera que, el flujo que oscila en una dirección se compensa con otro de igual magnitud en dirección contraria (Tene, 2017, pp.5-16).

Este proceso es poco relevante cuando se trata de radón en interiores, de hecho, la concentración de este gas dentro de un inmueble debido a difusión es de aproximadamente $2\text{Bq/m}^3\cdot\text{h}$ (Frutos, 2009, pp.48-57).

Convección: Este mecanismo influye de manera significativa en la tasa de exhalación del radón a la superficie ya que permite un desplazamiento de hasta 100m (García, 2016, pp.25-47). En este tipo de transporte, el movimiento del radón se da por una diferencia de presión entre dos medios, de manera que el gas fluirá hacia zonas donde esta sea menor, en este caso hacia la atmósfera ya que el suelo abarca mayor presión. En cuanto a las viviendas, el aire dentro es más cálido que el que se encuentra en el suelo adyacente a los cimientos, esta diferencia de temperatura genera un gradiente de presión que atrae aire con altos niveles de radón hacia el interior, el flujo de entrada de radón se ve favorecido por el viento y por los flujos de aire del sistemas de climatización (ventiladores, chimeneas, hornos), ya que estos pueden reducir la presión en el interior de la vivienda (The National Academy of Sciences, 1999, pp.25-26) . La contribución a la concentración final de radón al interior de una vivienda debido a este proceso es de aproximadamente $60\text{Bq/m}^3\cdot\text{hora}$ (Frutos, 2009, pp.48-57).

1.2.7. Radón en ambientes interiores

La concentración de radón en espacios interiores es variable, llegando a presentar valores muy distintos incluso en habitaciones diferentes del mismo edificio o en edificios vecinos, varía también de un día para otro o en cuestión de horas. Se debe tener en cuenta ciertos factores externos e internos que influyen en el nivel de radón dentro de un inmueble. Entre los factores externos se encuentran parámetros meteorológicos como la temperatura, presión atmosférica, cantidad de radón en el aire exterior y humedad del suelo, como se mencionó anteriormente, un aumento de humedad produce una disminución en la exhalación del radón, en este tipo de factores también se encuentran los movimientos sísmicos que generan un aumento inusual de exhalación; por otra parte los factores internos que influyen, están relacionados con la ubicación y características del edificio, entre estos se encuentran la ventilación, tipo de construcción, edad de la vivienda, materiales y revestimientos usados en paredes y pisos, altura de la planta baja sobre el suelo, porosidad y tipo de rocas presentes en el subsuelo (geología), y número de vías de ingreso de radón como grietas, tuberías, sumideros, desagües, marcos de ventanas, forjados sanitarios, porosidad de las paredes, etc. (García, 2016, pp.25-47).

Este gas tiene una alta movilidad entre los espacios porosos de los materiales usualmente empleados para la construcción, lo que le permite ingresar fácilmente en el interior de la vivienda traspasando los muros o introduciéndose a través de pequeñas grietas o fisuras (Frutos y Olaya., 2010, p.13-15), además, tiene un peso siete veces mayor que el del aire, por tanto, sus niveles suelen ser más elevados en

aquellos espacios que tienen contacto directo con el suelo, tal es el caso de los sótanos y las plantas bajas de las viviendas, por otra parte, su paso hacia las habitaciones de pisos superiores se favorece por la presencia de sistemas de ventilación o calefacción (Piedecausa y Chinchón Payá., 2011, p.38-39).

El radón se caracteriza por ser un gas inodoro e incoloro, por tanto, aunque su concentración sea muy elevada en el interior de un inmueble la única forma de identificar su presencia es realizando mediciones con dispositivos especializados para ello. La distancia promedio que puede recorrer en el aire el ^{222}Rn y ^{220}Rn antes de su desintegración es 2 metros y 2,80 centímetros respectivamente, en el caso del primero es la altura suficiente como para ser inhalado por las personas (Rojas, 2016, p.8).

La concentración media de radón y sus descendientes en interiores es mayor que la existente al aire libre, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en exteriores la concentración media de este gas se encuentra entre 5 Bq/m^3 y 15 Bq/m^3 mientras que en el interior de las edificaciones varía de $<10 \text{ Bq/m}^3$ hasta más de 10000 Bq/m^3 (OMS, 2016a).

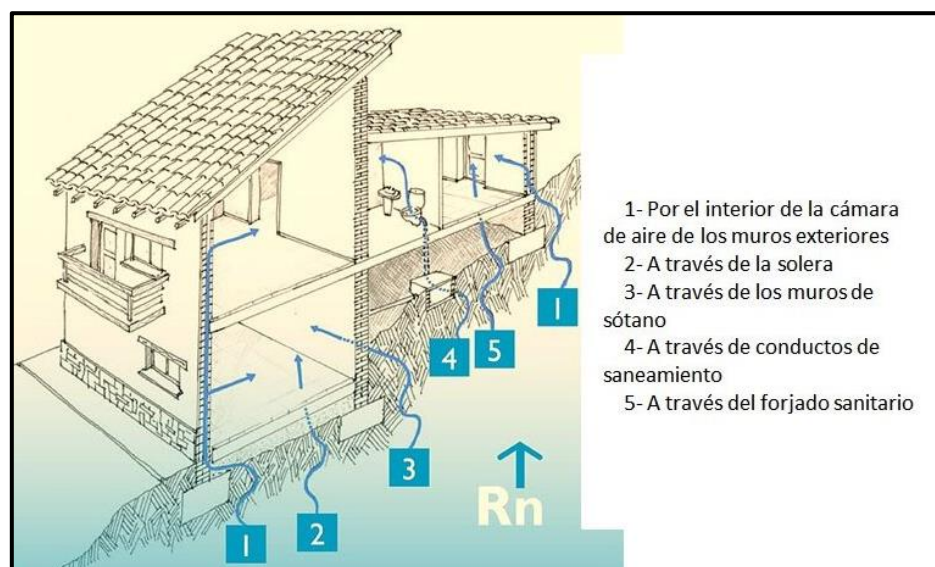


Figura 5-1: Puntos comunes de entrada del radón hacia el interior de las viviendas.
Fuente: (Frutos y Olaya., 2010, pp.13-15)

Como se observa en la figura 5-1, existen cinco puntos por donde comúnmente se da la entrada del radón hacia el interior de las viviendas (Frutos y Olaya., 2010, pp.13-15):

1. Cámaras de aire de muros: permiten que el radón se mueva libremente e incluso llegue hasta pisos altos.

2. Soleras: generalmente están elaboradas con hormigón armado y poseen juntas de dilatación colocadas por tramos, tanto estas como las fisuras de la solera permiten la entrada del gas, además, este es capaz de atravesar los poros de materiales hasta un determinado espesor.
3. Muros de sótano: en viviendas enterradas o semienterradas estos muros pueden ser traspasados por el radón al estar en contacto directo con el terreno.
4. Conductos de saneamiento: generalmente los conductos de saneamiento conectan los baños y cocinas, con las arquetas de la red de distribución situada habitualmente bajo la solera o piso de sótano, por este medio el gas podrá ascender hasta los cuartos húmedos.
5. Forjados sanitarios: El radón puede acumularse en la cámara de aire bajo el forjado sanitario y si no existe ventilación podrá traspasar el forjado e ingresar en la vivienda (Frutos y Olaya., 2010, pp.13-15).

1.2.8. Efectos en la salud humana

Como se ilustra en la figura 6-1, el radón y sus productos de descomposición (PDR) ingresan al cuerpo humano por medio de dos vías, inhalación e ingestión. En este trabajo nos enfocamos en los niveles de radón en el aire y por tanto en los efectos que genera su inhalación.

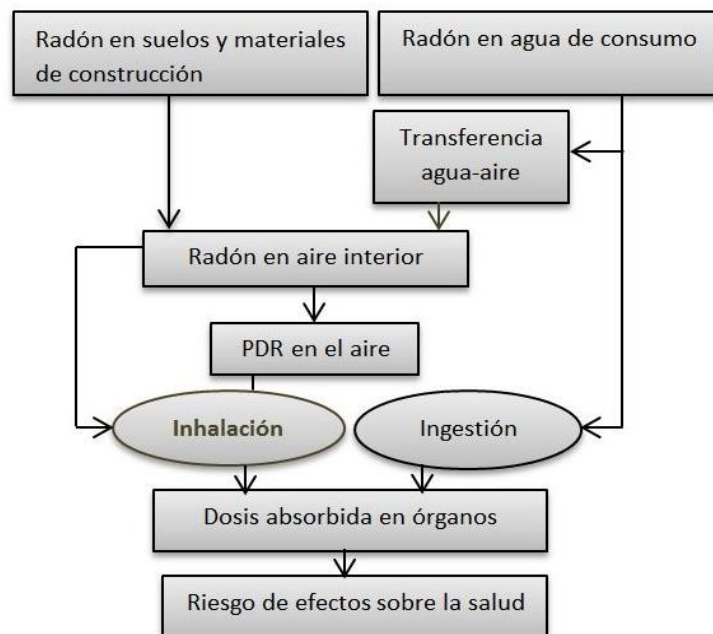


Figura 6-1: Vías de exposición a la radiación ionizante producida por los PDR.

Fuente: (The National Academy of Sciences, 1999, pp.25-26)

1.2.8.1. El radón y el cáncer de pulmón

En el siglo XVI se reportaron en Sajonia y Bohemia (Suiza) elevadas tasas de mortalidad de mineros de plata a causa de una enfermedad respiratoria desconocida, a finales del siglo XIX se supo que se trataba de cáncer de pulmón, una enfermedad hasta ese momento poco conocida y que en un inicio se atribuyó como sus causantes al polvo de plata y vapores de diésel presentes en el aire de las minas, a mediados del siglo XX se determinó, mediante investigación, que el verdadero causante era el radón y su progenie de vida corta, desde entonces diferentes investigaciones realizadas en mineros han mostrado un elevado riesgo de cáncer pulmonar debido a esta causa. En los años 90 se descubrió que este gas también se encuentra en las viviendas, haciéndose evidente que es un problema de salud pública que no aqueja únicamente a los mineros (Laughlin, 2012, pp.2-7).

Cabe mencionar que, la peligrosidad del radón no se debe en su totalidad a este elemento ya que al ser inhalado en su mayoría se exhala y no se acumula en el sistema respiratorio, esto debido a que tiene una semivida larga en relación al tiempo de respiración, sólo una pequeña parte del radón inhalado logra llegar a los pulmones para luego transferirse a la sangre y dispersarse por todo el organismo; el riesgo real lo generan sus PDR de vida corta, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po , estos son metales sólidos radiactivos, pueden permanecer suspendidos como átomos libres en el aire o adherirse a las partículas presentes en este, de manera que, pueden ser inhalados por una persona para luego depositarse en distintos lugares del sistema respiratorio, dependiendo el tamaño de partícula al cual estén asociados (mientras más pequeña la partículas más profundo viajará), dado que sus semividas son cortas (desde una fracción de segundo hasta 27 min) los PDR se depositan en las células que recubren las vías respiratorias y en las superficies epiteliales de los bronquios, donde se descomponen por completo mediante desintegración alfa, en consecuencia, los tejidos reciben irradiaciones que elevan la posibilidad de contraer cáncer (Tene, 2017, pp.5-16).

En el caso de los fumadores que habitan o trabajan en espacios con altas concentraciones de radón, es más probable la aparición de enfermedades pulmonares, ya que el humo del tabaco contiene partículas sólidas a las que se adhieren los descendientes de este gas. El riesgo de cáncer debido a radón que tiene un fumador es veinticinco veces mayor que en el caso de los no fumadores (Seisdedos Domínguez, 2016, pp.11-18).

Factores como los niveles de tolerancia de los individuos, antecedentes familiares, enfermedades respiratorias anteriores, la intensidad y tiempo de exposición determinan el riesgo que comprende la inhalación de radón; en este caso la relación dosis-respuesta es lineal, es decir, los efectos del gas crecen proporcionalmente con la exposición, de manera que, un incremento de 100 Bq/m^3 en la

concentración media de radón en un inmueble, lleva a un aumento del 16% en la probabilidad de que los habitantes sufran cáncer pulmonar. Hasta el momento no se conoce una concentración de radón umbral, por debajo de la cual la exposición no suponga un riesgo para la salud, ya que, una sola partícula alfa es capaz de generar daños relevantes en una célula (Seisdedos Domínguez, 2016, pp.11-18).

Varios contaminantes ambientales son considerados precursores de cáncer, pues así lo demuestran estudios realizados en animales, cultivos celulares o en seres humanos; el radón no es una excepción, por tal motivo, ha sido clasificado por la OMS y la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer IARC como un carcinógeno del Grupo 1, categoría que posee 120 agentes cancerígenos de los cuales existen pruebas suficientes que avalan su carcinogenicidad en humanos, como es el caso del asbesto, benceno y otros (Instituto de Protección Radiológica de Irlanda y Registro Nacional de Cáncer de Irlanda, 2005: pp.2-3); (IARC, 2020).

Existen estudios realizados en China, América del Norte y Europa que confirman que el radón presente en las viviendas incrementa el riesgo de cáncer de pulmón en la población, incluso si se encuentra en concentraciones bajas, de hecho, éste gas es considerado por la OMS como la segunda causa más importante de esta enfermedad después del tabaco, atribuyéndosele hasta el 14% del total de casos de este tipo de cáncer a nivel mundial (OMS, 2015, p.3-89). Análogamente, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estima que el radón es responsable de alrededor de 21,000 muertes por cáncer pulmonar al año de las cuales aproximadamente 2,900 ocurren entre personas que nunca han fumado (EPA, 2017, p.1-17).

1.2.8.2. El radón y otras enfermedades

Desde 1990 se han realizado varios estudios acerca de la relación entre la exposición al radón y una serie de padecimientos diferentes al cáncer pulmonar, como la leucemia linfocítica crónica, linfomas, alzhéimer y esclerosis múltiple, sin embargo, no se ha logrado reunir evidencia suficiente que demuestre dicha relación (Laughlin, 2012, pp.2-7); (Barros Dios, 2011, pp.27-31).

Si bien, algunos estudios publicados han mostrado un incremento en los niveles de riesgo para algunas de las enfermedades mencionadas, los resultados no son estadísticamente significativos, faltando además el mecanismo por el cual el radón pueda causar mutaciones en tejidos u órganos diferentes a la mucosa respiratoria (Barros Dios, 2011, pp.27-31). Cabe mencionar que, la radiación que el radón y los PDR emiten viaja cortas distancias por tanto es poco probable que afecten a otros tejidos fuera de los pulmones, a donde llegan por inhalación.

1.2.9. Dosis efectiva

Es una medida del riesgo que corre una persona de padecer efectos biológicos por la exposición a radiación ionizante, teniendo en cuenta la sensibilidad de órganos y tejidos. Su unidad es el sieverts (Sv) (Krivosheev y Kolbasov., 2018, p.424), sin embargo en protección radiológica es más común el uso del miliSievert (1 mSv = 0,001 Sv).

La dosis anual efectiva por inhalación de radón y sus productos de decaimiento se calcula mediante la siguiente ecuación (UNSCEAR, 2000, pp.5-108):

$$DAE = C_{Rn} * F * O * DCF$$

Dónde:

DAE: Dosis anual efectiva.

C_{Rn} : Concentración de radón (Bq/m^3).

F: Factor de equilibrio en interiores para el radón y su progenie (0.4).

O: Tiempo promedio de ocupancia en interiores por año (7000) (h/γ).

DCF: Factor de conversión de la dosis para radón y sus PDR ($9 \times 10^{-6} mSv \times m^3/Bq \times h$).

$$\text{Unidad: } \left(\frac{mSv}{\gamma} \right)$$

La dosis efectiva promedio por año derivada de fuentes naturales por exposición externa (rayos cósmicos y rayos gamma terrestres) e interna (inhalación e ingestión) para una persona es de 2.4 mSv, de los cuales 1.2 mSv corresponden a la dosis efectiva anual media por inhalación (UNSCEAR, 2000, p.5-108). Por otra parte, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda una dosis efectiva anual inferior a 3 mSv/γ, dosis superiores a esta requieren medidas correctivas para disminuir el nivel de radón y el riesgo que conlleva la exposición a este (ICRP, 1993, p.16-18).

1.2.10. Detección de radón en ambientes interiores

La determinación de los niveles de radón y sus descendientes se realiza mediante dos métodos de medida, activos y pasivos, los métodos activos necesitan electricidad ya sea mediante baterías o corriente eléctrica, realizan una lectura directa, miden y registran continuamente la cantidad radón o los productos de su desintegración presentes en el aire; entre los equipos que funcionan a base de este

método están los medidores digitales, las cámaras de ionización y las células de centelleo o de Lucas (EPA, 2002, pp.14-15). A su vez, los métodos pasivos no necesitan electricidad para llevar a cabo su función y requieren de un análisis en laboratorio posterior a su exposición al aire de una vivienda; bajo este método trabajan los detectores de carbón activado y detectores de trazas o de huellas nucleares en estado sólido (EPA, 2002, pp.14-15). El método y equipo usado en un estudio dependerá entre otros factores del costo y el tiempo de medida.

1.2.10.1. *Detector de radón usado en la investigación*

Detector digital de radon - Corentium Home by Airthings

Es un dispositivo con método activo de medición fabricado en Oslo-Noruega, cuenta con un sensor o fotodiodo de silicio calibrado para detectar y registrar partículas alfa en ambientes interiores basándose en el principio de difusión.



Figura 7-1: Medidor de gas radón Corentium Home

Fuente: (PCE Instruments, 2019)

Mecanismo de funcionamiento

El radón y sus descendientes entran al dispositivo mediante los orificios que se encuentran en su cubierta posterior, llegando a una cámara de difusión pasiva, la cual permite el flujo de la muestra de aire a través de un espacio de 0,2 mm hacia el detector, la muestra llena esta cámara en un periodo de 30 a 45 minutos, el detector contabiliza la cantidad de partículas alfa producto de la desintegración del radón y los PDR (la desintegración alfa de la descomposición de los PDR es proporcional a la

concentración de radón en la cámara), y genera pulsos de voltaje que se amplifican, se cuentan y se convierten a las unidades requeridas para mostrarse en la pantalla principal. Para evitar la activación del sensor por partículas que no son de interés el equipo se basa en un algoritmo patentado, desarrollado por su fabricante (Airthings, 2016).

Este dispositivo permite medir el promedio de los niveles de radón a corto plazo: 1-7 días y a largo plazo: hasta 1 año. A partir del momento que se enciende y calibra el equipo proporciona una medida por hora, las cuales se compilan continuamente (Airthings, 2016).

El radón se mide como un promedio, por tanto, el detector se encuentra constantemente recolectando muestras de aire y analizándolas para al cabo de un tiempo proporcionar un promedio de la cantidad de partículas alfa presentes en todas las muestras recogidas, de manera que, cuanto más largo sea el tiempo de medición más precisas serán las lecturas (Airthings, 2016).

Tabla 6-1: Características del detector digital de radón- Corentium Home

Unidad de medida	Rango de medición	Rango de operación	Muestreo	Método de detección
-Métrica: Bq/m^3	-Métrica: 0-9999 Bq/m^3	-Temperatura: 4°C hasta 40°C	Cámara de difusión pasiva	Espectrometría alfa
-Imperial: pCi/L	-Imperial: 0 - 500 pCi/L	-Humedad: Menos del 80%		

Fuente: (Ballance, 2020)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

1.2.11. Técnicas de reducción de los niveles de radón en interiores

Existen varios métodos que pueden ayudar a evitar el ingreso del radón en las viviendas ya existentes o en su defecto a disminuir su concentración, entre estos los más comunes son:

Sellado: Consiste en cubrir grietas y otras aberturas presentes en el piso y paredes de las habitaciones, esto limita el ingreso del radón, generalmente se usa esta técnica en combinación con otras para lograr una reducción más efectiva. No se recomienda usar el sellado sólo ya que no logra reducir los niveles de radón de manera significativa (EPA, 2013, pp.11-13).

Presurización de la construcción: Se basa en usar un ventilador para airear el sótano o las habitaciones del primer piso con la finalidad de generar una mayor presión dentro del hogar para evitar así el ingreso del radón, para alcanzar y mantener la presión suficiente para dicho fin no se

deben dejar abiertas las ventanas ya que esto significaría ingreso del aire exterior, se recomienda considerar el uso de esta técnica solo si otras no han dado efecto ya que implica costos de energía que pueden llegar a ser muy elevados (EPA, 2013, pp.11-13).

Despresurización: Se trata de la instalación de tubos que van desde una arqueta o excavación debajo de la casa pasando por la losa del piso hasta el techo, cuya función es extraer el radón formado y liberarlo hacia la atmósfera sobre la vivienda, donde se diluye. Este sistema puede ser de tiro natural o puede usar un ventilador que facilite y acelere el proceso (EPA, 2013, pp.11-13).

Ventilación natural: Consiste en abrir ventanas, puertas y cualquier conducto de ventilación en el hogar, lo cual permite que el aire exterior ingrese y se mezcle con el aire interior (contaminado) reduciendo la concentración de radón dentro de la vivienda, esta es una solución temporal ya que una vez se cierran las fuentes de ventilación los niveles de radón regresan a sus valores originales en alrededor de 12 horas (EPA, 2013, pp.11-13). Esta técnica podría ser de gran ayuda en lugares donde por cuestiones económicas no se puede aplicar otra.

Revestimiento de paredes: Se puede realizar un revestimiento de las paredes de la vivienda con pintura a base de polímeros, papel tapiz y materiales plásticos como policloruro de vinilo (PVC), poliamida, polietileno, etc. Ésta técnica permite una reducción de hasta 10 veces del ingreso de radón y se puede combinar con otras para lograr una reducción más eficiente. Después de haber realizado el revestimiento de paredes es necesario verificar la reducción de la concentración de radón, de no haber disminuido se debe aplicar un revestimiento adecuado en pisos y sótanos (Arteaga Cepa y Lliguin Vallejo., 2018, pp.38-56).

- Pintado: Para esta técnica se debe usar pintura de esmalte ya que esta posee en su composición resinas químicas sintéticas y polímeros, lo que la hace más resistente que otras formulaciones y permite que al secarse forme una película impermeable que además de proteger el área sobre la que se coloca, impide el paso de gases (Pinturas Super, 2019).

- Tapizado: Consiste en revestir las paredes del inmueble con un papel tapiz que cubra grietas y poros, este se debe escoger considerando sus características y las instrucciones de limpieza y colocación; esta técnica se puede usar en conjunto con otras como el sellado de paredes. En la siguiente tabla se describe las principales características de los tipos de papel tapiz más usados, que ayudarán a seleccionar el que mejor se adapte a las necesidades (Arteaga Cepa y Lliguin Vallejo., 2018, pp.38-56).

Tabla 7-1: Particularidades de diferentes tipos de papel tapiz

Tipo	Características	Dificultad de colocación y limpieza
Papel vinílico	<ul style="list-style-type: none"> - Consiste en una capa de papel recubierta por una de vinilo transparente. - Resistente a la humedad. - Resistentes a la luz. - No poroso. - Puede durar de 10 a 20 años. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sencilla colocación, algunos son autoadheribles y otros se instalan con cola. - De fácil limpieza.
Papel normal	<ul style="list-style-type: none"> - Papel pintado tradicional - Consta de una o dos capas de papel. - Su componente principal es la celulosa. - Poroso. - No durable y poca resistencia a la luz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Su instalación generalmente requiere cola. - No lavables
Papel textil	<ul style="list-style-type: none"> - Poseen un soporte de papel cubierto de un material textil como seda, algodón lino, etc. - Poroso. - Aislante del ruido y humedad. - Costo elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> - De difícil aplicación y limpieza
Papel texturizado	<ul style="list-style-type: none"> - Posee relieves que dan profundidad y contraste a las paredes. - Oculta los defectos de la pared - Se puede pintar sobre él. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difíciles de colocar, con el tiempo empieza a desprenderse y los bordes se doblan. - Lavable.

Fuente: (Samygina, 2016)

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

En este trabajo se usará el primer tipo de papel tapiz mencionado, este se considera el más apropiado para el fin propuesto por sus características favorables y facilidad de implementación.

Conviene especificar que después de la instalación de cualquier técnica de mitigación se debe realizar una medición de radón dentro de los 30 días posteriores pero no antes de 24 horas, para conocer la efectividad del sistema se recomienda que el tiempo de medición sea de uno a siete días, teniendo en cuenta que cualquier fuente de ventilación ha de cerrarse 12 horas antes y permanecerá así durante la medición; es importante mencionar que se debe realizar un seguimiento constante cada año (EPA, 2013, pp.11-13).

1.3. Bases conceptuales

1.3.1. Isótopo 222-Rn

Es el radioisótopo más estable y abundante del gas radón, supone el 80% de su totalidad y se forma a partir del ^{226}Ra mediante una desintegración α . Sus productos de desintegración forman una serie de radionúclidos que decaen a Pb^{206} y su tiempo de vida media es de 3.82 días (LAR, 2011).

1.3.2. Radioisótopo

Sinónimos usados para este término son radionucleido y radionúclido, se trata de un isótopo de un elemento cuyo núcleo es inestable lo que hace que sea radiactivo, se expresa por su símbolo químico acompañado de su masa (García, 2016, pp.25-47).

1.3.3. Concentración de radón

Denominado también nivel de radón es la actividad del gas por unidad de volumen, se expresa en unidades del sistema métrico Bq/m^3 o del sistema imperial pCi/L .

1.3.4. Desintegración alfa

Se da cuando el núcleo de un átomo inestable emite partículas α compuestas por dos protones y dos neutrones, lo que es el equivalente al núcleo de un átomo de helio (^4_2He), la energía de estas partículas varía entre 4 y 10 MeV (García, 2016, pp.25-47). Al perderse dos protones el número atómico “Z” decrece en dos unidades, generándose un nuevo elemento situado en Z-2 en el sistema periódico, mientras que debido a la pérdida de dos neutrones la masa del elemento formado tendrá cuatro unidades menos que el elemento de partida. Las partículas alfa son pesadas, además son intensas pero no penetrantes, de ahí que una hoja de papel o la piel pueden detenerlas, sin embargo, se tornan peligrosas cuando ingresan al cuerpo por inhalación o ingestión, llegando a afectar principalmente a los frágiles tejidos pulmonares (Barros Dios, 2011, pp.27-31).

1.3.5. Tiempo de vida media ($t_{1/2}$)

También denominado periodo de semidesintegración o semivida, es el tiempo necesario para que el número de átomos de una muestra disminuya a la mitad por desintegración, tiene relación con la distancia que alcanza el isótopo desde su fuente antes de desintegrarse, en el caso del ^{222}Rn esta distancia es de 2.2 m y para el ^{220}Rn es de 0.029 m (Tene, 2017, pp.5-16).

1.3.6. Bequerel (Bq)

Unidad usada para medir actividad (cantidad de desintegraciones por unidad de tiempo), un bequerel corresponde a una desintegración por segundo; se emplea generalmente como concentración de actividad en un metro cúbico de aire, es así que, una medida de $24 \text{ Bq}/\text{m}^3$ expresa que 24 átomos se descomponen por segundo en cada metro cúbico de aire (Dorado, 2010, pp.4-13). Cabe mencionar que $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$ equivale a $1 \text{ pCi}/\text{L}$.

1.3.7. Sievert (Sv)

Unidad del sistema internacional que mide el efecto biológico producido por las radiaciones ionizantes en los seres humanos mediante la dosis efectiva de radiación. En protección radiológica es más común el miliSievert ($1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$) y el microSievert ($1 \mu\text{Sv} = 0,000.001 \text{ Sv}$), que representan la milésima y millonésima parte de un Sv respectivamente (Dorado, 2010, pp.4-13).

1.3.8. Remediación:

Consiste en un conjunto de acciones que buscan corregir o dar remedio a la contaminación del medio ambiente (agua, suelo, aire), con el fin de proteger la salud de los seres humanos y el entorno, en este caso abarca la reducción de los niveles de radón en ambientes interiores aplicando ciertas técnicas, para prevenir enfermedades en quienes habitan estos lugares.

1.3.9. Construcción antigua:

En este trabajo hace referencia a viviendas construidas con materiales como bahareque (construcción a base de carrizo entretejido, madera, barro y paja), adobe (mezcla de barro y paja) y piedra, o una mezcla de estos.

1.3.10. Construcción mixta

Se entiende por vivienda de construcción mixta a aquella que en su estructura posee varios materiales, siendo los más comunes ladrillo, bloque, madera, acero y cemento.

1.4. Base legal

Hoy en día Ecuador no cuenta con ninguna normativa en la cual se hable acerca de los niveles de radón permisibles en el aire de los hogares, sin embargo, organizaciones internacionales como la EPA, ICRP y OMS han establecido valores límite para la concentración de este gas en interiores.

La EPA publicó en el 2017 un manual informativo acerca del radón, en este se establece como límite máximo en interiores 4 pCi/L equivalentes a 150 Bq/m^3 , menciona también que la exposición al radón podría ser perjudicial aún en niveles más bajos a este, por tanto, recomienda reducir al máximo cualquier tipo de contacto con este gas para disminuir la probabilidad de contraer cáncer pulmonar (EPA, 2017, pp.1-17).

La OMS en su manual del 2015 sobre radón en interiores, propone como límite de exposición 100 Bq/m^3 , señala además que en caso de no poder alcanzarse dicho nivel debido a las circunstancias concretas del país, éste se puede extender hasta 300 Bq/m^3 como máximo (OMS, 2015, p.3-89).

La ICRP en su publicación número 65 de 1993 acerca de la protección contra el radón en el hogar y trabajo, recomienda un nivel de acción entre $200\text{-}600 \text{ Bq/m}^3$ para la protección radiológica frente a radón en las viviendas (ICRP, 1993, p.16-18).

Para este estudio, se tomará como límite permisible el valor recomendado por la EPA (150 Bq/m^3), este ha sido usado en trabajos anteriores realizados en el país, por tanto, se considera adecuado en función de la problemática y posibilidades propias de este.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de investigación.

En cuanto al método de investigación, este proyecto es de tipo cuantitativo, puesto que, se recolectó datos de las variables planteadas que luego fueron analizados estadísticamente para determinar una correlación entre ellas, de modo que se pueda aceptar o rechazar la hipótesis establecida; según el objetivo, esta investigación se clasificó como aplicada, pues, los conocimientos teóricos adquiridos sobre las técnicas de remediación para reducir los niveles de radón se utilizaron como base para la implementación de los mismos en una población determinada, por otra parte, respecto al nivel de profundidad, es de tipo explicativa, ya que, se utilizó la experimentación para someter a prueba nuestra hipótesis; según la manipulación de las variables, se catalogó como cuasi experimental, dado que, no existió variación de la variable independiente; según la condición de estudio, es una investigación de campo, debido a que los datos fueron tomados en viviendas del cantón Mocha siendo estas un ambiente real no controlado; finalmente, en cuanto al tiempo, es de tipo transversal, ya que, se estudió a una población en un solo punto en el tiempo y se examinó la relación entre las variables de interés.

2.2. Determinación del área de estudio.

El barrio rural Capulispamba pertenece al cantón Mocha, provincia de Tungurahua. Este sector se encuentra ubicado junto a la vía Panamericana Troncal de la Sierra (E35) en el noreste de Mocha a 23 Km del cantón Ambato y está conformado por 77 viviendas, se encuentra a una altura de 3272 m.s.n.m. y se localiza en las siguientes coordenadas:

Latitud Sur: 1°24'31.1"

Longitud Oeste: 78°38'53.9"

Capulispamba limita al norte con el Barrio 10 de Agosto, al sur con el barrio El Pinar, al este con el barrio La Merced y al oeste con el barrio El Rey.



Figura 1-2: Ubicación del barrio Capulispamba en el cantón Mocha.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020



Figura 2-2: Barrio Capulispamba

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

2.3. Población y tamaño de muestra

La investigación se realizó en el barrio Capulispamba perteneciente al cantón Mocha en el cual existen 77 viviendas. En base al número de viviendas que conforman dicho barrio, se calculó el tamaño de la muestra con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Dónde:

N : Población de estudio

Z_{α} : Nivel de confianza (1.65)

p : Probabilidad de éxito (0.5)

q : Probabilidad de fracaso (0.5)

d : Error de estimación (10%)

$$n = \frac{77 * 1.65^2 * 0.5 * 0.5}{(0.10)^2 * (77 - 1) + 1.65^2 * 0.5 * 0.5} = 36.38$$

El tamaño de muestra para esta investigación fue de 36 viviendas (12 por cada material de construcción).

2.4. Selección de la muestra

La selección de la muestra se realizó mediante el método probabilístico aleatorio estratificado al azar, la población estuvo dividida en tres subgrupos siendo estos: viviendas de construcción antigua (adobe y /o bahareque), viviendas edificadas con bloque y viviendas mixtas. Para evitar la influencia de intereses durante esta etapa de la investigación, se asignó un número a cada vivienda de la población en la hoja de cálculo de Excel, donde se realizó un sorteo para muestras aleatorias al azar, obteniendo así la muestra a evaluar.

2.5. Variables

▪ Variable dependiente

Concentración de radón en habitaciones de viviendas del barrio Capulispamba perteneciente al cantón Mocha.

▪ Variable independiente

Técnicas de remediación y material de construcción

2.6. Diseño del experimento

Diseño bifactorial

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + B_j + (\tau B)_{ij} + u_{ijk}; \quad i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, r$$

Dónde:

<p>y_{ijk}: Resultado del tratamiento i-ésimo y j-ésimo de la replicación k-ésima.</p> <p>μ: Efecto constante nombrado media global.</p> <p>τ_i: Efecto generado por el nivel i-ésimo del factor A.</p> <p>B_j: Efecto generado por el nivel j-ésimo del factor B.</p> <p>$(\tau B)_{ij}$: Efecto ocasionado por la interacción entre A×B.</p> <p>u_{ijk}: termino de error.</p>	<p>r: número de repeticiones.</p> <p>n: número de observaciones.</p> <p>a: niveles para el factor A</p> <p>b: niveles para el factor B</p>
---	--

El número de parámetros de este modelo es, como en el modelo de dos factores sin replicación, $ab + 1$, pero en este caso el número de observaciones es abr (Lara Porras, 2000).

Descomposición de la variabilidad

La ecuación básica del análisis de la varianza es (Lara Porras, 2000):

$$\sum_{i,j,k} (y_{ijk} - \bar{y} \dots)^2 = br \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y} \dots)^2 + ar \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y} \dots)^2 + r \sum_{i,j} (y_{ijs} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y} \dots)^2 + \sum_{i,j,k} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2$$

Simbólicamente esta se puede escribir de la siguiente forma

$$SCT = SCA + SCB + SC(AB) + SCR.$$

Estas sumas de cuadrados también se pueden expresar como (Lara Porras, 2000):

- $SCT = \sum_{i,j,k} y_{ijk}^2 - (y_{...}^2)/r$: Suma total de cuadrados
- $SCA = (\sum_i y_{i..}^2)/(br) - (y_{...}^2)/(abr)$: S. C. entre niveles de A.
- $SCB = (\sum_j y_{.j.}^2)/(ar) - (y_{...}^2)/(abr)$: S. C. entre niveles de B.
- $SC(AB) = (\sum_{i,j} y_{ij.}^2)/r - (y_{...}^2)/(abr) - SCA - SCB$: S. C. de la interacción AxB
- $SCR = SCT - SCA - SCB - SC(AB)$: S. C. del error.

A partir de la ecuación básica del ANOVA se pueden construir los cuadrados medios definidos como (Lara Porras, 2000):

- * Cuadrado medio total: $CMT = SCT/(n - 1)$
- * Cuadrado medio de A: $CMA = (SCA)/(a - 1)$
- * Cuadrado medio de B: $CMB = (SCB)/(b - 1)$
- * Cuadrado medio de la interacción A x B: $CM(AB) = (SC(AB))/((a - 1)(b - 1))$
- * Cuadrado medio residual: $CMR = (SCR)/(ab(r - 1))$

Análisis estadístico

El objetivo del análisis es realizar los contrastes de hipótesis nula (Lara Porras, 2000):

- i) $H_{0A} \equiv \tau_1 = \dots = \tau_a = 0$. Es decir, considerando la presencia de las interacciones con el factor B, contrastar si los efectos de los niveles del factor A son nulos. El estadístico de contraste es:

$$F_A = \frac{(SCA)/(a - 1)}{(SCR)/(ab(r - 1))} = \frac{CMA}{CMR} \rightsquigarrow^{H_{0A}} F_{(a-1), ab(r-1)}$$

Se rechaza H_{0A} al nivel α si $F_{\alpha(exp)} > F_{(a-1), ab(r-1)}$

- i) $H_{0B} \equiv \beta_1 = \dots = \beta_b = 0$. Es decir, considerando la presencia de las interacciones con el factor A, contrastar si los efectos de los niveles del factor B son nulos. El estadístico de contraste es:

$$F_B = \frac{(SCB)/(b - 1)}{(SCR)/(ab(r - 1))} = \frac{CMB}{CMR} \rightsquigarrow^{H_{0B}} F_{(b-1), ab(r-1)}$$

Se rechaza H_{0B} al nivel α si $F_{\alpha(exp)} > F_{(b-1),ab(r-1)}$.

$H_{0(AB)} \equiv (\tau\beta)_{ij} = 0$ para todo i, j . Es decir, contrastar si los efectos de las interacciones entre los factores A y B son nulos. El estadístico de contraste es

$$F_{(AB)} = \frac{(SC(AB)) / ((a-1)(b-1))}{(SCR) / (ab(r-1))} = \frac{CM(AB)}{CMR} \rightsquigarrow H_{0(AB)} F_{(a-1)(b-1),ab(r-1)}$$

Se rechaza $H_{0(AB)}$ al nivel α si $F_{\alpha(exp)} > F_{(a-1)(b-1),ab(r-1)}$.

Tabla 1-2: ANOVA para el modelo bifactorial con replica

<i>F. V.</i>	<i>S. C.</i>	<i>G. L.</i>	<i>C. M.</i>	<i>F_{exp}</i>
<i>Factor A</i>	<i>SCA</i>	<i>a-1</i>	<i>CMA</i>	<i>CMA/CMR</i>
<i>Factor B</i>	<i>SCB</i>	<i>b-1</i>	<i>CMA</i>	<i>CMB/CMR</i>
<i>Interacción</i>	<i>SC(AB)</i>	<i>(a-1)(b-1)</i>	<i>CM(AB)</i>	<i>CM(AB)/CMR</i>
<i>Residual</i>	<i>SCR</i>	<i>ab(r-1)</i>	<i>CMR</i>	
<i>TOTAL</i>	<i>SCT</i>	<i>abr-1</i>	<i>CMT</i>	

Fuente: Lara Porras, 2000

Tabla 2-2: Combinaciones del diseño cuasi-experimental.

		MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN		
		A	B	M
TÉCNICA DE REMEDIACIÓN	I	A1I	B1I	M1I
		A2I	B2I	M2I
		A3I	B3I	M3I
		A4I	B4I	M4I
	T	A5T	B5T	M5T
		A6T	B6T	M6T
		A7T	B7T	M7T
		A8T	B8T	M8T
	P	A9P	B9P	M9P
		A10P	B10P	M10P
		A11P	B11P	M11P
		A12P	B12P	M12P

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Dónde:

- A, B, M representan viviendas de construcción antigua, bloque y mixtas, respectivamente.

- I, T, P representan las técnicas de aireación, tapizado y pintado, correspondientemente.
- 1-12 son el número de vivienda a la cual se aplicará el tratamiento.

2.7. Metodología

2.7.1. Requisitos de las unidades experimentales

- Construcciones antiguas (adobe y/o bahareque), de bloque o mixtas, de uno o dos pisos de altura (no se tomará como variable la altura del piso).
- Un área promedio de $25\text{m}^2 \pm 2$.
- Ventanas con contacto al exterior.
- Piso de cualquier tipo.
- Habitaciones con ventanas y puertas que permanezcan cerradas la mayor parte del tiempo (excepto en la técnica de aireación donde la prueba lo amerita).
- El equipo de medición debe colocarse apartado de cualquier electrodoméstico.

2.7.2. Proceso del experimento

Para la toma de mediciones antes y después de la remediación (excepto para la aireación) el detector permaneció por 48 horas en las habitaciones seleccionadas de las 36 viviendas. Durante las mediciones el detector fue colocado a 25cm de la pared, a 50cm del piso y a 150cm de las fuentes de ventilación o de electrodomésticos.

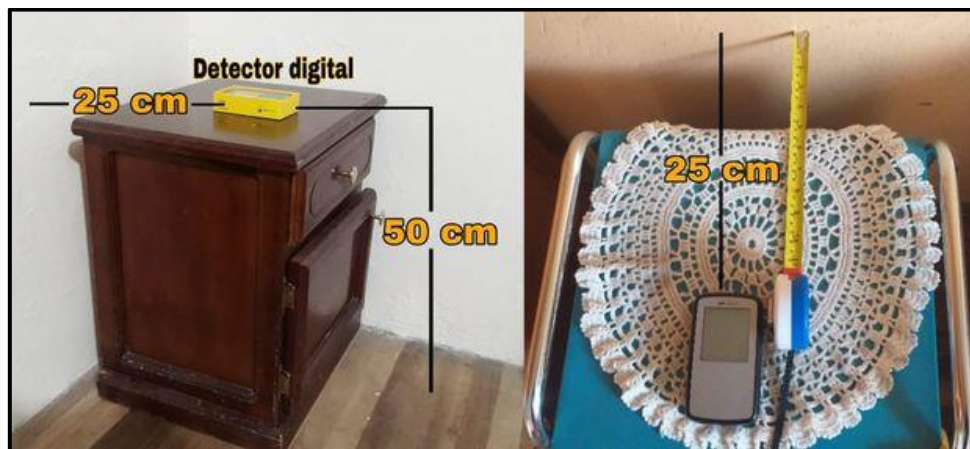


Figura 3-2: Modelo de instalación del detector

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

La primera medición se realizó en tres habitaciones de cada vivienda, de las cuales se eligió aquellas en las que se obtuvo mayor nivel de radón, en estas, se sellaron las grietas de las paredes usando masilla y posteriormente se ejecutaron las siguientes técnicas de remediación:

- **Aireación**

Esta técnica consistió en mantener abiertas las puertas y ventanas de la habitación durante 8 horas seguidas, transcurrido este tiempo, las fuentes de ventilación fueron cerradas y se procedió a hacer la segunda medición, en esta, el detector permaneció únicamente por un periodo de 12 horas, puesto que, la aireación proporciona una solución temporal, por tanto, la concentración de radón vuelve a sus valores normales al cabo de pocas horas.

- **Tapizado**

En esta técnica se retiró de las paredes cualquier rastro de polvo para que la goma tenga buena adherencia, posteriormente, se colocó el papel tapiz vinílico y se fijó usando una regleta de manera con filos redondos, se dejó secar por 24 horas hasta que este se adhiera adecuadamente a la pared, finalmente, se tomó la segunda concentración de radón.

- **Pintado**

Al igual que en el tapizado se lijaron y limpiaron las paredes para proceder a pintar con esmalte, una vez seco, se colocó el detector para la segunda medición.

Cabe mencionar que, la remediación se realizó únicamente en las paredes de las habitaciones por cuestión de costos y facilidad de implementación de técnicas, además, en investigaciones anteriores se demostró su efectividad en la reducción de radón.

2.7.3. Esquema del experimento

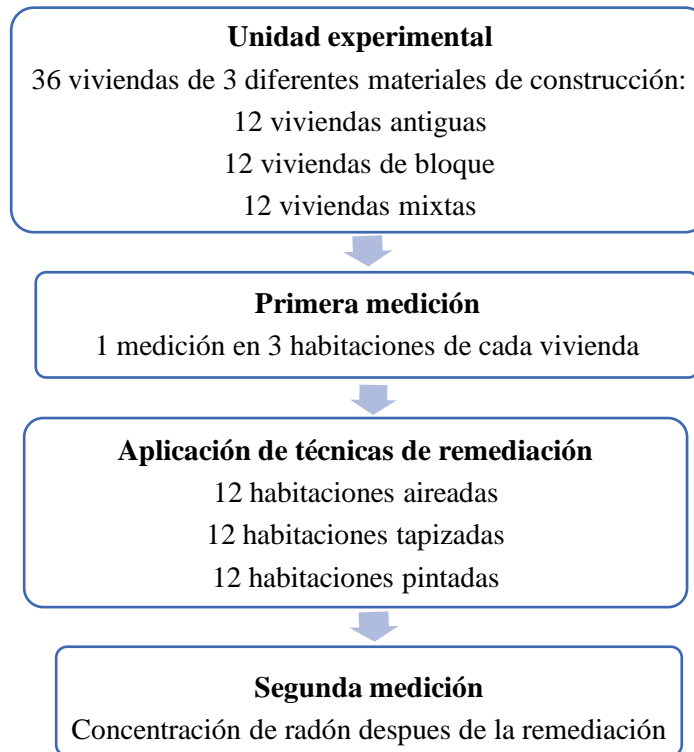


Figura 4-2: Esquema Experimental

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 3-2: Ficha para la recolección de datos de viviendas antiguas.

Viviendas	Habitación 1 Bq/m ³	Habitación 2 Bq/m ³	Habitación 3 Bq/m ³
A1			
A2			
A3			
A4			
A5			
A6			
A8			
A9			
A10			
A11			
A12			

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 4-2: Ficha para la recolección de datos de viviendas de bloque.

Viviendas	Habitación 1 Bq/m³	Habitación 2 Bq/m³	Habitación 3 Bq/m³
B1			
B2			
B3			
B4			
B5			
B6			
B7			
B8			
B9			
B10			
B11			
B12			

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 5-2: Ficha para la recolección de datos de viviendas mixtas.

Viviendas	Habitación 1 Bq/m³	Habitación 2 Bq/m³	Habitación 3 Bq/m³
M1			
M2			
M3			
M4			
M5			
M6			
M7			
M8			
M9			
M10			
M11			
M12			

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

2.8. Materiales y equipos

Papel Tapiz vinílico

El papel tapiz usado está fabricado con papel y vinilo lo que hace que su superficie sea lavable, de manera que, se puede instalar en habitaciones, cocinas, cuartos de baño, escaleras y zonas de mucha circulación.



Figura 5-2: Papel Tapiz

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

Pintura de Esmalte

Posee en su composición resinas químicas sintéticas y polímeros, lo que la hace más resistente que otras formulaciones y permite que al secarse forme una película impermeable que además de proteger el área sobre la que se coloca, impide el paso de gases.



Figura 6-2: Pintura esmalte.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Masilla

Es una pasta blanca cremosa de muy buena manejabilidad que se puede aplicar para cubrir grietas o imperfecciones en las paredes, una vez que se aplica posee un buen acabado y recibe fácilmente la pintura o el papel tapiz.



Figura 7-2: Masilla en polvo.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Rodillos

Son estructuras metálicas con un doble que sujeta y facilita el giro de un cilindro, en el extremo presenta un mango al cual se le añaden extensores para alcanzar superficies elevadas. El cilindro está elaborado de distintos materiales dependiendo del uso y el acabado que se desee obtener, este instrumento permite cubrir con mayor facilidad una gran superficie, aunque, siempre se debe acompañar con una brocha para cubrir ciertas zonas y obtener un acabado de calidad (Junta de comunidades de Castilla-La Mancha, 2019, p. 27-32).



Figura 8-2: Rodillos de felpa

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Brochas

Son utensilios elaborados con cerdas unidas en forma de cola de caballo que se atan a una manilla con la finalidad de ser utilizados para aplicar pintura, barnices, pastas, etc., sobre superficies de cualquier tipo. Las brochas de cerdas naturales se utilizan para acabados lisos, mientras que, las brochas de cerdas sintéticas se emplean para superficies no muy lisas como, por ejemplo, en paredes. (Junta de comunidades de Castilla-La Mancha, 2019, p. 27-32)



Figura 9-2: Brochas de cerdas sintéticas

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Espátulas

Son herramientas construidas por una lámina de metal sujeta a un mango que se usa para colocar productos de recubrimiento sobre imperfecciones, raspar pintura, papel o grietas viejas. (Junta de comunidades de Castilla-La Mancha, 2019, p. 27-32)



Figura 10-2: Espátulas

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

Goma Blanca

Es un adhesivo en estado líquido que tiene diversos usos, en este caso se empleó para adherir el papel tapiz a las paredes de las distintas habitaciones.



Figura 11-2: Goma blanca.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

Detector digital de radon - Corentium Home by Airthings

Es un dispositivo con método activo de medición, cuenta con un sensor o fotodiodo de silicio calibrado para detectar y registrar partículas alfa en ambientes interiores basándose en el principio de difusión.



Figura 12-2: Detectores de Radón

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

CAPÍTULO III

3. MARCO DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis estadístico inferencial

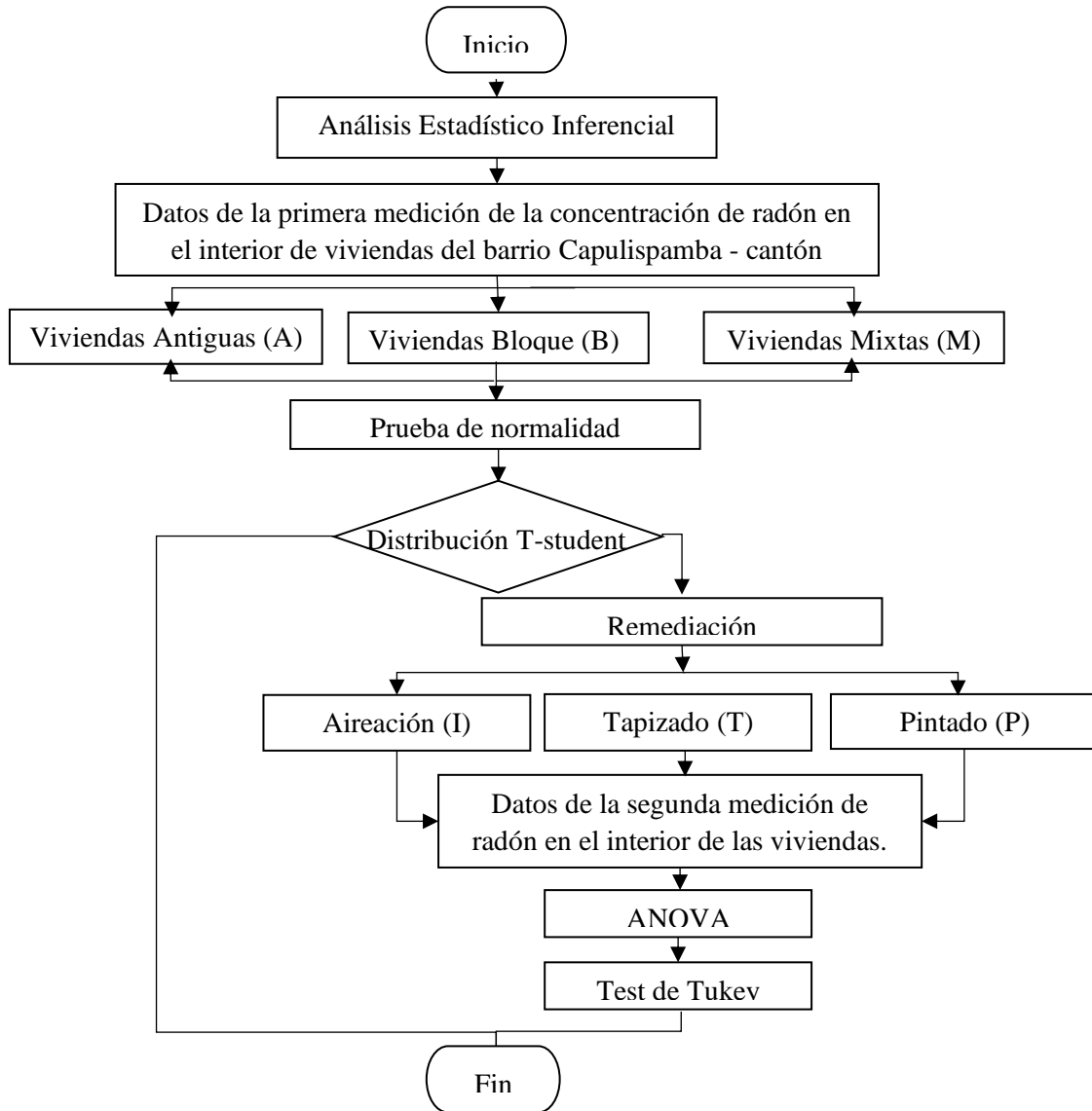


Gráfico 1-3: Flujograma del análisis estadístico inferencial de la investigación.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

El análisis estadístico inferencial hace base fundamental en la selección y ejecución de metodologías adecuadas, que proporcionan una inferencia estadística, con la finalidad de satisfacer ciertas necesidades predeterminadas por el investigador; bajo este contexto, para el desarrollo del análisis estadístico inferencial de la presente investigación, se efectuará las actividades descritas en el gráfico 1-3, estas se realizarán de manera ordenada y en un número finito de procesos.

3.2. Primera medición de la concentración de radón en los tres tipos de vivienda.

Tabla 1-3: Mediciones de radón en el interior de las viviendas de construcción antigua.

Viviendas	Habitación 1 (Bq/m ³)	Habitación 2 (Bq/m ³)	Habitación 3 (Bq/m ³)	μ
A1	526	539	533	532,667
A2	561	564	577	567,333
A3	566	584	555	568,333
A4	542	537	559	546
A5	535	551	539	541,667
A6	498	515	491	501,333
A7	569	549	554	557,333
A8	561	567	574	567,333
A9	533	528	534	531,667
A10	534	549	536	539,667
A11	554	564	551	556,333
A12	498	491	499	496

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 2-3: Mediciones de radón en el interior de las viviendas de bloque.

Viviendas	Habitación 1 (Bq/m ³)	Habitación 2 (Bq/m ³)	Habitación 3 (Bq/m ³)	μ
B1	359	349	330	346
B2	430	420	414	421,333
B3	386	390	381	385,667
B4	400	381	390	390,333
B5	377	380	392	383
B6	369	352	340	353,667
B7	337	304	333	324,667
B8	414	399	404	405,667
B9	377	370	388	378,333
B10	490	488	480	486
B11	388	387	363	379,333
B12	404	374	380	386

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 3-3: Mediciones de radón en el interior de las viviendas de construcción mixta.

Viviendas	Habitación 1 (Bq/m ³)	Habitación 2 (Bq/m ³)	Habitación 3 (Bq/m ³)	μ
M1	303	297	284	294,667
M2	294	299	269	287,333
M3	270	255	240	255
M4	290	273	279	280,667
M5	239	220	242	233,667
M6	237	226	255	239,333
M7	233	230	240	234,333
M8	320	312	338	323,333
M9	242	267	245	251,333
M10	244	259	247	250
M11	221	245	219	228,333
M12	212	228	222	220,667

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

En las tablas 1-3, 2-3 y 3-3, se muestran los datos de campo obtenidos en una muestra de 36 viviendas (12 por cada material de construcción) situadas en el Barrio Capulispamba del Cantón Mocha, cabe mencionar que, para cada una de estas se tomaron tres mediciones correspondientes a diferentes habitaciones, razón por la cual, se realizó un promedio (μ) que se considera dato representativo del nivel de radón de cada inmueble.

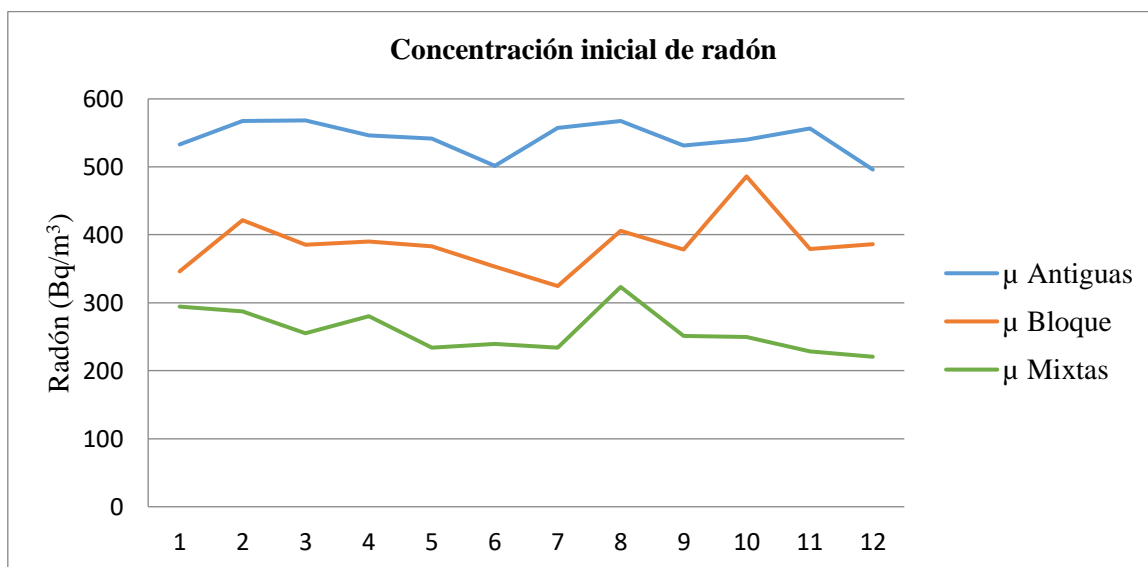


Gráfico 2-3: Representación de las primeras mediciones en los tres tipos de viviendas evaluadas.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

En el gráfico 2-3, se aprecia que la concentración de radón es mayor en viviendas de construcción antigua, edificaciones cuyas paredes son mayoritariamente de bahareque y en menor cantidad de

adobe, el componente principal de estos materiales es tierra con un contenido del 60% de arcilla (Pinos Sarmiento y Baculima Armijos., 2014, p.13-24); como se observa en la tabla 3-1 la arcilla es una roca sedimentaria con un alto contenido de U^{238} , cuya desintegración radiactiva da origen al Rn^{222} y sus PDR, además, debido al largo tiempo que llevan construidas y a las desventajas propias de estos materiales, como su vulnerabilidad a la humedad y erosión, escasa resistencia a los esfuerzos y contracción al secarse (Pinos Sarmiento y Baculima Armijos., 2014, pp.13-24), este tipo de viviendas presentaron mayor cantidad de grietas por donde se facilita el ingreso del gas en cuestión, cabe mencionar que, esta clase de domicilios no cuenta con soleras o losas de hormigón lo que también incrementa su exposición.

3.2.1. Prueba de normalidad

Las pruebas paramétricas asumen distribuciones estadísticas dependientes de los datos, por tanto, para que el resultado sea fiable se debe cumplir algunas condiciones de validez, en este caso se trabajó con una sola muestra, de modo que, se verificó el supuesto de normalidad aplicando la prueba de Shapiro-Wilk usada cuando la muestra es menor a 50.

Planteamiento de hipótesis:

H₀= Los datos siguen una distribución normal.

H_a= Los datos siguen una distribución distinta a la normal.

Tabla 4-3: Prueba de normalidad Shapiro-Wilk

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	tipo de material	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
concentracionradon	adobe	,166	12	,200*	,890	12	,119
	bloque	,214	12	,135	,904	12	,180
	mixtas	,207	12	,163	,914	12	,238

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Como se puede observar en la tabla 4-3, el p-valor (Sig.) es mayor a la significancia de 0,05, razón por la cual, se acepta la hipótesis nula concluyendo que los datos provienen de una distribución normal, por tanto, se da paso a las pruebas paramétricas.

3.2.2. Distribución T-student

Posterior a la toma de datos y comprobación de normalidad se procede a realizar la distribución T-student, para comparar la media de los datos de la concentración de radón en el interior de los tres tipos de viviendas vs el valor medio permisible de radón propuesto por la EPA igual a 150 Bq/m³, de esta manera se tiene un análisis cuantitativo científico de las diferencias de las medias.

Planteamiento de hipótesis:

H₀: $\mu \leq 150$

La media de los datos de la concentración de radón medida es menor o igual a 150 Bq/m³.

H_a: $\mu > 150$

La media de los datos de campo de la concentración de radón es mayor a 150 Bq/m³.

La fórmula empleada para este efecto es:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{x} : Media muestral.

μ : Media poblacional.

s : Desviación estándar muestral.

n : Muestra

Tabla 5-3: Prueba T- student para los datos de la primera medición de radón en el interior de los tres tipos de vivienda.

Prueba T- student para una muestra			
$\alpha= 0.05$			
	Viviendas A	Viviendas B	Viviendas M
Media	542,139	386,667	258,222
Desviación estándar	24,126	40,641	31,458
Observaciones	12	12	12
Grados de libertad	11	11	11
t experimental	56,305	20,173	11,921
Valor crítico de t	1,796	1,796	1,796
p-valor	3,42E-15	2,44E-10	6,22E-08

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

En la tabla 5-3, se muestran los valores más relevantes obtenidos mediante la prueba T-student, de manera que, en base al valor crítico de t se establece el siguiente intervalo de confianza:

$$-1,796 < t < 1,796$$

En los tres casos el estadístico de prueba calculado (t experimental) no está dentro del intervalo de confianza propuesto y el p-valor es menor que el nivel de significancia de 0,05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula con una confiabilidad de 95% y se concluye que la media de los datos de las mediciones de la concentración de radón en el interior de los tres tipos de viviendas es mayor al límite permisible de 150 Bq/m³, motivo por el cual, se procede a realizar la remediación mediante tres tipos de tratamientos.

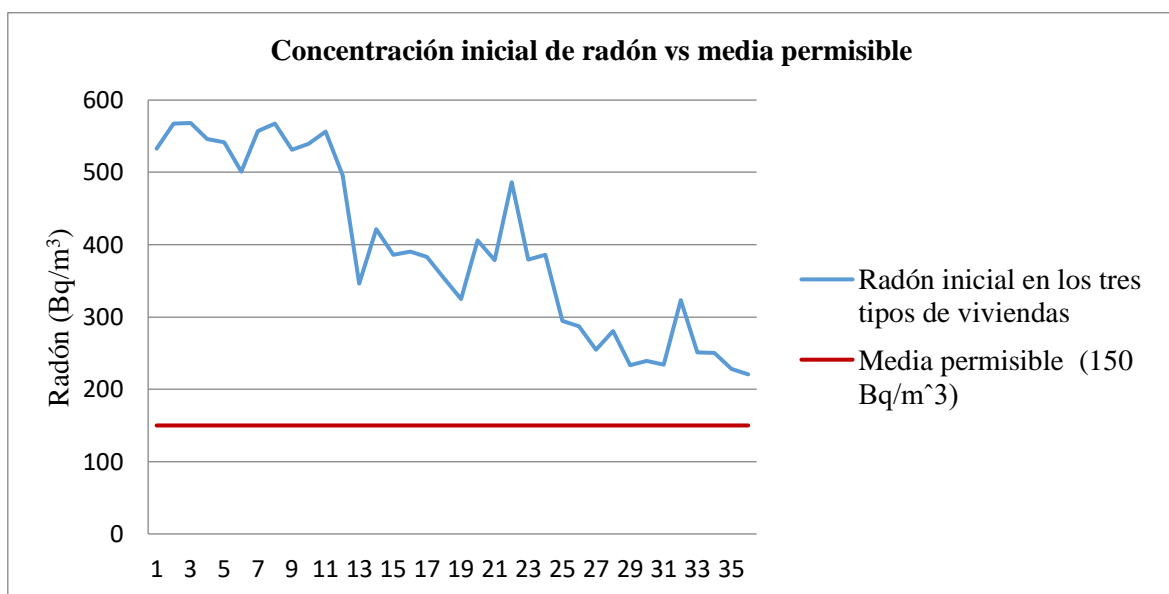


Gráfico 3-3: Datos iniciales de la concentración de radón en las viviendas estudiadas vs media permisible de radón.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

El gráfico 3-3, corrobora la conclusión obtenida en la prueba T, ya que en este se aprecia a simple vista que los datos de la concentración de radón obtenidos en cada una de las viviendas son superiores a la media permitida por la EPA.

3.3. Remediación y segunda medición de radón en los tres tipos de vivienda.

La remediación consistió en aplicar tres tipos de tratamientos, aireación (I), tapizado (T) y pintado (P), para disminuir la concentración de radón en la habitación que presentó mayor concentración de este gas por vivienda, posterior a estas intervenciones se tomaron los datos experimentales con los cuales se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando un modelo bifactorial.

Tabla 6-3: Comparación de la concentración inicial y final de radón en viviendas antiguas.

Viviendas	Concentración inicial (Bq/m ³)	Concentración final (Bq/m ³)
A1I	539	94
A2I	577	100
A3I	584	101
A4I	559	99
A5T	535	77
A6T	515	76
A7T	569	83
A8T	574	81
A9P	534	94
A10P	549	96
A11P	564	99
A12P	499	88

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 7-3: Comparación de la concentración inicial y final de radón de las viviendas de bloque.

Viviendas	Concentración inicial (Bq/m ³)	Concentración final (Bq/m ³)
B1I	359	61
B2I	430	79
B3I	390	67
B4I	400	69
B5T	392	59
B6T	369	55
B7T	337	50
B8T	414	61
B9P	370	65
B10P	490	86
B11P	388	68
B12P	404	71

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 8-3: Comparación de la concentración inicial y final de radón de las viviendas mixtas.

Viviendas	Concentración inicial (Bq/m ³)	Concentración final (Bq/m ³)
M1I	303	52
M2I	299	53
M3I	270	48
M4I	290	51
M5T	242	35
M6T	255	39
M7T	240	38
M8T	338	51
M9P	267	46
M10P	259	45
M11P	245	42
M12P	228	40

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

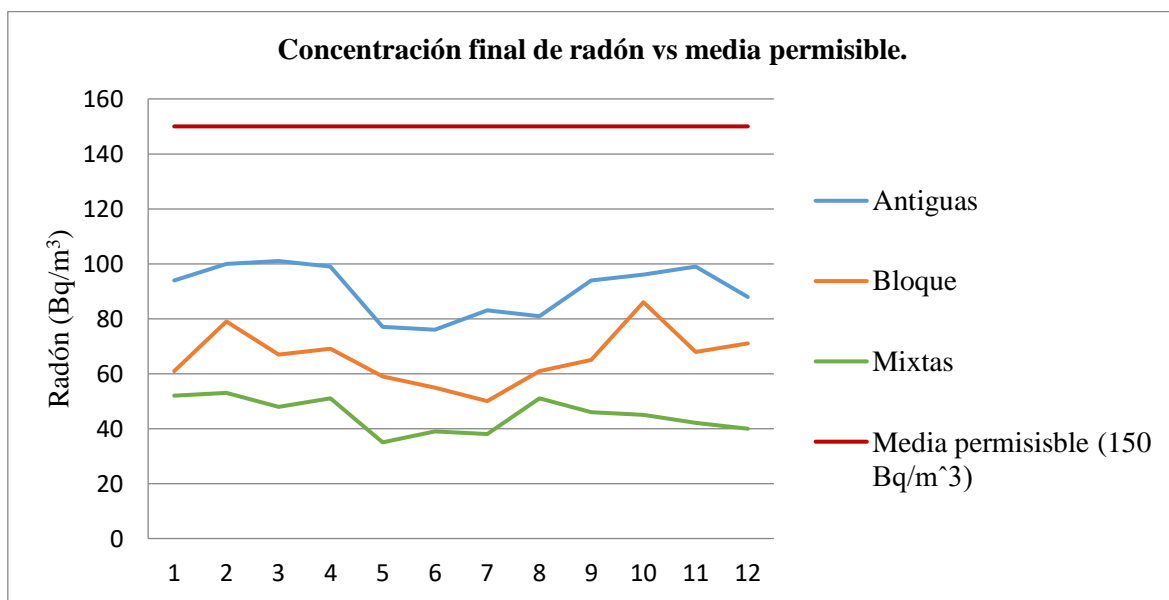


Gráfico 4-3: Datos de la concentración final de radón en las viviendas evaluadas vs media permisible de radón.

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

En el gráfico 4-3, se aprecia los datos de radón obtenidos en cada una de las viviendas dependiendo de la categoría establecida, en los tres tipos de viviendas se observa una disminución de los niveles de radón por debajo del límite establecido de 150Bq/m³.

3.3.1. ANOVA bifactorial con replicación

Posterior a la remediación se recolectaron los datos experimentales con los cuales se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando un modelo bifactorial, para determinar la influencia de las técnicas de remediación (Factor A) y de los materiales de construcción (Factor B) en la reducción de radón.

El modelo estadístico para este diseño como se explicó anteriormente es:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + u_{ijk}$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, r$$

Las hipótesis de interés para los tres efectos son:

- **H0A** = $\tau_1 = \dots = \tau_a = 0$.
La técnica de remediación no tiene influencia en la disminución de la concentración de radón.
- **H1A** = $\tau_i \neq 0$ para algún i
La técnica de remediación influye en la disminución de la concentración de radón.
- **H0B** = $\beta_1 = \dots = \beta_b = 0$.
El tipo de material de construcción no influye en la disminución de los niveles de radón.
- **H1B** = $\beta_i \neq 0$ para algún i
El tipo de material de construcción ejerce influencia en la reducción de los niveles de radón.
- **H0(AB)** = $(\tau\beta)_{ij} = 0$ para todo ij
El material de construcción y la técnica de remediación no tienen efecto sobre la reducción de los niveles de radón.
- **H1(AB)** = $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$ para algún ij
El material de construcción y la técnica de remediación ejercen efecto sobre la disminución de los niveles de radón.

Tabla 9-3: Modelo bifactorial con replicaciones para los datos de las mediciones de radón.

FACTOR A: TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN	FACTOR B: TIPO DE MATERIAL		
	Antiguas (A)	Bloque (B)	Mixtas (M)
Aireación (I)	94	61	52
	100	79	53
	101	67	48
	99	69	51
Tapizado (T)	77	59	35
	76	55	39
	83	50	38
	81	61	51
Pintado (P)	94	65	46
	96	86	45
	99	68	42
	88	71	40

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

$$n = a*b*r = 3*3*4=36$$

En la tabla 9-3, se presenta los datos experimentales de la concentración de radón para todas las posibles combinaciones de los tres niveles de cada factor, en este modelo, $a = 3$, $b = 3$ y $r = 4$, entonces $n = 36$ observaciones.

Tabla 10-3: Datos para el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo.

RESUMEN		Antiguas (A)	Bloque (B)	Mixtas (M)	Total
Aireación (I)	Cuenta	4	4	4	12
	Suma	69,775	69,793	70,251	209,819
	Promedio	17,444	17,448	17,563	17,485
	Varianza	0,035	0,391	0,078	0,141
Tapizado (T)	Cuenta	4	4	4	12
	Suma	57,847	59,527	60,678	178,052
	Promedio	14,462	14,882	15,169	14,838
	Varianza	0,077	0,018	0,321	0,205
Pintado (P)	Cuenta	4	4	4	12
	Suma	70,277	70,218	69,289	209,784
	Promedio	17,569	17,554	17,322	17,482
	Varianza	0,004	0,000	0,031	0,024
Total	Cuenta	12	12	12	
	Suma	197,899	199,538	200,218	
	Promedio	16,491	16,628	16,685	
	Varianza	2,282	1,777	1,380	

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Tabla 11-3: ANOVA para el modelo bifactorial con replicación.

ANÁLISIS DE VARIANZA				
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad
Muestra	56,002	2	28,001	0,000
Columnas	0,237	2	0,118	0,342
Interacción	0,967	4	0,242	0,087
Dentro del grupo	2,866	27	0,106	
Total	60,072	35		

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

En base a la tabla 11-3, que muestra los valores obtenidos mediante el análisis ANOVA, se pudo verificar que, en el caso del factor A, el p-valor es menor a la significancia de 0,05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula con una confiabilidad de 95% y se concluye que existe diferencia significativa entre al menos dos de las medias analizadas, de manera que, las técnicas de remediación influyen en la disminución de los niveles de radón; por otra parte, para el factor B y para la interacción de factores, el p-valor es mayor a la significancia, en consecuencia, se acepta las hipótesis nulas y se concluye que las medias no son significativamente diferentes, de ahí que, el tipo de material de construcción y la interacción entre este y la técnica de remediación no ejercen efecto sobre la disminución de los niveles de radón.

3.3.2. Prueba de Tukey

Como se muestra en el apartado anterior existen diferencias significativas entre al menos dos de las medias del factor A, por tanto, se empleó la prueba de Tukey al 95% de confianza para determinar cuál de ellas es diferente.

Tabla 12-3: Promedio de las concentraciones obtenidas con las técnicas de remediación.

	Antiguas (A)	Bloque (B)	Mixtas (M)	μ
Aireación (I)	98,500	69,000	51,000	72,833
Tapizado (T)	79,250	56,250	40,750	58,750
Pintado (P)	94,250	72,500	43,250	70,000

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

En la tabla 12-3, se muestran los promedios de los tratamientos de remediación con los cuales se ejecutará la comparación de rangos múltiples.

Tabla 13-3: Análisis Tukey

T0.05	9.609
q	3.505
CME	30.065
n	12
α	0.05

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

La tabla de F-Fisher proporciona el valor de $q_{0.05(3,27)} = 3.505$, posteriormente, para el cálculo de T0.05 se reemplazan los valores de la tabla 13-3 en la siguiente fórmula, obteniéndose un resultado de 5,548.

$$W = q_{(n,gl,\alpha)} \times \sqrt{\frac{CME}{r}}$$

Dónde:

q: amplitud total estudentizada, se encuentra en tablas en función de:

α: nivel de significancia

gl: grados de libertad

n: número de tratamientos

CME: Cuadrado medio del error

r: número de repeticiones (4)

El análisis se realiza comparando los promedios de las técnicas empleadas (Factor A) con el resultado de la prueba Tukey. De las comparaciones por pares se obtiene la tabla 14-3.

Tabla 14-3: Comparaciones o pruebas de rango múltiples para las técnicas de remediación.

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
μ1-μ2	72,833-58,750= 14.083 > 9.609	Significativa
μ1-μ3	72,833-70,000= 2.833 < 9.609	No significativa
μ2-μ3	58,750-70,000= 11.250 > 9.609	Significativa

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

Con este análisis se concluye que:

- Aireación (I) ≠ Tapizado (T) (existe diferencia significativa entre las medias de estas técnicas).
- Aireación (I) = Pintado (P) (no se observa diferencia significativa entre las medias).
- Tapizado (T) ≠ Pintado (P) (existe diferencia significativa entre las medias de estas técnicas).

De manera que, tanto el método de aireación como pintado ofrecen similares resultados en cuanto a la reducción de radón, mientras que, el tapizado proporciona un nivel de remediación diferente a los demás.

Tabla 15-3: Porcentajes de reducción

Material de construcción	Técnicas de Remediación			% de reducción
	Aireación	Tapizado	Pintado	
Antigua	82,558	85,545	82,432	83,512
Bloque	82,52	85,119	82,445	83,361
Mixta	82,444	84,837	82,683	83,321
% de reducción	82,507	85,167	82,520	

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020

En la tabla 15-3, se muestran los porcentajes de reducción obtenidos tanto para los métodos de remediación como para el material de construcción, concluyendo que, el método con el cual se obtuvo mejores resultados es el tapizado, ya que, como se mencionó en capítulos anteriores, el material usado para este fin está compuesto por una capa de papel recubierta con una de vinilo transparente, que al no ser poroso evita el ingreso tanto del radón exterior que se filtra por las grietas como de las partículas alfa y radón proveniente de la desintegración radiactiva del radio presente en el material de construcción de las paredes.

Conviene recordar que, durante la formación del radón y sus PDR se liberan partículas alfa, mismas que son las menos penetrantes, de manera que, una hoja de papel puede detenerlas (Barros Dios, 2011, pp.27-31), razón por la cual, tanto el papel tapiz como la capa de esmalte pueden actuar como barrera impidiendo el ingreso de estas, ahora bien, el espesor de la capa de esmalte es menor que el del tapiz, además, su aplicación puede no ser uniforme sobre el material de construcción e incluso puede no llegar a cubrir en su totalidad todas las imperfecciones. Hay que destacar que, las tres técnicas de reducción se usaron en combinación con el sellado de grietas, lo que mejora su eficiencia. Aunque en todas las viviendas se produjo una disminución de radón, en aquellas de construcción antigua se observó un porcentaje de reducción ligeramente superior, como se señaló anteriormente, se trata principalmente de viviendas cuyas paredes al tener como componente principal la tierra, poseen una

gran cantidad de fisuras y grietas, de manera que, al tapar estas con masilla y colocar la pintura o el tapiz, tanto dichas imperfecciones como el bahareque quedan cubiertos, en consecuencia, el ingreso de radón exterior y aquel que pudiese provenir del material de construcción es menor, además, las fibras vegetales (paja) que forman parte de la mezcla con que se elaboran las paredes están dispuestas de manera irregular, lo que ayuda a que el aire circule (Pinos Sarmiento y Baculima Armijos., 2014, p.13-24); cabe mencionar que este material de construcción tiene una gran porosidad y capacidad de filtrar el aire exterior, lo que beneficia durante el tratamiento de aireación (Ramírez, 2017).

Resultados similares se obtuvieron en un estudio realizado en el barrio La Macarena, cantón Ambato, donde el porcentaje de reducción para el tratamiento de aireación es de 84,02 %, para pintado de 84,21 % y para tapizado 89,61 % (Ramos Flores, 2008), de igual manera, en la investigación realizada en la parroquia “Victoria del Portete”, cantón Cuenca, se alcanzó una disminución del 83,85 % y 85,30%, con las técnicas de aireación y tapizado, respectivamente. (Arteaga Cepa y Lliguin Vallejo., 2018, pp.38-56)

3.4. Dosis anual efectiva

La dosis anual efectiva se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$DAE = C_{Rn} * F * O * DCF$$

Tabla 16-3. Estimación de dosis anual efectiva

	Promedio sin remediar (Bq/m³)	Dosis anual efectiva sin remediar (mSv /Y)	Promedio remediado (Bq/m³)	Dosis anual efectiva con remediación (mSv /Y)
Antiguas	549,833	13,856	90,667	2,285
Bloque	395,250	9,960	65,917	1,661
Mixta	269,667	6,795	45,000	1,134

Realizado por: Caluña Alejandra; Obando Johana, 2020.

Como se puede observar en la tabla 16-3, el cálculo de la dosis anual efectiva previa remediación en los tres tipos de viviendas estudiadas es superior al promedio mundial por inhalación de 1,2 mSv/ Y (UNSCEAR, 2000, p.5-108) y al nivel de acción de 3 mSv /Y recomendado por la ICRP. Posterior a la remediación, estos valores disminuyen notablemente a una dosis aceptable.

CONCLUSIONES

- Se monitoreó la concentración de radón en viviendas de construcción antigua, de bloque y mixtas ubicadas en el cantón Mocha, “barrio Capulispamba”, para este fin, se utilizó un detector digital con método activo de medición. Los datos recolectados mostraron que la concentración de radón en todas las viviendas se encontraba sobre el límite permisible propuesto por la EPA de 150 Bq/m³, no obstante, las viviendas antiguas fueron las que presentaron índices más elevados de radón con un promedio de 542,139 Bq/m³.
- Se aplicaron las técnicas de aireación, tapizado o pintado en la habitación cuya concentración de radón fue más elevada que las otras evaluadas en cada vivienda, con las tres técnicas se logró reducir los niveles de radón por debajo del límite de 150 Bq/m³ independientemente del material de construcción. Los porcentajes de reducción que proporcionaron las técnicas empleadas fueron de 82,507 %, 85,167 % y 82,520 %, respectivamente, siendo el más efectivo el tapizado.
- Se determinó la dosis anual efectiva a la cual están expuestos los habitantes de las viviendas, antes de la remediación se obtuvo una dosis de 13, 850 mSv/Y para las construcciones antiguas; 9,960 mSv/Y para las de bloque y 6,795 mSv/Y para las mixtas, luego de los tratamientos, dichos valores fueron de 2,285 mSv/Y, 1,661 mSv/Y, 1,134 mSv/Y , correspondientemente, si bien, los dos primeros fueron superiores a la media mundial por inhalación de 1,2 mSv/Y, en los tres casos la dosis calculada está por debajo del nivel de acción de 3 mSv/Y recomendado por la ICRP, con lo cual, se reduce el riesgo al que están expuestos los habitantes.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar técnicas de protección elevada como los sistemas de extracción forzada, sistemas de presurización, sistemas de renovación de aire interior, etc., para lograr mediciones de radón por debajo de los límites permisibles en el interior de toda la vivienda, ya que las técnicas empleadas en este estudio ofrecen protección únicamente en el área tratada.
- Es necesario realizar estudios similares en otras zonas dentro de la provincia y el país, de manera que, con los datos obtenidos se pueda evaluar la situación y en caso de ser necesario aplicar medidas que permitan precautelar la salud de la población. Se recomienda además realizar mediciones a largo plazo (un año) para obtener resultados más certeros de la concentración de radón en las viviendas evaluadas.
- Se debe realizar investigaciones sobre radiación procedente de los materiales de construcción, suelo y agua que se encuentran en la zona estudiada, de modo que, se pueda determinar las razones de los elevados niveles de radón detectados.
- Puesto que las tres técnicas probadas dieron buenos resultados, por cuestiones económicas, se recomienda el tapizado para los casos más críticos, mientras que en casos más leves se puede usar la aireación, sin embargo, se debe tener en cuenta que la efectividad de este tratamiento dura un corto lapso de tiempo.
- Durante la manipulación de los detectores de radón se debe cuidar que estos no estén expuestos directamente a la luz solar, a humedad o polvo para evitar daños en el equipo y la alteración en la lectura de los datos.
- Debido al desconocimiento de la población con respecto a este tema, se recomienda crear un plan informativo sobre el radón-222 y los efectos que tiene en la salud humana cuando existe una exposición prolongada a elevadas concentraciones de este.
- Para evitar inconvenientes con los moradores del sector en estudio se debe explicar adecuadamente la finalidad que persigue la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

AIRTHINGS. *Radon Detector - How We Make the Corentium Home* [en línea]. 2016. [Consulta: 23 junio 2020]. Disponible en: <https://www.airthings.com/resources/radon-detector>.

ARTEAGA CEPA, César., & LLIGUIN VALLEJO, Carlos. Reducción de los niveles de ^{222}Rn en viviendas de la Parroquia “Victoria del Portete”, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay [en línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas. Riobamba, Ecuador. 2018. pp.38-56. [Consulta: 16 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9041/1/156T0002.pdf>.

ATSDR. Case studies in environmental medicine (CSEM) Radon Toxicity. *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades* [en línea]. 2012, pp.12-13. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/radon/radon.pdf>.

BALLANCE, Laoise. *Home: radon sensor information | Airthings Help Center* [en línea]. 2020. [Consulta: 5 septiembre 2020]. Disponible en: <https://help.airthings.com/en/articles/3119732-home-radon-sensor-information>.

BARROS DIOS, Juan Miguel. "El radón: ¿riesgo para la salud?". *Revista de Salud Ambiental* [en línea], 2011, (España) vol. 11, no. 1-2, pp. 27-31. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/171-391-1-SM.pdf>.

BARROS, Juan Miguel; & PÉREZ, Mónica. *Radón y cáncer de pulmón*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela, 2012. ISBN 978- 84- 9887- 948- 3, pp. 32-34.

BERENGUER, Ma José. NTP 440: Radón en ambientes interiores [en línea]. 1999, p.2. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/326962/ntp_440.pdf.

CARDENAS HERRERA, Edgar Patricio. Propuesta para Reducir los Niveles de Radón en Construcciones de Viviendas de la Parroquia Portete de Tarqui, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba-Ecuador. 2010.

CAVEDON, Jean Marc. *¿Es realmente peligrosa la radiactividad?* Madrid-España: Ediciones Akal, S.A., 2005. ISBN 84-460-2096-3, pp. 10-15.

COLCHA ORTÍZ, María Patricia. Dosimetría de Radón, en Viviendas con Diferentes Materiales de Construcción (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba-Ecuador. 2005.

DORADO, Pedro. Dosis de radiación/CSN [en línea]. Madrid: 2010, pp.4-13. [Consulta: 18 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis de radiación](https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci3n).

EPA. Guía del Radón para el Comprador y Vendedor de Viviendas. *Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos* [en línea]. 2002, pp.14-15. [Consulta: 23 junio 2020]. EPA 402-K-02-001 Disponible en: <https://sosradon.org/files/sosradon/resources/hmbuygudsp.pdf>.

EPA. Consumer's Guide to Radon Reduction. *Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos* [en línea]. 2013, pp. 11-13. [Consulta: 24 junio 2020]. EPA 402/K-10/005. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/2013_consumers_guide_to_radon_reduction.pdf.

EPA. Manual Informativo Sobre El Radón La guía para proteger a su familia y a usted del radón. *Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos* [en línea]. Estados Unidos: 2017, pp.1-17. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2017-09/documents/manual_informativo_sobre_el_radon.pdf.

FERRER, Gabriel. *El Radón: tratamiento jurídico de un enemigo invisible*. Alicante-España: Editorial Club Universitario, 2003, pp. 13-28. ISBN 9788415591481

FRUTOS, Borja. Estudio experimental sobre la efectividad y viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas. Madrid. 2009. pp. 48-57. [Consulta: 26 diciembre 2019]. Disponible en: http://oa.upm.es/22535/1/BORJA_FRUTOS_VAZQUEZ.pdf.

FRUTOS, Borja., & OLAYA, Manuel. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. *Consejo de Seguridad Nuclear* [en línea]. Madrid, España: 2010, pp.13.15. [Consulta: 10 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protección+frente+a+la+inmisión+de+gas+radón+en+edificios](https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protecci3n+frente+a+la+inmisi3n+de+gas+rad3n+en+edificios).

GARCÍA, Javier. Estudio del radón en viviendas mediante modelos de minería de datos basados en cubos OLAP [en línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado)Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Madrid. 2016. pp.25-47. [Consulta: 24 junio 2020]. Disponible en: http://oa.upm.es/40156/1/JAVIER_GARCIA_TOBAR.pdf.

GARZÓN, León. *El Radón y sus riesgos*. España: Universidad de Oviedo, 1992. ISBN 84-7468-513-3, pp. 77-80.

GENERALIC, Eni. “Radón”. *EniG. Tabla periódica de los elementos* [en línea]. 2020 [Consulta: 24 junio 2020]. Disponible en: <https://www.periodni.com/es/rn.html>.

GOBIERNO MUNICIPAL DE MOCHA. Diagnóstico del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Mocha [en línea]. Mocha: 2016, pp. 37-44. [Consulta: 24 junio 2020].

Disponible en:

[http://app.sni.gob.ec/sni-](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1860000990001_PDOT%20CANTON%20MOCHA%20COMPILADO_14-04-2016_15-44-07.pdf)

[link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1860000990001_PDOT%20CANTON%20MOCHA%20COMPILADO_14-04-2016_15-44-07.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1860000990001_PDOT%20CANTON%20MOCHA%20COMPILADO_14-04-2016_15-44-07.pdf)

IARC. *Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–127 – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. World Health Organization* [en línea]. 2020 [Consulta: 24 junio 2020]. Disponible en: <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>.

ICRP. Summary of ICRP Recommendations on Radon. *International Commission on Radiological Protection* [en línea]. S.l.:2018, p.3. [Consulta: 22 junio 2020]. ICRP ref 4836 -9756 -8. Disponible en: <http://www.icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf>.

INSTITUTO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DE IRLANDA., & REGISTRO NACIONAL DE CÁNCER DE IRLANDA. Health Risks due to Exposure to Radon in Homes in Ireland [en línea]. Irlanda: 2005, pp. 2-3. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/084/43084017.pdf?r=1&r=1.

JUNTA DE COMUNIDADES DE CASTILLA-LA MANCHA. *Peón especialista* [en línea]. Madrid-España: Editorial CEP, 2019, pp.27-32. [Consulta: 09 diciembre 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=X52SDwAAQBAJ&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=true>

KRIVOSHEEV, Mikhail V., & KOLBASOV, Boris N. Safety of Fusion Reactors. En: V. GLUKHIKH, O. FILATOV y B. KOLBASOV (eds.), *Fundamentals of Magnetic Thermonuclear Reactor Design*. Rusia: Elsevier, 2018, ISBN 978-0-0810-2471-3, p. 424.

LAR. *Información general sobre el gas radón (^{222}Rn)*. Universidad de Santiago de Compostela [en línea]. 2011. [Consulta: 25 agosto 2019]. Disponible en: <http://fpsalmon.usc.es/lar/esp/servicios/servicioradon/inforadon.php>.

LAUGHLIN, J. Mc. "An historical overview of radon and its progeny: Applications and health effects". *Radiation Protection Dosimetry* [en línea], 2012, vol. 152, no. 1-3, pp. 2-7. [Consulta: 26 junio 2020]. ISSN 01448420. DOI 10.1093/rpd/ncs189. Disponible en: <https://academic.oup.com/rpd/article/152/1-3/2/1597322>

LOAYZA, Marlon. Elaboración de un mapa radiológico de los niveles de radón presentes en las viviendas de las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca-Ecuador en el periodo 2017-2018 [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Ecuador. 2018. p.21. [Consulta: 19 noviembre 2019]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15421/1/UPS-CT007579.pdf>.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS. Anexo no 3. Geología y geotecnia [en línea]. S.l.: 2012, p.3 [Consulta: 24 junio 2020]. Disponible en: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas_Anexo-03-geologia-geotecnia.pdf.

NAZAROFF, William W. "Radon transport from soil to air". *Reviews of Geophysics* [en línea], 1992, (California) vol. 30, no. 2, pp. 137-160. [Consulta: 25 junio 2020]. ISSN 19449208. DOI 10.1029/92RG00055. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1029/92RG00055>.

OMS. Manual de la OMS sobre el radón en interiores Una perspectiva de salud pública. *Organización Mundial de la Salud* [en línea]. S.l.: 2015, pp.3-89. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=480A7D9107739F86303D1FFD2FA654B6?sequence=1.

OMS. *El radón y sus efectos en la salud* [en línea]. 2016a. [Consulta: 10 noviembre 2019]. Disponible en:

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health?fbclid=IwAR08YGvFXUzENHQvdp52H5YvlfNw6t15EmDg1i-1CFmuwkhdiKE3SQjZjCw>.

OMS. *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección* [en línea]. 2016b. [Consulta: 18 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.

PCE INSTRUMENTS. *Medidor de radiación Corentium HOME* [en línea]. 2019. Alicante-España: [Consulta: 27 noviembre 2019]. Disponible en:

https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-radiacion-corentium-as-medidor-de-radiaci_n-corentium-home-det_5843273.htm.

PICHISACA CÓRDOVA, Carmen Eugenia. Cuantificar los Niveles de Radón en Ambientes de Dormitorios en la Parroquia Victoria del Portete (Cuenca - Azuay). En construcciones que Contengan Diferentes Tipos de Materiales (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba-Ecuador. 2006.

PIEDECAUSA, Beatriz.; & CHINCHÓN PAYÁ, Servando. "Radiactividad natural de los materiales de construcción. Radiación interna: el gas radón". Revista Técnica cemento hormigón [en línea], 2011, (España), no. 946, pp. 38-39. [Consulta: 19 noviembre 2019]. ISSN: 0008-8919. DOI 0008-8919. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/286186197_Radiactividad_natural_de_los_materiales_de_construccion_Radiacion_interna_el_gas_radon.

PINOS SARMIENTO, Jessica., & BACULIMA ARMIJOS, Andrea. Recuperación del sistema constructivo en la técnica del bahareque en la contemporaneidad [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad de Cuenca Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Cuenca, Ecuador. 2014. pp.13-24. [Consulta: 19 octubre 2020]. Disponible en:

<file:///C:/Users/USUARIO/AppData/Local/Temp/RECUPERACION%20DEL%20SISTEMA%20CONSTRUCTIVO%20EN%20LA%20TECNICA%20DEL%20BAHAREQUE%20EN%20LA%20CONTEMPORANEIDAD.pdf>

PINTURAS SUPER. *¿Qué es la pintura de esmalte?* [En línea]. 2019. [Consulta: 18 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.pinturassuper.com/pintura-esmalte/>.

PUERTA ORTIZ, J. Anselmo.; & MORALES ARAMBURO, Javier. "Biological effects of ionizing radiation". *Revista Colombiana de Cardiología* [en línea], 2020, vol. 27, no. 1, pp. 61-71. [Consulta: 22 junio 2020]. ISSN 01205633. DOI 10.1016/j.rccar.2020.01.005. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0120563320300061>

RAMÍREZ, Gustavo. *Ventajas Esenciales de la Bioconstrucción* [blog]. Asociación GAIA. 2017. [Consulta: 19 octubre 2020]. Disponible en: https://gaia.org.ar/caracteristicas-de-las-casas-de-la-ecovilla-gaia/?fbclid=IwAR3ZOyG7832jk3NM2nfrdWDyy-mx1v7zMy5hFb65k46b_Wupeb_ZDGsjzTs

RAMOS FLORES, María Eugenia. *Propuesta de Reducción de los Niveles de Radón en Construcciones de Cemento Armado (Trabajo de titulación).* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba-Ecuador. 2008.

ROJAS, Jhonny. *Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de Lima* [en línea] (Trabajo de titulación). (Masterado). Pontificia Universidad Católica Del Perú. Lima. 2016. p.8. [Consulta: 23 junio 2020]. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7441/ROJAS_JHONNY_RADON_222.pdf?sequence=1&isAllowed=yhttp://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7441/ROJAS_JHONNY_RADON_222.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

SAMYGINA, Anna. *9 Main Types of Wallpaper. Basic of interior design* [blog]. 2016. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://medium.com/learning-about-interior-design/types-of-wallpaper-97555ed60391>.

SCHÜTTMANN, W. "Zur Entdeckungsgeschichte des Radons". *Isotopenpraxis Isotopes in Environmental and Health Studies* [en línea], 1988, vol. 24, no. 4, pp. 160-162. [Consulta: 7 septiembre 2020]. ISSN 0021-1915. DOI 10.1080/10256018808623931. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10256018808623931>.

SEISDEDOS DOMÍNGUEZ, Manuel. *Mapa del riesgo de exposición al gas radón en las viviendas de la comunidad de Madrid* [en línea] (Trabajo de titulación). (Masterado) Universidad Complutense De Madrid. Madrid. 2016. pp. 11-18. [Consulta: 18 diciembre 2019]. Disponible en: http://eprints.ucm.es/46341/1/TFM_MTIG_MSD_MAPA_RADON.pdf.

TENE, Talía. Environmental radon measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program from Ecuador (Trabajo de titulación) (Doctorado). Università della Calabria, Dipartimento de física, Scuola de Dottorato. Calabria. 2017. pp. 5-16

THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. *Risk Assessment of Radon in Drinking Water.* Washington, D.C: National Academies Press, 1999. ISBN 0-309-06292-6, pp. 25-26.

THORNTON, Brett F.; & BURDETTE, Shawn C. "Recalling radon's recognition". *Nature Chemistry* [en línea], 2013, vol. 5, no. 9, 2013, pp. 804. [Consulta: 25 junio 2020]. ISSN 17554330. DOI 10.1038/nchem.1731. Disponible en: www.nature.com/naturechemistry.


UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation.* New York: United Nation Publication, 2000. ISBN 92-1-142238-8, pp.5-108.

ANEXOS

ANEXO A: SOCIALIZACIÓN DEL PROYECTO



ANEXO B: PRIMERA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN.

 <p>A photograph of a bedroom in an old house. A bed with a patterned coverlet is on the right. A chair with a yellow detector on it is on the left. A red arrow points to the detector with the word "Detector" written in red.</p>	 <p>A close-up of a digital radon detector. The screen shows "LONG TERM AVERAGE" with a reading of 360 Bq/m³ and "SHORT TERM AVERAGE" with a reading of 584 Bq/m³.</p>
<p>B.1 Medición en vivienda de construcción antigua.</p>	<p>B.2 Lectura más alta del detector en viviendas antiguas.</p>
 <p>A photograph of a bedroom in a block house. A bed with a patterned coverlet is on the left. A small table with a yellow detector on it is on the right. A red arrow points to the detector with the word "Detector" written in red.</p>	 <p>A close-up of a digital radon detector. The screen shows "LONG TERM AVERAGE" with a reading of 341 Bq/m³ and "SHORT TERM AVERAGE" with a reading of 490 Bq/m³.</p>
<p>B.3 Medición en vivienda de bloque.</p>	<p>B.4 Lectura más alta del detector en viviendas de bloque.</p>
 <p>A photograph of a bedroom in a mixed house. A bed with a blue coverlet is on the left. A nightstand with a yellow detector on it is on the right. A red arrow points to the detector with the word "Detector" written in red.</p>	 <p>A close-up of a digital radon detector. The screen shows "LONG TERM AVERAGE" with a reading of 334 Bq/m³ and "SHORT TERM AVERAGE" with a reading of 338 Bq/m³.</p>
<p>B.5 Medición en vivienda mixta.</p>	<p>B.6 Lectura más alta del detector en viviendas mixtas.</p>

ANEXO C: SELLADO DE GRIETAS



C.1 Colocación de masilla en habitación de construcción antigua.



C.2 Colocación de masilla en habitación de bloque.



C.3 Colocación de masilla en vivienda mixta.

ANEXO D: AIREACIÓN



D.1 Apertura de ventanas y puertas en habitación de construcción antigua.



D.2 Apertura de ventanas y puertas en habitación de bloque.



D.3 Apertura de ventanas y puertas en habitación de construcción mixta.

ANEXO E: TAPIZADO



E.1 Aplicación de goma blanca.



E.2 Cortado del papel tapiz.



E.3 Instalación del tapiz en vivienda antigua.



E.4 Instalación del tapiz en vivienda mixta.



E.5 Instalación del tapiz en vivienda de bloque.

ANEXO F: PINTADO



F.1 Aplicación del esmalte en habitación de construcción antigua.



F.2 Aplicación del esmalte en habitación de bloque.



F.3 Aplicación e inspección del esmalte en habitación de construcción mixta.

ANEXO G: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN- AIREACIÓN



G.1 Toma de concentración en vivienda antigua.



G.2 Toma de concentración en vivienda de bloque.



G.3 Toma de concentración en vivienda mixta.

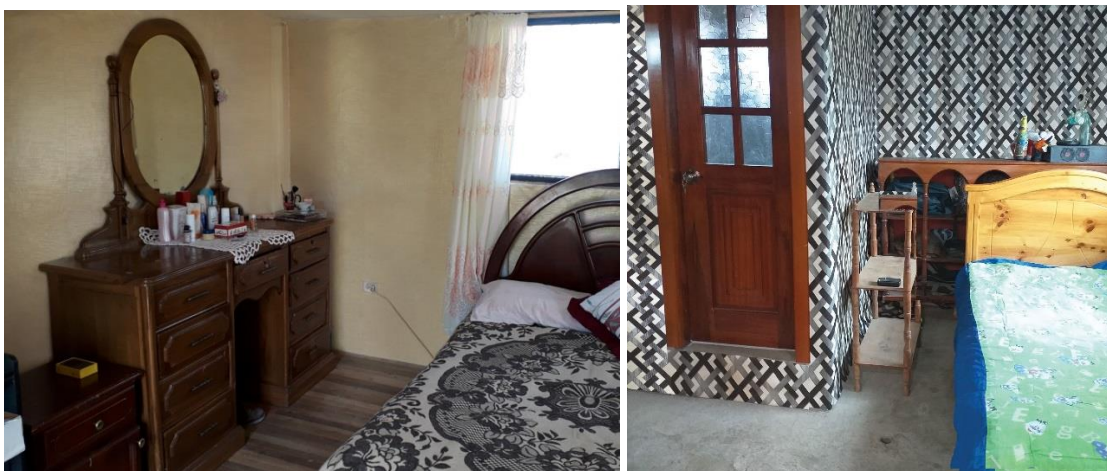
ANEXO H: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN-TAPIZADO



H.1 Segunda medición de radón en habitación de construcción antigua.



H.2 Medición de radón en habitación de bloque.



H.3 Medición de radón en habitación de tipo mixto.

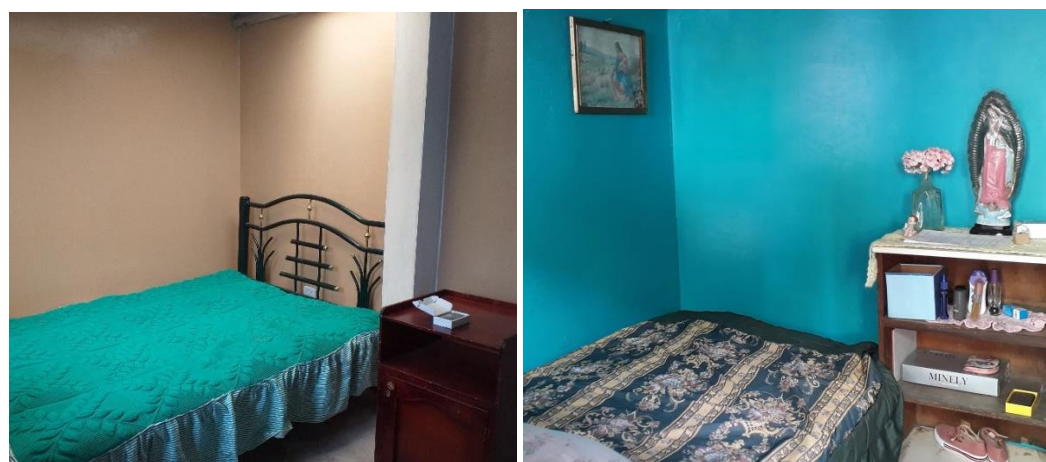
ANEXO I: MEDICIÓN POST REMEDIACIÓN - PINTADO



I.1 Toma de concentración en vivienda antigua.



I.2 Toma de concentración en vivienda de bloque.



I.3 Toma de concentración en vivienda mixta.

ANEXO J: LECTURAS DEL DETECTOR POST REMEDIACIÓN.



J.1 Lectura más alta del detector en habitaciones de edificación antigua.



J.2 Lectura más alta del detector en habitaciones de bloque.



J.3 Lectura más alta del detector en habitaciones de construcción mixta.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO



DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 25 / 03 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: ALEJANDRA DEL CONSUELO CALUÑA PADILLA JOHANA CAROLINA OBANDO YUMISACA
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: CIENCIAS
Carrera: QUÍMICA
Título a optar: QUÍMICA
f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc.



Firmado electrónicamente por:
HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA

0631-DBRAI-UPT-2021