



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

**“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**

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para obtener el grado académico de:

**BIOFÍSICO**

**AUTOR: YAULI ESPÍN LIVENTON HOMERO**

**DIRECTOR: Dr. RICHARD PACHACAMA MSc.**

Riobamba-Ecuador

2020

© 2020, Yauli Espín Liventon Homero

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

Yo, Yauli Espín Liventon Homero, en calidad de autor del trabajo de investigación experimental realizado sobre: “DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE GAS RADÓN - 222 EN LA MINA SUBTERRANEA PROMINE CIA. LTDA DE LA COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN MINERA AURIFERA "BELLA RICA" EN EL CANTON CAMILO PONCE ENRIQUEZ DE LA PROVINCIA DEL AZUAY.” soy responsable de las ideas, doctrinas, teorías y resultados expuestos en el mismo, por la presente autorizo a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contiene esta investigación, ya sea con fines académicos o de investigación. Los derechos que como autor me corresponden, seguirían vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Riobamba, 04 de marzo del 2020



**Yauli Espín Liventon Homero**

**C I: 050344072-9**

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

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo experimental, “DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE GAS RADÓN - 222 EN LA MINA SUBTERRANEA PROMINE CIA. LTDA DE LA COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN MINERA AURIFERA "BELLA RICA" EN EL CANTON CAMILO PONCE ENRIQUEZ DE LA PROVINCIA DEL AZUAY”, realizado por el señor YAULI ESPÍN LIVENTON HOMERO, 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
Mat. Luis Marcelo Cortez Bonilla <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2020-03-04
Dr. Richard Willians Pachacama Choca Msc <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2020-03-04
Biof. María Fernanda Heredia Moyano <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		2020-03-04

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser quien me ha dado la fortaleza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados en mi vida.

A mi Esposa que, durante todo este tiempo, ha compartido conmigo momentos difíciles y me sabido comprender y me ha apoyado en todo momento, y especial a mis hijos que siempre han sido mi inspiración para poder cumplir con este sueño que hoy es una realidad.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y un privilegio poder ser su hijo, son los mejores padres.

A mi hermana por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Liventon

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, y por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mi esposa Gladys por ser el apoyo incondicional en mi vida, que, con su amor y respaldo, me ayuda alcanzar mis objetivos, y por cuidar de mis hijos Jeremy y Sebastián, y guiarlos por el camino del bien.

A mis padres Clever y Patricia, por ser los principales promotores de este sueño, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

A mis docentes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi preparación profesional y personal, de manera especial, al Dr. Richard Pachacama, MsC, tutor de mi proyecto de investigación quien me ha guiado con su paciencia, dedicación y apoyo incondicional como docente. De igual forma a la Biof. María Fernanda Heredia Moyano, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación. Y de manera muy especial un agradecimiento eterno a la Biof. Talía Beatriz Tene Fernández PhD, que incondicionalmente me ayudo todo este tiempo para poder culminar mi trabajo de titulación.

De manera especial agradezco al Ing. George Pastor gerente de la operadora minera Promine Cía. Ltda. Y al Lic. Richard Franz Torres gerente de la Cooperativa de Producción Minera Aurífera "Bella Rica" por abrirme las puertas en su empresa que fue un valioso aporte para mi investigación.

Liventon

## TABLA DE CONTENIDO

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

## CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Identificación del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación del problema.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.1. Objetivo General.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Marco Teórico .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.1. Minería Aurífera en Ecuador .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.1.1. Tipos de minas existentes en el Ecuador.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.1.2. Fases de la actividad minera en el Ecuador .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.2. Política Pública Minera .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.3. Estudios Epidemiológicos en Mineros.....</b>	<b>12</b>
<b>1.5.3.1. Rn y sus productos de decaimiento .....</b>	<b>12</b>
<b>1.5.3.2. Estimación de la exposición.....</b>	<b>15</b>
<b>1.5.3.3. Análisis Epidemiológico.....</b>	<b>15</b>
<b>1.5.4. Efectos del radón sobre órganos y tejidos .....</b>	<b>16</b>
<b>1.5.4.1. Consideraciones dosimétricas.....</b>	<b>16</b>
<b>1.5.4.2. Epidemiología del cáncer.....</b>	<b>17</b>

1.5.4.3. <i>Efectos más allá del cáncer</i> .....	17
1.5.5. <i>Legislación Internacional Radón en las minas</i> .....	19
1.5.5.1. <i>Marco Internacional</i> .....	19
1.5.6. <i>Marco Nacional</i> .....	22
1.5.7. <i>Detectores pasivos de Radón</i> .....	22
1.5.7.1. <i>Clasificación</i> .....	22
1.5.8. <i>E-PERM y cámaras de ionización</i> .....	24

## CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	30
2.1. Descripción del área de muestreo .....	30
2.1.1. <i>Ubicación geográfica</i> .....	30
2.1.2. <i>Población de estudio</i> .....	32
2.2. Metodología de experimentación .....	34
2.2.1. <i>Toma de las muestras</i> .....	34
2.3. Metodología de Cálculo de la concentración .....	36
2.4. Cálculo de incertidumbre .....	38
2.4.1. <i>La incertidumbre en el factor de calibración CF</i> .....	38
2.4.2. <i>Cálculo Incertidumbre sobre el radón equivalente debido al fondo de radiación gamma (BG)</i> .....	38
2.4.3. <i>La incertidumbre acerca de la lectura del potencial electret</i> .....	38
2.4.4. <i>Incertidumbre expandida</i> .....	39
2.5. Cálculo de la dosis .....	39
2.6. Cálculo de incertidumbre de la dosis efectiva.....	39

## CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	40
3.1. Concentración de Radón – 222 en las instalaciones de PROMINE CIA. LTDA....	40
3.2. Resultados de la tasa de dosis ambientales .....	41

<b>3.3. Discusión de resultados</b> .....	46
<b>CONCLUSIONES</b> .....	48
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Niveles de referencia recomendados para radón en países de la Unión Europea.....	20
<b>Tabla 2-1:</b> Niveles de referencia recomendados para radón en países europeos que no.....	21
<b>Tabla 1-2:</b> Constantes de cálculo A, B y C.....	36
<b>Tabla 2-2:</b> Tabla de corrección de la altitud sobre el nivel del mar.....	37
<b>Tabla 1-3:</b> Tabla de resultados de voltajes en los diferentes puntos de experimentación.....	38
<b>Tabla 2-3:</b> Tabla de resultados de concentración de radón - 222.....	39
<b>Tabla 3-3:</b> Tabla de resultados de Dosis Efectiva ambiental.....	41
<b>Tabla 4-3:</b> Tabla de resultados de Dosis Efectiva debido a inhalación de Rn - 222.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Cadena de desintegración del U-238 .....	13
<b>Figura 2-1:</b> Cadena de desintegración del U-235 .....	13
<b>Figura 3-1:</b> Equipo lector termoluminiscente (TL).....	23
<b>Figura 4-1:</b> Filtro de carbón activado, detector de radón.....	24
<b>Figura 5-1.</b> Electret E-PERM ® y su lector .....	26
<b>Figura 6-1:</b> Cámaras de ionización diversos modelos .....	27
<b>Figura 7-1:</b> Cámaras de ionización diversos modelos .....	27
<b>Figura 8-1:</b> Principio de funcionamiento de un E-PERM detector de radón. ....	28
<b>Figura 9-1:</b> Encendió y apagado de una cámara S.....	28
<b>Figura 10-1:</b> Equipo para lectura de electret.....	29
<b>Figura 1-2:</b> Mapa de ubicación de PROMINE Cía. Ltda.....	31
<b>Figura 2-2:</b> Extensión de la operadora minera PROMINE Cía. Ltda. ....	32
<b>Figura 3-2:</b> Niveles de la operadora minera PROMINE Cía. Ltda. ....	33
<b>Figura 4-2:</b> Puntos seleccionados para la experimentación en PROMINE Cía. Ltda.....	33

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4:</b> Niveles de Concentración de (Rn-222) en Promine Cia. Ltda .....	40
<b>Gráfico 2-4:</b> Dosis efectiva debido a la radicación ambiental en Promime Cía. Ltda. ....	42
<b>Gráfico 3-4:</b> Dosis efectiva debido a la inhalación de Radón - 222 en Promime Cía. Ltda .....	44
<b>Gráfico 4-3:</b> Diagrama de comparación de dosis efectiva debido a la inhalación de Radón – 222 y a radiación ambiental en “Promime Cía. Ltda.....	45

## **ÍNDICE DE ANEXSO**

**ANEXO A:** INSPECCIÓN DE CAMPO PARA DETERMINAR LOS LUGARES DE MUESTREO.

**ANEXO B:** PREPARACIÓN PREVIA DE LOS ELECTRETS Y LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN ANTES DE SER COLOCADAS EN LOS PUNTOS DE EXPERIMENTACIÓN.

**ANEXO C:** COLOCACIÓN DE LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN EN LOS PUNTOS DE EXPERIMENTACIÓN

**ANEXO D:** INSPECCIÓN DE CAMPO PARA VERIFICAR QUE LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN PERMANECEN EN ESTADO DE REPOSO COMO SE COLOCÓ INICIALMENTE.

**ANEXO E:** PROCESO DE RETIRAR LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN PARA SU POSTERIOR ANÁLISIS DE RESULTADOS.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la concentración de actividad de gas Radón-222 (Rn-222) en la mina subterránea Promine Cía. Ltda de la cooperativa de producción minera aurífera "Bella Rica" en el cantón Camilo Ponce Enríquez de la Provincia del Azuay. Para evaluar la dosis efectiva por inhalación de (Rn-222) en el personal técnico operativo de la empresa; y verificar los posibles lugares donde existe mayor concentración. Usando cámaras de iones Electret (EIC). Como resultado se obtuvo que con respecto a la concentración de (Rn-222), se tiene una concentración elevada en el punto denominado (Frente de la Salosa) igual a  $(1182 \pm 61.92 \text{ Bq/m}^3)$ , en dos de los puntos estudiados se tiene escasa concentración de (Rn- 222), estos son los puntos denominados: (Boca Mina) y (a 20 m de la intersección Emily). La contribución promedio de la radiación gamma externa a la dosis efectiva anual es de  $(0.084 \pm 0.003 \text{ mSv/año})$ , mientras la dosis efectiva debida a la inhalación de radón, calculada con la concentración promedio de radón, es  $(3,47 \pm 0,14 \text{ mSv/año})$ , 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  $20 \text{ mSv/año}$  para recintos cerrados, sin embargo en comparación con los valores recomendados por la EPA  $300 \text{ Bq/m}^3$  el valor de concentración encontrado en (frente de la salosa) es aproximadamente 4 veces mayor. Se recomienda ventilación continua dentro del área de trabajo, además de portar el equipo de protección adecuado para evitar la posible inhalación de (Rn -222).

**Palabras clave:** <RADÓN – 222 (RN-222) >, <CONCENTRACIÓN DE RADÓN>, <CÁNCER DE PULMÓN>, <DOSIS EFECTIVA POR INHALACIÓN >, < BELLA RICA >.

REVISADO

06 MAR 2020

Ing. Jhanatan Parreño Uquillas, MBA  
(ANALISTA DE BIBLIOTECA II)

## SUMMARY

The present investigation aimed to determine the concentration of gas activity Radon-222 (Rn-222) in the underground mine Promine Cia. Ltda. Of the mining production cooperative "Bella Rica" in Camilo Ponce Enriquez canton, located in Azuay Province. To evaluate the effective inhalation dose of (Rn-222) in the company; and check the possible places where there is greater concentration. Using cameras from Electret Ions (EIC). As a result, it was obtained that with respect to the concentration of (Rn-222) there is a high concentration at the point called (Salt Front) equal to  $(1182 \pm 61.92 \text{ Bq/m}^3)$ , two of the points studied have a low concentration of (Rn-222), these are the so-called points: (Boca Mina) and (20 m from the Emily intersection). The contribution The average external gamma radiation at the annual effective dose is  $(0.084 \pm 0.003 \text{ mSv/year})$ , while the effective dose due to radon inhalation, calculated with the concentration radon, is  $(3.47 \pm 0.14 \text{ mSv/year})$ , the values obtained in the investigation are lower than the permissible limits set by the ICRP, concentration maximum of  $1600 \text{ Bq/m}^3$  and an effective dose limit of  $20 \text{ mSv/year}$  for enclosures, without However, compared to the EPA recommended values of  $300 \text{ Bq/m}^3$ , the value of concentration found in (Front of the Salosa) is approximately 4 times higher. It is recommended continuous ventilation within the work area, in addition to carrying adequate protection against possible inhalation of (Rn -222).

**Keywords:** <RADON - 222 (RN-222)>, <RADON CONCENTRATION>, <LUNG CANCER>, < DOSE EFFECTIVE BY INHALATION >, <BELLA RICA>.



## INTRODUCCIÓN

El Radón es un gas radiactivo de origen natural cuya vida media es de 3.8 días, este emana del centro de la tierra a través de las rocas y el suelo, generalmente tiende a concentrarse en espacios cerrados como es el caso de las minas subterráneas. El Radón contribuye de forma significativa a la dosis de radiación ionizante recibida por la población en general aproximadamente en un 57% (Aguilar, 2018). El radón ( $Rn - 222$ ) se forma como el producto de la desintegración del radio ( $Ra - 226$ ) con vida media de ( $T_{1/2} = 1620$  años), que a su vez es parte de la cadena de desintegración radiactiva del uranio ( $U - 238$ ). Es un gas que emite partículas alfa, generadas tras decaimientos sucesivos a partir del ( $U - 238$ ).

La exposición a este gas en la industria minera subterránea ha sido objeto de investigación debido a los efectos que este puede ocasionar en el personal técnico – operativo, según la organización mundial de la salud (OMS, 2015), este es causante del cáncer de pulmón entre un 3 y 14 %, la exposición a la radiación natural resultante de la permanencia en una mina subterránea, ha recibido menos atención que la exposición que aquella proveniente de la industria y usos médicos. La exposición al radón y su descendiente dependen de diversos factores, tales como, el tipo de mina, la geología y las condiciones de trabajo particularmente la ventilación.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de 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. Este trabajo se divide en 4 capítulos que se describen a continuación:

En el capítulo I se puntualiza de manera breve la problemática, antecedentes, identificación del problema, y justificación del trabajo de investigación. Así como también se hace referencia, los objetivos de la investigación los mismos que servirán como guía para realizar su desarrollo.

En el capítulo II se puede apreciar un estudio del arte de la teoría usada para poder elaborar esta investigación, tales como: Estudio a fondo del radón, los efectos del radón sobre la salud, y también se expone sobre la descripción de los materiales y equipos usados.

En el capítulo III se hace una descripción de la zona de estudio, así como también la metodología a seguir conjuntamente con su base científica; y se hace la descripción del procedimiento experimental a seguir, así como los parámetros óptimos para la medición del Radón ( $Rn - 222$ ).

Una vez obtenidos los datos se hace un tratamiento estadístico para el cálculo de concentración de Radón y el cálculo de la dosis por inhalación.

Finalmente, en el Capítulo IV, se describe la interpretación de los resultados obtenidos tanto en concentración de Radón ( $Rn - 222$ ) como también la dosis efectiva debido a inhalación y en base a ello se hace las conclusiones que se lograron y las recomendaciones de este trabajo de titulación.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Identificación del problema

La actividad minera ecuatoriana, se basa en principios de desarrollo sustentable, prevención, precaución, solidaridad y responsabilidad integral (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Arts. 14, 73, 259 y 313). Muchas de las veces no se aplica adecuadamente las técnicas de exploración, explotación y aprovechamiento de los minerales, razón por la cual hoy en día se oponen muchos pueblos e incluso entidades públicas como el ministerio del ambiente y la Agencia de regulación y control minero, ya que consideran que se genera una contaminación desmedida al medio ambiente.

En este contexto las actividades mineras tanto de exploración y explotación que tiene 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, se manejan normas de aprovechamiento de los minerales siempre con un alto índice de responsabilidad socio- ambiental y económico, con una extracción de los minerales tecnificada, amigable con el medio ambiente y a la vez económicamente rentable.

En la actividad minera se presenta ciertos riesgos para los trabajadores, tales como fallas geológicas o falta de seguridad industrial y ocupacional, adicionalmente existen riesgos de carácter biológico por inhalación de gas Radón (Rn - 222), que según la (OMS Organizacion Mundial de la Salud, 2016), es un gas radiactivo de origen natural, que tiende a concentrarse en interiores, como en viviendas, escuelas y lugares de trabajo como es el caso de las minas subterráneas. Así también menciona que el radón es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco. Se estima que la proporción de los casos de cáncer de pulmón a nivel nacional atribuibles al radón con respecto al total varía de un 3% a un 14%, en función de la concentración media nacional de radón y de la prevalencia de consumo de tabaco (OMS Organizacion Mundial de la Salud, 2016).

## **1.2. Justificación del problema**

Los escasos estudios realizados acerca de la medición de niveles del gas Radón - 222 han sido de naturaleza preliminar y no proporcionan datos relevantes para describir la aparición y distribución de este gas en la industria minera. Se necesitan estudios adicionales para describir las concentraciones de este gas radiactivo de origen natural y su distribución geográfica. Además, se debe realizar un estudio para determinar si existe alguna correlación entre la emisión del gas Radón -222 y afecciones del personal minero.

Esta es la razón que motiva el desarrollo del trabajo de titulación, además de que contamos con los equipos necesarios para poder realizarlo y se cuenta con el recurso humano con una amplia capacitación sobre temas que contribuyen con el conocimiento necesario de las áreas a ser investigadas y con ello contribuir a la seguridad del personal implicado.

La operadora minera PROMINE CIA. LTDA, a través de la cooperativa de producción minera aurífera “Bella Rica”, con el apoyo de sus gerentes Ing. George Pastor y Lic. Richard Franz Torres respectivamente, autorizó el desarrollo de esta investigación en sus instalaciones, previo el cumplimiento de normas estipuladas por la misma.

En la operadora Minera PROMINE CIA. LTDA, el proceso de exploración se lo hace a lo largo y ancho de diversas galerías (Niveles-Subniveles) que se dirigen, a diversos buzamientos de las Vetas, los trabajadores se ven afectados por la inhalación de gas Radón (Rn-222) y las fallas geológicas que muchas veces provoca inconvenientes de seguridad e impiden el desarrollo normal del proceso (minero – productivo).

### ***Beneficiarios Directos***

***El Personal*** que laboran en las diferentes galerías, quienes podrán realizar sus actividades de exploración sin riesgos ni peligros de inhalación de Radón (R-222) causante de problemas biológicos.

***La empresa donde se desarrolla el trabajo de investigación*** que es la responsable de garantizar seguridad y buen ambiente de trabajo para sus trabajadores, asegurándole un ambiente apto y adecuado para su trabajo diario eficiente. Bajo las consideraciones de concentraciones de gas Radón (Rn-222).

***Estudiante Investigador*** que tendrá la oportunidad de demostrar sus conocimientos teóricos en la ejecución del presente trabajo de investigación, además que tiene la oportunidad de conocer

experiencias nuevas dentro y fuera de las labores cotidianas mineras.

### ***Beneficiarios Indirectos***

***La carrera Biofísica*** de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, porque a través del estudiante investigador se abren nuevas puertas y líneas de investigación buscando así soluciones técnicas a diversos problemas que se generan en la actividad que se desarrollan en la industria minera.

***El sector minero nacional*** representado por inversionistas, personal técnico y operativo, asesores mineros, docentes universitarios y estudiantes, que pueden utilizar como referencia la información técnica que contiene esta investigación para posteriores indagaciones que se puedan realizar en operadoras mineras vecinas a Promine Cia. Ltda.

### ***Relevancia***

Esta investigación es relevante porque:

- Promine Cia. Ltda. Dispondrá del estudio realizado en esta investigación correspondiente que le permita diseñar o implementar un plan de contingencia para el personal técnico y operativo minero, y pueda generar una estabilización de las labores minero – productivas que se localizan en las áreas contiguas a esta zona.
- Los trabajadores mineros podrán desarrollar sus actividades laborales dentro de un ambiente subterráneo confiable y seguro, generado por la ventilación adecuada para la estabilización de los frentes de explotación, vías de acceso y zonas de descanso, situación que repercutirá positivamente en su comportamiento emocional y ambiente laboral.

### ***Aporte***

- Esta investigación aportará a la empresa para que dentro de su gestión utilice la información, se aplique y se ejecute las recomendaciones desde el punto de vista técnico a fin de asegurar las labores mineras en las áreas donde exista mayor concentración de gas radón.
- Esta investigación aportara una estimación concreta de la cantidad de dosis recibida por los operadores mineros en base a la concentración de Radón (Rn-222).
- Esta investigación será un elemento que se aproveche para varias investigaciones similares que se realicen posteriormente, a la vez que se constituirá en la base datos de

campo recopilados por el investigador, que se utilizarán para valorar globalmente y efectuar un mapa de concentración de radón ( $Rn-222$ ), en esta área del país.

### ***Recursos***

La ejecución de la presente investigación requiere los siguientes recursos:

***El talento humano del estudiante investigador*** quien dispone de los conocimientos técnicos y científicos inherentes a la radiación y afines, para realizar este trabajo de investigación, el tiempo disponible para identificar el área de estudio, recolectar y procesar la información que sustente la misma.

***Equipos y materiales*** se cuenta con los equipos necesarios para la identificación de las zonas de estudio, y con los equipos para la recolección de datos, los mismos que pertenecen al laboratorio de técnicas nucleares de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

***Autorización*** de la empresa minera PROMINE CIA. LTDA. Para utilizar toda la información técnica disponible, así como para efectuar las mediciones y muestreos, necesarios para determinar los parámetros técnicos y operativos que sustenten la investigación en la industria minera.

***Asesoramiento técnico*** de la carrera de Biofísica de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por medio de los docentes miembros de tribunal que revisarán y aprobarán el contenido del presente trabajo de investigación, y del tutor que guiará su desarrollo, así como de los ingenieros de PROMINE CIA. LTDA.

***Disponibilidad Económica*** para cubrir los gastos generados en el desplazamiento y la movilización a la operadora minera PROMINE CIA. LTDA, las impresiones, fotocopias, reproducción de documentos y obtención de material bibliográfico que se requiere en la investigación serán cubiertos por el estudiante investigador.

### **1.3. Antecedentes de la investigación**

Los antecedentes bibliográficos que sirvieron de base para el planteamiento de este trabajo de titulación son detallados a continuación:

En el año 1994 Andam, A y Amoo, D. realizaron una investigación denominada Mediciones de gas radón en minas de oro, en la misma que hicieron mediciones de la concentración de gas radón

en dos minas de oro profundas en Ghana, Tarkwa Goldfields y Prestea Goldfields. Las concentraciones de radón medidas bajo tierra en Tarkwa estaban en el rango de 56 Bq/m<sup>3</sup> a 268 Bq/m<sup>3</sup>. Los valores correspondientes para Prestea fueron 43 Bq/m<sup>3</sup> a 878 Bq/m<sup>3</sup>. Estos resultados representan los primeros datos publicados sobre la concentración subterránea de radón en minas de oro en Ghana. La medición del gas radón se realizó mediante la técnica de trazas nucleares CR-39 como medio de registro para las partículas alfa de la desintegración del radón. El estudio es parte de un programa de monitoreo de radón a nivel nacional (Andam, 1994).

Algunos años más tarde, en el 2001, Tadeusz Andrzej Przylibski, realiza un estudio denominado El radón y el comportamiento de sus desintegraciones en el aire de una ruta turística subterránea en la antigua mina de arsénico y oro en Złoty Stok (Montañas Sudetes, suroeste de Polonia), en esta investigación se describe la aparición del radón y sus desintegraciones en los áreas accesibles, parcialmente abiertos al público, en la antigua mina de arsénico y oro en Złoty Stok. Los resultados demuestran que las áreas bien ventiladas a lo largo de la ruta turística tienen los valores más bajos de todos los parámetros medidos y que las variaciones temporales son irregulares. Los valores de concentración más altos para el radón son (hasta 18.500 Bq/m<sup>3</sup>) y sus productos secundarios (hasta 14.490 Bq/m<sup>3</sup>) se registraron en los trabajos con ventilación natural obstruida (Przylibski, 2001).

Un estudio radiológico preliminar en minas sin uranio en Brasil indicó que una mina subterránea de carbón en el sur de Brasil tenía una alta concentración, es por ello que realizaron este trabajo porque consideraron necesario que la concentración de radón debía evaluarse mejor. Como producto de esta evaluación, se encontró que las concentraciones promedio de radón en todas las campañas de muestreo y sitios de excavación estaban por encima del rango del nivel de acción para los lugares de trabajo de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup> recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica: ICRP 65. Además se encontró que la dosis efectiva promedio estimada para los trabajadores fue casi 30 veces mayor que la dosis promedio mundial para los mineros del carbón (Veiga, 2004).

Otra investigación realizada por Darko en el 2005 trata sobre las concentraciones de radón en aire en Bq/m<sup>3</sup> en los sitios seleccionados se midió usando el modelo Alpha Guard PQ 2000 PRO. Como conclusión a esta investigación se tiene que se estudiaron los materiales radiactivos naturales (NORMS) en muestras de suelo y aire de una mina de oro en Ghana y se calcularon las dosis efectivas anuales para los trabajadores, tanto para minas de superficie como subterráneas. Los resultados revelaron un amplio rango de dosis efectivas, desde un valor bajo de 0.23 – 0.28 mSv para la superficie hasta 1.69 – 1.99 mSv para el subsuelo. Las dosis efectivas anuales para la superficie y el subsuelo estuvieron dentro del rango encontrado

en otros países. También se encontró que estaban dentro del límite para el control de exposición ocupacional establecido por la ICRP60 (Darko, 2005).

En el año 2010, R.M. Anjos y un grupo de colaboradores reportaron un estudio denominado Exposición ocupacional al radón y radiación gamma natural en La Carolina, una antigua mina de oro en la provincia de San Luis, Argentina, donde se menciona que las mediciones del nivel de radiación de radón y gamma se realizaron dentro de la mina La Carolina, uno de los campamentos de minería de oro más antiguos del sur de América del Sur, que está abierto para visitas turísticas en la actualidad. La contribución promedio de la radiación gamma externa a la dosis efectiva anual es de 0.50 mSv, similar al valor de 0.48 mSv reportado por UNSCEAR (2000), la dosis efectiva debida a la inhalación de radón, calculada con la concentración promedio de radón, fue de  $28 \pm 4$  mSv y 1, lo que es un resultado significativo en relación con el límite de dosis ocupacional de 20 mSv sugerido por la ICRP (2008) (Anjos, 2010).

En Ecuador, en el 2018 Aguilar Alex realizó una investigación denominada Determinación de los niveles de Radón-222 presentes en la mina subterránea "El Señor de Roma" en el cantón Zaruma-El Oro, Ecuador. Este estudio se realizó en una mina subterránea de 1090 m de profundidad, la misma que tenía 8 túneles laterales que oscilaban entre 2 m y 380 m de profundidad, para la determinación de concentración de Radón – 222 en el ambiente interior y exterior de la mina y en el obrero se usó detectores LR-115 tipo II con dimensiones de 1 x 2 cm, además se establecieron mediciones a factores ambientales que intervienen en la concentración del Radón – 222, como temperatura, presión y humedad. Los detectores se ubicaron en 14 puntos estratégicos de la mina, en lugares donde existe mayor contacto de la superficie con la mina, se realizaron muestreos cada 60 días, durante 4 meses, los niveles de concentración de radón obtenidos en los 14 puntos de muestreo, se puede observar que los niveles de concentración de Radón – 222 es de  $1819,3 \pm 349,8$  Bq/m<sup>3</sup> con un dosis efectiva promedio de  $22,94 \pm 5,5$  mSv/año, mientras que el promedio de concentración de Radón – 222 y sus descendientes es de  $2348,6 \pm 435,1$  Bq/m<sup>3</sup> con una dosis efectiva promedio de  $31,95 \pm 5,9$  mSv/año, en ambos casos los niveles exceden los límites permisibles establecidos por instituciones internacionales como la ICRP, la cual indica un máximo de concentración 1600 Bq/m<sup>3</sup> y una dosis efectiva límite de 20 mSv/año para recintos cerrados similares a un mina subterránea (Aguilar, 2018).

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Determinar la concentración de actividad 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.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Realizar el estudio del arte del gas Radón generado en la industria minera.
- Identificar los puntos donde exista una mayor probabilidad de exposición para público y que sean idóneos para la colocación de los detectores.
- Calcular la concentración de gas Radón – 222 presentes en los puntos muestrales, usando dispositivos E-PERM y una cámara de ionización ALPHAE para control.
- Evaluar los niveles de gas Radón - 222 en las muestras obtenidas en diferentes áreas de la zona de estudio, para identificar el tratamiento adecuado que se debe dar en el área.
- Determinar la dosis efectiva debido a la inhalación del gas Radón – 222.
- Sugerir recomendaciones de seguridad radiológica dependiendo del nivel de radiactividad del gas Radón – 222 encontrado en el presente estudio.

## **1.5. Marco Teórico**

### ***1.5.1. Minería Aurífera en Ecuador***

#### ***1.5.1.1. Tipos de minas existentes en el Ecuador***

Según el (Banco Central del Ecuador, 2017), el Ecuador cuenta con diferentes tipos de minas debido a su relieve y a la diversidad de recursos que posee. Los tipos de minería más importantes existentes son:

***Minería Subterránea***, es la que desarrolla su actividad de explotación en el interior de la tierra a través de túneles, ya sean verticales u horizontales. En las minas, se trabaja desde una chimenea de acceso y se establecen niveles a intervalos regulares, por lo general con una separación de 50 metros o más; así como también, a partir de varios túneles de acceso con diferente altura, o de rampas de acceso que unen diferentes niveles (Banco Central del Ecuador, 2017).

***Minería de superficie***, es la que se desarrolla sobre la superficie de la tierra, de manera progresiva por capas o terrazas en terrenos previamente delimitados. Este tipo de minería se aplica en sitios donde los minerales están a poca profundidad (Bnamericas, 2015).

***Minería aluvial***, comprenden actividades y operaciones mineras realizadas en riberas o cauces de los ríos; también se emplean métodos de minería aluvial para la extracción de minerales y materiales en terrazas aluviales, que constituyen pequeñas plataformas sedimentarias o mesetas construidas en un valle fluvial por los propios sedimentos del río (Banco Central del Ecuador, 2017).

***Minería por paredones***, es un método de explotación de carbón en fajas delgadas verticales, que son cortadas por medios mecánicos a lo largo de caras o paredes rectas (Abigail, 2018).

***Minería de pozos de perforación***, se refiere a cualquier perforación del suelo diseñada con el objetivo de hallar y extraer fluido combustible, ya sea petróleo o hidrocarburos gaseosos, tales como el gas y el petróleo (Abigail, 2018).

***Minería submarina o dragado***, permite obtener materiales situados bajo el océano o ríos, extrayendo los materiales mediante una draga en una barca especialmente preparada para remover el lecho del mar o del río (Abigail, 2018).

### *1.5.1.2. Fases de la actividad minera en el Ecuador*

Según (Abigail, 2018), existen varias fases de actividad minera en el Ecuador, de las cuales se pueden identificar siete fases que son:

***Prospección***, es la búsqueda de indicios de nuevas áreas mineralizadas.

***Exploración***, consiste en la determinación del tamaño y forma del yacimiento, así como del contenido y calidad del mineral en él existente. La exploración incluye también la evaluación económica del yacimiento. Esta fase comprende las siguientes actividades: mapeo geológico; muestreo geoquímico de sedimentos a lo largo de drenajes; muestreo sistemático de suelo y líneas de geofísica; y, muestreo de afloramientos y sondajes.

***Explotación***, es el conjunto de operaciones, trabajos y labores mineras destinadas a la preparación y desarrollo del yacimiento y a la extracción y transporte de los minerales. Entre sus principales actividades se encuentran: apertura y/o mejora de vías; instalación de campamentos y equipos de producción; extracción, triturado, transporte, molienda y concentración; construcción y operación de escombreras y depósito de relaves; transporte de concentrados a puerto marítimo; y cierre de la mina.

***Beneficio***, comprende el tratamiento de los minerales explotados para elevar el contenido útil o ley de los mismos.

***Fundición***, son los procedimientos técnicos destinados a separar los metales de los correspondientes minerales o concentrados producidos en el beneficio.

***Refinación***, consiste en los procedimientos técnicos destinados a convertir los productos metálicos en metales de alta pureza.

### ***1.5.2. Política Pública Minera***

El sector minero ha venido tomando importancia en el contexto de la economía ecuatoriana, razón por la cual el Gobierno Nacional ha introducido una serie de cambios en el marco legal con el propósito de establecer la normativa para la aplicación de la Ley de Minería y sus leyes conexas, cuyo interés principal es incrementar la productividad del sector minero; incentivar la inclusión de los actores mineros en el territorio nacional; reducir el impacto ambiental y social en las actividades mineras; y, acentuar el nivel de modernización, investigación y desarrollo tecnológico

en el sector minero (Banco Central del Ecuador, 2017).

La explotación minera, al desarrollarse sobre recursos naturales no renovables, es considerada como un área estratégica para el Estado ecuatoriano. Por ello, debido a su trascendencia económica, social, política y ambiental, el Estado se ha reservado el derecho de administrar, controlar y gestionar esta industria (Una Nueva Industria para Ecuador, 2017). En Ecuador existen dos leyes que norman la industria minera: La Ley de Minería de 1991 y la Ley de Minería de 2009, y sus respectivos reglamentos que en su momento recibieron reformas. La primera Ley de Minería de 1991 declaraba a la industria como una actividad de utilidad pública a nivel nacional (Ley de Minería, 1991). La misma que reconocía dos tipos de minería. Por un lado, se identificaba a la explotación artesanal, también denominada “minería en pequeña escala” y, por otro lado, se incluía a la extracción no metálica, que abarcaba materiales de construcción, depósitos salinos artificiales y actividades mineras en las aguas marinas; es decir, esta ley no consideraba grandes proyectos mineros. Adicionalmente, las fases de la actividad minera contempladas en esta ley eran: prospección, exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación y comercialización, estableciéndose la correspondencia de la función ejecutiva para la formulación de la política minera, la cual era aplicada por el entonces Ministerio de Energía y Minas (Ley de Minería, 1991).

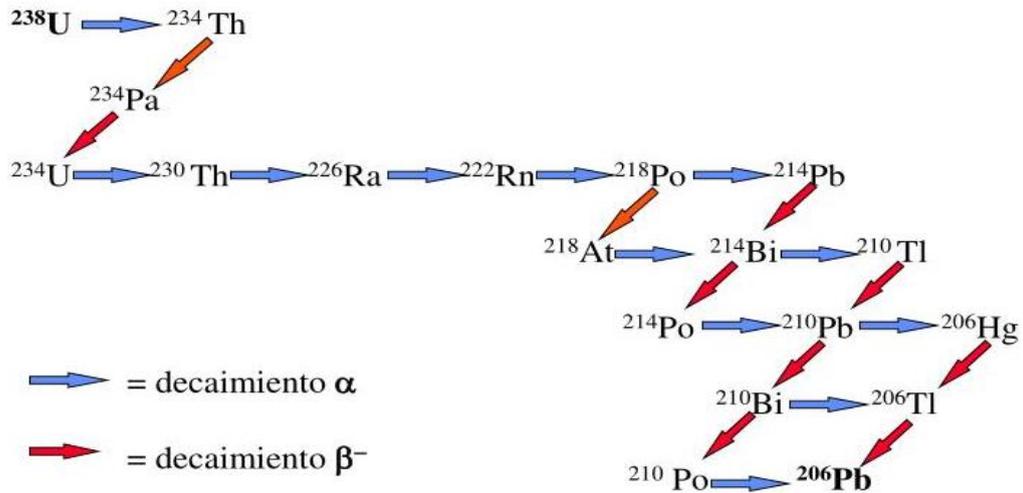
La presente Ley de Minería norma el ejercicio de los derechos soberanos del Estado Ecuatoriano, para administrar, regular, controlar y gestionar el sector estratégico minero, de conformidad con los principios de sostenibilidad, precaución, prevención y eficiencia. Así como también Ley de Minería, regula las relaciones del Estado con las empresas mixtas mineras; con las personas naturales o jurídicas nacionales o extranjeras, públicas, mixtas, privadas y las de éstas entre sí, respecto de la obtención, conservación y extinción de derechos mineros y de la ejecución de actividades mineras (Ley de Minería, 2018).

### ***1.5.3. Estudios Epidemiológicos en Mineros***

#### ***1.5.3.1. Rn y sus productos de decaimiento***

El uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) y el uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ) son los padres de las dos cadenas naturales de desintegración radiactiva más importantes. El  $^{238}\text{U}$  se desintegra, a través de 13 isótopos intermedios, en  $^{206}\text{Pb}$  que es estable. Por su parte el  $^{235}\text{U}$ , a través de 10 isótopos intermedios, finaliza en  $^{207}\text{Pb}$ . Midiendo las relaciones  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  y  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  puede determinarse la edad de una roca e incluso de la propia Tierra (SÁNCHEZ, 2005).

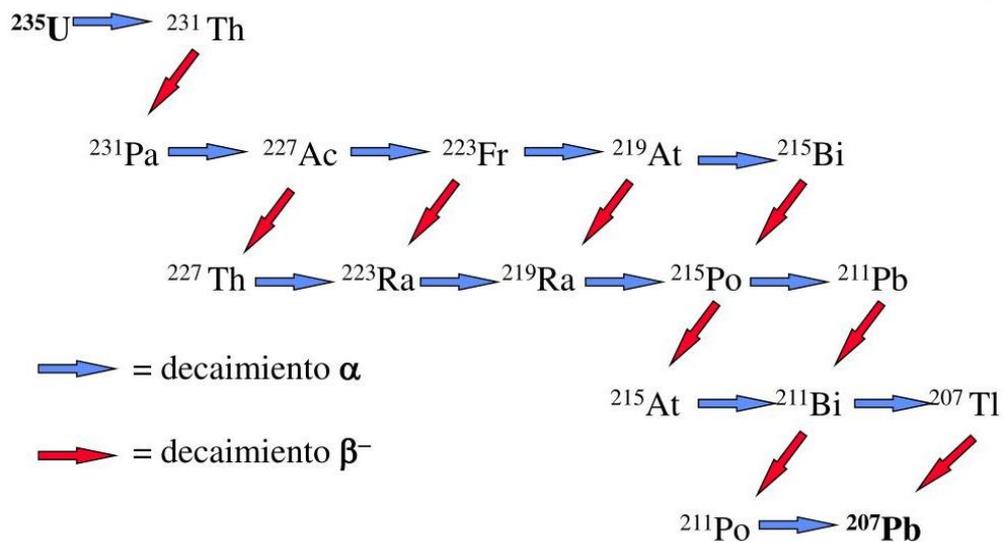
El  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $\text{Th}$ , constituyen las cabezas de las principales series radiactivas, cuyas cadenas de desintegración se presentan en las Figuras 1 y 2. En estado de equilibrio la razón de emisión de cada miembro de la serie es esencialmente igual a la razón de la emisión del nucleído padre. Este y los radionúclidos de larga vida de sus series existen en el suelo y rocas en concentraciones de partes por millón, mientras que los de vida corta están en concentraciones extremadamente pequeñas (Loría, 1992).



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

Fuente: (SÁNCHEZ, 2005)

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: (SÁNCHEZ, 2005)

El  $^{235}\text{U}$  para llegar al isotopo estable  $^{207}\text{Pb}$ , pasa por 8 decaimientos  $\alpha$  y 4 decaimientos  $\beta^-$ .

El radón es un elemento químico de origen natural que pertenece a la familia de los gases nobles. Su símbolo es  $^{222}\text{Rn}$ , es un gas radiactivo que tiene un periodo de vida de 3.824 días, es incoloro, inodoro e insípido, el  $^{222}\text{Rn}$  proviene de la desintegración del radio  $^{226}\text{Ra}$  que tiene una vida media de 1620 años, que a su vez se proviene de la desintegración del uranio  $^{238}\text{U}$  con vida media de 4.470 millones de años.

El  $^{222}\text{Rn}$  es emisor de partículas alfa ( $\alpha$ ) y produce los isótopos de Polonio 212 y Plomo 214 (SC Liu, 1984) (Jaffey, 1889).

En Alemania, Friedrich Ernest Dorn fue quien descubrió al gas radón en 1900, Se le dio el nombre de radón ya que se obtuvo como producto de decaimiento del isótopo del radio  $^{226}\text{Ra}$ ; aunque durante algún tiempo recibió el nombre de nitón (del latín "niteo", brillar) porque en compuestos sólidos emite una luz amarillenta. Es muy radiactivo y se desintegra con la emisión de partículas energéticas alfa. Es el elemento más pesado del grupo de los gases nobles, o inertes. Todos sus isótopos son radiactivos con vida media corta. Además de sus tres isótopos naturales, el radón tiene otros 22 que han sido sintetizados por medio de reacciones nucleares de transmutación artificial realizadas en ciclotrones y aceleradores lineales; sin embargo, ninguno de estos isótopos tiene una vida tan larga como el  $^{222}\text{Rn}$  (ATSDR).

El radón es un gas de origen natural. No tiene olor, color ni sabor. El radón se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del uranio, que está presente de forma natural en suelos y rocas. El radón también puede estar presente en el agua (OMS Organización Mundial de la Salud, 2016).

El radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite partículas radiactivas. Al respirar e inhalar esas partículas, estas se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, donde pueden dañar el ADN y provocar cáncer de pulmón (OMS Organización Mundial de la Salud, 2016).

Al aire libre, el radón se diluye rápidamente, tiene concentraciones muy bajas y no suele representar ningún problema. La concentración media de radón al aire libre varía de 5 Bq/m<sup>3</sup> a 15 Bq/m<sup>3</sup>. 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 Bq/m<sup>3</sup> hasta más de 10 000 Bq/m<sup>3</sup> (OMS Organización Mundial de la Salud, 2016).

### *1.5.3.2. Estimación de la exposición*

Según la (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015), En muchos países, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco. Es mucho más probable que el radón provoque cáncer de pulmón en personas que fuman o han fumado que en quienes nunca lo han hecho. Sin embargo, entre quienes no han fumado nunca constituye la principal causa de cáncer de pulmón. No se conoce una concentración umbral por debajo de la cual la exposición al radón no suponga ningún riesgo. Incluso concentraciones de radón muy bajas pueden dar lugar a un pequeño incremento en el riesgo de cáncer de pulmón. La mayoría de los casos de cáncer de pulmón inducidos por el radón están provocados por concentraciones de radón bajas o moderadas, y no por concentraciones elevadas, dado que en general es menor el número de personas expuestas a concentraciones elevadas de radón en interiores.

En general, las tasas de cáncer de pulmón en mineros expuestos al radón se han estudiado mediante un diseño de cohortes en el que se identifica a todos los trabajadores empleados en una mina durante un determinado periodo de tiempo. A continuación se los somete a seguimiento, independientemente de que sigan o no trabajando en la mina, y al final del periodo de seguimiento se determina el estado vital de cada trabajador. En los estudios en mineros expuestos al radón, las concentraciones de los descendientes del radón suelen expresarse en unidades de «nivel de trabajo» (NT). Por nivel de trabajo se define cualquier combinación de descendientes de vida corta del radón en un litro de aire que dé lugar en total a la liberación de  $1,3 \times 10^5$  MeV de energía potencial alfa. La exposición acumulada de una persona expuesta a dicha concentración durante un «mes de trabajo» de 170 horas (o a una concentración doble durante la mitad de tiempo, etc.) se define como «mes–nivel de trabajo» o «nivel de trabajo–mes» (MNT/NTM) (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015).

### *1.5.3.3. Análisis Epidemiológico*

En lo que se refiere a la minería de oro se han realizado algunos estudios que dan como resultado diversos casos epidemiológicos tales como: los accidentes laborales, los cuales no sólo pueden causar lesiones definitivas, sino la muerte. Gran parte de estos problemas pueden reducirse dramáticamente con programas intensos de entrenamiento y el compromiso decidido de las multinacionales (Carrol, 2012).

Además de los posibles efectos que pueden presentarse por la liberación accidental de grandes cantidades de soluciones cianuradas con altos contenidos de metales en la gran minería de oro, también es posible que la remoción de material del subsuelo genere contaminantes de gran

impacto sobre la salud humana. El grupo de los elementos denominados tierras raras, es decir, los quince lantánidos, además del escandio y el itrio, han sido encontrados en suelos de las áreas de procesamiento de mineral. De hecho, en un estudio publicado recientemente, y que fue ejecutado en una zona minera de la provincia de Fujian en el sudeste de China, la correlación entre la presencia de estos elementos en suelo y sangre de humanos fue alta y significativa.

Es complejo realizar comparaciones entre las características y la magnitud de los impactos que sobre la salud humana y ambiental pueden suscitarse entre la gran minería y pequeña minería.

Algunos de los estudios epidemiológicos corroboran que el radón en las residencias aumenta el riesgo de cáncer de pulmón en la población general. No se han justificado fehacientemente otros efectos del radón sobre la salud. Se estima que la proporción de casos de cáncer de pulmón asociados al radón con respecto al total varía entre un 3% y un 14% según la concentración media de radón en el país y el método de cálculo empleado (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015).

#### ***1.5.4. Efectos del radón sobre órganos y tejidos***

##### *1.5.4.1. Consideraciones dosimétricas*

La unidad usada ampliamente para describir la concentración de energía potencial alfa de la generación del radón es el nivel de trabajo (“working level”) WL, el cual se define como “Cualquier combinación de la progenie del radón de vida media corta, en un litro de aire, en condiciones normales de presión y temperatura que emita  $1.3 \times 10^6$  MeV de energía de partículas alfa”. 1 WL equivale aproximadamente a la cantidad total de energía liberada en un intervalo de tiempo por la generación del radón en equilibrio con 3,700 Bq/m (100 pCi/l) de radón (Diehl, 1995). Expresado en unidades del SI:

$$1WL = 100 \text{ pCi/L} = 3700 \text{ Bq/m}^3$$

También se define el nivel de trabajo mensual (“work level month”, WLM) como la exposición acumulativa equivalente a un “nivel de trabajo” para un mes de trabajo laboral (170 horas):

$$1WLM = 2 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3} \times 170 \text{ h}$$

Aquí habría que destacar que la unidad de actividad radiológica en el SI es el Becquerel (Bq), igual a una transformación por segundo y la unidad tradicional de actividad es el Curie (Ci) y la equivalencia es:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

#### *1.5.4.2. Epidemiología del cáncer*

Según la (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015), la magnitud del riesgo de cáncer de pulmón observado en trabajadores de minas subterráneas expuestos al radón apunta claramente a la posibilidad de que el radón sea una causa de cáncer de pulmón en la población general debido a la exposición que tiene lugar en el interior. Otros factores determinantes del riesgo de cáncer de pulmón también son diferentes según que la exposición se produzca en minas o en interiores. Por ejemplo, muchos de los mineros no solo estuvieron expuestos al radón sino también a otros carcinógenos pulmonares como el arsénico. Todas estas diferencias suponen una incertidumbre sustancial a la hora de extrapolar los estudios en mineros para obtener una valoración cuantitativa del riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón presente en los hogares. Gran parte de la incertidumbre asociada a la extrapolación cuantitativa de los estudios en mineros puede evitarse estudiando directamente la asociación entre el radón en interiores y el riesgo de cáncer de pulmón. En este tipo de estudios, las exposiciones al radón suelen expresarse como la concentración media de gas radón por metro cúbico de aire a la que la persona ha estado expuesta en el hogar durante las décadas anteriores, y su unidad es el becquerelio por metro cúbico (Bq/m<sup>3</sup>), donde 1 Bq corresponde a una desintegración por segundo. Las concentraciones de radón en el interior de una casa concreta suelen experimentar una variación sistemática a lo largo del día y según las estaciones, y la concentración anual media de radón también suele estar sujeta a una variación aleatoria sustancial de un año a otro debida a numerosos factores (patrones meteorológicos o prácticas de los ocupantes tales como la apertura de ventanas). Entre los primeros intentos de estudiar el riesgo de cáncer de pulmón derivado del radón en interiores figuraron varios estudios de correlación geográfica (a veces conocidos como «estudios ecológicos») que examinaron la correlación entre las concentraciones medias de radón y las tasas medias de cáncer de pulmón en diferentes zonas geográficas. Sin embargo, la utilidad de tales estudios es extremadamente limitada, ya que son incapaces de controlar adecuadamente la influencia de otros factores determinantes del riesgo de cáncer de pulmón, como el tabaco, que en la mayoría de los grupos de población causan muchos más casos de cáncer de pulmón que el radón. Resulta complicado comparar directamente los riesgos de cáncer de pulmón observados en los estudios del radón en interiores con los observados en los estudios de mineros expuestos al radón.

#### *1.5.4.3. Efectos más allá del cáncer*

Cuando una persona pasa tiempo en una atmósfera que contiene gas radón y sus productos de

desintegración, la parte del organismo que absorbe la mayor dosis de radiación ionizante es el epitelio bronquial, aunque las vías respiratorias extra torácicas y la piel también pueden acoger dosis apreciables. De igual forma en, otros órganos como la médula ósea y los riñones pueden recibir pequeñas dosis (Kendall et al 2002). Si una persona bebe agua que contiene radón disuelto, el estómago también se verá expuesto. Los datos indicativos de un aumento en la mortalidad por otros tipos de cáncer distintos del de pulmón se han investigado en los mismos estudios sobre mineros expuestos al carbón (Darby et al. 1995), sin que se hallasen pruebas sólidas de que el radón provoque ningún cáncer distinto del de pulmón. No obstante, existen investigaciones posteriores que abordan esta cuestión. Por ejemplo, un estudio de casos en una cohorte que evaluaba la incidencia de leucemia, linfoma y mieloma múltiple en mineros de uranio checos (Rericha et al. 2007) halló una asociación positiva entre la exposición al radón y la leucemia, incluida la leucemia linfocítica crónica.

La relación entre la exposición al radón y las enfermedades cardiovasculares se ha analizado en varias cohortes de mineros expuestos al radón, sin que en ningún momento se hayan encontrado datos que demuestren que el radón provoca enfermedades cardiovasculares (Villeneuve et al. 1997, 2007, Xuan et al. 1993, Tomasek et al. 1994, Kreuzer et al. 2006). Un estudio de casos y controles sobre el cáncer de estómago en una zona en la que el agua de consumo contenía elevadas concentraciones de uranio y otros radionúclidos de origen natural no ofreció ningún indicio de un aumento del riesgo (Auvinen et al. 2005). Se han realizado unos 20 estudios ecológicos sobre la relación entre la exposición de la población general al radón y la leucemia, tanto en niños como en adultos. Varios de ellos, entre los que figura el reciente estudio de (Smith et al. 2007), metodológicamente avanzado, han hallado asociaciones geográficas entre la concentración del radón en interiores y el riesgo de leucemia.

En estudio ecológico realizado en Noruega mostró una asociación entre la esclerosis múltiple y las concentraciones de radón en interiores (Bolvikén 2003). En general, estas asociaciones se han confirmado en estudios de alta calidad de casos y controles o de cohortes, bien en mineros expuestos al radón o bien en la población general; se han realizado varios estudios así (Laurier et al. 2001, Möhner et al. 2006).

Al igual que en los estudios sobre exposición al radón y cáncer de pulmón, estos estudios ecológicos son propensos a una serie de sesgos.

Por consiguiente, es probable que arrojen resultados engañosos y no deben tomarse como prueba de que el radón actúe como causa de las enfermedades en cuestión (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015).

### ***1.5.5. Legislación Internacional Radón en las minas***

#### ***1.5.5.1. Marco Internacional***

Las primeras guías para la protección contra el radón se puntualizaron a la exposición ocupacional, el Comité Consultivo de Estados Unidos en Rayos-X y protección al radio estableció en 1941,  $3.7 \times 10^{-4}$  Bq/cm<sup>3</sup> como el valor de concentración máxima permisible (MCP) para exposición ocupacional, (40 h/semana) para <sup>222</sup>Rn incluyendo su descendiente. (National Bureau of Standards, 1941).

En 1953, la Comisión Internacional en Protección Radiológica (ICRP) sugirió un valor de  $3.7 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>3</sup> para una exposición continua (168 h/semana). En 1959 el ICRP sugirió valores diferenciados, para lugares de trabajo (40 h/semana):  $1.37 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> y  $3.7 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>3</sup> para exposición continua (168 h/semana) (ICRP-1959).

Una vez que quedó clara la relación entre la frecuencia del cáncer de pulmón con la presencia de radón, hubo nuevas propuestas para limitar el riesgo de exposición al radón. En 1976, el ICRP recomendó las siguientes reglas y niveles:

- a) Acceso controlado a menos que la concentración fuera menor a 1100 Bq/m<sup>3</sup>.
- b) El uso de respiradores para concentraciones de 11,000 Bq/m<sup>3</sup>, en áreas de entre 11,000 y 111,000 Bq/m<sup>3</sup>, se combinan el uso de respiradores con la reducción con el tiempo de estancia.
- c) Para concentraciones mayores se marcarían con un anuncio de peligro.

En 1983, ICRP estableció en los “Principios para limitar la exposición del público a fuentes de radiación natural” que “casi todas las exposiciones a fuentes naturales de radiación son controlables y este control debía de ser el factor principal para cualquier sistema de limitación de dosis y recomendó un valor de 200 Bq/m<sup>3</sup> de radón.

En 1985, el ICRP recomendó para un trabajador minero un Límite Anual de Incorporación (ALI) de radón de  $3.6 \times 10^4$  (Bq h m<sup>-3</sup>), que corresponde a 1,800 Bq/m<sup>3</sup> para 2000 horas trabajadas por año. La publicación de ICRP 65 de 1993, fue dedicada totalmente a radón y presentó una serie de recomendaciones para adoptar niveles de acción en interiores exteriores y lugares de trabajo. En base a recomendaciones de organismos internacionales y/o a sus propios institutos de investigación cada país establece niveles de referencia recomendable u obligatoria que además en

algunos casos son de jurisdicción estatal.

En 1990 la comisión de las Comunidades Europeas presentaron recomendaciones para la protección del público a la exposición por radón, las principales recomendaciones se centraron en el establecimiento de un nivel de referencia limitante en viviendas el cual correspondiera a un equivalente de dosis efectiva de 20 mSv por año, correspondiente de manera práctica a 400 Bq/m<sup>3</sup> y para casas nuevas se recomendó un diseño en el cual se tuviera una dosis efectiva de 10 mSv por año correspondiente a una concentración de radón de 200 Bq/m<sup>3</sup>. Actualmente los países de la comunidad europea han adoptado los niveles incluidos en la Tabla 1-1, según (WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON, 2009).

**Tabla 1-1:** Niveles de referencia recomendados para radón en países de la Unión Europea.

<b>País</b>	<b>Nivel de referencia Casas existentes (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Nivel de referencia Casas nuevas (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Austria</i>	400	200
<i>Bélgica</i>	400	-
<i>Dinamarca</i>	400	200
<i>Finlandia</i>	400	200
<i>Francia</i>	-	-
<i>Alemania</i>	1000	250
<i>Grecia</i>	400	200
<i>Irlanda</i>	200	200
<i>Italia</i>	-	-
<i>Luxemburgo</i>	150	150
<i>Países bajos</i>	-	-
<i>Portugal</i>	-	-
<i>España</i>	200	
<i>Suecia</i>	200*	200*
<i>Reino Unido</i>	200	200*

Fuente: (WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON, 2009)

Otros países europeos que no pertenecen a la Unión Europea han adoptado los niveles de referencia listados en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Niveles de referencia recomendados para radón en países europeos que no pertenecen a la Unión Europea.

País	Nivel de referencia Casas existentes (Bq/m <sup>3</sup> )	Nivel de referencia Casas nuevas (Bq/m <sup>3</sup> )
<i>Bielorrusia</i>	400* 200	200*
<i>Republica Checa</i>	500	250
<i>Estonia</i>	400	200
<i>Latvia</i>	600* 300	300*
<i>Lituania</i>	400*	200*
<i>Noruega</i>	400	200*
<i>Polonia</i>	400	200*
<i>Rusia</i>	400*	200*
<i>República Eslovaca</i>	500*	250*
<i>Eslovenia</i>	400	200
<i>Suiza</i>	1000* 400	400*
<i>Yugoslavia</i>	400* 200	200*

Fuente: (Carranza, 2018)

En el caso de los Estados Unidos de América el nivel de referencia recomendado por la Agencia de Protección Ambiental (US EPA, 2003) es de 148 Bq/m<sup>3</sup>, aunque en los diferentes Estados adoptan niveles diferentes que se encuentran entre 200 y 400 Bq/m<sup>3</sup>.

En México no hay regulación al respecto y es necesario que se considere que es un hecho que el radón es cancerígeno y por lo tanto debe de existir regulación al respecto como en la mayoría de países del llamado primer mundo. En base a lo anterior, y debido al riesgo en salud existente, el determinar las concentraciones de radón en lugares cerrados como minas, cuevas, casas, edificios, salones, lugares de trabajo, y específicamente en guarderías, kindergarten, y escuelas, es fundamental y estratégico.

Y esta tarea debería ser realizada por el Estado, como lo recomienda el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, también conocido por sus siglas en inglés UNSCEAR, o bien por Universidades y/o empresas privadas responsables y autorizadas por instituciones oficiales; para prevenir casos de cáncer pulmonar, leucemias, y algunas otras enfermedades en la población, generadas por el radón intramuros; y con esto también reduciendo el costoso gasto público o privado, debido a los tratamientos del cáncer pulmonar, y demás posibles afectaciones en salud de la población.

### ***1.5.6. Marco Nacional***

Según (Ley de Minería, 2018), Art. 5, El sector minero estará estructurado de la siguiente manera: “El Ministerio Sectorial, La Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), El Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM), La Empresa Nacional Minera (ENAMI EP), y, Las municipalidades en las competencias que les correspondan”. Lo antepuesto es un hecho histórico deseado por el sector debido a la falta de atención administrativa efectiva. El 13 de febrero de 2015 el presidente Rafael Correa firmó el Decreto Ejecutivo número 578 mediante el cual en su artículo 3 se creó el Ministerio de Minería (Decreto Ejecutivo No. 578, 2015). El cuerpo legal vigente establece que la participación del Estado en los beneficios de la industria minera debe ser mayor a la de las empresas privadas (Ley de Minería, 2018). La (Ley de Minería, 2018) establece que para los proyectos de minería a gran escala el Gobierno y la empresa a cargo deben negociar y firmar un Contrato de Explotación. El manejo de estos recursos, dados por empresas privadas en etapas previas a la explotación, requiere transparencia y claridad. Como se mencionó anteriormente, la Constitución manda que los ingresos obtenidos de los recursos no renovables sean invertidos en actividades no permanentes con un objetivo: Evitar la erosión de la riqueza pública.

### ***1.5.7. Detectores pasivos de Radón***

Los detectores pasivos le indican la concentración máxima a la que ha estado expuesto el detector al gas, son muy útiles para saber positivamente si hay Radón o no en un espacio determinado y que niveles máximos se alcanzan. Para obtener resultados que tomen en cuenta los efectos estacionales, climatológicos y condiciones ambientales en viviendas, es importante llevar a cabo mediciones en un período largo de tiempo. El promedio en la concentración de radón en el aire en viviendas sobre este período de tiempo largo es el que determina el daño en la salud del ser humano. El uso de dispositivos integradores es la manera más práctica de obtener el promedio de la concentración de radón en un tiempo largo. De aquí que estas técnicas son preferidas para vigilancia laboral para obtener la concentración de radón en aire promedio en una construcción específica. Las técnicas pasivas son descritas a continuación (Carranza, 2018).

#### ***1.5.7.1. Clasificación***

***Termoluminiscencia.*** - La termoluminiscencia es la propiedad que tienen ciertas sustancias de almacenar energía que puede ser liberada en forma de luz cuando la sustancia es calentada. Estas sustancias termoluminiscentes son sensibles a la radiación alfa, beta y gamma.



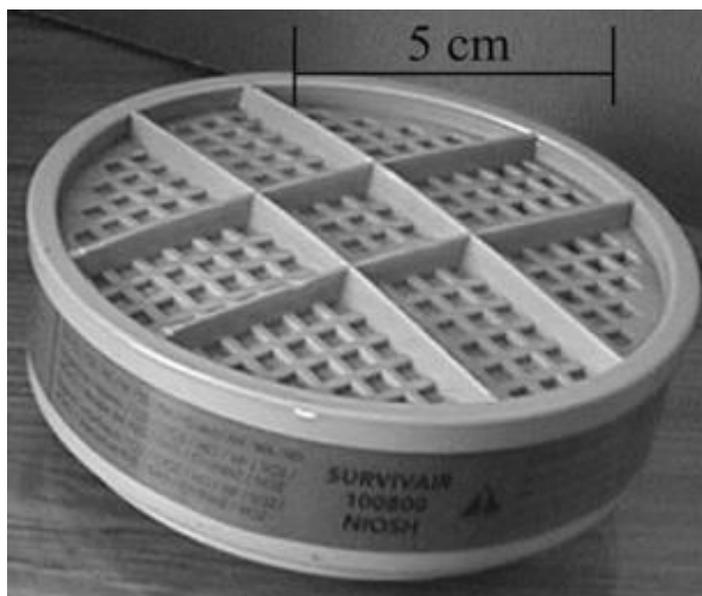
**Figura 3-1:** Equipo lector termoluminiscente (TL).

Fuente: (Carranza, 2018)

***Medición de radón mediante partículas alfa.*** - El procedimiento para considerar solamente la componente de las partículas alfa se basa en dos detectores termoluminiscentes, los cuales son montados en la parte interior de un recipiente cóncavo, uno de los detectores se cubre con una laminilla delgada de aluminio para excluir todas partículas alfa, mientras las partículas beta y radiación gamma son detectadas; y el otro detector se deja descubierto. Se leen ambos detectores, y por exclusión se obtendrá la contribución de las partículas alfa, solamente (Regulla et al, 1980).

***Medición de radón mediante radiación gamma.*** - Por este procedimiento, se puede determinar la concentración de radón intramuros del medio ambiente, midiendo las radiaciones gamma emitidas por los hijos del radón. Siendo este un método alternativo, pero que, por su complejidad para la discriminación de la radiación gamma del uranio, torio, radio, ha quedado rezagado respecto a otros métodos mucho más simples.

***Carbón Activado.*** - Esta técnica es usada para vigilancia rápida de concentración de radón en aire. El carbón activado tiene la característica de absorber y retener el radón. En esta técnica un recipiente que contiene el carbón activado es expuesto al aire durante algunos días de tal manera que el radón entre en el recipiente. El radón y sus hijos atrapados en el carbón son medidos por espectrometría gamma (Montero et al, 2003; Espinosa and Silva, 2009). En la figura 4, se muestra un filtro comercial de carbón activado, usado para la medición de radón.



**Figura 4-1:** Filtro de carbón activado, detector de radón

**Fuente:** (Carranza, 2018)

***Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos.***- La metodología de detección por Trazas Nucleares en Sólidos es recomendada para la medición de concentración de radón intramuros, por no ser sensible a cambios de temperatura, de presión atmosférica, de humedad, no requiere de energía eléctrica, los dispositivos de medición son de tamaño pequeño, se pueden transportar y cargar fácilmente en una mochila, su costo no es elevado, por lo que su pérdida no es onerosa en casos de desastre, inundaciones, o simplemente desaparición del lugar. (Espinosa, 1994, 2016) (Carranza, 2018).

#### ***1.5.8. E-PERM y cámaras de ionización***

Un E-PERM, también conocido como una cámara de iones Electret (EIC), es un monitor de ionización pasiva integración que consiste en un electret muy estable montado dentro de una pequeña cámara hecha de conductor de electricidad de plástico. El electret, es un disco Teflón cargado, sirve como la fuente para la recolección de iones y como el sensor de iones de integración.

El gas radón difunde pasivamente en la cámara a través de entradas filtradas, y las partículas alfa emitidas por las moléculas de aire ionizar proceso de descomposición. Los iones negativos producidos dentro de la cámara se recogen en la electret cargado positivamente, causando una reducción de su carga de superficie. La reducción de la carga es una función de la concentración de radón, la duración del período de prueba, y el volumen de la cámara (Industry Lane Frederick). Típicamente, electrets más sensibles, se hace referencia como ST Electrets, se utilizan para mediciones a corto plazo, y (electrets a largo plazo) LT Electrets que son menos sensibles se

utilizan para mediciones de una duración más larga (Industry Lane Frederick).

Según (Industry Lane Frederick), el sistema de E-PERM consta de cuatro componentes:

- (1) Un cargado electrostáticamente un disco de teflón que recoge iones, llamado un electret
- (2) Una cámara de iones de plástico conductor en el que un electret se puede cargar
- (3) Un lector para leer el potencial superficial (tensión) de la electret
- (4) Software para calcular las concentraciones de radón.

Se necesitan estos componentes para hacer una medición de radón en el interior. E-PERMs (que incluyen un electret y la cámara) se denominan (así como el software utilizado para el cálculo de la concentración de radón y generar un informe) a veces por su nombre genérico, Electret Ion Cámaras, que la EPA ha designado el acrónimo “EIC” o el método “CE”, en referencia al sistema de E-Rad PERM de Elec.



**Figura 5-1.** Electret E-PERM ® y su lector

**Fuente:** (Industry Lane Frederick)

**Cámaras de ionización.** - Cuando un electret está equipado con la cámara, se llama una cámara de iones electret y se refiere como un E-PERM. El electret sirve tanto como una fuente de campo eléctrico para ayudar colección de iones y que también sirve como un sensor. Como se recogen iones, la tensión de superficie de la electret disminuye en proporción a la concentración de radón y el tiempo de exposición. La disminución de la tensión se mide usando un lector de voltaje electret, conocido como un lector de SPER-1 (Industry Lane Frederick).

El radón es un gas radioactivo inerte. Como se difunde de radón en la cámara a través de aberturas filtradas, las partículas alfa emitidas por la descomposición del radón provocan la ionización, que crea iones positivos y negativos en el aire. Cuando esto ocurre en el volumen fijado de una cámara de conductor de la electricidad, los iones negativos son atraídos hacia la superficie de la electret cargado positivamente. El electret lleva una carga positiva y por lo tanto se acumula iones negativos del aire, mientras que los iones positivos van a la pared de la cámara conductora de la electricidad y son neutralizados. Rad Elec fabrica diferentes tipos de cámaras. La base de la cámara E-PERM está tiene una rosca en la parte inferior para que se acople al electret. Hay dos tipos de cámaras de ionización (el "S" y "L") incluyen un mecanismo de encendido / apagado para cubrir y descubrir la electret (Industry Lane Frederick).

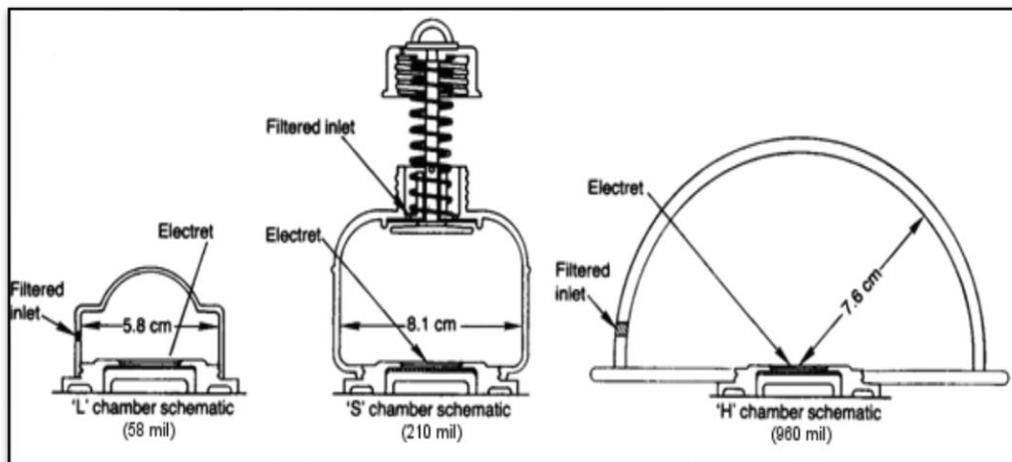
Rad Elec fabrica cámaras que tienen diferentes volúmenes a ser utilizados para una variedad de las opciones de medición. La Cámara S (210 ml) se usa principalmente para 2-7 mediciones día y dispone de un mecanismo de "ON / OFF". La Cámara L (58 ml) se usa principalmente para mediciones a largo plazo. Una versión de la Cámara L, también tiene un mecanismo que permite que la cámara sea "abierta" y "cerrada". Una Cámara H (960 ml) se usa principalmente para

mediciones de una duración más corta, y se puede modificar para mediciones de “flujo” (Industry Lane Frederick).



**Figura 6-1:** Cámaras de ionización diversos modelos

Fuente: (Industry Lane Frederick)

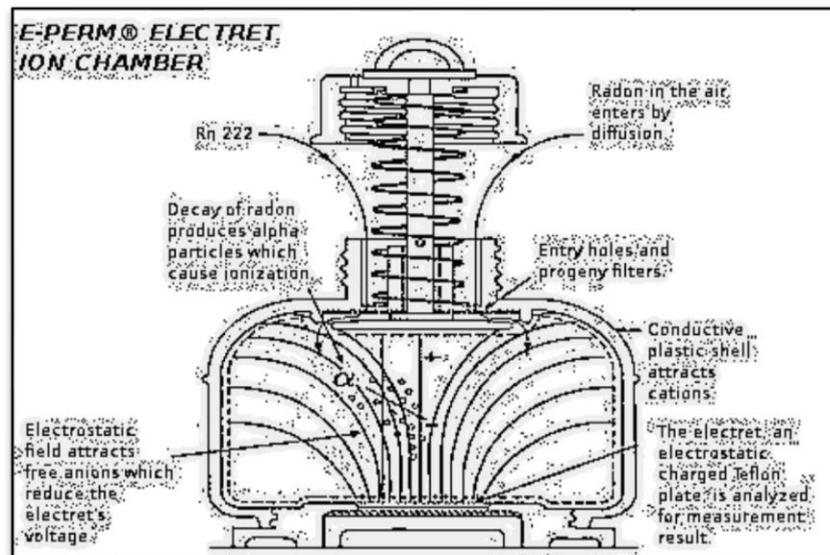


**Figura 7-1:** Cámaras de ionización diversos modelos

Fuente: (Industry Lane Frederick)

**Principio de funcionamiento de las cámaras de ionización.** - Sólo el gas radón (no sus descendientes presentes en el aire) se difunde a través de la entrada de filtrado en el volumen de la cámara hasta que la concentración de radón en el interior de la cámara es el mismo que el interior de la habitación. El electret cargado positivamente atrae los iones negativos (aniones) generados por la radiación en la cámara de lo que resulta en una disminución neta de la tensión de electret.

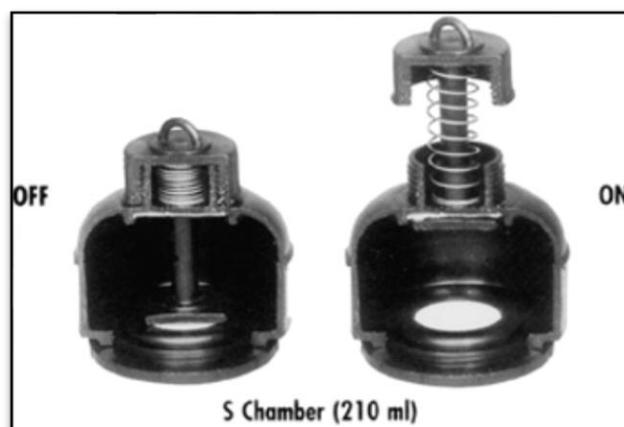
Los iones positivos (cationes) van a la pared de la cámara y se disipan. La disminución de tensión del electret es proporcional a la concentración de radón y el tiempo de la exposición. La caída en el voltaje de la electret es la medida del producto de la concentración de radón y el tiempo de exposición. La concentración de radón se informa como sea pCi / L o Bq / m<sup>3</sup> (Industry Lane Frederick).



**Figura 8-1:** Principio de funcionamiento de un E-PERM detector de radón.

Fuente: (Industry Lane Frederick)

**Cámara S.-** La cámara estándar o S es una cámara que tiene un volumen de 210 ml con un mecanismo de “OFF/ON”. Cuando la medida se va a hacer en un corto plazo se usa (ST) electret de corto tiempo, la configuración de E- PERM en ese caso será "SST". Cuando la medida se va a hacer en un largo plazo se usa (LT) electret de largo tiempo, la configuración de E- PERM en ese caso será "SLT" (Industry Lane Frederick).



**Figura 9-1:** Encendido y apagado de una cámara S

Fuente: (Industry Lane Frederick)

***El lector de Electret.***- Los lectores SPER (potencial de superficie Electret Reader) son una familia de lectores utilizados para medir la tensión de un electret. El cambio en la tensión de superficie de un electret durante un período de exposición conocida es una medida de la concentración integrada en el tiempo de radón en la cámara -PERM durante el período que este sea expuesto (Industry Lane Frederick).



**Figura 10-1:** Equipo para lectura de electret

**Fuente:** (Industry Lane Frederick)

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Descripción del área de muestreo

##### 2.1.1. Ubicación geográfica

PROMINE CIA. LTDA., es una operadora de la cooperativa de producción minera aurífera “Bella Rica” que geográficamente se sitúa en la parte occidental de la Provincia del Azuay, en el Cantón Camilo Ponce Enríquez sector La López. Esta zona goza de un clima tropical húmedo con temperaturas que van desde los 21°C hasta los 30°C, su topografía es bastante irregular posee altitudes que fluctúan desde 43 m.s.n.m., en la cabecera cantonal, hasta los 3680 m.s.n.m., en su parte alta la concesión minera “Bella Rica” está comprendida por 1350 hectáreas mineras cuyos límites son al Norte concesión minera GOLD RUSH, concesión minera GUANACHE 3 DE MAYO, concesión minera MOLLOPONGO, concesión minera MUYUYACU y MUYUYACU I, al Sur con la concesión minera MTOP RIO SIETE, concesión minera PARAÍSO I y Concesión minera DARWIN, al Este con Concesión minera DARWIN y al Oeste con concesión minera ROSSANA. (Ver Figura 1-2).

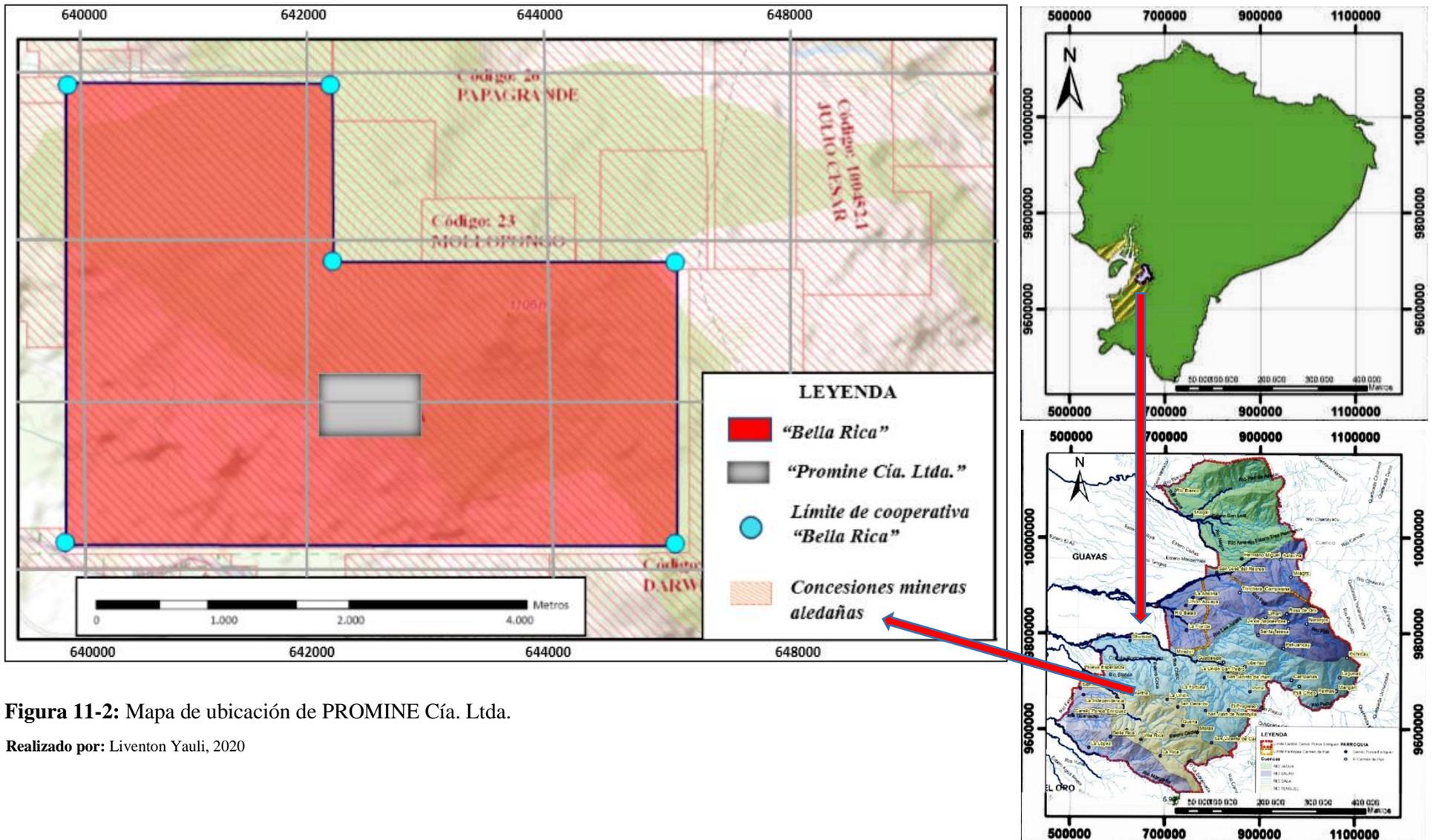


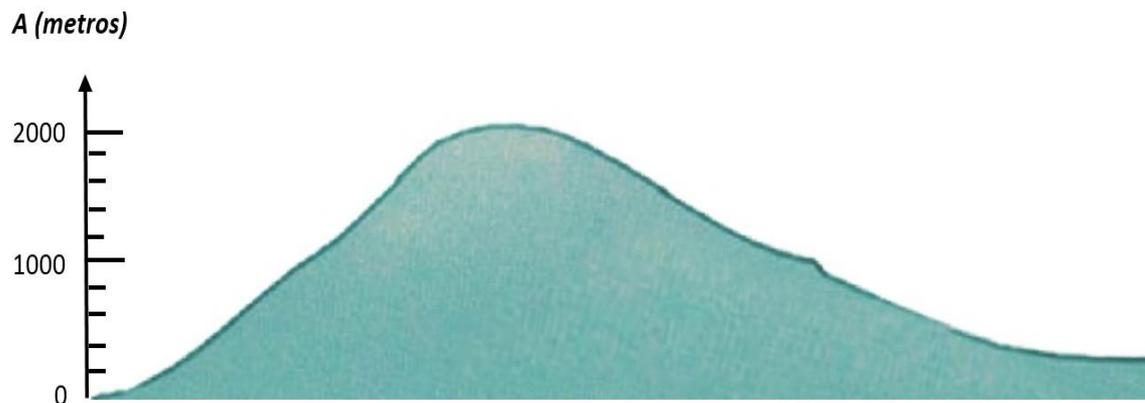
Figura 11-2: Mapa de ubicación de PROMINE Cía. Ltda.

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

### 2.1.2. Población de estudio

Esta investigación se realizó en PROMINE CIA. LTDA de la Cooperativa de Producción Minera Aurífera "BELLA RICA" en el Cantón Camilo Ponce Enríquez perteneciente a la Provincia del Azuay. Se encuentra en el sector La López, a 4.5 km al SE respecto al Cantón, el tiempo aproximado de llegada en automotor desde el Cantón es de 15 minutos. Sus coordenadas son las siguientes: E 642 575 y N 9 658 685.

En la zona predominan las rocas volcánicas del Cretácico, denominado Unidad Pallatanga, conocida antes como Piñón de La Sierra o Volcánicos Macuchi, PROMINE CIA. LTDA., tiene una extensión de carácter irregular, (Ver figura 2-2).



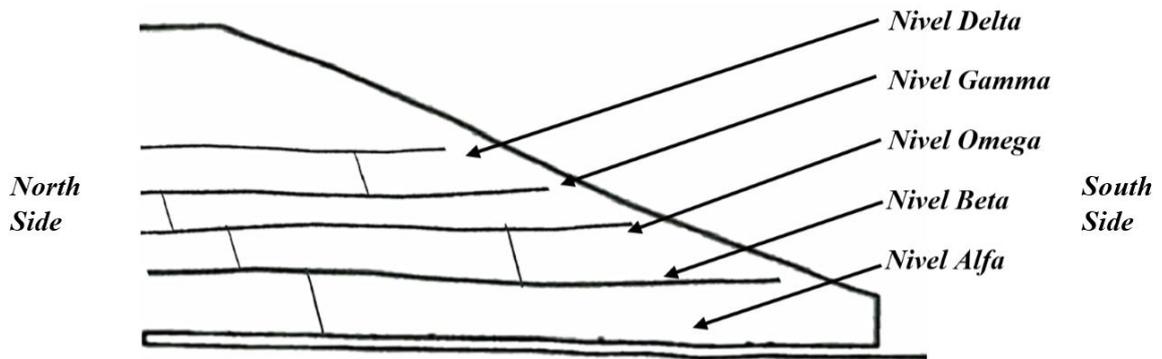
**Figura 12-2:** Extensión de la operadora minera PROMINE Cía. Ltda.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020

Las instalaciones de Promine Cía. Ltda. Está dividida en varios niveles que son los siguientes:

Nivel Alfa, Nivel Beta, Nivel Omega, Nivel Gamma y Nivel Delta.

Las labores de cruceros, galerías, chimeneas y algunos tajos presentan una valoración de Roca Tipo I (Muy buena) y II (Buena), existe zonas de fallas donde la valoración alcanza a Tipo IV (Mala) y V (Muy mala). En lo que respecta al método de explotación es corte y relleno ascendente convencional selectivo con chimeneas de caída libre en 45° en dirección de veta hacia los cajones principales, para posteriormente llevarlo hacia al exterior, (Ver Figura 3-2).

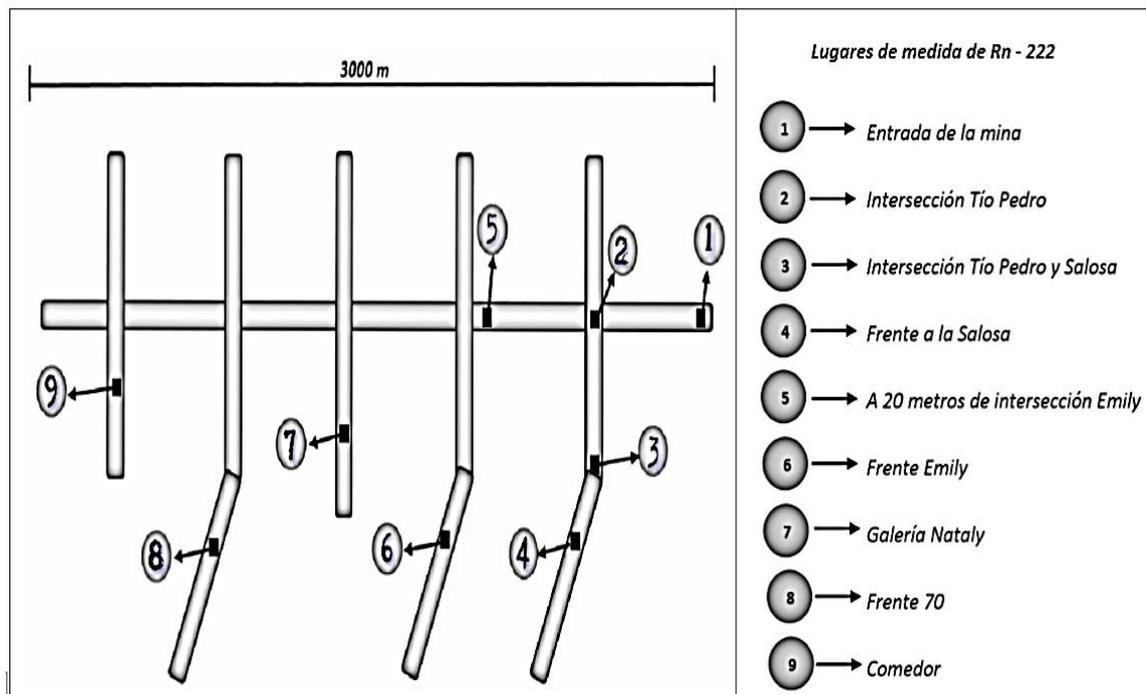


**Figura 13-2:** Niveles de la operadora minera PROMINE Cía. Ltda.

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

El nivel alfa de la operadora minera PROMINE CIA. LTDA., cuenta con un túnel de acceso principal que va desde el sur hasta el norte, tiene aproximadamente 3000 m de profundidad, y tiene varios túneles (galerías), transversales paralelas contiguas, actualmente todas estas áreas de son de exploración minera, y a su vez este nivel es el seleccionado para realizar este trabajo de investigación, debido a que es el nivel más bajo con el que cuenta la operadora.

En la (Figura 4-2) se puede apreciar los puntos seleccionados para la experimentación.



**Figura 14-2:** Puntos seleccionados para la experimentación en PROMINE Cía. Ltda.

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

## **2.2. Metodología de experimentación**

### **2.2.1. Toma de las muestras**

En primera instancia se hizo un recorrido previo, dentro de las instalaciones de PROMINE CIA. LTDA., con la finalidad de evaluar las posibles áreas donde se puedan ubicar las cámaras de ionización, esta evaluación se realizó con la ayuda de un contador Geiger-Müller que es un dispositivo que permite detectar radiaciones ionizantes.

Una vez evaluada la zona de estudio se fijan puntos, en base a las zonas donde mayor afluencia de obreros existe, ya fijados los puntos se ubicaron las cámaras que previamente fueron preparadas con los electrets.

Para lo cual se usó el lector Electret Rad Elec Inc. Donde,

Primero se colocó la cara del electret hacia abajo en el receptáculo circular en la parte superior del lector.

Luego se gira el electret de modo que el número de serie y el código de barras queden paralelos al nombre de “Rad Elec Inc” en el lector.

Se verifica que el electret este en el borde inferior del receptáculo.

Para encender el lector se debe tirar de la palanca del obturador con un movimiento lento pero constante hasta el límite inferior y volver lentamente a la posición de cerrado. Esto activa el lector. En la pantalla se muestra información de diagnóstico durante el encendido. Cuando se visualiza el mensaje “READY”, la unidad está lista para su uso. Si aparece un mensaje de error, es necesario que se tomen medidas correctivas.

Posteriormente se tira de la palanca del obturador de nuevo y se la mantiene pulsada hasta que se muestre la lectura de voltaje. La tensión se muestra en el centro de la pantalla. Si se tira demasiado rápido o demasiado lento, el mensaje correspondiente se muestra y es necesario repetir este paso.

Después de dejar el obturador cerrado durante varios segundos, se repite el paso anterior.

Se hizo un mínimo de tres lecturas sucesivas para verificar si los valores de voltaje son los mismos o similares. Si este valor se repetía era la lectura correcta de tensión del electret.

Se retiró el electret desde el lector y se instaló en una cámara de ionización apropiada que tiene un mecanismo de encendido y apagado.

Estos pasos se repetían las veces que fueran necesarias o dependiendo del número de electrets y cámaras de ionización que se colocaron.

Para poder encerrar los valores en el lector de electretc, antes de medir el voltaje de cada uno de los electrets de experimentación se usó un electret de referencia, que estaba dentro de  $\pm 3$  voltios, es un muy electret estable.

Este paso es fundamental para evitar falsos positivos de lecturas de voltajes en los electrets de experimentación.

Se registró las lecturas de voltaje inicial de cada electrets conjuntamente con el código de electret y el número o serie de la cámara de ionización.

Se colocó un par de cámaras, una abierta y una cerrada en cada punto seleccionado para la experimentación y se registró la fecha y hora de inicio de la prueba, voltajes iniciales en base a los códigos de los electres y el lugar donde son colocadas.

Trascurrido el tiempo necesario para que los electrets almacenen la información del lugar de experimentación, fueron retirados e igualmente se registró la fecha y hora de fin de la prueba, los códigos de los electres y el lugar donde fueron retirados. Es muy importante cerrar las cámaras que se encuentren abiertas para que la experimentación finalice satisfactoriamente.

Para leer el voltaje final de los electrets, se desenroscó cuidadosamente los electrets de las Cámaras de ionización. Sin tocar la superficie del electret en ningún momento. Se repitió los mismos pasos que se hicieron para la lectura de voltaje inicial.

Se registró las lecturas de voltaje final de cada electret conjuntamente con el código de electret y el lugar donde se realizó la experimentación.

Una vez obtenidos los datos, estos fueron introducidos en la aplicación de software Radón Lab, para calcular los resultados de concentración de Radón (Rn-222).

### 2.3. Metodología de Cálculo de la concentración

Para el cálculo de concentración de gas Radón (Rn-222), a partir de la diferencia de tensión electret y el tiempo de exposición es necesario para llevar a cabo dos operaciones (MANUALE D'USO, 2008).

En primer lugar se determina el factor de calibración CF con la fórmula (1). El término  $[(I + F) / 2]$  representa el valor promedio de la tensión (MPV).

El factor de calibración (CF), una combinación electret cámara-fija, se define como el cambio en la tensión de un electret por exposición a una concentración de radón de 1 Bq/m<sup>3</sup> para un día. El CF está en relación lineal con la caída de tensión del electret en el rango de 750 a 150 V (MANUALE D'USO, 2008).

Para calcular el factor de calibración apropiada como una función del valor medio de la tensión durante la exposición utilizando la fórmula (1) que se detalla a continuación.

$$CF \left( \frac{VOTS \times m^3}{Bq \times dia} \right) = \left( A + B \times \frac{I + F}{2} \right) \times \frac{1}{37} \quad (1)$$

Donde A y B son constantes para el cálculo, para una configuración de cámara - electret dada, y I y F son los valores iniciales y finales de voltaje del electret. 1/37 es el factor que nos permite expresar la concentración directamente en Bq/m<sup>3</sup>. Los valores de las constantes A y B se dan a continuación la tabla de constantes de cálculo (Ver Tabla 3-2) (MANUALE D'USO, 2008).

**Tabla 3-2:** Constantes de cálculo A, B y C

<i>CONFIGURACIÓN</i>	<i>CONSTANTE A</i>	<i>CONSTANTE B</i>	<i>CONSTANTE C</i>
SST	1.6978	0.0005742	0.35
SLT	0,1400	0.0000525	0.35
LST	0.2613	0.0001386	0.59
LLT	0.02383	0.0000112	0.59
HST	7.2954	0.004293	0.33

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

Donde;

**SST** = Cámara S con electret ST  
**SLT** = Cámara S con electret LT  
**LST** = Cámara L con electret ST  
**LLT** = Cámara L con electret LT

La fórmula (2) permite calcular el RNC concentración de radón usando CF:

$$RnC(Bqm^{-3}) = \left( \frac{I + F}{CF \times D} - BG \right) \times H \quad (2)$$

Donde  $BG = C \times R\gamma$  y donde:

- R $\gamma$**  es el rango de tasa subyacente en nGy / h
- C** es la constante de cálculo para una configuración dada en la tabla anterior.
- RNC** es la concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup>
- I y F** son el voltaje inicial y final del electret
- D** es el período de exposición en días
- CF** es el factor de calibración definida por (1)
- BG** es la concentración de radón equivalente debido al fondo gamma ambiental
- H** es un factor de corrección para la altitud (Ver tabla 4-2)

**Tabla 4-2:** Tabla de corrección de la altitud sobre el nivel del mar

<i>Altura(m)</i>	<i>Factor de corrección (Cámara S)</i>	<i>Factor de corrección (Cámara L)</i>
0	01:00	01:00
300	01:00	01:05
600	01:00	01:09
900	01:00	01:14
1200	01:03	01:18
1500	01:09	01:22
1800	01:15	01:28
2100	01:21	01:33
2400	01:27	01:39

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020

## 2.4. Cálculo de incertidumbre

Según la incertidumbre estándar que ha de atribuirse a la medición de la concentración de radón se obtiene de la propagación de incertidumbres estándar aplicadas a la ecuación (2), mientras que la incertidumbre es insignificante durante el periodo de exposición y el factor de corrección para la altitud, y está dada por:

$$U_c = H \times \sqrt{\left(\frac{1}{CF \cdot D}\right)^2 \cdot u_{Vi-Vf}^2 + \left(\frac{Vi - Vf}{CF^2 \times D}\right)^2 \cdot u_{CF}^2 + C^2 \cdot u_R^2} \quad (3)$$

Los componentes individuales que contribuyen a la incertidumbre se valoran como se detalla a continuación:

### 2.4.1. La incertidumbre en el factor de calibración CF

Es evaluado por el fabricante e incluye todas las causas de la variabilidad de los componentes del sistema (volúmenes de cámaras, espesores de los electret). Se da como un porcentaje de incertidumbre estándar, igual al 5% (MANUALE D'USO, 2008).

$$U_{CF} = CF \cdot 0.05$$

### 2.4.2. Cálculo Incertidumbre sobre el radón equivalente debido al fondo de radiación gamma (BG)

La incertidumbre depende del tipo de la tasa de  $U_\gamma$  parte inferior, mientras que se considera como una constante el valor de conversión C dada por el fabricante.

$$U_{R\gamma} = R_\gamma \cdot U_\gamma$$

### 2.4.3. La incertidumbre acerca de la lectura del potencial electret

Esta incertidumbre tiene en cuenta dos componentes: el primero es la variabilidad de leer debido a la posición (operador), la segunda es la resolución instrumental. La incertidumbre estándar asociada con la diferencia de potencial ( $V_i - V_f$ ) está dada por:

$$U_{Vi-Vf} \sqrt{U_{Vi}^2 + U_{Vf}^2} = 1.29$$

#### 2.4.4. Incertidumbre expandida

En el resultado de la medición puede estar asociada con la incertidumbre expandida correspondiente a un nivel de confianza del 95%, que se obtiene multiplicando la incertidumbre estándar combinada para el factor de cobertura  $k = 2$  (MANUALE D'USO, 2008).

$$U_e = 2 \cdot U$$

#### 2.5. Cálculo de la dosis

Para el cálculo de dosis efectiva debida a inhalación de Radón (Rn-222), se tomó en cuenta la formula dictaminada por la (UNSCEAR, 2000), La Dosis Promedio Anual (DPA) efectiva, en mSv/año (E), debida a la inhalación directa de radón, se define por la ecuación (4) (MANUALE D'USO, 2008):

$$E = DFC \times C \times F \times \tau \quad (4)$$

Dónde;

**DFC** es la concentración del radón medido en Bq / m<sup>3</sup>;

**C** es el factor de equilibrio (0.4);

**F** es el número de horas en un año (hora-año) y;

**$\tau$**  es el factor de conversión entre la concentración de radón y la dosis ( $9 \times 10^{-6}$  mSv/hr/Bq/m<sup>3</sup>)

#### 2.6. Cálculo de incertidumbre de la dosis efectiva

Para el cálculo de incertidumbre de la dosis efectiva debida a inhalación de Radón (Rn-222), se uso

$$\sigma_E = DFC \times F \times TF \times \tau \times \sigma_C \quad (5)$$

Dónde;

**$\sigma_C$**  es igual a 1000.

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 3.1. Concentración de Radón – 222 en las instalaciones de PROMINE CIA. LTDA

A continuación, se expone una tabla que muestra la cantidad de voltaje que se estima en cada punto de experimentación (Ver Tabla 5-3) así, como también datos generales como es el fondo radiactivo, la altitud s.n.m, el tiempo de permanencia de las cámaras en el lugar de experimentación, las fechas de inicio y fin de la prueba y características determinadas de las cámaras de ionización.

Una vez realizados los cálculos correspondientes usando los datos de la (Tabla 5-3), se plasma en la (Tabla 6-3) se exhiben los resultados de los niveles de concentración de Radón obtenidos en los nueve puntos de muestreo antes mencionados, de donde se puede destacar el valor promedio de concentración mínimo de Radón – 222, se tiene en el punto denominado a 20 metros de la intersección Emily siendo  $36 \pm 11.11 \text{ Bq/m}^3$  y el valor promedio de concentración máximo de (Radón – 222) se tiene en el punto denominado frente a la Salosa, siendo  $1182 \pm 61.92 \text{ Bq/m}^3$ .

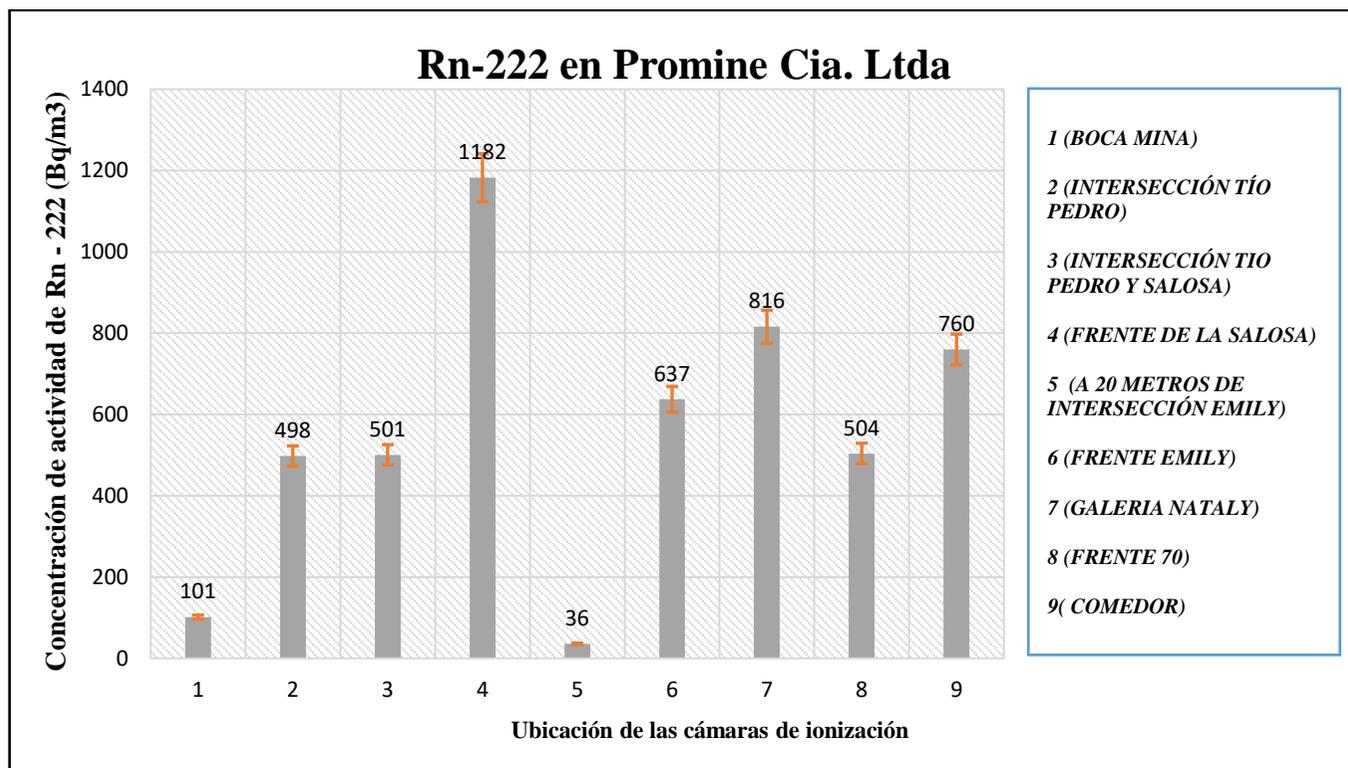
**Tabla 5-3:** Tabla de resultados de voltajes en los diferentes puntos de experimentación

<b>Código Eletret</b>	<b>Inicio de medida</b>	<b>Fin de medida</b>	<b>Voltaje Inicial</b>	<b>Voltaje Final</b>	<b>Fondo Gamma</b>	<b>Altitud SNM</b>	<b>Incert. Fondo Gamma</b>	<b>Tiempo de medida</b>	<b>Lugar de la medida</b>	<b>Número de punto en el mapa</b>	<b>Observación</b>
	(dd/mm/aa hh.mm)	(dd/mm/aa hh.mm)	(V)	(V)	(nGy/h)	m	%	(Días)			
LW 7432	5/8/19 15:43	22/8/2019 15:43	737	717	0	362	10	16,97	<b>BOCA MINA</b>	<b>1</b>	CERRADO
LW 7371	5/8/19 15:44	22/8/2019 15:43	760	723	0	362	10	16,98			ABIERTO
LW 7452	5/8/19 12:00	22/8/2019 15:43	728	503	0	362	10	17,13	<b>INTERSECCIÓN TÍO PEDRO</b>	<b>2</b>	ABIERTO
LW 7620	5/8/19 12:03	22/8/2019 15:43	717	570	0	362	10	17,12			CERRADO
LW 7502	5/8/19 12:44	22/8/2019 15:43	695	689	0	362	10	17,10	<b>INTERSECCIÓN TÍO PEDRO Y SALOSA</b>	<b>3</b>	CERRADO
LW 7845	5/8/19 12:45	22/8/2019 15:43	755	666	0	362	10	17,10			ABIERTO
LW 7613	5/8/19 12:38	22/8/2019 15:43	734	538	0	362	10	17,10	<b>FRENTE DE LA SALOSA</b>	<b>4</b>	ABIERTO
LW 7571	5/8/19 12:39	22/8/2019 15:43	745	739	0	362	10	17,11			CERRADO
LW 7462	5/8/19 13:23	22/8/2019 15:43	746	746	0	362	10	17,07	<b>A 20 METROS DE INTERSECCIÓN EMILY</b>	<b>5</b>	CERRADO
LW 7844	5/8/19 13:24	22/8/2019 15:43	759	753	0	362	10	17,08			ABIERTO
LW 7614	5/8/19 13:41	22/8/2019 15:43	741	589	0	362	10	17,06	<b>FRENTE EMILY</b>	<b>6</b>	ABIERTO
LW 7582	5/8/19 13:42	22/8/2019 15:43	716	667	0	362	10	17,06			CERRADO
LW 7652	5/8/19 15:02	22/8/2019 15:43	715	580	0	362	10	17,00	<b>GALERIA NATALY</b>	<b>7</b>	ABIERTO
LW 7639	5/8/19 15:03	22/8/2019 15:43	724	720	0	362	10	17,01			CERRADO
LW 7588	5/8/19 14:31	22/8/2019 15:43	712	623	0	362	10	17,03	<b>FRENTE 70</b>	<b>8</b>	ABIERTO
LW 7635	5/8/19 14:32	22/8/2019 15:43	226	220	0	362	10	17,03			CERRADO
LW 7648	5/8/19 14:05	22/8/2019 15:43	746	706	0	362	10	17,05	<b>COMEDOR</b>	<b>9</b>	CERRADO
LW 7597	5/8/19 14:06	22/8/2019 15:43	757	594	0	362	10	17,05			ABIERTO

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

**Tabla 6-3:** Tabla de resultados de concentración de radón - 222

<i>Lugar de la medida</i>	<i>Número de punto en el mapa</i>	<i>Observación</i>	<i>Concentración de Radón</i>	<i>Incet. Sigma 1</i>	<i>Incert. extendida</i>	<i>Incert extendida %</i>	<i>Fondo gamma</i>	<i>Concentración de 222Rn</i>	<i>Error Absoluto</i>	<i>Error porcentual</i>
			(Bq/m3)	(Bq/m3)	(Bq/m3)			(Bq/m3)		%
<b>BOCA MINA</b>	<b>1</b>	CERRADO	<b>121</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	0.03 – 0.10	101	16,75636363	16,52345
		ABIERTO	<b>222</b>	<b>14</b>	<b>27</b>	<b>12</b>	0.03 – 0.10			
<b>Intersección Tío Pedro</b>	<b>2</b>	ABIERTO	<b>1408</b>	<b>71</b>	<b>142</b>	<b>10</b>	0.03 – 0.05	498	84,55924037	16,98295
		CERRADO	<b>910</b>	<b>46</b>	<b>92</b>	<b>10</b>	0.03 – 0.05			
<b>INTERSECCIÓN TIO PEDRO Y SALOSA</b>	<b>3</b>	CERRADO	<b>36</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>44</b>	0.04 – 0.05	501	29,10242686	5,812175
		ABIERTO	<b>537</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>10</b>	0.04 – 0.05			
<b>FRENTE DE LA SALOSA</b>	<b>4</b>	ABIERTO	<b>1218</b>	<b>61</b>	<b>123</b>	<b>10</b>	0.05 – 0.06	1182	61,93250733	5,23844
		CERRADO	<b>36</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>44</b>	0.05 – 0.06			
<b>A 20 METROS DE INTERSECCIÓN EMILY</b>	<b>5</b>	CERRADO	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	0.08 – 0.09	36	11,00279571	30,87553
		ABIERTO	<b>36</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>44</b>	0.08 – 0.09			
<b>FRENTE EMILY</b>	<b>6</b>	ABIERTO	<b>936</b>	<b>47</b>	<b>95</b>	<b>10</b>	0.02 – 0.03	637	50,37252579	7,905855
		CERRADO	<b>299</b>	<b>17</b>	<b>34</b>	<b>11</b>	0.02 – 0.03			
<b>GALERIA NATALY</b>	<b>7</b>	ABIERTO	<b>840</b>	<b>43</b>	<b>86</b>	<b>10</b>	0.05 – 0.07	816	43,4853457	5,329683
		CERRADO	<b>24</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>65</b>	0.05 – 0.07			
<b>FRENTE 70</b>	<b>8</b>	ABIERTO	<b>549</b>	<b>29</b>	<b>57</b>	<b>10</b>	0.04 – 0.06	504	30,2253617	5,999434
		CERRADO	<b>45</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>44</b>	0.04 – 0.06			
<b>COMEDOR</b>	<b>9</b>	CERRADO	<b>241</b>	<b>14</b>	<b>29</b>	<b>12</b>	0.04 – 0.06	760	52,6230822	6,927928
		ABIERTO	<b>1000</b>	<b>51</b>	<b>101</b>	<b>10</b>	0.04 – 0.06			
<b>Realizado por: Liventon Yauli, 2020</b>								5	352,5410667	63,024



**Gráfico 1-3:** Niveles de Concentración de gas radon 222 en las instalaciones de Promine Cia. Ltda.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020

En el (Gráfico 1-3), se puede apreciar los niveles de concentración de gas Radón (Rn - 222), de donde se destaca que en punto 4 denominado (frente de la Salosa) existe una concentración de gas radón (Rn – 222) bastante considerable, a diferencia de los puntos 1 (Boca Mina) y 5 (a 20 m de la intersección Emily) que presentan una concentración de gas radón (Rn -222) relativamente pequeña.

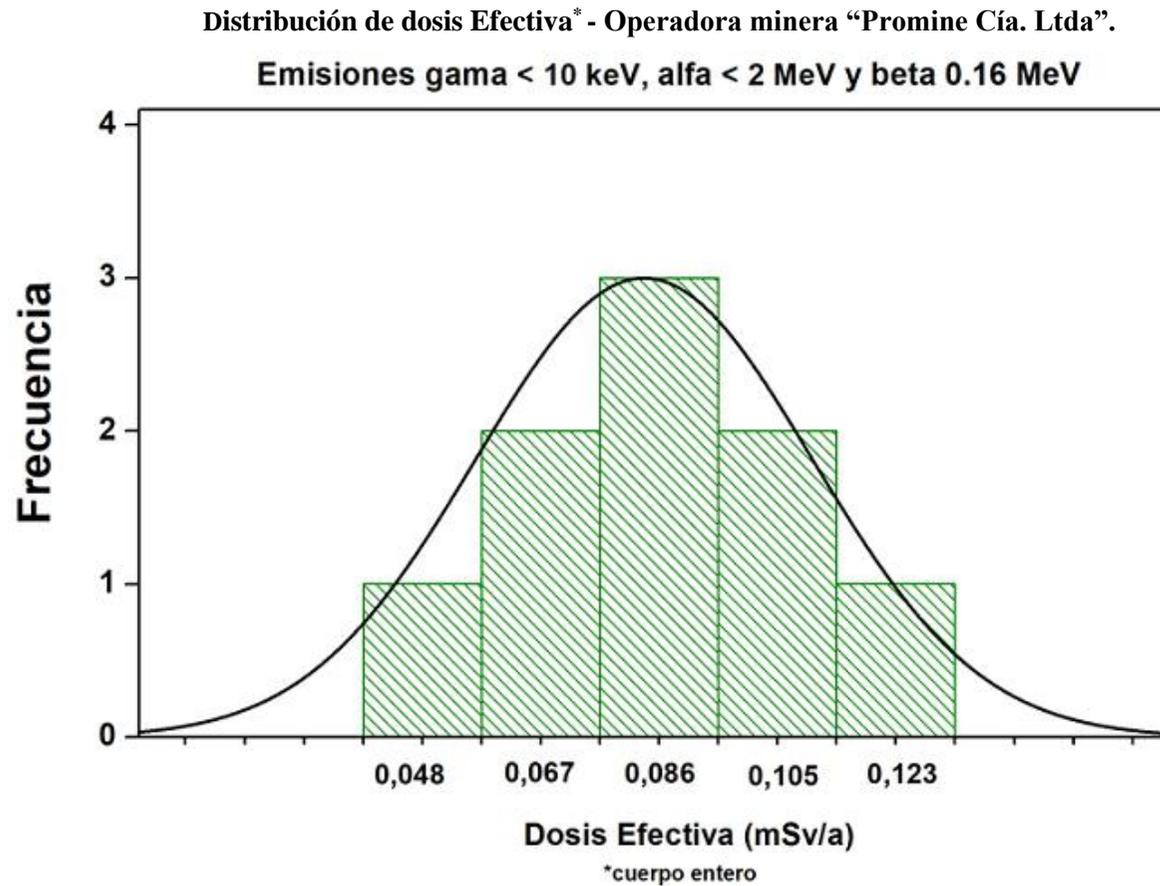
### 3.2. Resultados de la tasa de dosis ambientales

De igual forma en la (Tabla 7-3), se detallan los resultados de dosis efectiva debido a la radiación ambiental, donde se puede apreciar que en valor máximo de dosis efectiva se tiene en el punto 1 (Boca Mina), siendo este el **0.077 mSv/año** y el valor mínimo de dosis efectiva se tiene en el punto 2 (Intersección Tío Pedro), 3 (Intersección Tío Pedro y la Salosa) y en el punto 4 (Frente de la Salosa), siendo un valor de **0.011 mSv/año**, respectivamente.

**Tabla 7-3:** Tabla de resultados de Dosis Efectiva ambiental

Número de ubicación en el mapa	Lugar de experimentación	Concentración de <sup>222</sup> Rn	Error Absoluto	Error porcentual	Fondo radiactivo	Fondo radiactivo	D.E	D.E
		(Bq/m3)	(Bq/m3)	%	uSv/h	uSv/h	mSv/año	mSv/año
1	BOCA MINA	101	16,756	16,5234475	0,065	0,049	0,101	0,077
2	INTERSECCIÓN TÍO PEDRO	498	84,559	16,9829487	0,085	0,007	0,133	0,011
3	INTERSECCIÓN TIO PEDRO Y SALOSA	501	29,102	5,81217504	0,045	0,007	0,070	0,011
4	FRENTE DE LA SALOSA	1182	61,933	5,2384395	0,03	0,01	0,039	0,011
5	A 20 METROS DE INTERSECCIÓN EMILY	36	11,003	30,8755254	0,05	0,01	0,078	0,022
6	FRENTE EMILY	637	50,373	7,90585487	0,07	0,05	0,101	0,077
7	GALERIA NATALY	816	43,485	5,32968296	0,06	0,01	0,094	0,022
8	FRENTE 70	504	30,225	5,99943419	0,05	0,01	0,078	0,022
9	COMEDOR	760	52,623	6,92792778	0,04	0,01	0,062	0,022

Realizado por: Liventon Yauli, 2020



**Gráfico 2-3:**

Dosis efectiva debido a la radiación del medio ambiente en Promine Cia. Ltda.

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

En el (Gráfico 2-3), se aprecia los valores de dosis efectiva para emisiones gama < 10 keV, emisiones alfa < 2 MeV, y emisiones beta igual a 0.16 MeV. En el pico máximo se tiene una dosis efectiva de **0.086 mSv/año**.

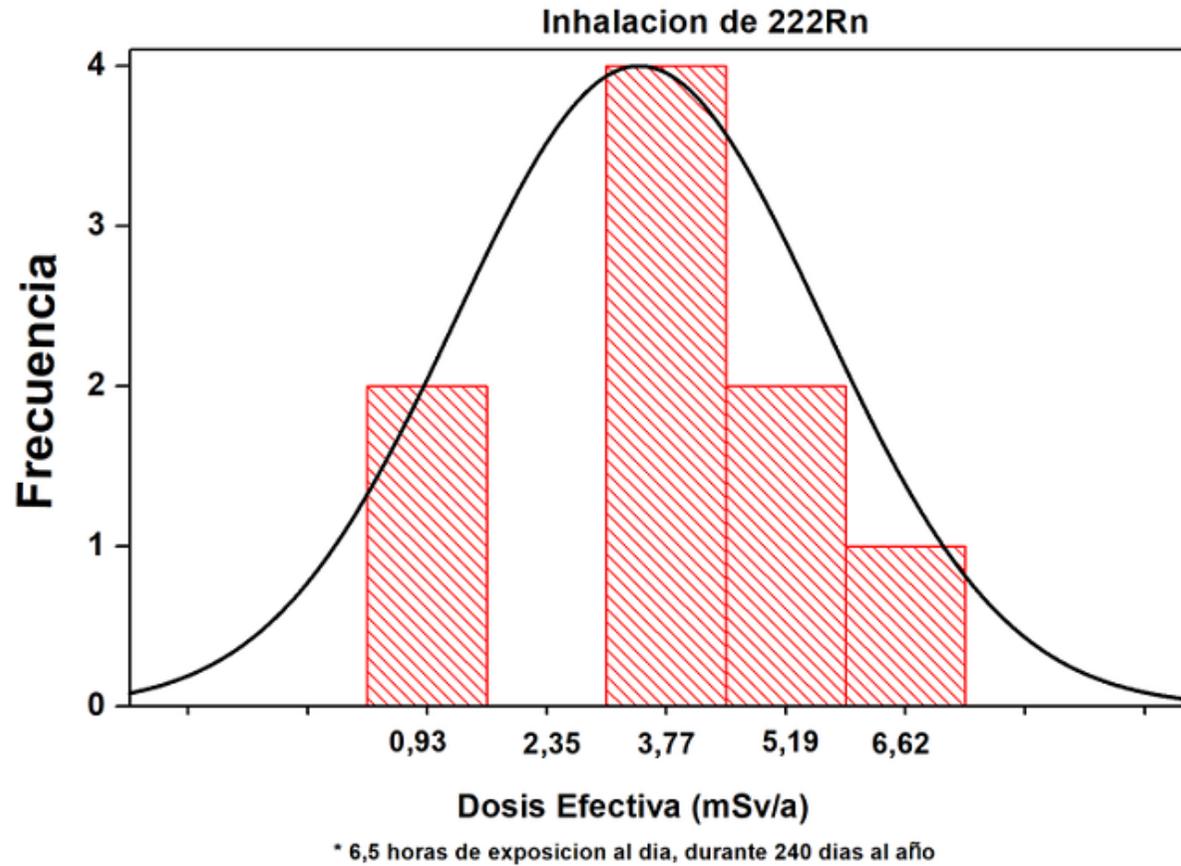
En la (Tabla 8-3) se describe los resultados de dosis efectiva debido a inhalación de Radón – 222, donde se puede apreciar que el valor máximo de dosis efectiva debido a inhalación de Radón - 222 se encuentra en el punto 4 (Frente de la Salosa) siendo igual a **7.33 ± 0,38 mSv/año** y el valor mínimo de dosis efectiva debido a inhalación de Radón - 222 se encuentra en el punto 5 (a 20 m de la intersección Emily) siendo igual a **0.22 ± 0,06 mSv/año.**}

**Tabla 8-3:** Tabla de resultados de Dosis Efectiva debido a inhalación de Rn - 222

<i>Concentración (Bq/m3)</i>	<i>Error Absoluto de la Concentración</i>	<i>(Parámetro de conversión) DFC (Sv/Bqm-3h)</i>	<i>Factor de equilibrio M</i>	<i>Tiempo medio para interiores de casas</i>	<i>Tiempo medio para lugares de trabajo</i>	<i>Dosis efectiva por inhalación (Sv/año)</i>	<i>Dosis efectiva por inhalación (mSv/año)</i>	<i>Error Absoluto de dosis efectiva (sV/año)</i>	<i>Error Absoluto de dosis efectiva (msV/año)</i>
101	16,8	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00062884	0,62884099	0,00010391	0,10390621
498	84,6	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00308752	3,08751947	0,00052435	0,52435185
501	29,1	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00310493	3,10493314	0,00018046	0,18046415
1182	61,9	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00733126	7,33125729	0,00038404	0,38404348
36	11,0	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00022098	0,2209787	6,8228E-05	0,06822834
637	50,4	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,003951	3,95099629	0,00031236	0,31236003
816	43,5	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00505945	5,05944971	0,00026965	0,26965263
504	30,2	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00312409	3,12408574	0,00018743	0,18742747
760	52,6	7,95E-09	0,5	7000	1560	0,00471015	4,71014917	0,00032632	0,32631573

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

**Distribución de Dosis Efectiva\* - Operadora minera “Promine Cia. Ltda”:**

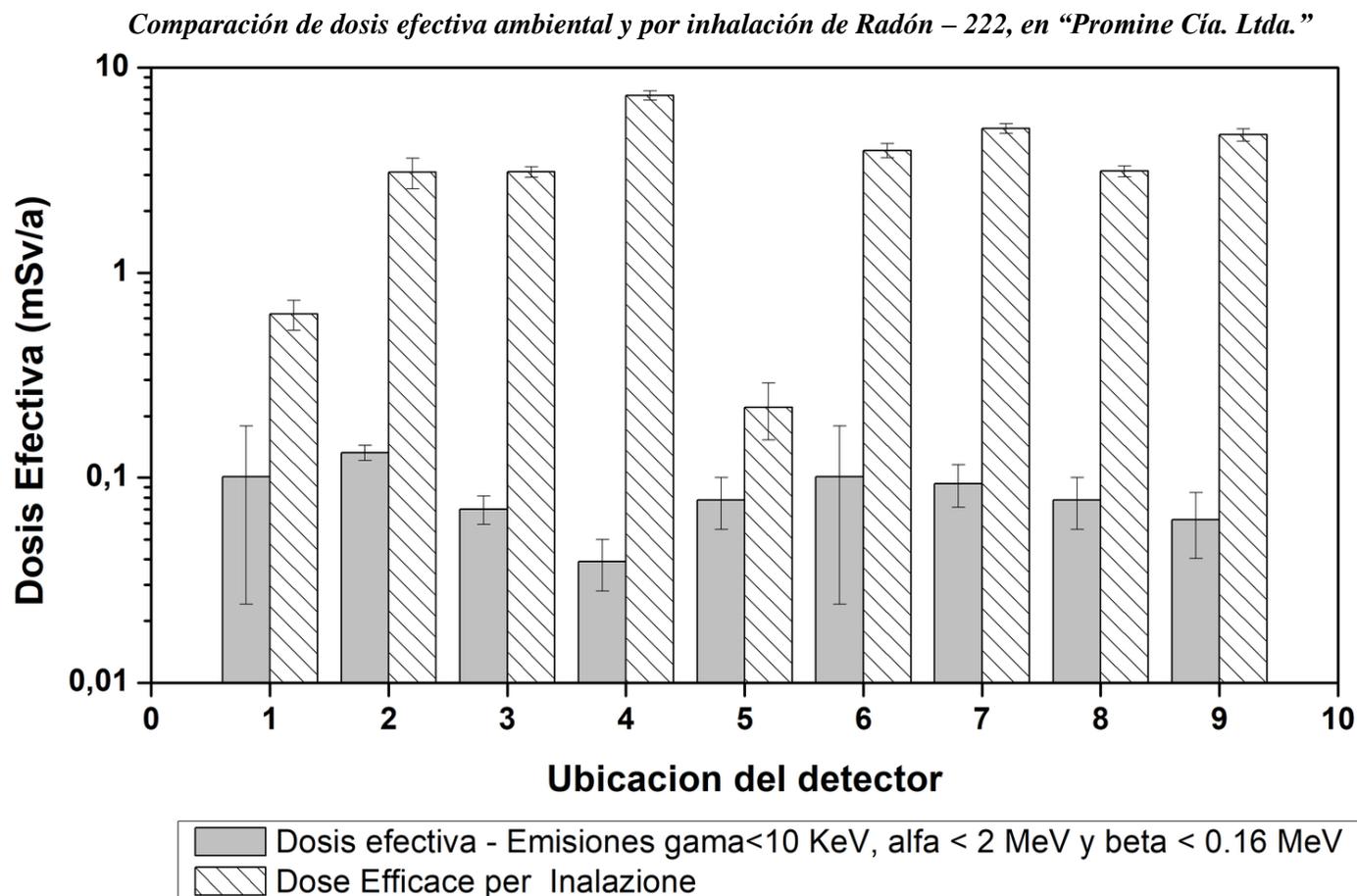


**Gráfico 3-3:** Dosis efectiva debido a la inhalación de Radón – 222 en Promine Cia. Ltda.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020

En el (Gráfico 3-3) se observa la dosis efectiva debido inhalación de Radón – 222 en la operadora “Promine Cia. Ltda”.

En el (Gráfico 4-3), se observa una notable de la dosis efectiva debido a factores ambientales como por inhalación de Radón – 222, notándose que en todos los puntos muestrales la dosis efectiva por inhalación de Radón – 222, supera ampliamente a la dosis efectiva resultante de factores ambientales.



**Gráfico 4-3:** Diagrama de comparación de dosis efectiva debido a la inhalación de Radón - 222 y a radiación ambiental en Promine Cía. Ltda.

Realizado por: Liventon Yauli, 2020

### 3.3. Discusión de resultados

La investigación se basa en la cuantificación de los niveles de concentración de gas radón – 222, a la que los obreros mineros de la operadora minera aurífera “Promine Cia. Ltda”, están expuestos, para ello se hace una evaluación de diferentes puntos de experimentación, inicialmente se consideran factores tales como (Temperatura, Humedad, Presión y el fondo gama), y poder establecer si cualquier variación en los resultados de la investigación se asocia a estos factores.

La metodología empleada para la medición de gas Radón – 222 en las instalaciones subterráneas de “Promine Cía. Ltda”, es una técnica que se usa generalmente para la medición de Radón en aire, es una técnica fácil de ejecutar, sin embargo existen limitaciones debido a que la profundidad de la mina y el largo de las galerías no permiten ubicar los detectores cercanos entre sí, en lo que se refiere a los resultados obtenidos, notamos que la concentración tiende a ser mayor en las galerías más lejanas de la línea principal.

El muestreo en el interior de la mina subterránea se dio en los diferentes puntos seleccionados para la experimentación, con la colocación de un par de cámaras de ionización en cada punto, de este par de cámaras, la una permaneció abierta y la otra cerrada, la abierta capta la concentración de radón existente en el lugar, mientras que la cerrada sirve para poder medir la variación de voltaje debido al fondo radiactivo, cabe recalcar que la ubicación de las cámaras fue en lugares donde no se tenía fácil acceso para que estas no generen falsos positivos en los resultados.

Los niveles de concentración de gas (Radón – 222), obtenidos durante la experimentación son relativamente altos (**1182 ± 61.92 Bq/m<sup>3</sup>**), en comparación a estudios realizados en minas con características similares (Tarkwa Goldfields y Prestea Goldfields).

Donde las concentraciones de radón medidas bajo tierra en Tarkwa estaban en el rango de (**56 Bq/m<sup>3</sup> a 268 Bq/m<sup>3</sup>**), y los valores correspondientes para Prestea fueron (**43 Bq/ m<sup>3</sup> a 878 Bq/m<sup>3</sup>**).

Los niveles de concentración de Radón – 222, obtenidos en esta investigación son bajos (**1182 ± 61.92 Bq/m<sup>3</sup>**), en comparación a otro estudio similar realizado en Ecuador que muestra como resultado (**1819,3 ± 349,8 Bq/m<sup>3</sup>**) cuya dosis efectiva promedio es de (**22,94 ± 5,5 mSv/año**).

La contribución promedio de la radiación gamma externa a la dosis efectiva anual es de (**0.084 ± 0.003 mSv/año**), similar al valor de 0.48 mSv reportado por UNSCEAR (2000), la dosis efectiva debida a la inhalación de radón, calculada con la concentración promedio de radón, fue en nuestro

caso ( **$3,47 \pm 0,14$  mSv/año**), esta se encuentra en el punto 4 (Frente de la Salosa). En ambos casos los niveles no superan los límites permisibles establecidos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica: ICRP, la cual indica un máximo de concentración  $1600 \text{ Bq/m}^3$  y una dosis efectiva límite de  $20 \text{ mSv/año}$  para recintos cerrados similares a un mina subterránea, y tampoco supera el rango del nivel de acción para los lugares de trabajo recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica: ICRP el mismo que es de  $500$  a  $1500 \text{ Bq/m}^3$ .

## CONCLUSIONES

El principal objetivo de la investigación fue determinar la concentración de actividad 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, con el uso de detectores E-Perms, se estimó concentración promedio de gas radón – 222 de **(1182 ± 61.92 Bq/m<sup>3</sup>)**.

Durante la indagación de información válida que aporten al presente trabajo de titulación se encontró datos relevantes e importantes de estudios similares realizados en lo que concierne a la industria minera, tales como en minas internacionales (Tarkwa Goldfields y Prestea Goldfields. Donde las concentraciones de radón medidas bajo tierra en Tarkwa estaban en el rango de (56 Bq/m<sup>3</sup> a 268 Bq/m<sup>3</sup>), y los valores correspondientes para Prestea fueron (43 Bq/ m<sup>3</sup> a 878 Bq/m<sup>3</sup>), valores que son relativamente bajos a diferencia de un estudio realizado en Ecuador, donde, se muestra como resultado (1819,3 ± 349,8 Bq/m<sup>3</sup>) cuya dosis efectiva promedio es de (22,94 ± 5,5 mSv/año), estos 2 valores mencionados superan los límites permisibles sugeridos por Comisión Internacional de Protección Radiológica: ICRP, la cual indica un máximo de concentración 1600 Bq/m<sup>3</sup> y una dosis efectiva límite de 20 mSv/año para recintos cerrados similares a un mina subterránea, y el rango del nivel de acción para los lugares de trabajo recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica: ICRP es de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

Los puntos de experimentación para colocar los dispositivos E-Perms, se fijaron en base a resultados de exploración de campo que se realizó con un contador Geiger – Muller, y a la vez se consideró también los puntos donde mayor parte de su tiempo permanece el personal operativo y ejecutivo de PROMINE CIA. LTDA.

En base a los resultados de niveles de concentración de (Rn– 222), se tienen que el lugar donde mayor concentración de Radón existe es en el punto 4 (Frente de la Salosa), y los puntos con menor concentración son el punto 1 (Boca Mina) y 5 (a 20 m de la intersección Emily) que presentan una concentración de gas radón (Rn -222) relativamente pequeña. Esto se debe a que en el punto 4 (frente de la Salosa) existe poca, casi nula ventilación, mientras que en los otros dos puntos antes mencionados existe un ducto de ventilación que permanece activa continuamente.

La contribución promedio de la radiación gamma externa a la dosis efectiva anual es de (0.084 ± 0.003 mSv/año), similar al valor de 0.48 mSv reportado por UNSCEAR (2000), la dosis efectiva debida a la inhalación de radón, calculada con la concentración promedio de radón, fue en nuestro caso (3,47 ± 0,14 mSv/año).

## **RECOMENDACIONES**

Para evitar valores del fondo gama erróneos, el detector Geiger-Müller se debe encontrar perfectamente calibrado y además debe constar con su respectivo certificado de calibración, el cual es emitido por el laboratorio que brinde el servicio de calibración.

Los materiales y equipos que se usan para el desarrollo de la investigación, deben ser transportados con mucha precaución, puesto que son delicados y costosos, estos al estar defectuosos proporcionarían valores equivocados en los resultados.

La calibración del lector e electrets debe ser obligatoria, antes de medir el voltaje de cada electret de experimentación, porque caso contrario el voltaje obtenido no será el real del electret e influirá en los resultados de la investigación.

Las cámaras de ionización deben ser colocadas en lugares seguros, donde no puedan ser manipuladas, ni contaminadas, esto ayudara a tener éxito en el desarrollo de la investigación.

En el procesamiento de datos, se debe tomar muy en cuenta las codificaciones de los electrets y los lugares donde permanecieron durante la experimentación para no generar falsos positivos en la presentación de resultados.

La ventilación permanente, es fundamental para obtener bajas concentraciones de actividad de gas (Radón – 222), por lo que un posible tratamiento adecuado para todas las zonas estudiadas seria mantener una ventilación continua, especialmente en los puntos donde mayor afluencia de personal operativo exista.

El personal técnico-operativo que ingresa a la mina, deberá contar con el equipo de protección adecuado para las labores encomendadas, los cuáles son: el equipo de seguridad industrial (Botas, casco, guantes, gafas, y fundamentalmente una mascarilla adecuada para evitar la inhalación de gases.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGUILAR AGUILAR, Alex Jonathan.** 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) (Superior). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. 2018. pp. 34-48.

**ANDAM, A. A. B.** Indoor and soil radon measurements in a tropical climate. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, vol. 20, no 2, (1992), (Ghana) pp. 371-375.

**ANJOS, Roberto Meigikos, et al.** Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Journal of environmental radioactivity*, vol. 101, no 2, (2010), (Argentina), pp. 153-158.

**ATSDR. (s.f.).** *Agencia para sustancias tóxicas y el registro de actividades* [Blog]. [Consulta: 18 Agosto 2019]. Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs145.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs145.html)

**BANCO CENTRAL DEL ECUADOR.** *Reporte de Minería 2017* [Blog]. [Consulta: 24 Octubre 2019]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012017.pdf>

**BNAMERICAS.** *Minería en superficie.* [Blog]. [Consulta: 04 Febrero 2020]. Disponible en: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/mineria-en-superficie>

**CAMACHO. P. A.,** El decomiso de las herramientas de trabajo en la ley de minería. (Trabajo de titulación), (Maestría). [En línea] Universidad Regional Autónoma de los Andes, Puyo-Ecuador. 2018 pp. 10-14. [Consulta: 12 Enero 2019] Disponible en: <http://dspace.uniandes.edu.ec/bitstream/123456789/7517/1/PIUPA003-2018.pdf>

**CARRANZA, A. & ESPINOSA, G.** *Radon Intramuros Y Salud Pública* [En línea]. Mexico, 2018. [Consulta: 16 Febrero 2020]. Disponible en: [http://www.fisica.unam.mx/personales/espinosa/files/2018/2018-03\\_07\\_LIBRO\\_Radon\\_intramuros\\_y\\_salud\\_publica-Espinosa\\_y\\_Angeles\\_16p.pdf](http://www.fisica.unam.mx/personales/espinosa/files/2018/2018-03_07_LIBRO_Radon_intramuros_y_salud_publica-Espinosa_y_Angeles_16p.pdf)

**CEPAL. (2016).** *Estudio Económico de América Latina y el Caribe* [Blog]. [Consulta: 23 Noviembre 2019]. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43964/141/S1800837\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43964/141/S1800837_es.pdf)

**CEPAL. (2018).** *Perspectivas económicas de América Latina 2018* [Blog]. [Consulta: 24 Agosto 2019]. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43513/1/LEO2018\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43513/1/LEO2018_es.pdf)

**CEPAL, N. U. 2018.** *Informe de la Novena Reunión de la Conferencia Estadística de las Américas de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe.* [Blog]. [Consulta: 22 Septiembre 2019]. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43366/1/S1800189\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43366/1/S1800189_es.pdf)

**COUNTER, S. Allen, et al.** Elevated blood mercury and neuro-otological observations in children of the Ecuadorian gold mines. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, vol. 65, no 2, (2002), (Reino Unido), pp. 149-163.

**DARKO, E. O.; TETTEH, G. K.; AKAHO, E. H. K.** Occupational radiation exposure to norms in a gold mine. *Radiation protection dosimetry*, vol. 114, no 4, (2005), (Ghana) pp. 538-545.

**DARKO, E. O., et al.** Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana. *Radiation protection dosimetry*, vol. 138, no 1, (2010), (Ghana), pp. 45-51.

**DOYI, I. y col.** Evaluación de la exposición ocupacional a la radiación en minas de oro artesanales subterráneas en Tongo, Región del Alto Este de Ghana. *Revista de radiactividad ambiental*, vol.126, (2013), (Ghana), pp.77-82.

**FINKELSTEIN, Murray M.** Clinical measures, smoking, radon exposure, and risk of lung cancer in uranium miners. *Occupational and environmental medicine*, vol. 53, no 10, (1996), (Canada), pp. 697-702.

**HERDOÍZA, David Larenas; FIERRO-RENOY, Virginia; FIERRO-RENOY, Claudia.** Minería a Gran Escala, Una Nueva Industria para Ecuador. *Polémika*, vol. 5, no 12, (2017), (Ecuador). pp. 67-91.

**INDUSTRY LANE FREDERICK. (s.f.).** *Manual. E-PERM® SYSTEM USER'S MANUAL* [En línea]. Maryland, 2018. [Consulta: 26 Agosto 2019]. Disponible en: [www.radelec.com](http://www.radelec.com)

**JAFFEY, A. H., et al.** Precision measurement of half-lives and specific activities of U 235 and U 238. *Physical review C*, vol. 4, no 5, (1971), (Estados Unidos). pp. 18-89.

**LEY DE MINERIA 1991.** *Ley de Minería.* [Blog]. [Consulta: 15 Noviembre 2019]. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/texts/ecu77015.doc>

**LEY DE MINERIA. 2018.** *Ley de Minería, Asamblea Nacional Comisión Legislativa y de Fiscalización* [Blog]. [Consulta: 18 Noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4\\_ecu\\_mineria.pdf](https://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_mineria.pdf)

**LIU, S. C.; MCAFEE, J. R.; CICERONE, R. J.** Radon 222 and tropospheric vertical transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 89, no D5, (1984), (Estados Unidos). pp. 7291-7297.

**LORÍA, Luis Guillermo; JIMÉNEZ, Ricardo; GALLARDO, Mauricio.** Cuantificación de la concentración de elementos naturales y contaminantes radiactivos emisores gamma en suelos de la península de Nicoya, Guanacaste, utilizando la técnica de conteo de bajo nivel. *Tecnología en Marcha*, vol. 11, no 4, (1993), (Costa Rica). pp. 61-72.

**MANUALE D'USO 2008.** *Sistema Per La Misura Del Gas Radon. En RAD ELEC E-PERM* [En línea]. [Consulta: 24 Enero 2020]. Disponible en: [www.radelec.com](http://www.radelec.com)

**MUDD, Gavin M.** Tendencias mundiales en la extracción de oro: hacia la cuantificación de la sostenibilidad ambiental y de los recursos. *Política de Recursos*, vol.32, no 1-2, (2007), (Australia), pp.42-56.

**NODAL 2014.** *Minería en América Latina: debates y conflictos de una actividad en expansión* [Blog]. [Consulta: 28 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.nodal.am/2014/05/mineria-en-america-latina-debates-y-conflictos-de-una-actividad-en-expansion/>

**OMS Organizacion Mundial de la Salud 2015.** *Manual de la OMS sobre el radón en interiores.* [Blog]. [Consulta: 21 Diciembre 2019]. Disponible en: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671\\_spa.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf?sequence=1)

**OMS Organizacion Mundial de la Salud 2016.** *El radón y sus efectos en la salud.* [Blog]. [Consulta: 08 Diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

**PRZYLIBSKI, Tadeusz Andrzej.** Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 57, no 2, (2001), (Polonia), pp. 87-103.

**SALAZAR-XIRINACHS, José Manuel; PETERS, Enrique Dussel; ARMONY, Ariel C.** *Efectos De China En La Cantidad Y Calidad Del Empleo* [En línea]. Perú, 2019. [Consulta: 13 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/4329/b1a1dfadadc9642c0ba2169f06232e4460d6.pdf>

**SÁNCHEZ, Guillermo.** El Uranio un elemento poco conocido. *Revista SNE*, [En línea]. 2005, (España). pp. 3-7 [Consulta: 17 Febrero 2019]. Disponible en: [https://gedos.usal.es/bitstream/handle/10366/55606/DEHE\\_Uranio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://gedos.usal.es/bitstream/handle/10366/55606/DEHE_Uranio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON.** *World Health Organization* . [En línea]. 2009, (Suiza). pp. 21-49 [Consulta: 25 Febrero 2019]. Disponible en: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf?sequence=1)

## ANEXOS

### ANEXO A: INSPECCIÓN DE CAMPO PARA DETERMINAR LOS LUGARES DE MUESTREO.



**Figura 1A:** Toma de datos del fondo gama  
Realizado por: Liventon Yauli, 2020.



**Figura 2A:** Muestreo de campo con Geiger-Muller  
Realizado por: Liventon Yauli, 2020.

**ANEXO B: PREPARACIÓN PREVIA DE LOS ELECTRETS Y LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN ANTES DE SER COLOCADAS EN LOS PUNTOS DE EXPERIMENTACIÓN.**



**Figura 1B:** Calibración de lector de electrets para posteriormente medir el Voltaje inicial

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**Figura 2B:** medida del voltaje inicial de cada electret

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**Figura 3B:** Colocación del electret en la cámara S.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.

## ANEXO C: COLOCACIÓN DE LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN EN LOS PUNTOS DE EXPERIMENTACIÓN



**Figura 1C:** Colocación de un par de cámaras S con sus respectivos electrets.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**Figura 2C:** Colocación en un lugar seguro donde no puedan ser manipuladas fácilmente.

**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**Figura 3C:** Activación de cámara de ionización S.  
**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**Figura 4C:** Cámaras de ionización reposando en intercesión Tío Pedro.  
**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.

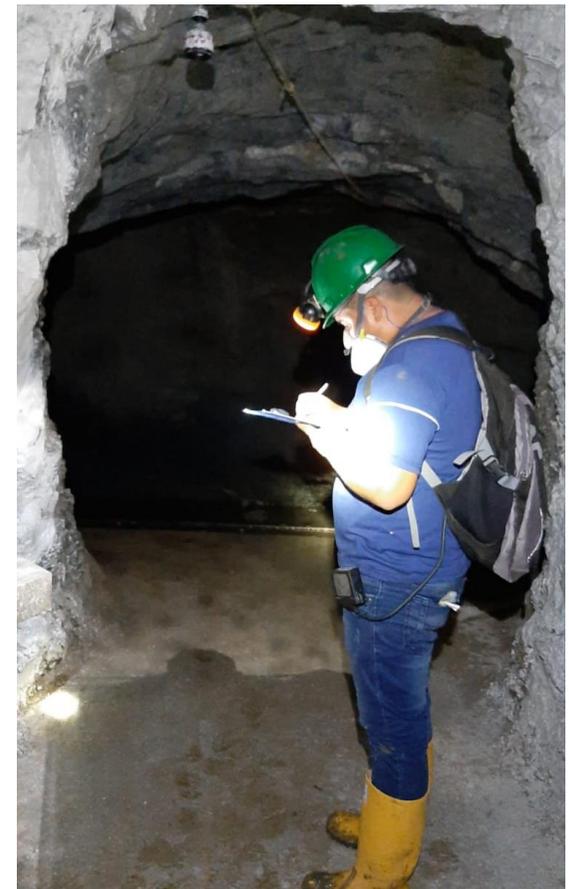
**ANEXO D: INSPECCIÓN DE CAMPO PARA VERIFICAR QUE LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN PERMANECEN EN ESTADO DE REPOSO COMO SE COLOCÓ INICIALMENTE.**



**Figura 1D**



**Figura 2D**



**Figura 3D**

**Figura 1D, 2D y 3D:** respectivamente detallan el proceso de verificación del reposo de las cámaras  
**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.

**ANEXO E: PROCESO DE RETIRAR LAS CÁMARAS DE IONIZACIÓN PARA SU POSTERIOR ANÁLISIS DE RESULTADOS.**



**Figura 1E**



**Figura 2E**

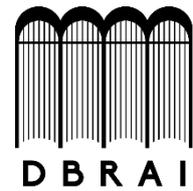


**Figura 3E**

**Figura 1E, 2E y 3E:** respectivamente detallan el proceso de retiro de las cámaras del lugar de experimentación para su posterior análisis.  
**Realizado por:** Liventon Yauli, 2020.



**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:** 13/ 03 / 2020

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Liventon Homero Yauli Espín
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Biofísica
<b>Título a optar:</b> Biofísico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b>