



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA FÍSICA**

**“TASAS DE EXHALACIÓN SUPERFICIAL DE RADÓN-222 DE  
LOS SEDIMENTOS DE LAS LAGUNAS DE AGUAS RESIDUALES  
DE ACTIVIDADES MINERAS EN LA PROVINCIA DE EL ORO”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado de académico de:

**FÍSICO**

**AUTORES: JUAN GABRIEL BRAVO GUZMÁN**  
**ANGEL DAVID RODRÍGUEZ OCAÑA**

Riobamba – Ecuador

2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA FÍSICA**

**“TASAS DE EXHALACIÓN SUPERFICIAL DE RADÓN-222 DE  
LOS SEDIMENTOS DE LAS LAGUNAS DE AGUAS RESIDUALES  
DE ACTIVIDADES MINERAS EN LA PROVINCIA DE EL ORO”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado de académico de:

**FÍSICO**

**AUTORES: JUAN GABRIEL BRAVO GUZMÁN**

**ANGEL DAVID RODRÍGUEZ OCAÑA**

**DIRECTORA: DRA. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDOÑEZ PhD.**

Riobamba – Ecuador

2022

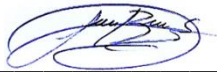
**©2022, Juan Gabriel Bravo Guzmán & Angel David Rodríguez Ocaña**

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

Nosotros, JUAN GABRIEL BRAVO GUZMÁN y ANGEL DAVID RODRÍGUEZ OCAÑA declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

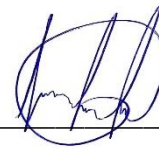
Riobamba, 06 de septiembre del 2022.



---

**Juan Gabriel Bravo Guzmán**

**0705324077**



---

**Angel David Rodríguez Ocaña**

**0604740548**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA FÍSICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación, “**TASAS DE EXHALACIÓN SUPERFICIAL DE RADÓN-222 DE LOS SEDIMENTOS DE LAS LAGUNAS DE AGUAS RESIDUALES DE ACTIVIDADES MINERAS EN LA PROVINCIA DE EL ORO**”, realizado por los señores: **JUAN GABRIEL BRAVO GUZMÁN** y **ANGEL DAVID RODRÍGUEZ OCAÑA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

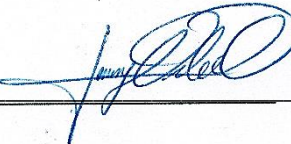
**FECHA**

Mat. Luis Marcelo Cortéz Bonilla MSc.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



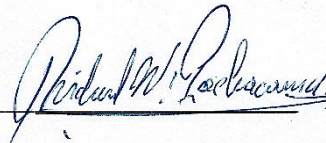
2022-09-06

Dra. Jheny Del Carmen Orbe Ordoñez PhD.  
**DIRECTORA DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2022-09-06

Dr. Richard Williams Pachacama Choca MSc.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



2022-09-06

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Bases teóricas.....	4
1.2.1. <i>Actividad de una fuente radioactiva</i> .....	4
1.2.2. <i>Serie radioactiva del radón-222</i> .....	5
1.2.3. <i>Emanación de radón</i> .....	6
1.2.4. <i>Difusión de radón</i> .....	7
1.2.5. <i>Exhalación de radón</i> .....	10
1.2.6. <i>Sedimentos y aguas residuales</i> .....	11
1.2.7. <i>Lagunas de sedimentación</i> .....	12

### CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	13
2.1. Tipo de investigación.....	13
2.2. Diseño de la investigación.....	13
2.2.1. <i>Localización del estudio</i> .....	13
2.2.2. <i>Recolección y tratamiento de las muestras</i> .....	14
2.2.3. <i>Metodología para medir la tasa de exhalación superficial de radón</i> .....	15
2.2.4. <i>Configuración experimental</i> .....	16
2.2.5. <i>Descripción del sistema de detección</i> .....	16
2.3. Mediciones y Parámetros.....	17
2.3.1. <i>Medición de la concentración de radón dentro de las cámaras</i> .....	18

2.3.2.	<i>Pendiente inicial de la curva de crecimiento (Me)</i> .....	19
2.3.3.	<i>Background del laboratorio (Co)</i> .....	19
2.3.4.	<i>Leakage (<math>\lambda v</math>)</i> .....	20
2.3.5.	<i>Volumen efectivo de las cámaras (V)</i> .....	22
2.3.6.	<i>Tasas de exhalación superficial</i> .....	22

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>23</b>
3.1.	<b>Magnitudes asociadas de las muestras y cámaras</b> .....	<b>23</b>
3.2.	<b>Background del laboratorio y las cámaras</b> .....	<b>24</b>
3.3.	<b>Leakage</b> .....	<b>26</b>
3.4.	<b>Tasa de exhalación superficial y másica iniciales</b> .....	<b>27</b>
3.5.	<b>Tasas de exhalación superficial a lo largo del tiempo</b> .....	<b>30</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>32</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>33</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Cadena de desintegración del U-238. ....	5
<b>Figura 2-1:</b> Cadena de desintegración del U-235. ....	6
<b>Figura 3-1:</b> Mecanismos de emanación de radón de granos de minerales. ....	7
<b>Figura 4-1:</b> Valores medios experimentales del coeficiente de difusión y la longitud de difusión en materiales de construcción populares. ....	9
<b>Figura 5-1:</b> Longitud de difusión del radón.....	10
<b>Figura 6-2:</b> Vista satelital de la concesión minera “Torata Mining” (color rojo). ....	13
<b>Figura 7-2:</b> Curvas de concentración de radón-222 con rectas de ajuste lineal de las curvas de crecimiento. ....	19
<b>Figura 8-2:</b> Curva de decaimiento de radón-222 ideal y experimental con rectas de ajuste y concentración inicial $C_b$ . ....	20



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3:</b> Masas, áreas de exhalación de las muestras y volúmenes efectivos de las cámaras. 23	
<b>Tabla 2-3:</b> Valores del <i>background</i> del laboratorio y cámaras de vidrio. ....24	

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfica 1-3:</b> Curva de concentración de radón-222 en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH ( <i>background</i> ).....	25
<b>Gráfica 2-3:</b> Patrón de concentración de radón-222 dentro de la cámara A sin presencia de muestra ( <i>background</i> ).....	25
<b>Gráfica 3-3:</b> Patrón de concentración de radón dentro de la cámara B sin presencia de muestra ( <i>background</i> ). ....	26
<b>Gráfica 4-3:</b> Curva de decaimiento de radón-222 dentro de la cámara A en un periodo de 147 horas. ....	26
<b>Gráfica 5-3:</b> Curva de decaimiento de radón-222 en un periodo de 181 horas dentro de la cámara B.....	27
<b>Gráfica 6-3:</b> Curva de acumulación de radón-222 dentro la cámara A para la muestra de tufo italiano. ....	28
<b>Gráfica 7-3:</b> Curva de acumulación de radón-222 para la muestra de tufo italiano dentro de la cámara B.....	28
<b>Gráfica 8-3:</b> Comparación de las tasas de exhalación superficial inicial de la muestra de tufo italiano en las cámaras A y B.....	29
<b>Gráfica 9-3:</b> Patrón de concentración de radón de la muestra de sedimentos 2 dentro de la cámara A.....	29
<b>Gráfica 11-3:</b> Patrón de concentración de radón de la muestra de sedimentos 1 dentro de la cámara B.....	30
<b>Gráfica 12-3:</b> Curva de la tasa de exhalación superficial de la muestra de tufo italiano en función del tiempo dentro de la cámara A. ....	31
<b>Gráfica 13-3:</b> Curva de la tasa de exhalación superficial de la muestra de tufo italiano en función del tiempo dentro de la cámara B.....	31

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** RECONOCIMIENTO DE LA CONCESION MINERA “TORATA MINING”.

**ANEXO B:** RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS EN LA  
CONCESIÓN MINERA “TORATA MINING.

**ANEXO C:** PROCESAMIENTO Y TRAMIENTO DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS.

**ANEXO D:** PROCESO DE MEDICIÓN CON EL DETECTOR PYLON AB7 Y CELDA DE  
LUCAS 600P.

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>UNSCEAR</b>	Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas.
<b>ESPOCH</b>	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
<b>UNICAL</b>	Università della Calabria.
<b>GIDAC</b>	Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático.
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud.
<b>ICRP</b>	Comisión Internacional de Protección Radiológica.
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.
<b>IDI</b>	Instituto de Investigación (ESPOCH).
<b>CA</b>	Cámara A.
<b>CB</b>	Cámara B.
<b>Rn</b>	Radón.
<b>Ra</b>	Radio.
<b>Bq</b>	Bequerelios.
<b>m</b>	Metro.
<b>g</b>	Gramo.
<b>l</b>	Litro.
<b>°C</b>	Grados centígrados.
<b>t</b>	Tiempo medido en horas.
<b>E</b>	Tasa de exhalación de radón $Bq m^{-2} h^{-1}$ .

## RESUMEN

Este Proyecto de Investigación tuvo como objetivo determinar las tasas de exhalación superficial y másica de radón-222 en sedimentos de actividades mineras en la provincia de El Oro. Se empleó el método de la cámara cerrada con dos cámaras denominadas A y B de volúmenes 125 y 51 litros respectivamente. El sistema de detección consistió en un monitor Pylon AB7 (Alpha-Beta generación 7) en interfaz con un detector tipo Celda de Lucas 600P (600 por Pylon). Los valores de la tasa de leakage (fuga) de las cámaras fueron calculados a partir de la pendiente inicial de la curva de decaimiento del radón dentro de las cámaras, obteniendo valores de  $(0.0099 \pm 0.0010)$  1/h para la cámara A y  $(0.0277 \pm 0.0047)$  1/h para la cámara B. El valor del background o concentración de fondo del laboratorio que se obtuvo fue de  $(48.34 \pm 8.36)$  Bq/m<sup>3</sup>, dentro de la cámara A este fue igual a  $(42.76 \pm 5.07)$  Bq/m<sup>3</sup> y dentro de la cámara B se obtuvo un valor de  $(44.83 \pm 6.25)$  Bq/m<sup>3</sup>, estos resultados muestran gran compatibilidad entre ellos. Las tasas de exhalación superficial y másica de las muestras de sedimentos de una laguna de aguas residuales de actividades mineras de la Concesión Torata Mining presentaron patrones compatibles con el fondo de radón de las cámaras, por lo que se concluyó que están libres de radón. Se recomendó estudios posteriores a este cuando la mina se encuentre en etapa de explotación a fin de comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

**Palabras clave:** <RADÓN>, <EXHALACIÓN SUPERFICIAL>, <SEDIMENTOS>, <AGUAS RESIDUALES>, <MINERÍA>, <LEAKAGE>, <CÁMARA CERRADA>, <PYTHON (SOFTWARE)>.



2174-DBRA-UTP-2022

## ABSTRACT

The objective of this research project was to determine the surface and mass exhalation rates of radon-222 in sediments from mining activities in the province of El Oro. The closed chamber method was used with two chambers named A and B of volumes 125 and 51 litres respectively. The detection system consisted of a Pylon AB7 (Alpha-Beta generation 7) monitor interfaced with a Lucas Cell 600P (600 by Pylon) detector. The values of the leakage rate of the chambers were calculated from the initial slope of the radon decay curve inside the chambers, obtaining values of  $(0.0099 \pm 0.0010)$  1/h for chamber A and  $(0.0277 \pm 0.0047)$  1/h for chamber B. The laboratory background concentration value obtained was  $(48.34 \pm 8.36)$  Bq/m<sup>3</sup>, within chamber A this was equal to  $(42.76 \pm 5.07)$  Bq/m<sup>3</sup> and within chamber B a value of  $(44.83 \pm 6.25)$  Bq/m<sup>3</sup> was obtained, these results show great compatibility between them. Surface and mass exhalation rates of sediment samples from a mining wastewater lagoon at the Torata Mining Concession showed patterns compatible with the radon background of the chambers and were therefore concluded to be radon-free. Further studies are recommended after this one when the mine is in exploitation stage in order to compare the results obtained in this research.

Keywords: <RADON>, <SURFACE EXHALATION>, <SEDIMENTS>, <WASTEWATER>, <MINING>, <LEAKAGE>, <CLOSED CHAMBER>, <PYTHON (SOFTWARE)>.



Dra. Carmita Eulalia Rojas Castro. Mgtr.

0602890469

## INTRODUCCIÓN

El radón es un gas radiactivo de origen natural con una vida promedio estimada de 3.8 días, este suele ser emanado desde el centro de la tierra y suele concentrarse mayormente en espacios cerrados ya que es incapaz de dispersarse, también se ha detectado presencia de este elemento en zonas abiertas, aunque en menor cantidad. El radón es un gas que emite partículas alfa y se forma como el producto de la desintegración del radio que a su vez se desintegra del uranio. Algunas de las concentraciones más altas en minas ocurren en minas subterráneas de rocas ígneas, especialmente de uranio, donde puede entrar al aire directamente desde el mineral, o ser llevado desde la mina disuelto en agua. Sin embargo, también se pueden medir concentraciones apreciables en hogares, donde la fuente principal suele ser el subsuelo, aunque en algunas circunstancias se pueden detectar niveles considerables debido a materiales de construcción o por radón disuelto en agua.

Informes del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (EFFECTS OF IONIZING RADIATION, 2009) muestran que la mayor exposición de la población a las radiaciones ionizantes se debe al radón  $1.26 (mSv/año/persona)$ . Los estudios epidemiológicos han proporcionado pruebas convincentes de una asociación entre la exposición al radón y el cáncer de pulmón. El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población general, después del tabaquismo según la (OMS, 2016). En adición a esto, varios estudios epidemiológicos muestran patrones de mortalidad de varios grupos de mineros expuestos al radón y su progenie. En la actualidad se han publicado resultados de once grandes estudios, que cubren un total de más de 60.000 mineros en Europa, América del Norte, Asia y Australia, entre los cuales han ocurrido más de 2500 muertes por cáncer de pulmón. Ocho de los estudios son de mineros de uranio; el resto son de mineros de estaño, espato de flúor o hierro.

Alrededor de quince concesiones mineras realizan extracción de material aurífero en cuatro mil hectáreas ubicadas en el sector de El Guayabo del cantón Santa Rosa, provincia de El Oro. Los desechos mineros, entre ellos aguas residuales son acumulados en lagunas para un posterior proceso de sedimentación y luego son descargados en las quebradas de la zona. Las sustancias químicas usadas en la minería contaminan el suelo, agua y aire del sector antes mencionado, pudiendo causar posibles problemas de salud a los trabajadores y a la gente que vive cerca de las minas. Los químicos tóxicos utilizados en la minería incluyen: cianuro, mercurio, ácido sulfúrico, ácido nítrico, nitrato de amonio, plomo, gasolina, diésel, acetileno entre otros.

Investigaciones en el sector de minería en provincias cercanas muestran que existe presencia de radón en actividades mineras (YAULI, 2020). Así mismo dentro de la provincia de El Oro hay estudios que corroboran la existencia de radón en minas subterráneas empleando métodos de detección convencionales (AGUILAR, 2018).

Por otro lado, en el sitio el Guayabo, que presenta antecedentes con incidentes relacionados con contaminación por desechos de actividades mineras (PROAÑO, 2021) resulta necesario un estudio detallado de la presencia de este radionucleido. El principal objetivo de este proyecto es determinar las tasas de exhalación superficial de radón-222 de los sedimentos de las lagunas de aguas residuales de actividades mineras en la provincia de El Oro. Además, se busca caracterizar el área de estudio, elaborar la metodología para la recolección de muestras de sedimentos en una laguna de sedimentación para el análisis con la técnica de cámara cerrada, usando una celda de Lucas en interfaz con el monitor Pylon AB7.



# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Antecedentes

La investigación de la radioactividad natural en zonas mineras en nuestro país no ha sido tratada con la importancia pertinente, por ello la información referente al tema es muy poca y la desinformación sobre los peligros que la radiación puede representar son ignorados. A pesar de la poca cantidad de investigaciones referentes al tema se pueden encontrar trabajos que guardan relación con esta problemática.

En un estudio llevado a cabo en una mina inactiva al sur oeste de Polonia por Tadeusz Przylibski se detalla la aparición de gas radón y sus consecuentes desintegraciones utilizando detectores LR-115 tipo II dentro de contenedores plásticos con filtros, las muestras corresponden a áreas de fácil acceso para el público en general, puesto que esta mina funciona como atracción turística, detectando valores de entre  $18.50 \text{ kBq m}^{-3}$  lo que puede significar un riesgo para los turistas y demás personas. (PRZYLIBSKI, 2001 pp. 14,15).

Así mismo existen estudios que tratan la presencia de elementos radioactivos en sedimentos disueltos en agua producidos por actividades petroleras, en la región de Ras Tanura en Arabia Saudita utilizando detectores CR-39 y una cámara cilíndrica se lleva a cabo un estudio donde se comprueba que en efecto hay presencia de radón en sedimentos recolectados de medios acuáticos, pues para la concentración de radón y la dosis efectiva anual se obtuvieron valores de  $(6,02 \pm 0,8) \text{ Bq m}^{-3}$  hasta  $(927 \pm 101) \text{ Bq m}^{-3}$  y  $0,15 \text{ mSv y}^{-1}$  hasta  $23.4 \text{ mSv y}^{-1}$ , respectivamente (ALSHAHRI, y otros, 2017 p. 316).

En Ecuador Levinton Yauli lleva a cabo una investigación en el cantón Camilo Ponce Enríquez de la provincia del Azuay, en la mina subterránea de Promine Cia. Ltda. en donde se obtienen valores considerables de radón, llegando a medir  $(1182 \pm 61.92 \text{ Bq m}^{-3})$ , esto utilizando un monitor E-PERM (tipo cámara de ionización). Estos resultados se deben a muestras tomadas a gran profundidad, puesto que al hacer análisis en la boca mina (entrada a la mina subterránea) se hallan niveles muy bajos, por lo que el autor deduce que la contribución promedio de la radiación gamma externa a la dosis efectiva anual es de  $(0.084 \pm 0.003 \text{ mSv año}^{-1})$ , mientras la dosis efectiva debida a la inhalación de radón es  $(3,47 \pm 0,14 \text{ mSv año}^{-1})$ . Los valores obtenidos en la investigación son inferiores en comparación con los límites permisibles establecidos por la ICRP, concentración máxima de  $1600 \text{ Bq m}^{-3}$  y una dosis efectiva límite de  $20 \text{ mSv año}^{-1}$  para recintos cerrados, sin embargo en comparación con los valores recomendados por la EPA, que corresponden a  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , el valor de concentración encontrado es aproximadamente 4 veces mayor (YAULI, 2020, pp. 70,71).

Remitiéndonos a la provincia de El Oro, Alex Aguilar lleva a cabo estudios en la mina subterránea "El Señor de Roma" en el cantón Zaruma usando detectores LR-115 y una cámara de difusión, logrando determinar una concentración de gas radón-222 en el interior de la mina de  $(1819,3 \pm 349,8 \text{ Bq m}^{-3})$  (AGUILAR, 2018, pp. 93,94).

Esto demuestra que hay presencia de radón-222 en las actividades mineras que se llevan a cabo en la provincia de El Oro y en la zona sur del país, por lo que se considera razonable realizar un estudio en la zona de interés de este Proyecto de Investigación.

## 1.2. Bases teóricas

### 1.2.1. Actividad de una fuente radioactiva

La ley de decaimiento radioactiva establece que, si  $N$  es el número de nucleidos radioactivos presentes en una fuente radioactiva en algún instante de tiempo, la rapidez de cambio de  $N$  es:

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

Donde:

$\lambda$ : Constante de proporcionalidad también llamada constante de decaimiento, es propia de cada nucleido radioactivo y representa la probabilidad de decaimiento por núcleo por segundo.

Introduciendo la condición inicial  $N(0) = N_0$ , siendo  $N_0$  el numero de nucleidos radioactivos en  $t = 0$ , la ec. (1.1) resuelve como:

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

Reemplazando (1.2) en (1.1), se obtiene:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

De aquí se define la rapidez de decaimiento  $R$  como:

$$R = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

Donde hemos definido  $R_0 \equiv \lambda N_0$  como la rapidez de decaimiento inicial. La rapidez de decaimiento de una muestra radioactiva ( $R$ ) es la que se conoce como actividad. En el SI la unidad de actividad es el Becquerel ( $Bq$ ), definido como (SERWAY, y otros, 2002 pp. 1452,1453):

$$1 Bq \equiv 1 \text{ decaimiento} * s^{-1} \quad (1.5)$$

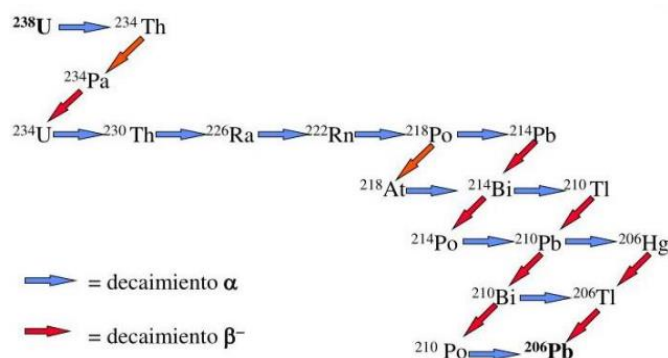
Por otro lado, existe la concentración de actividad de una fuente radioactiva que se define como el número de decaimientos por segundo en un metro cubico, en unidades del sistema internacional esto es  $Bq m^{-3}$ .

### 1.2.2. Serie radioactiva del radón-222

El radón-222 es un gas incoloro e inodoro, resulta de decaimientos del radio-226 que a su vez es parte de una serie de decaimientos radiactivos a partir del uranio-238. Es radiactivo con una vida media de 3,8 días, decayendo como partículas alfa, a polonio, bismuto y plomo.

El decaimiento del radón-222, se produce en un promedio de una hora, a través de cuatro decaimientos adicionales, dos de ellos que emiten partículas alfa, y los otros dos, por otros tipos de radiaciones. Los átomos en los que se desintegra un átomo de radón son isótopos del polonio, plomo y bismuto, también conocidos como hijos del radón.

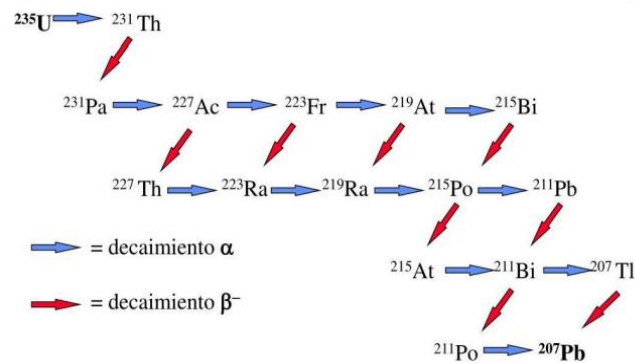
Los elementos anteriores al radón en la cadena tienen una vida media considerablemente larga y de menor preocupación por exposición, pero el radón y los elementos consiguientes en su cadena, son de corta duración y por lo tanto de mayor peligrosidad. A diferencia de sus antecesores que son sólidos y no irán lejos de su lugar en el suelo, el radón es un gas y puede moverse en la tierra a través de cortas distancias, en el orden de los centímetros generalmente. Se dice que, por cada pie cuadrado de tierra, generalmente, pueden aparecer cerca de seis átomos de radón por segundo (SANCHEZ, 2005, p. 23).



**Figura 1-1:** Cadena de desintegración del U-238.

Fuente: (SANCHEZ, 2005, p. 24).

El  $^{238}\text{U}$  para llegar al isotopo estable  $^{206}\text{Pb}$ , pasa por 8 decaimientos  $\alpha$  y 6 decaimientos  $\beta^-$ .



**Figura 2-1:** Cadena de desintegración del U-235.

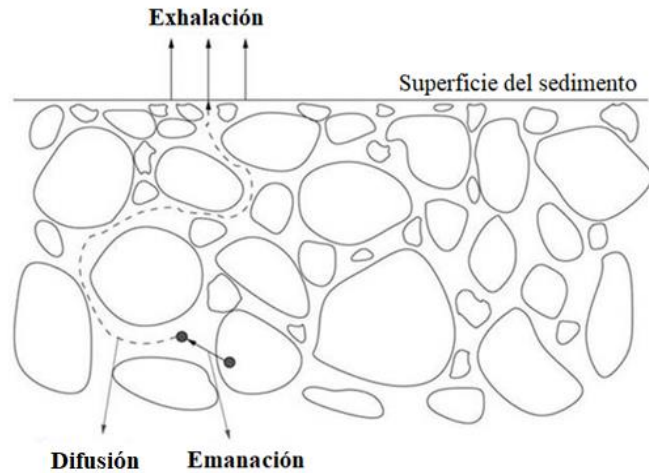
Fuente: (SANCHEZ, 2005, p. 24).

El radón en el aire suele diluirse muy rápido, pero si es atrapado en una construcción o sitio cerrado, puede alcanzar altas concentraciones por mucho tiempo. Un estudio llevado a cabo en 13 países de Europa determinó que la concentración media de radón al aire libre varía de  $5 \text{ Bq m}^{-3}$  a  $15 \text{ Bq m}^{-3}$  lo cual no representa una medida significativa (DARBY, 2005 p. 3).

En cambio, en espacios cerrados, las concentraciones de radón son más elevadas, en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, donde se registran los niveles más altos. En edificios como viviendas, escuelas y oficinas, las concentraciones de radón varían de  $10 \text{ Bq m}^{-3}$  hasta más de  $10\,000 \text{ Bq m}^{-3}$ , esto en base a estudios realizados en distintas regiones del noroeste de España. Hay una estimación de que los primeros dos metros de suelo en un promedio de cuatro mil metros cuadrados de tierra, existen cerca de 22 kilogramos de uranio. Esto corresponde aproximadamente a tres partes por millón si se hace el cálculo respectivo (Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS-CCOO), 2019 p. 8).

### 1.2.3. Emanación de radón

La mayor parte del radón que se produce por la desintegración del radio nunca se escapa del mineral en el que nace, sino que suele quedar encajado en la red cristalina durante días hasta que se desintegra. La pequeña fracción de radón que se escapa del mineral entra en los poros del sedimento y se concentra en él. Dado que el radón es un gas inerte, puede moverse con bastante libertad a través de medios porosos, aunque normalmente sólo una fracción de esa toxicidad de los materiales alcanza la superficie (ORBE, 2019 p. 15).



**Figura 3-1:** Mecanismos de emanación de radón de granos de minerales.

Fuente: (PATITAPABAN, y otros, 2016 p. 4).

El coeficiente de emanación del radón  $\epsilon$ , se define como la fracción de la cantidad total de radón producida por la desintegración del radio que escapa de la fase sólida y entra en los poros del material. También se denomina potencia de emanación, fracción de emanación, relación de liberación y relación entre escape y producción. El coeficiente de emanación de radón es un parámetro adimensional y se representa como una fracción o un porcentaje. El coeficiente de emanación oscila entre 0 (el radón no se escapa) y 1 (todo el radón se escapa). El resto del radón producido ( $1 - \epsilon$ ) queda atrapado en el material. Hay que mencionar que el radón no sólo se descompone en la fase aérea, sino también cuando es adsorbido por los poros de los materiales y disuelto en líquidos (KLOVER, 2021 p. 208).

Por lo general, el coeficiente de emanación del radón se determina a partir de la tasa de exhalación de radón medida en una muestra con una masa y geometría determinadas. Si suponemos que todo el radón emanado se exhala durante la medición de la liberación de radón, es decir, que la desintegración del radón en la muestra debido a la adsorción (adherencia y absorción de un fluido en estado líquido o gaseoso por parte de un sólido) y a las bajas tasas de difusión es insignificante, el coeficiente de emanación  $\epsilon$  puede calcularse a partir de la concentración de actividad del radio-226 en el material y de la tasa de exhalación de radón másica  $E_m$  (ELMAGD, 2014 p. 394).

#### 1.2.4. *Difusión de radón*

Se entiende por difusión de radón al proceso de migración partiendo de un soluto originario con elevada concentración a una región de menor concentración, es decir el flujo de radón por difusión depende de la variación de concentración del gas en una sección del medio donde se haya disuelto, ya sean los poros de un material o en algún fluido (OLAYA, y otros, 2010 p. 12).

La ley de Fick describe de manera general este fenómeno y enuncia que la velocidad de difusión por unidad área ( $\vec{J}$ ), es decir el número de moléculas que atraviesa un área determinada por unidad de tiempo, depende del gradiente de la concentración ( $\vec{\nabla}C$ ) y de un coeficiente propio de cada sistema llamado coeficiente de difusión (D).

$$\vec{J} = -D \vec{\nabla}C \quad (1.6)$$

El signo menos se debe a que las partículas migran de un punto de mayor concentración a uno de menor concentración (ASHBY, y otros, 2005 p. 289).

El coeficiente de difusión nos da información sobre la facilidad con que un determinado soluto se mueve en un solvente en particular. A su vez  $\vec{J}$  en componentes puede ser expresada como:

$$J_i = \frac{1}{A} \frac{dn_i}{dt} \quad (1.7)$$

Donde:

$A$ : magnitud del área por la que fluyen las moléculas.

$n_i$ : número de moléculas que fluyen en la dirección  $i$  ésimas.

Pudiendo entonces reescribirse la ley de Fick como:

$$\frac{1}{A} \frac{dn_i}{dt} = -D \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (1.8)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = -D A \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad \text{con } i = 1, 2, 3 \quad (1.9)$$

La difusión de radón se produce en el aire y en el agua, el factor determinante de esta es la extensión de la porosidad abierta que alcanza la superficie desde el material que ha absorbido el radón. En general, una mayor porosidad permite una difusión más extensa; pero es fundamental tener en cuenta que sólo una fracción del espacio poroso permite el paso de radón hacia la superficie. La mayor parte de la porosidad del suelo (tierra o sedimentos) está interconectada, pero en las rocas esto no es necesariamente cierto (ORBE, 2019 p. 18).

El proceso de difusión del radón a través de materiales, como la tierra, el hormigón, el mortero, el yeso, los revestimientos, entre otros, se describe mediante el coeficiente de difusión D. La longitud de difusión del radón L puede calcularse a partir del coeficiente de difusión D como  $L = (D/\lambda)^{1/2}$ . La longitud de difusión se define como la distancia característica recorrida por los átomos de radón durante su vida media. Otra definición popular de la longitud de difusión del

radón es la distancia a través de la cual la concentración de radón disminuye hasta el 37% (porque  $e - 1 = 0,37$ ) de su valor inicial. En contraste con el coeficiente de difusión  $D$ , que es independiente del espesor del elemento, el flujo a través de una muestra disminuye con el espesor (KLOVER, 2021 p. 205).

Para obtener un parámetro independiente del espesor que describa la permeabilidad (o impermeabilidad, es decir, la estanqueidad) de los materiales respecto al gas radón, se sugiere utilizar el cociente del espesor de la muestra y la longitud de difusión (KELLER, HOFFMAN, & FEIGENSPAN, 2001, p. 86)

Según este enfoque, si el grosor de la muestra es tres veces la longitud de difusión, menos del 5% (porque  $e - 3 = 0,05$ ) del radón inicial sólo pasa el material, que en este caso puede denominarse como hermético al radón.

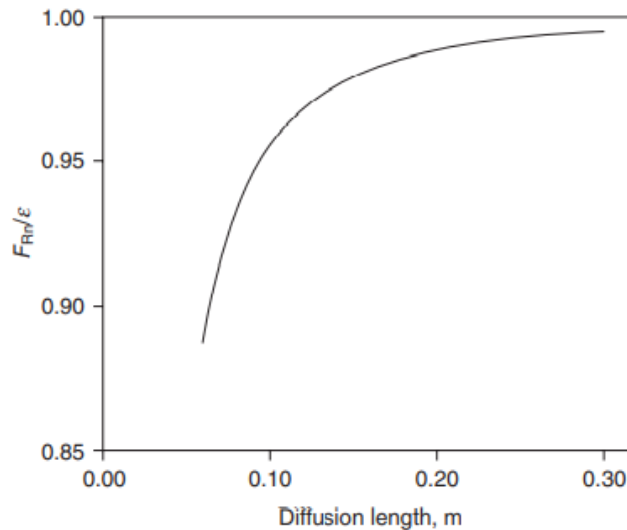
Material	Thickness (mm)	Diffusion length (mm)	Remarks
Gypsum	100	1100	Permeable
Pumice	150	850	Permeable
Limestone	150	400	Permeable
Brick	150	400	Permeable
Sandstone	100	1000	Permeable
Aerated concrete	100	800	Permeable
Heavy concrete	100	60	Permeable
Polymer concrete	40	7	Tight
Granite	30	160	Permeable
Glass foam plate	70	<0.7	Tight
Asphalt-asbestos	3	<0.7	Tight
Bitumen	3	<0.7	Tight
High-density polyethylene	1	<0.7	Tight
Silicone rubber	3	<0.7	Tight
Lead foil	0.1	<0.7	Tight
Butyl rubber	1.5	2	Permeable
Polyurethane coating	5	<0.7	Tight
Plastic foil	3	<0.7	Tight
Epoxy resin	3	<0.7	Tight

**Figura 4-1:** Valores medios experimentales del coeficiente de difusión y la longitud de difusión en materiales de construcción populares.

**Fuente:** (KELLER, et al., 2001 p. 86).

La figura 4-1 muestra los valores medios experimentales del coeficiente de difusión y la longitud de difusión en materiales de construcción populares obtenidos por (KELLER, et al., 2001 p. 87).

La longitud de difusión del radón varía entre unos 0,06 m para los hormigones densos y 0,30 m para los materiales de construcción ligeros. La relación entre  $FR n/\varepsilon$  y la longitud de difusión del radón se deriva y se muestra en la figura 5-1 (DE JONG, et al., 2011 p. 130).



**Figura 5-1:** Longitud de difusión del radón.

**Fuente:** (DE JONG, et al., 2011 p. 130).

Por lo tanto, para la mayoría de los materiales, el factor de liberación de radón  $FR_n$  subestima el coeficiente de emanación de radón  $\epsilon$  en  $\sim 10\%$  como máximo. Como resultado, el factor de liberación de radón se utiliza a menudo en las estimaciones de ingeniería, en lugar del coeficiente de emanación de radón real (KLOVER, 2021 p. 207).

### 1.2.5. Exhalación de radón

La exhalación de radón es el proceso mediante el cual el gas radón es liberado hacia la atmósfera tras ser transportado desde su origen. Para describir este proceso se emplea la tasa de exhalación de radón  $E_o$ , que se define como la concentración de radón liberada por una unidad de superficie durante una unidad de tiempo.

El valor de la tasa de exhalación de radón en un medio depende principalmente de aquellos factores que influyen en el coeficiente de emanación y el transporte de radón, como pueden ser la porosidad del medio, la permeabilidad, la humedad y la distancia de la fuente de radón respecto a la superficie, puesto que la concentración de radón disminuye al aumentar la distancia. Cuando se estudia la exhalación de radón del suelo, las condiciones meteorológicas como la presión y temperatura del aire, la velocidad del viento o las precipitaciones juegan un papel importante. En algunas zonas continentales donde hay fuentes de radón importantes o en el caso de determinadas condiciones meteorológicas, como la inversión térmica o épocas de poca precipitación, la concentración de radón en la atmósfera puede llegar a alcanzar valores elevados gracias a la exhalación (ELMAGD, 2014 p. 392).



### 1.2.6. *Sedimentos y aguas residuales*

Se puede definir como sedimentos a todo material sólido que se encuentra acumulado sobre la superficie terrestre derivados de procesos que actúan sobre la atmósfera, hidrosfera e incluso sobre la biosfera, como por ejemplo vientos, lluvia e incluso corrientes de agua.

Es oportuno diferenciar las palabras sedimentos y sedimento ya que hay una diferencia crítica entre ambas, sedimentos hace referencia al material que está siendo transportado en un determinado medio y aún no ha llegado a lograr su estabilidad física completa, cuando este material ha sido depositado en forma de material sólido por medio de procesos previos que actúan sobre la atmósfera, hidrosfera e incluso sobre la biosfera y la superficie terrestre, finalmente ya pueden ser llamados sedimentos, a este proceso mediante el cual el sedimento alcanza su estabilidad física se le llama sedimentación.

Existen 2 tipos de sedimentos: Insolubles y Solubles

- *Insolubles:* Se corresponden con fragmentos de roca, minerales y materiales arcillosos. Tienen una única clasificación llamada sedimentos Siliciclásticos que son fragmentos de roca o minerales sólidos derivados de una masa continental manteniéndose durante toda su evolución como partículas sólidas (BLAIR, et al., 1999 p. 13).
- *Solubles:* Minerales precipitados a partir de materiales en solución acuosa. Se dividen en dos tipos; sedimentos aloquímicos que son fragmentos como conchas enteras, fragmentos orgánicos o granos no esqueléticos como oolitas, peloides, etc. de composición calcárea y sedimentos ortoquímicos que son formados a partir de precipitados, dentro de los más importantes tenemos los lodos microcristalinos de calcita o dolomita, cemento calcáreo o silíceo. Es de particular interés para este estudio los sedimentos ortoquímicos (BLAIR, et al., 1999 p. 14).

El agua es un elemento fundamental para las aplicaciones mineras, se utiliza agua para los procesos de extracción y limpieza de materiales, como para el personal de la propia instalación, los principales focos de contaminación que podemos encontrar en las minas son; fluidos de perforación salmuera y aguas congénitas, aguas servidas, aguas amargas de refinación, aguas de lixiviación, flotación y concentración en minería y efluentes de refinación y lavadores de gases.

Conocido esto se puede entender al agua residual en la minera como aquella agua sobrante de procesos como lavado de equipos, refinación y extracción del material de la mina, por lo general estos residuos son almacenados en lagunas de sedimentación, donde los materiales más densos descienden al fondo de las lagunas (Aimar Water Solutions, 2021).

Las aguas residuales pueden ser generadas de diversas maneras en una explotación minera, dependiendo de si la mina es subterránea o a cielo abierto, si tiene un balance hídrico positivo o negativo y dependiendo del proceso de refinación, por lo general el agua residual de minería contiene:

- Acido libre.
- Aniones, por ejemplo: sulfato y carbonato.
- Metales disueltos, por ejemplo: hierro, aluminio, calcio, magnesio, manganeso, etc.
- Partículas en suspensión.
- Productos químicos.
- Elementos radioactivos como consecuencia de los procesos de extracción de uranio y tierras raras (CondorCherm Envitech, 2022).

### ***1.2.7. Lagunas de sedimentación***

Una laguna o también conocida como piscina de sedimentación es una excavación artificial que sirve para detener las aguas residuales de ser liberadas en afluentes sin tratamiento, acumulan sólidos y líquidos con alto contenido de sedimentos almacenando las aguas residuales durante el tiempo necesario para que el material más denso que el agua, es decir los sólidos se decanten al fondo de la piscina y el agua restante pueda ser liberada. Son construidas de dos formas distintas pueden ser excavados en el piso o aprovechando deformaciones producidas por las actividades. Las lagunas de sedimentación son de particular interés en materia minera ya que la escasez de agua es uno de los principales problemas existentes que rondan los lugares en los que abundan los recursos explotables y aunque haya fuentes de agua disponibles cerca de una zona de explotación, estas fuentes están destinadas a otros fines, como el potable o el doméstico (ALBERT, et al., 1988 p. 7).

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación para este proyecto es del tipo cuantitativo, pues se calcularon las tasas de exhalación radón-222 presentes en las muestras de sedimentos tomadas en las lagunas de sedimentación de la localidad, así mismo su objetivo es aplicativo. Este Proyecto de Investigación fue de tipo no experimental, puesto que a pesar de que se trabajó en un laboratorio, las actividades desarrolladas para obtener los resultados que se exponen en este proyecto fueron meramente protocolarias y de procedimiento. Se realizó la medición de tasas de exhalación de acuerdo con parámetros preestablecidos y empleando métodos que se saben efectivos para este fin.

#### 2.2. Diseño de la investigación

##### 2.2.1. Localización del estudio

Este Proyecto de Investigación se desarrolló en el sector El Guayabo, en la localidad denominada Torata, cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, en la concesión minera denominada El Guayabo con código 225 perteneciente a la empresa Torata Mining, la cual representa a la compañía australiana Challenger Exploration, en Ecuador. Esta concesión minera se encuentra en etapa de exploración y por tanto los residuos que produce son netamente debidos a esta actividad.



**Figura 6-2:** Vista satelital de la concesión minera “Torata Mining” (color rojo).

Fuente: (Satellites Pro, 2022).

La zona de donde se recolectaron las muestras se encuentra ubicada a aproximadamente 800 metros sobre el nivel del mar, sus coordenadas fueron determinadas con un GPS Garmin eTrex 10, obteniendo las siguientes coordenadas: 3°34'29.4"S 79°52'15.9"W. Se caracterizaba por presentar un clima frío-húmedo, con alta presencia de agua debido a precipitaciones, el suelo arcilloso-terroso conocido como Oxisoles, el cual comprendía la mayoría del predio en combinación con rocas y grava, esta última agregada para facilitar la circulación en el sitio.

Las muestras se colectaron de una piscina de sedimentación, de dimensiones: 9 m de largo, 4 m de ancho y 2 m metros de profundidad, lo que resulta en área total de 36 m<sup>2</sup>, ubicada cerca de la bocamina en el punto de extracción denominado “La Quebrada”. Para el proceso de muestreo la piscina fue dividida en seis segmentos de 6 m<sup>2</sup>.

### **2.2.2. *Recolección y tratamiento de las muestras***

Se tomó una muestra de cada segmento de la piscina de sedimentación, dando un total de seis muestras correspondientes a sedimentos de actividades mineras en la concesión El Guayabo de Torata Mining.

Para la recolección de las muestras se empleó un barreno tipo pala. Debido a que el volumen de agua en la piscina era muy bajo, se recolectaron las muestras de sedimento a una profundidad de 10 cm aproximadamente, respecto a la superficie del agua. Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas, mismas que se etiquetaron y se depositaron en contenedores de poliuretano individuales para facilitar su transporte hasta el laboratorio de Técnicas Nucleares en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

El tratamiento al que fue sometido cada muestra se detalla a continuación:

- a) Todas las muestras fueron secadas, para esto se colocó el sedimento en recipientes metálicos aptos para ser introducidos en las estufas del laboratorio de Biorremediación de la ESPOCH, una vez colocadas en los recipientes se retiró el líquido excedente de las muestras dejando que estas se vuelvan a sedimentar y absorbiendo el agua con la ayuda de jeringas. Se emplearon estufas configuradas a 105 °C durante un periodo de 24 horas. Las muestras secas se almacenaron en bolsas Ziploc, con su respectiva etiqueta, para el posterior proceso de tamizado.
- b) De cada muestra se eliminó de forma manual los residuos de mayor dimensión como piedras y otros objetos que no eran de interés para el estudio y se procedió al tamizado con un tamiz de 500 μm.

### 2.2.3. Metodología para medir la tasa de exhalación superficial de radón

La tasa de exhalación superficial inicial de cada muestra se calculó con la siguiente ecuación (ELMAGD, 2014 p. 392):

$$E_o = (M_e - \lambda_v C_o) \frac{V}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

$E_o$ : Tasa de exhalación superficial inicial ( $Bq h^{-1} m^{-2}$ ).

$M_e$ : Pendiente inicial de la curva de crecimiento (*buildup*) de la concentración de radón dentro de las cámaras ( $Bq h^{-1} m^{-3}$ ).

$\lambda_v$ : Fuga o *leakage* de las cámaras ( $h^{-1}$ ).

$C_o$ : Concentración de radón presente en el laboratorio o *background* ( $Bq m^{-3}$ ).

$V$ : Volumen efectivo de las cámaras ( $m^3$ ).

$A$ : Área de las muestras ( $m^2$ ).

La tasa de exhalación superficial sigue una relación lineal con la concentración de radón dentro de la cámara, este es un comportamiento que se puede analizar a lo largo del periodo de medición y puede afectar directamente a la exhalación de radón desde la muestra hacia el ambiente (interior de la cámara) puesto que ya hay átomos de radón presentes dentro de la cámara (*background*) y el volumen de esta no puede ser ocupado con facilidad.

Conociendo el valor de  $E_o$  podremos finalmente calcular la tasa de exhalación superficial  $E$  la cual se calcula tomando la ecuación 2.2 (CHAO, et al., 1996 p. 357):

$$E = E_o - \alpha C \quad (2.2)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{\lambda_b V}{A} \quad (2.3)$$

Introduciendo 2.3 en 2.2:

$$E = E_o - \frac{\lambda_b V}{A} C \quad (2.4)$$

Además (ELMAGD, 2014 pág. 392):

$$\lambda_b V = V_s \lambda \quad (2.5)$$

Al reemplazar 2.5 en 2.4, obtenemos:

$$E = E_o - \frac{V_s}{A} \lambda C \quad (2.6)$$

Donde:

$\lambda$ : Constante de decaimiento radioactivo del radón-222 igual a  $7.55 \times 10^{-3} h^{-1}$ .

$C$ : Concentración de radón-222 dentro de las cámaras en un tiempo  $t$  ( $Bq m^{-3}$ ).

$V_s$ : Es el volumen de la fuente de radón-222 ( $m^3$ ).

Debido a que la ecuación 2.6 relaciona a cada valor de concentración un valor de tasa de exhalación superficial se pueden graficar como valores puntuales.

La tasa de exhalación másica se determinó empleando la ecuación 2.3 (ELMAGD, 2014 p. 392):

$$E_m = E_o \frac{A}{m} \quad (2.7)$$

Donde:

$m$ : Masa de la muestra del material ( $kg$ ).

#### **2.2.4. Configuración experimental**

La técnica de cámara cerrada consiste en introducir el sistema de detección formado por un monitor (Pylon AB7) en interfaz con un detector (Celda de Lucas 600P) junto a una muestra de interés dentro de una cámara de vidrio de determinadas dimensiones. Para efectos de este estudio se emplearon dos cámaras con distintos volúmenes.

#### **2.2.5. Descripción del sistema de detección**

##### **Interfaz monitor-detector**

La Celda de Lucas es un detector cilíndrico con orificios en un extremo que permiten a la muestra de gas atravesar un filtro de poliuretano a prueba de luz. Este filtro previene que partículas alfa aerotransportadas y la progenie del radón (Polonio, Plomo y Bismuto) ingresen a la celda. Este detector es de tipo centelleo, por lo que el interior de la celda está recubierto con Sulfuro de Zinc

(Zn S) activado con plata, un compuesto químico que, al ser golpeado por partículas alfa, se convierten en helio que emite fotones. En la parte superior de la celda hay un tubo fotomultiplicador que cuenta los fotones revelados y envía la cuenta en forma de impulsos eléctricos a el monitor al que está acoplado la celda.

Una vez los impulsos eléctricos son generados, el monitor los amplifica y da forma de onda, discrimina pulsos con interferencia (ruido) y lleva a cabo el conteo de los pulsos restantes (*counts*). El monitor también almacena los datos los datos que luego pueden ser extraídos en distintos formatos para luego ser analizados. Adicionalmente el AB7 puede llevar a cabo cálculos si se le provee de la información apropiada. Este monitor de última generación especializado en la detección de radón cuenta con las siguientes características (Pylon Electronics Inc., 2020):

- Pantalla táctil LCD.
- Conexión en red.
- Interfaces USB.
- Configuración de mediciones personalizadas.
- Cálculos automatizados.

#### **Descripción de la Cámara A:**

Cámara de vidrio de 5 *mm* de espesor, tiene las siguientes características y componentes:

- Forma cubica de 50 *cm* de arista con un volumen total de  $(125 \pm 0.75) l$ .
- Instalación eléctrica que nos permite conectar el cargador del monitor Pylon AB7 y un ventilador que se usa para homogenizar el aire dentro de la cámara.

#### **Descripción de la Cámara B:**

Cámara fabricada específicamente para este Proyecto de Investigación con vidrio de 4 *mm* de espesor, con las siguientes características y componentes:

- Forma de paralelepípedo con dimensiones  $(40 \pm 0.1) cm \times (40 \pm 0.1) cm \times (32 \pm 0.1) cm$ ,
- Volumen total de  $(51.20 \pm 0.42) l$ .
- Instalación eléctrica con las mismas características que la cámara A.

### **2.3. Mediciones y Parámetros**

Se llevaron a cabo mediciones y se determinaron parámetros que permitieron calcular las tasas de exhalación superficial de las muestras descritas en la sección 2.2 utilizando las técnicas descritas en la misma sección.

### 2.3.1. *Medición de la concentración de radón dentro de las cámaras*

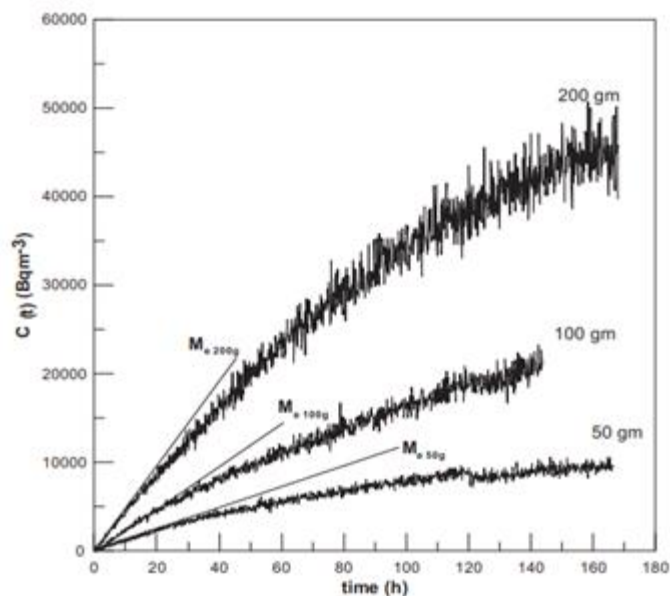
Se registró los niveles de radón con dos tipos de muestras, las muestras de sedimentos de las actividades mineras de la concesión El Guayabo y una piedra de tufo italiano. Esta última muestra, fue analizada con anterioridad por el grupo de investigación GIDAC y se utilizó para probar el desempeño de las cámaras y los códigos de Python desarrollados en este Proyecto de Investigación. A continuación, se detallan las etapas del protocolo.

- a) Se tomó una porción de la muestra de sedimento seco de cierta masa la cual fue colocada en un recipiente rectangular de vidrio. La muestra de tufo italiano completa fue introducida dentro de la cámara.
- b) El recipiente de vidrio, que contiene el sedimento, se introdujo en las cámaras de vidrio junto a el monitor Pylon AB7 en interfaz con la Celda de Lucas, configurado en modo *standard continuous*, con un intervalo de medición de 1 hora.
- c) Se cerraron y sellaron las cámaras empleando cinta aislante para asegurar la mayor hermeticidad posible. La concentración de radón dentro de las cámaras se midió por noventa y seis horas
- d) La muestra de tufo italiano se monitoreó durante 358 horas en la cámara A y 168 horas en la cámara B.
- e) Las curvas de acumulación de los niveles de radón en función del tiempo se graficaron en Python, usando Matplotlib.

A manera de ejemplo, la figura 7-2 muestra las típicas curvas de acumulación, en este caso obtenidas con tres muestras de uranio enriquecido (*pitchblende*) de masas 200, 100 y 50 gramos. Este experimento fue realizado en Arabia Saudita (ELMAGD, 2014 p. 395) utilizando una cámara con un volumen nominal de  $0.05 m^3$ , fabricada por Genetron Instruments con acero inoxidable de 1 mm de espesor.

Una vez descritos los protocolos y graficadas las curvas de acumulación en Python, se procede a determinar los parámetros especificados en la ecuación (2.6), que permiten el cálculo de la tasa de exhalación superficial de radón.





**Figura 7-2:** Curvas de concentración de radón-222 con rectas de ajuste lineal de las curvas de crecimiento.

Fuente: (ELMAGD, 2014 p. 395).

### 2.3.2. Pendiente inicial de la curva de crecimiento ( $M_e$ )

Tras monitorear y descargar los resultados de las mediciones de concentración de radón-222 dentro de las cámaras se realizó un ajuste lineal de los 24 primeros datos de acumulación utilizando el método de mínimos cuadrados en Python, el valor de  $M_e$  es igual al valor de la pendiente de la recta del ajuste. El error asociado a esta medida ( $\Delta M_e$ ) viene dado por el mismo método empleado para su determinación (método de mínimos cuadrados).

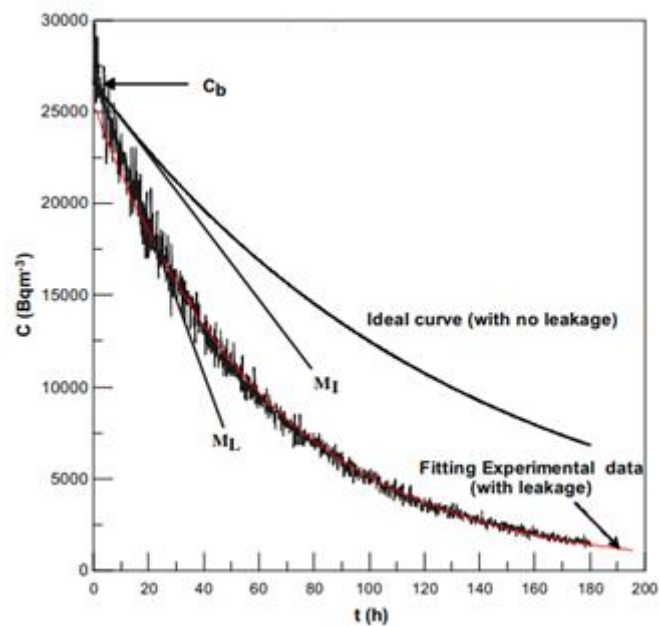
### 2.3.3. Background del laboratorio ( $C_o$ )

Las mediciones del *background* o fondo radón en el laboratorio se realizaron con el monitor Pylon AB7 en interfaz con la Celda de Lucas, durante ciento sesenta y ocho horas, con intervalos de medición de una hora. El archivo en extensión .csv, se descargó desde el monitor AB7 Pylon y utilizando la librería Pandas se importó a Python, dónde se calculó la media como valor representativo del conjunto de datos y una desviación estándar como medida de dispersión utilizando la biblioteca Numpy.

### 2.3.4. Leakage ( $\lambda_v$ )

Se llevaron a cabo dos experimentos para determinar el *leakage* de las cámaras A y B, usando pequeñas piedras de uranio para llenar las cámaras de radón hasta una determinada concentración inicial. Luego se retiró la muestra, se midió la concentración de radón por varios días para obtener la curva de decaimiento.

Como ejemplo, la figura 8-2 muestra una curva de decaimiento típica, en este caso correspondiente a una fuente de radón Pylon RN-1025 de flujo continuo (fuente práctica) en un experimento realizado en la región de Ras Tanura en Arabia Saudita, empleando una cámara de cristal con  $0.5\text{ m}^3$  de volumen que cuenta con una tapa de acero inoxidable equipada con una compuerta de plexiglás de  $(15 \times 20)\text{ cm}^2$  (ELMAGD, 2014 p. 395).



**Figura 8-2:** Curva de decaimiento de radón-222 ideal y experimental con rectas de ajuste y concentración inicial  $C_b$ .

Fuente: (ELMAGD, 2014 p. 395).

- Experimento 1 (Cámara A):

Se utilizó una muestra de uranio de masa  $(9 \pm 0.5)\text{ g}$  colocada en un contenedor plástico. La muestra permaneció dentro de la cámara 137 horas.

- Experimento 2 (Cámara B):

En la cámara B se usaron  $(3 \pm 0.5)\text{ g}$  de uranio y se colocó en el contenedor plástico. La muestra permaneció dentro de la cámara 120 horas.

Para determinar el *leakage* asociado a las cámaras se utilizó la expresión (ELMAGD, 2014 p. 392):

$$\lambda_v = \frac{M_I - M_L}{C_b - C_o} \quad (2.8)$$

Donde:

$\lambda_v$ : es la fuga o *leakage* de la cámara ( $h^{-1}$ ).

$M_I$ : Pendiente inicial de la curva ideal de decaimiento (sin fuga,  $\lambda_v = 0$ ) ( $Bq h^{-1} m^{-3}$ ).

$M_L$ : Pendiente inicial para la curva de decaimiento (con fuga) ( $Bq h^{-1} m^{-3}$ ).

$C_b$ : Concentración inicial de radón dentro de la cámara ( $Bq m^{-3}$ ).

$C_o$ : Concentración de radón en el laboratorio o *background* ( $Bq m^{-3}$ ).

La curva de decaimiento ideal en una cámara sin fuga está descrita por la siguiente expresión (ELMAGD, 2014 p. 392):

$$C_I = C_b e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

La pendiente inicial de la curva ideal de decaimiento (sin fuga),  $M_I$  puede ser calculada con la siguiente relación (ELMAGD, 2014 p. 392):

$$M_I = \frac{dC_I}{dt_{t \rightarrow 0}} = -C_b \lambda \quad (2.10)$$

Donde:

$\lambda$ : Constante de decaimiento radioactivo del radón ( $h^{-1}$ ).

$C_b$ : Concentración inicial de radón dentro de la cámara ( $Bq m^{-3}$ ).

$M_I$ : Pendiente inicial de la curva ideal de decaimiento (sin fuga,  $\lambda_v = 0$ ) ( $Bq h^{-1} m^{-3}$ ).

Para calcular los parámetros ( $C_b$ ) y ( $M_L$ ) se realizó un ajuste lineal con los 12 primeros datos de la curva de decaimiento, usando el método de mínimos cuadrados en Python mediante la biblioteca Sympy, donde la intersección con el eje y, corresponde al valor de  $C_b$  y la pendiente de la recta de ajuste corresponde a  $M_L$ . El error asociado a estas cantidades ( $\Delta C_b$  y  $\Delta M_L$ ), viene dado por el mismo método empleado para su determinación (método de mínimos cuadrados).

Para mostrar lo que se puede observar al llevar a cabo las mediciones previamente descritas en esta sección (2.3.4), en la figura 8-2 correspondiente al experimento de (ELMAGD, 2014 p. 395), se muestran la curva experimental e ideal de decaimiento con las respectivas rectas de ajuste, además de la intersección de estas con el eje y, que corresponde al valor de  $C_b$ .

En base a la tasa de *leakage* obtenida se pueden determinar la tasa de fuga por hora, que viene dada por la ecuación (CHAO, et al., 1996 p. 357):

$$q = V\lambda_v \quad (2.11)$$

Donde:

$q$ : Tasa de fuga por hora de la cámara ( $m^3 h^{-1}$ ).

$\lambda_v$ : Fuga o *leakage* de la cámara ( $h^{-1}$ ).

$V$ : Volumen efectivo de la cámara ( $m^3$ ).

Usando este coeficiente, se determina el tiempo que toma el recambio total de aire de la cámara en cuestión usando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V}{q} \quad (2.11)$$

Donde:

$R$ : Tiempo de recambio de aire (*días*).

$q$ : Tasa de fuga por hora de la cámara ( $m^3 h^{-1}$ ).

$V$ : Volumen efectivo de la cámara ( $m^3$ ).

### **2.3.5. Volumen efectivo de las cámaras ( $V$ )**

El volumen efectivo se calcula como la diferencia del volumen total de las cámaras y el volumen de los elementos introducidos en esta (sistema de detección, cables eléctricos, ventilador y recipiente de vidrio con la muestra).

### **2.3.6. Tasas de exhalación superficial**

Retomando la ecuación (2.1) determinamos la tasa de exhalación superficial inicial de cada una de las muestras, lo que otorga un único valor representativo de este fenómeno. Y empleando la ecuación (2.6) calculamos las tasas de exhalación superficial, datos que representan el comportamiento de la exhalación de radón por parte de una muestra a lo largo del tiempo. Estos datos serán procesados en Python para obtener la gráfica característica de su comportamiento.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los cálculos de tasa de exhalación superficial, *leakage* (tasa de fuga), valores medios y desviación estándar del *background* (fondo radón), empleando las librerías Sympy y Numpy. Se mostrarán gráficos de curvas de acumulación y decaimiento de la concentración de radón realizados con Pyplot usando la librería Matplotlib que permite elaborar gráficas del estilo MATLAB pero con flexibilidad para manipular la escala de los ejes (concentración de radón y tiempo), modificar los colores, formas y nivel de detalle de la gráfica, insertar barras de error y modificar su presentación (color, longitud, remates), añadir o quitar marcos en el área del gráfico, manipular la posición de la figura dentro del área de la gráfica y presentar los datos en forma de líneas, puntos, barras, etc. Esto nos permitirá llevar a cabo análisis en base a sus barras de error, franjas de valores medios y de dispersión, etc.

#### 3.1. Magnitudes asociadas de las muestras y cámaras

En la tabla 1-3 se muestran las masas, áreas de exhalación y volúmenes de las muestras de sedimentos y la roca de tufo italiano de las cuales se midieron tasas de exhalación superficial, además de las masas de las piedras de uranio que sirvieron para el experimento de *leakage*, adicionalmente se muestran los valores de los volúmenes efectivos de las cámaras de vidrio.

**Tabla 1-3:** Masas, áreas de exhalación de las muestras y volúmenes efectivos de las cámaras.

<b>Tufo Italiano</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Volumen	$2.32 \pm 0.53$	<i>l</i>
Área	$0.0863 \pm 0.0006$	$m^2$
Masa	$1499 \pm 0.5$	<i>g</i>
<b>Muestra de Uranio (Experimento 1)</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Masa	$9 \pm 0.5$	<i>g</i>
<b>Muestra de Uranio (Experimento 2)</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Masa	$3 \pm 0.5$	<i>g</i>
<b>Muestra de Sedimentos (Recipiente de Vidrio)</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Volumen	$0.021 \pm 0.018$	<i>l</i>
Área	$0.0177 \pm 0.0004$	$m^2$
Masa	$158 \pm 0.5$	<i>g</i>

<b>Cámara A</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Volumen Efectivo	125 ± 1	l
<b>Cámara B</b>		
<b>Medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Volumen Efectivo	51.2 ± 0.4	l

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

### 3.2. Background del laboratorio y las cámaras

Los resultados del fondo radón (*background*) tanto para el laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH, donde se llevó a cabo este Proyecto de Investigación, como para las cámaras de vidrio, utilizadas para medir las tasas de exhalación superficial y másica de las muestras, se presentan en la tabla 2-3.

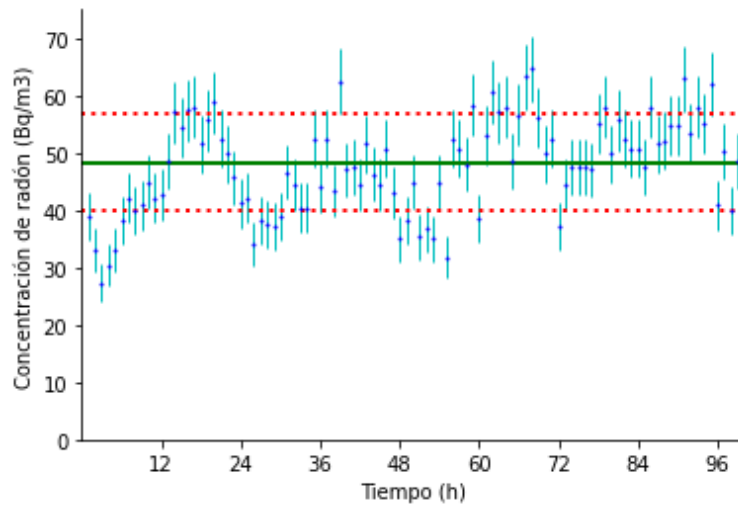
**Tabla 2-3:** Valores del *background* del laboratorio y cámaras de vidrio.

<b>Background del Laboratorio</b>			
Valor medio		Desviación estándar	
48.34 Bq m <sup>-3</sup>		8.36 Bq m <sup>-3</sup>	
<b>Background de las Cámaras</b>			
<b>Cámara A</b>		<b>Cámara B</b>	
Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
42.76 Bq m <sup>-3</sup>	5.07 Bq m <sup>-3</sup>	44.83 Bq m <sup>-3</sup>	6.25 Bq m <sup>-3</sup>

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

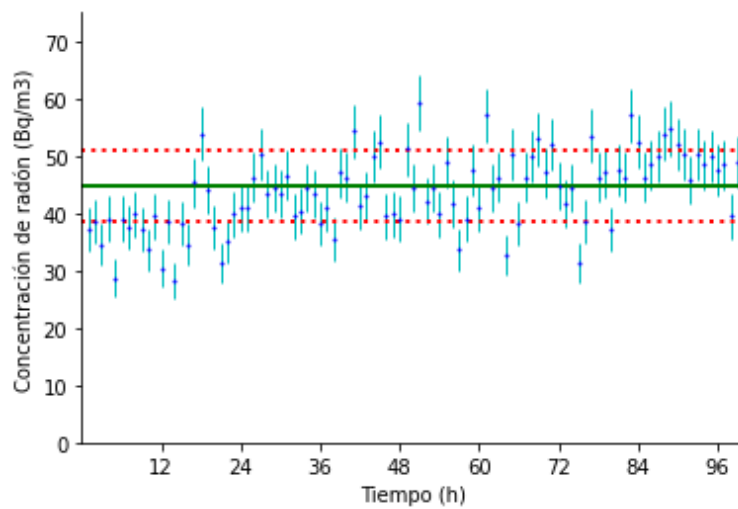
La concentración de radón de fondo de la cámara A es compatible con la concentración de la cámara B y a su vez las dos concentraciones con el background del laboratorio, resultado esperado considerando que es el mismo aire.

En la gráfica 2-3 y 3-3 muestran la concentración de radón en función del tiempo dentro de las cámaras A y B con 96 horas de medición. Las concentraciones de radón dentro la cámara B presentan una mayor dispersión respecto al valor medio que la cámara A. Por otra parte, la dispersión de las concentraciones en el laboratorio es mayor que en las cámaras como se puede ver en la gráfica 1-3.



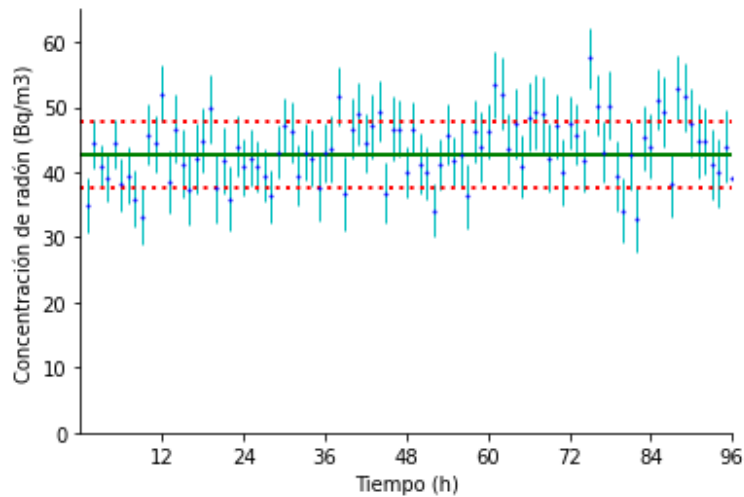
**Gráfica 1-3:** Curva de concentración de radón-222 en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH (*background*).

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).



**Gráfica 2-3:** Patrón de concentración de radón-222 dentro de la cámara A sin presencia de muestra (*background*).

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).



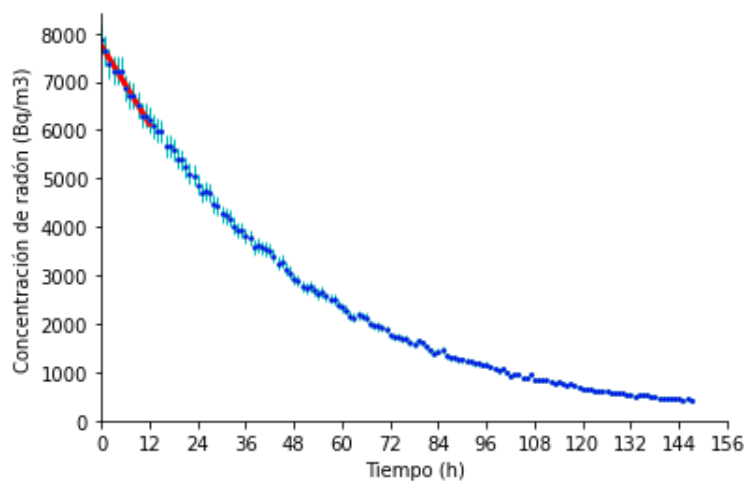
**Gráfica 3-3:** Patrón de concentración de radón dentro de la cámara B sin presencia de muestra (*background*).

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022)

### 3.3. Leakage

Las gráficas 4-3 y 5-3 muestran las curvas de decaimiento de radon-222 (graficadas en Python) dentro de las cámaras A y B respectivamente. La línea roja representa al ajuste lineal de los primeros 24 datos del decaimiento.

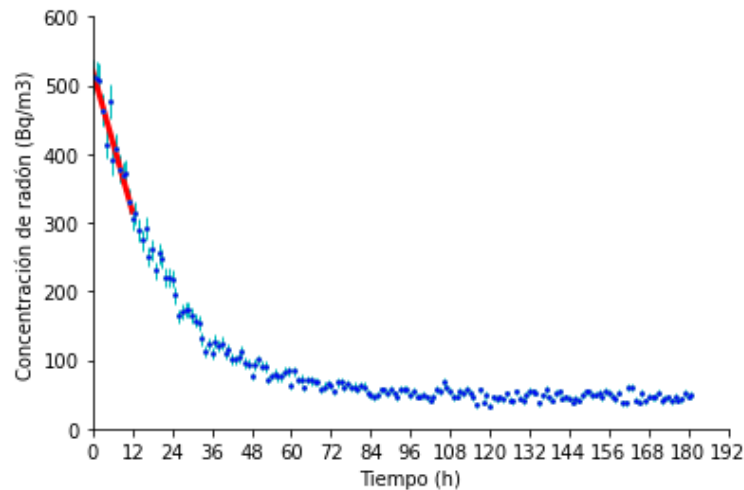
Usando los parámetros descritos en el capítulo II y la ecuación 2.4, la tasa de *leakage*, para la cámara A es  $(0.0099 \pm 0.0010) h^{-1}$  y  $(0.0277 \pm 0.0047) h^{-1}$  para la cámara B. Basados en los resultados, la tasa de fuga de aire de la cámara A es 64 % más pequeña que la cámara B.



**Gráfica 4-3:** Curva de decaimiento de radón-222 dentro de la cámara A en un periodo de 147 horas.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).





**Gráfica 5-3:** Curva de decaimiento de radón-222 en un periodo de 181 horas dentro de la cámara B.

**Realizado por:** (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

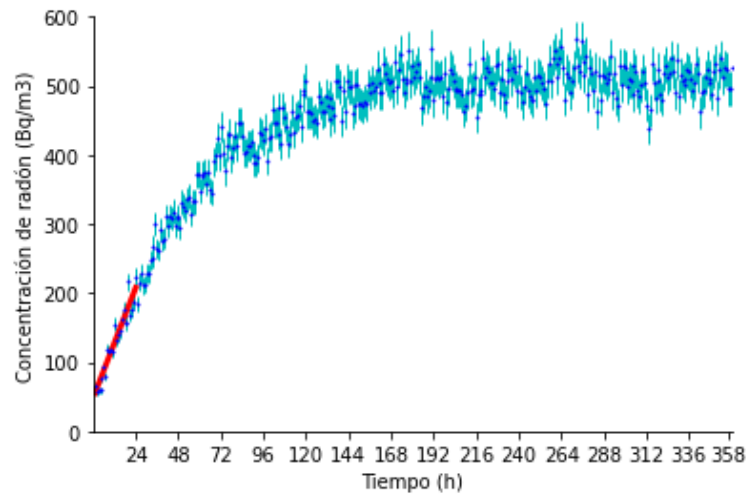
La tasa de fuga por hora de la cámara A es  $1.13 \text{ l h}^{-1}$  y para la cámara B es  $1.12 \text{ l h}^{-1}$ , mientras que el recambio total de aire de la cámara A es de aproximadamente de 4 días y para la cámara B de aproximadamente 2 días.

### 3.4. Tasa de exhalación superficial y másica iniciales

#### Tufo italiano

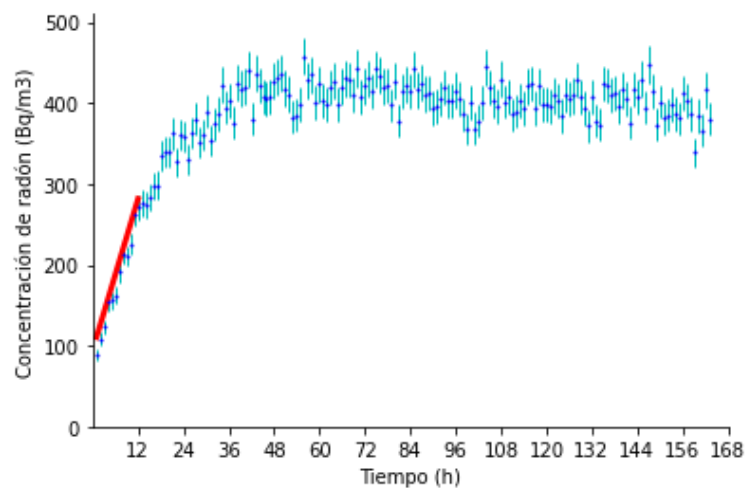
Las gráficas 6-3 y 7-3 muestran las curvas de crecimiento (*buildup*) del radón dentro de las cámaras y las rectas del ajuste lineal, en rojo, para la muestra de tufo italiano.

Se observa que en la cámara A la concentración de equilibrio es mayor que en la cámara B. El estado de equilibrio en la cámara B se alcanza más rápido (aproximadamente 60 horas) que en la cámara A (aproximadamente 168 horas).



**Gráfica 6-3:** Curva de acumulación de radón-222 dentro la cámara A para la muestra de tufo italiano.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

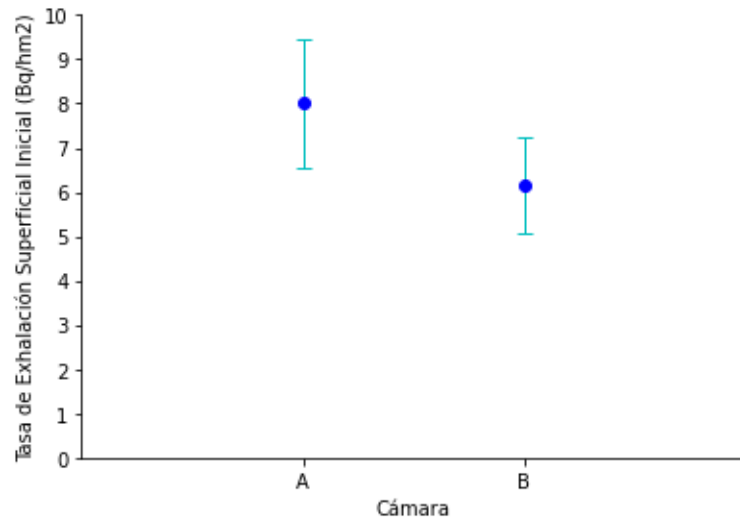


**Gráfica 7-3:** Curva de acumulación de radón-222 para la muestra de tufo italiano dentro de la cámara B.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

El cálculo la tasa de exhalación superficial inicial para la muestra de tufo italiano reporta valores de  $(7.99 \pm 1.44) Bq m^{-2}h^{-1}$  en la cámara A y  $(6.15 \pm 1.10) Bq m^{-2}h^{-1}$  en la cámara B.

En la gráfica 8-3 se comparan los valores de las tasas de exhalación superficial inicial de la muestra de tufo italiano dentro de las cámaras A y B. Se observa que los valores calculados están en concordancia.



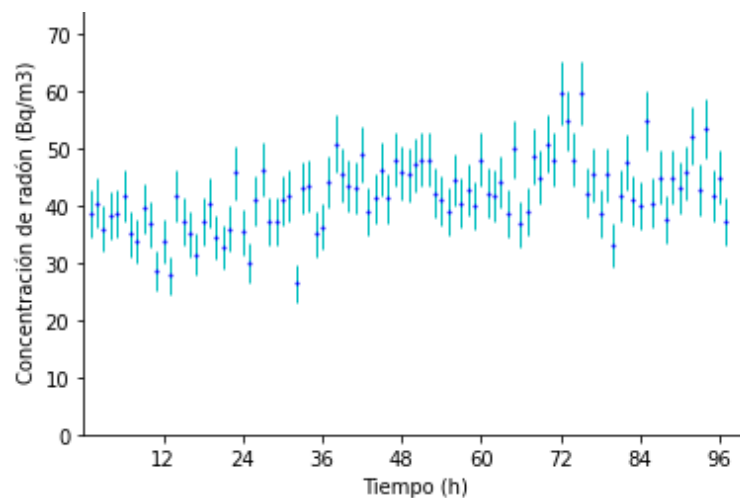
**Gráfica 8-3:** Comparación de las tasas de exhalación superficial inicial de la muestra de tufo italiano en las cámaras A y B.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

Los valores obtenidos para la tasa de exhalación másica del tufo italiano son  $(0.46 \pm 0.05) Bq kg^{-1}h^{-1}$  y  $(0.35 \pm 0.04) Bq kg^{-1}h^{-1}$  en la cámara A y B respectivamente.

### Sedimentos

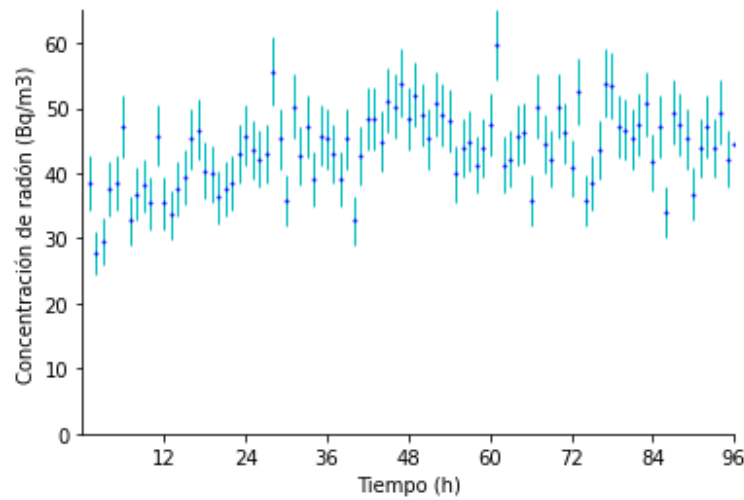
La gráfica 9-3 muestra el patrón de acumulación de radón dentro de la cámara A correspondiente a la muestra de sedimento tomada en el compartimento dos de la piscina de sedimentación.



**Gráfica 9-3:** Patrón de concentración de radón de la muestra de sedimentos 2 dentro de la cámara A.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

La gráfica 10-3 muestra el patrón de acumulación de radón dentro de la cámara B correspondiente a la muestra de sedimento tomada en el compartimento uno de la piscina de sedimentación.



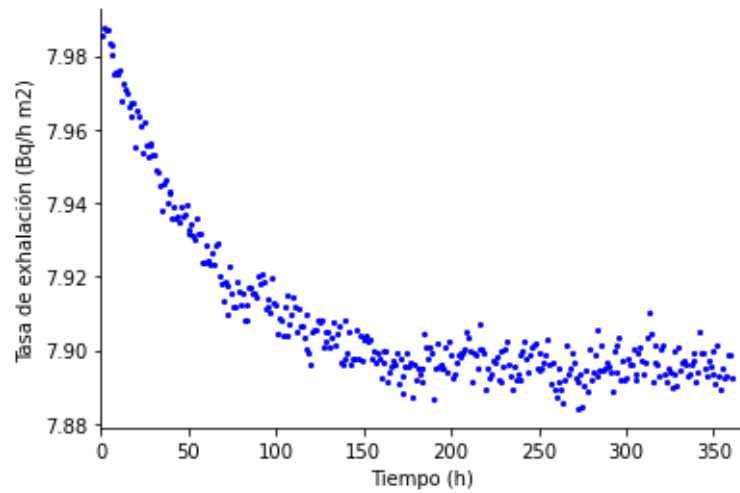
**Gráfica 11-3:** Patrón de concentración de radón de la muestra de sedimentos 1 dentro de la cámara B.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

Las gráficas obtenidas con las muestras de sedimentos indican que no existe una acumulación de radón dentro de las cámaras, más bien los patrones son compatibles a aquellos obtenidos en las mediciones del fondo radón dentro de las cámaras, lo que implica que las muestras de sedimentos no exhalan radón o están libres de radón.

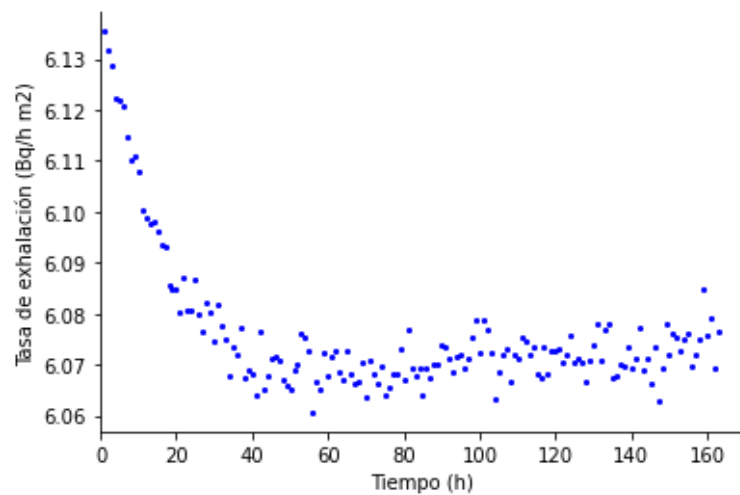
### 3.5. Tasas de exhalación superficial a lo largo del tiempo

Las tasas de exhalación superficial a lo largo del tiempo para la muestra de tufo italiano en las cámaras A y B se calcularon, usando la ecuación 2.6. Las gráficas 11-3 y 12-3 muestran los valores puntuales de la exhalación, durante 358 horas de medición en la cámara A y 168 horas en la cámara B.



**Gráfica 12-3:** Curva de la tasa de exhalación superficial de la muestra de tufo italiano en función del tiempo dentro de la cámara A.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).



**Gráfica 13-3:** Curva de la tasa de exhalación superficial de la muestra de tufo italiano en función del tiempo dentro de la cámara B.

Realizado por: (BRAVO, RODRIGUEZ, 2022).

Estas gráficas muestran un comportamiento espejo al de la curva de acumulación de la misma muestra (gráficas 6-3 y 7-3). La presencia de radón dentro de las cámaras dificulta la emanación de este, se observan variaciones centesimales entre los valores de las tasas de exhalación superficial, lo que indica poca influencia de este fenómeno en el experimento. Con estos resultados se puede decir que las tasas de exhalación superficial del tufo italiano son constantes a lo largo de las mediciones.

## CONCLUSIONES

- Se usó la técnica de cámara cerrada para determinar las tasas de exhalación superficial y másica de radon-222 de los sedimentos recogidos de una laguna de aguas residuales de actividades mineras de la Concesión Torata Mining en la provincia del Oro, que consiste en un detector de centelleo (Celda de Lucas Pylon) y dos cámaras de vidrio con valores de *leakage* de  $(0.0099 \pm 0.0010) h^{-1}$  para la cámara A de 125 litros y  $(0.0277 \pm 0.0047) h^{-1}$  para la cámara B de 51 litros, lo que implica que la cámara A presenta una menor fuga que la cámara B.
- El valor del *background* o concentración de fondo del laboratorio es  $(48.34 \pm 8.36) Bq m^{-3}$ , dentro de la cámara A es igual a  $(42.76 \pm 5.07) Bq m^{-3}$  y dentro de la cámara B es  $(44.83 \pm 6.25) Bq m^{-3}$ , estos resultados muestran gran compatibilidad entre ellos.
- Con la muestra de tufo italiano se comprobó que los algoritmos elaborados en Python para analizar los datos y obtener las curvas de crecimiento y decaimiento de radón dentro de las cámaras, son eficientes y aplicables a todo conjunto de datos correspondientes a muestras de diferentes materiales.
- Las tasas de exhalación superficial y másica de las muestras de sedimentos de una laguna de aguas residuales de actividades mineras de la Concesión Torata Mining presentaron patrones compatibles con el fondo de radón de las cámaras, por lo que se concluye que están libres de radón.

## RECOMENDACIONES

- Mejorar la calidad de las uniones y el sellado de la denominada cámara B será crucial para obtener mejores resultados en caso de que esta se utilice en posteriores proyectos de investigación.
- Usar lenguajes de programación de alto nivel que se acoplen a las necesidades del investigador, como Python en este caso resulta crucial, pues al combinarla con IDLE's como Spyder nos permite procesar grandes cantidades de datos y realizar varios cálculos de manera rápida y efectiva. Un claro ejemplo de esto es este proyecto, pues se tenían conjuntos de más de trescientos datos, y mediante las bibliotecas que ofrece Python estos pudieron ser procesados y visualizados. Además, este software fue empleado para calcular todos los resultados expuestos en este proyecto.
- Cuidar la cantidad de agua presente en los sedimentos antes de empezar con el procesamiento de estos, pues además de apresurar el tiempo de secado, facilita la manipulación y cuidado de estos, lo que resulta en mejores muestras para trabajar.
- Realizar un estudio posterior en el mismo sitio donde se ha efectuado este proyecto cuando la concesión se encuentre en etapa de explotación a fin de comparar los resultados obtenidos en este Proyecto de Investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGAFOSHIN, Nikolai.** *Ley periódica y sistema periódico de los elementos de Mendeleiev.* . Moscú: Mockba Reverte, 1977. pp. 64-67.

**AGUILAR, Alex.** Determinación de los niveles de Radón-222 presentes en la mina subterránea "El Señor de Roma" en el cantón Zaruma-El Oro, Ecuador. (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador, 2018. pp. 2-94.

**AICARDI, Gonzalo; et.al.** *Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio* [blog]. Madrid : Medicina y Seguridad del Trabajo, 2015. [Consulta: 12 de noviembre 2021]. pp. 86-98.

**Aimar Water Solutions.** iagua. [En línea] 2021, (España) vol. 1, p. 5 [Consultado: 13 de mayo 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/gestion-tratamiento-y-reutilizacion-agua-sector-minero-latinoamerica>.

**ALBERT, Erick; et.al.** "Sedimentation ponds: A review of United States regulations affecting design". *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment.* vol. 2, n° 1 (2007), (United States of America) pp. 7-8.

**ALSHAHRI, Fatim; et.al.** "Characterization of Radon Concentration and Annual Effective Dose of Soil Surrounding a Refinery Area", *Journal of Enviromental Science and Technology,* vol. 326, n° 2 (2017) (Saudi Arabia) pp. 7-9.

**ARPACAL.** "Rapporto di prova", ARPACAL [en línea], 2019 (Italia), pp. 4-5. [Consultado: 09 de noviembre 2021]. ISSN 2038. Disponible en: <http://www.arpacal.it/allegati/REPORT2020DATIRDRU2019.pdf>

**ASHBY, Michael; & JONES, David.** *Engineering Materials 1, An Introduction to Properties, Applications and Design.* Burlington, England : Elsevier Science & Technology Books, 2005. ISBN 9780080966663, pp. 350 - 367.

**BLAIR, Thomas; & MCPHERSON, John.** "Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles". *Journal of Sedimentary Research,* vol. 69, n° 1 (1999), (United States of America) pp. 6-19.



**CANTOS, Ana.** Estudio de trazas nucleares de radionúclidos alfa presentes en el ambiente usando detectores de policarbonato CR-39. Riobamba (Trabajo de Titulación) (Pregrado) : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Riobamba - Ecuador). 2021. pp. 29-54.

**CHAO, Christopher; et.al.** "Determination of Radon Emanation and Back Diffusion Characteristics of Building Materials in Small Chamber Tests". *Elsevier Science*, vol. 32, n° 4 (1996) (England) pp. 355-362.

**CondorCherm Envitech.** Tratamiento de Aguas Residuales [blog] [Consultado: 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-aguas-residuales-industria-minera/>.

**DARBY, Sarah; et al.** Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, vol. 330, n° 7485 (2005), (United Kingdom) p. 223.

**DE JONG, Peter; et al.** "Influence of the porosity on the  $^{222}\text{Rn}$  exhalation rate of concrete". *Health Physics*, vol. 100, n° 2 (2011), (Netherlands) pp. 127-137.

**ELMAGD, M. ABO.** Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion – Evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 4, n° 7 (2014), (Egypt) pp. 304-398.

**ESPINOSA, Gilberto; & VAZQUEZ, Rodolfo.** *Física de reactores nucleares : Un enfoque conceptual*. Ciudad de México-México: OmniaScience, 2016. p. 180.

**FAJARDO, Marco.** "Estudio de la presencia de gas radón y radiometría gamma superficial en el área de la Punta Fort William". *Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica*, vol. 4, n° 1 (1998), (Ecuador) pp. 45-53.

**FERRAGUT, Antoni.** "Estudio de la determinación del radón-222 en un monitor de radiación gamma ambiental en aerosoles por filtro de papel" (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Barcelona-España. 2015. pp. 16-20.

**KELLER, Guostaff; et al.** Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Science of The Total Environment*, vol. 272, n° 3 (2001), (Germany) pp. 85-89.

**KOVLER, Konstantin.** Radioactive materials. *Toxicity of Building Materials*, vol. 8, n° 1 (2021), (Israel) pp. 196-240.

**OLAYA, Manuel; & FRUTOS, Borja.** "Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios". *Colección Informes Técnicos*, vol. 1, (2010), (España) pp. 7-79.

**OMS.** *El radón y sus efectos en la salud* [blog]. OMS, 2016. [Consultado: 01 de noviembre de 2021]. Disponible en : <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health#:~:text=El%20radón%20emana%20fácilmente%20del,y%20provocar%20cáncer%20de%20pulmón..>

**ORBE, Jheny.** Radon measurement techniques in building materials and water using Italian and Ecuadorian samples (Trabajo de Titulación) (Doctorado). Università della Calabria, Reggio Calabria - Italia. 2019. pp. 17-30.

**PATITAPABAN, Sahu; et.al.** A comprehensive review on sources of radon and factors affecting radon concentration in underground uranium mines. *Environmental Health Science*, vol. 75, n° 7, (Germany), 2016, pp. 1-19.

**PROAÑO, Paul.** *Mineras habrían causado intoxicación masiva en Santa Rosa*. Ecuavisa, Ecuador, 17 de Febrero de 2021.

**PRZYLIBSKI, Tadeus A.** Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Studey Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 75, n° 2 (2001), (Poland) pp. 87-103.

**Pylon Electronics Inc.** *PYLON ® MODEL AB7 RADIATION MONITOR MANUAL* [blog]. Pylon, 2020. [Consultado: 01 de Junio de 2022.]. Disponible en: <https://pylonelectronics-radon.com/wpcontent/uploads/2019/08/DS138R2-AB7.pdf>.

**SANCHEZ, Guillermo.** "El Uranio, un elemento poco conocido". *Revista de la Sociedad Nuclear Española*, vol. 54, n° 3 (2005), (España) pp. 72-76.

**SERWAY, Raymond; et al.** *Physics Science & Engineering II*. 5ª ed. Madison - Estados Unidos: Harcourt College Pub, 2002, pp. 1452-1453.

**UNSCEAR.** "Effects of ionizing radiation". *Scientific Annexes*, vol. 11, n° 2 (2009), (United States of America) pp. 40-142.

**YAULI ESPIN, Levinton Homero.** Determinación de la concentración de gas radón - 222 en la mina subterránea Promine Cia. Ltda de la cooperativa de producción minera aurífera "Bella Rica" en el cantón Camilo Ponce Enríquez de la provincia del Azuay (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador. 2020. pp. 12-33.

**ANEXOS**

**ANEXO A: RECONOCIMIENTO DE LA CONCESION MINERA “TORATA MINING”.**



**FIGURA 1A**



**FIGURA 2A**



**FIGURA 3A**

**ANEXO B: RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS EN LA CONCESIÓN MINERA “TORATA MINING.**



**FIGURA 1B**



**FIGURA 2B**





**FIGURA 3B**

**ANEXO C: PROCESAMIENTO Y TRAMIENTO DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS.**



**FIGURA 1C**



**FIGURA 2C**





**FIGURA 3C**



**FIGURA 4C**

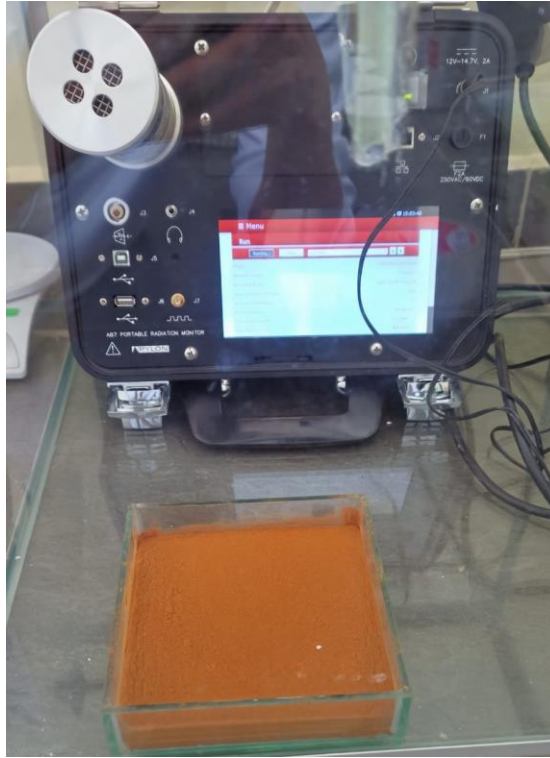
**ANEXO D: PROCESO DE MEDICIÓN CON EL DETECTOR PYLON AB7 Y CELDA DE LUCAS 600P.**



**FIGURA 1D**



**FIGURA 2D**



**FIGURA 3D**



epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 19 / 12 / 2022

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Juan Gabriel Bravo Guzmán Ángel David Rodríguez Ocaña
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Física
<b>Título a optar:</b> Físico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.



2174-DBRA-UTP-2022