



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE RADÓN EN UNA CUEVA DE ARCHIDONA A TRAVÉS  
DE MÉTODOS ACTIVOS

AUTOR

Felipe Alejandro García Paz

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE RADÓN EN UNA CUEVA DE ARCHIDONA A TRAVÉS DE  
MÉTODOS ACTIVOS

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos  
para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación.

Profesor guía

M.Sc. Yasser Alejandro González Romero

Autor

Felipe Alejandro García Paz

Año

2018

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación de Radón en una Cueva de Archidona a través de Métodos Activos, a través de reuniones periódicas con el estudiante, Felipe Alejandro García Paz, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

-----  
Yasser Alejandro González Romero

Magister en Ingeniería Ambiental

CI:070373762-7

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de Radón en una Cueva de Archidona a través de Métodos Activos, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Rasa Zalakeviciute  
Doctor of Engineering Science  
CI:175707679-7

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

---

Felipe Alejandro García Paz

CI: 1721308672

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por todo su cariño y esfuerzo en prepararme profesionalmente, a mis hermanos por el constante apoyo y motivación; a mi profesor el Ingeniero Yasser González por su tiempo y guía en todo momento. A mi universidad por haberme formado académicamente de la mejor manera y a mis compañeros de carrera por estar siempre presentes.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios, por ser una guía en mi vida así como a mis padres y hermanos quienes con sus consejos han sabido apoyarme en todo momento.

## RESUMEN

El trabajo de titulación que a continuación se presenta consiste en la detección y cuantificación de los niveles de concentración del gas radiactivo de origen natural radón -  $Rn^{222}$ , así como la determinación de puntos críticos y estimación de dosis efectiva absorbida por guías dentro de la caverna Jumandy perteneciente a la comunidad *Kichwa Ruku Jumandy Kawsay* ubicada en el cantón de Archidona, provincia de Napo en Ecuador. Esta zona se encuentra ubicada según el mapa de factibilidad uranífera del Ecuador, en una de las áreas de primera prioridad para la obtención de uranio. La metodología de medición fue realizada durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre del año 2017, en tres diferentes puntos de monitoreo dentro de la caverna. Los equipos de medición que se utilizaron fueron de tipo activo y continuo en donde a través de una cámara de difusión, el gas radón<sup>222</sup> fue detectado y cuantificado. Se realizó una caracterización mineralógica de 4 muestras obtenidas de la caverna con la finalidad de corroborar la información obtenida de la geología del lugar con la concentración de radón<sup>222</sup>. Los niveles promedio de concentración obtenidos en los tres puntos durante los 4 meses dentro de la caverna de Jumandy sobrepasan el límite máximo permisible de 4 pCi/L ~ 148 Bq/m<sup>3</sup> recomendado en normas internacionales, así como la estimación de dosis efectiva absorbida por los guías que cumplen su jornada de trabajo dentro de las cavernas que de igual manera sobrepasa los niveles máximos permisibles de 1 mSv/año para el público dentro de las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica. Como parte final del trabajo de titulación, se elaboró una propuesta de mitigación que consistió en modificar las horas laborales en las que los guías se encuentren expuestos a elevadas concentraciones de radón<sup>222</sup> para así poder reducir la dosis efectiva absorbida estimada.



## ABSTRACT

The graduation work presented as follows consists of the detection and quantification of the concentration levels of radioactive gas radon<sup>222</sup> of natural origin, as well as the determination of the critical points and the estimate of the effective dose absorbed by the guides inside the Jumandy cavern belonging to the Kichwa Ruku Jumandy Kawsay community, in the canton of Archidona, province of Napo, in Ecuador. This area is located according to the feasibility map of uranium of Ecuador, in one of the top-priority areas for obtaining uranium. The measurement methodology was carried out during the months of July, August, September and October of 2017, in three different monitoring points inside the cavern. The measuring equipment used was of active and continuous method, where, through a diffusion chamber, the radon<sup>222</sup> gas was detected and quantified. It is important to note that a mineralogical characterization of 4 cavern samples was carried out in order to determine whether these minerals contained radioactive materials of natural origin. The average levels of concentration obtained in the three points, in a period of 4 months within the Jumandy cavern, exceeded the maximum permissible limit of 4 pCi/L ~ 148 Bq/m<sup>3</sup> recommended by international standards, as well as the estimate of the effective dose absorbed by the guides that spend their work hours inside the caverns, which also exceed the maximum permissible levels of 1 mSv/year for the personnel not occupationally exposed, recommended by the International Atomic Energy Agency. As a final part of this thesis, a mitigation proposal was prepared, which consist of modifying the work hours in which the guides were exposed to higher concentrations of radon<sup>222</sup> in order to reduce the estimated effective dose absorbed.

# ÍNDICE

1.	Capítulo I. Desarrollo del Tema.....	1
1.1.	Antecedentes .....	2
1.2.	Hipótesis.....	3
1.2.1.	Hipótesis Alternativa .....	3
1.2.2.	Hipótesis Nula .....	3
1.3.	Alcance.....	3
1.4.	Justificación .....	4
1.5.	Objetivos .....	5
1.5.1.	Objetivo General .....	5
1.5.2.	Objetivos específicos .....	5
2.	Capítulo II. Marco Teórico .....	5
2.1.	Tipos de Radiaciones.....	5
2.1.1.	Radiaciones Ionizantes .....	6
2.1.2.	Radiaciones No Ionizantes .....	6
2.2.	Periodo de semidesintegración radiactiva.....	7
2.3.	NORM .....	8
2.4.	Working Level Month (WLM) .....	9
2.5.	Radiación Alfa .....	10
2.6.	Radón.....	11
2.7.	Detectores.....	11
2.7.1.	Métodos activos. ....	11
2.7.2.	Cámaras de difusión .....	12
2.7.3.	Corentium Home by Airthings .....	12
2.8.	Seguridad Radiológica.....	14
2.9.	Normativa.....	14
2.9.1.	Cuerpo regulador en Ecuador .....	14
2.9.2.	Normativa Internacional .....	15

3.	Capitulo III. Metodología .....	16
3.1.	Selección del área de estudio .....	16
3.2.	Ubicación del área de estudio .....	18
3.3.	Descripción del monitoreo. ....	20
3.4.	Fechas de monitoreo.....	20
3.5.	Geología del área de estudio .....	21
3.6.	Condiciones meteorológicas .....	23
3.6.1.	Estaciones climáticas dentro de la región Amazónica Ecuatoriana .....	24
3.7.	Parámetros físicos .....	25
3.8.	Flujo mensual de turistas y guías.....	26
3.9.	Calculo de dosis .....	27
3.9.1.	Ecuación de Papachristodoulou.....	27
3.10.	Dimensionamiento del área de estudio.....	28
3.11.	Factores de Influencia.....	29
3.11.1.	Ruta y tiempos de recorrido guiado .....	29
3.12.	Puntos de monitoreo .....	31
3.12.1.	Primer punto de monitoreo.....	31
3.12.2.	Segundo punto de monitoreo.....	32
3.12.3.	Tercer punto de monitoreo.....	33
3.13.	Análisis de puntos críticos.....	35
3.14.	Correlación de datos .....	35
3.15.	Caracterización mineralógica.....	36
4.	Capitulo IV. Resultados y Análisis .....	37
4.1.	Diagrama de resultados y análisis .....	37
4.2.	Niveles de concentración .....	38
4.2.1.	Primer punto de monitoreo - monitoreo diario .....	38
4.2.2.	Segundo punto de monitoreo – monitoreo diario .....	43
4.2.3.	Tercer punto de monitoreo – monitoreo diario .....	48

4.2.4.	Tercer punto de monitoreo con Corentium Pro – monitoreo horario.....	54
4.3.	Caracterización mineralógica.....	59
4.4.	Registro de miembros de la comunidad y cantidad mensual de turistas.....	62
4.5.	Dosis efectiva recibida:.....	64
4.6.	Determinación de puntos críticos.....	65
4.7.	Medidas de mitigación.....	65
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	67
5.1.	Conclusiones.....	67
5.2.	Recomendaciones.....	68
	Referencias.....	70

## Introducción

La radiactividad es un fenómeno físico, en donde el núcleo de un átomo posee muchos o muy pocos neutrones, esto provoca que el átomo sea inestable y en su búsqueda por alcanzar estabilidad genera o emite radiación. Los Materiales Radiactivos de Origen Natural o por su abreviatura NORM, que en inglés significa "*Naturally Occurring Radiactive Materials*", están presentes en todos los minerales y materia prima del planeta. El radón ( $\text{Rn}^{222}$ ), es un gas noble radiactivo de origen natural que resulta de la desintegración del radio ( $\text{Ra}^{226}$ ) y tiene un periodo de semidesintegración de 3,8 días (Fisher, 1995, pp.2-15).

El radón está presente en la cadena de desintegración radiactiva del uranio ( $\text{U}^{238}$ ) y cuando se menciona a la desintegración radiactiva de origen natural es importante señalar que: todo radioisótopo en su búsqueda por estabilidad atómica llegará a decaer en un elemento estable como lo es el plomo ( $\text{Pb}^{206}$ ) (Quindos, 1995, pp.5-9). El radón está presente de manera natural y forma una pequeña parte del aire que respiramos, sin embargo, al ser incoloro, inodoro e insípido, su detección es difícil de realizar. Una de las características más importantes de este gas es que se puede solubilizar en el agua y estar también presente en el suelo (Gruppen, 2016, pp.61-78). La presencia de radón es más considerable cuando a este se lo evalúa en espacios con poca ventilación y cerca del nivel del suelo. Las cavernas son escenarios ideales para la presencia de gases radiactivos de origen natural como el radón y si a esto le sumamos la presencia del ser humano, por ser este un espacio turístico, se debe considerar que los principios para la protección radiológica deben ser implementados (OMS, 2016). La medición es realizada utilizando cámaras de difusión como un instrumento activo de detección y toma lugar en el cantón de Archidona, perteneciente a la provincia de Napo en el Ecuador.

## 1. Capítulo I Desarrollo del Tema

### 1.1. Antecedentes

Existen varios factores para considerar la presencia de radón, uno de los más importantes para tomar en cuenta es el nivel de uranio que posee la geología de una zona. Es importante ya que al considerar al uranio como el “padre” del radón, su presencia y localización nos informa la existencia de este último. El uranio está presente en casi todos los tipos de roca del planeta tierra, ya sea ocupando grandes proporciones o una pequeña fracción (Eriksen, 2013, pp.3-15). El levantamiento de una línea base en cuanto a un mapa geológico de la zona en donde se realiza la medición de radón es fundamental ya que dependiendo de la formación geológica, encontraremos en mayor o menor cantidad uranio.

El granito es un tipo de roca ígnea y la arcilla un material natural sedimentario, en donde la presencia de uranio es significativa, con valores entre 3,7 a 5 partes por millón (ppm) (Otton, 1992, pp. 4-10).

Tabla 1.

*Presencia de uranio y torio en materiales de construcción.*

Materia	Uranio <sup>238</sup> (en ppm)	Torio <sup>232</sup> (en ppm)
Rocas areniscas	0.5	1.7
Rocas carbonatadas	0.5	1.7
Rocas basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3.5	11
Rocas graníticas	5	12

Al ser el radón un gas, puede acumularse en espacios en donde exista muy poca ventilación. El radón puede estar presente en el suelo, agua y aire, convirtiendo su presencia en un tema de interés común (Cigna, 2005).

La Organización Mundial de Salud (OMS) junto con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) recomiendan que se realicen monitoreos

constantes sobre la concentración de radón en espacios cerrados en donde exista la presencia de personas (NRC, 1999).

## **1.2. Hipótesis**

### **1.2.1. Hipótesis Alternativa**

Existen concentraciones de radón en el lugar de estudio debido a la formación geológica Napo-Tena.

### **1.2.2. Hipótesis Nula**

No existen concentraciones de radón en el lugar de estudio debido a la formación geológica Napo-Tena.

## **1.3. Alcance**

El presente proyecto pretende evaluar la presencia de radón en una caverna de Archidona, tomando en cuenta puntos críticos con el fin de levantar información acerca de la concentración de este gas, así como informar a los guías sobre los riesgos frente a un elevado tiempo de exposición. Se pretende realizar una propuesta de mitigación para que, desde el punto de vista de la seguridad radiológica, la salud de las personas expuestas no se vea afectada logrando así que la presencia de altas concentraciones de radón no sea un limitante para la visita a este punto turístico, lo cual conllevaría en afectaciones económicas para las personas que de esta industria, basan su economía.

#### 1.4. Justificación

El radón, al ser inhalado, se adhiere al tejido pulmonar en donde se irradian las células broncopulmonares. Una vez ahí las partículas ionizantes que son el producto del decaimiento radiactivo del  $Rn^{222}$  ( $Po^{218}$ ,  $Po^{214}$ ) interactúan con los tejidos pulmonares, causando alteraciones en el ADN de las células pulmonares, de igual manera, el radón es la principal causa de muerte por cáncer pulmonar para los no fumadores a nivel mundial y desde 1988 es considerado carcinógeno humano por el departamento de la Organización Mundial de la Salud especializado en investigación oncológica (Kendall, 2002). Además alteración del ADN de las células pulmonares como consecuencia de la exposición al gas radón, se puede dar a cualquier nivel de concentración.

Las cavernas ubicadas en la provincia de Napo cerca de Archidona están situadas según el mapa geológico del Ecuador, en una zona de geología Ígnea. Este tipo de roca nos informa sobre la presencia de uranio y torio, elementos que preceden la generación de radón. El conocimiento de las afecciones que puede llegar a producir el contacto con el gas radón permite generar el interés público de capacitación y preparación frente a la exposición a este gas.

Se crea la necesidad de realizar un estudio en el que se mida la concentración, tasa de dosis y se realice una propuesta de plan de mitigación de gas radón en espacios cerrados como cuevas o cavernas en la provincia de Napo tomando en cuenta su gran afluencia turística y ubicación frente a un mapa geológico. Se busca prevenir posibles afectaciones tanto a la salud de los turistas, así como también del personal que ahí trabaja, minimizando impactos sobre el principal motor económico de la zona. La peligrosidad de la presencia del radón está en la emisión de radiación por parte del mismo, pero sin duda, es importante considerar que al decaer, sus descendientes emitirán radiación, por esto es importante detectar su presencia y mitigar su impacto potencial (Quindos, 1995).



## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Analizar la presencia de radón a través de métodos activos de detección.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Cuantificar niveles de concentración de radón dentro de la caverna en Archidona-Ecuador.
- Calcular la dosis recibida estimada por turistas y guías mediante modelos de inhalación.
- Determinar puntos críticos de concentración dentro de la caverna en Archidona.

## **2. Capítulo II. Marco Teórico**

### **2.1. Tipos de Radiaciones**

A los elementos con átomos inestables se los conoce como radioisótopos, los mismos, se crean a partir de desintegraciones de núcleos inestables, en donde la velocidad en la que un radioisótopo se desintegra dependerá del radionúclido del que se trate. El tiempo que transcurra para que esto suceda, se lo conoce como periodo de semidesintegración radiactiva (Laurence, 2015). La radiación de un átomo generalmente proviene de su núcleo, sin embargo, algunas provienen por la excitación de los electrones que se encuentran en las orbitas del mismo, en todo caso, la liberación de energía durante el proceso de estabilización varía, convirtiéndose en tipos de radiaciones como: alfa, beta, gamma, electromagnética y neutrónica. Todos estos tipos de radiaciones se

diferencian por la energía o fuerza de radiación, la cual indica el poder penetrante, esta energía es expresada en electrón voltios (Ev) (Carrasco, 2003).

### 2.1.1. Radiaciones Ionizantes

Cuando un átomo radiactivo busca estabilización, este emite radiación. La radiación ionizante está catalogada como un tipo de radiación que tiene la capacidad de ionizar materia y emitir ondas de tipo electromagnéticas teniendo como resultado la exposición interna o externa a las personas que tienen contacto con este tipo de radiación (OMS, 2016).

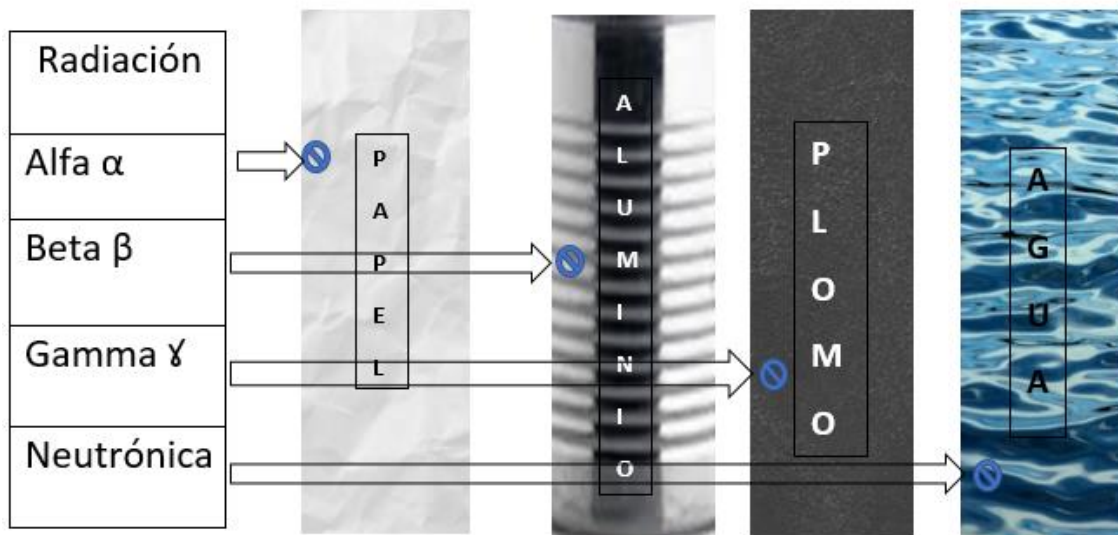


Figura 1. Tipos de Radiaciones Ionizantes.

### 2.1.2. Radiaciones No Ionizantes

La radiación no ionizante se define como un tipo de energía que posee una mayor longitud de onda y menor energía en comparación con la radiación ionizante. No es capaz de desprender o sacar electrones de su estructura y se dividen en dos grupos: electromagnéticas y óptimas.

Dentro de las fuentes naturales que emiten radiación no ionizante tenemos a la radiación solar, además este tipo de energía se puede encontrar mediante el uso de artículos electrónicos como radios o celulares (Wood, 2017).

## 2.2. Periodo de semidesintegración radiactiva

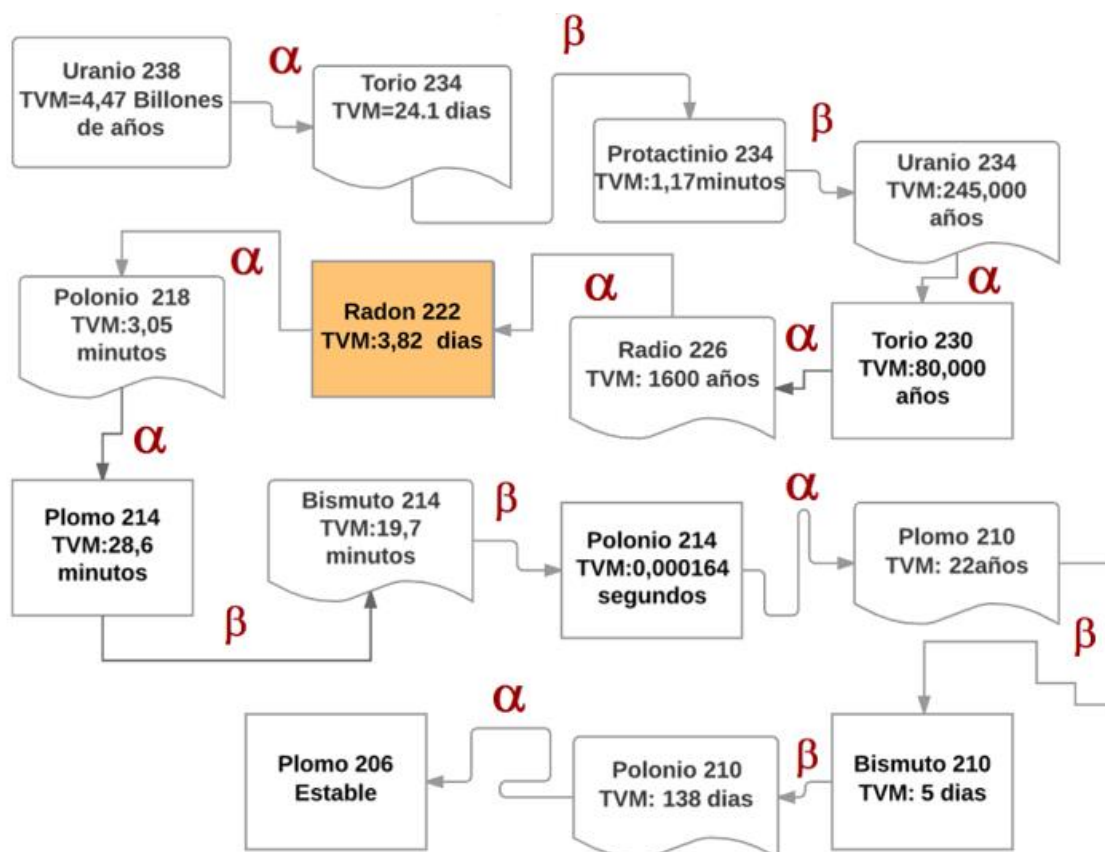


Figura 2. Desintegración Radiactiva del  $U^{238}$ .

Adaptado de National Research Council 1999, pp.27.

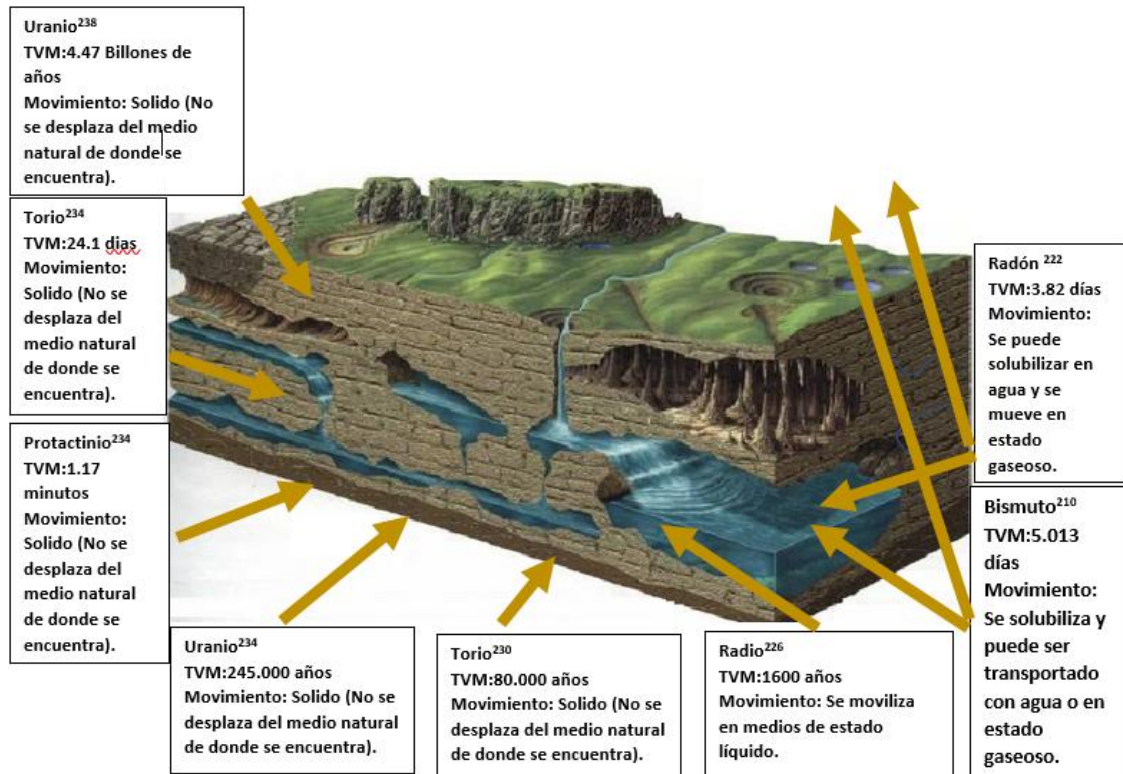


Figura 3. Movimiento de radionúclidos según el medio físico.

Adaptado de IAEA. Safety Reports Series No. 34 ,2003,pp.62.

### 2.3. NORM

Todos los minerales y materias primas contienen una cierta cantidad de radionúclidos de origen natural, en donde los más importantes para los propósitos de protección radiológica, son aquellos que provienen de la cadena de desintegración radiactiva del  $U^{238}$  y  $Th^{232}$ . Los Materiales Radiactivos de Origen Natural o por su abreviatura NORM, que en ingles significa “*Naturally Occurring Radioactive Materials*”, están presentes de manera libre en el medio ambiente y su presencia representa un porcentaje del total de toda la radiación que un ser humano recibirá durante su vida (*World Nuclear Association, s.f*).

Anteriormente las personas que por su trabajo, se encontraban expuestas ya sea en temas de minera o extracción de petróleo, eran las que se consideraban más propensas a ser irradiadas por NORM's. Sin embargo, este tipo de exposición no ha sido, sino hasta las dos últimas décadas tomada en cuenta como un tema de estudio para personas que no se encuentran ocupacionalmente expuestas a este tipo de radiación. Durante las últimas dos décadas muchos países han creado mecanismos para regular y controlar la exposición tanto de trabajadores como del público en general hacia el contacto con materiales radiactivos de origen natural. Dos avances importantes en esta área fueron la creación de los estándares de protección básicos contra la radiación ionizante y protección contra las fuentes radiactivas publicado en 1996 por la *International Atomic Energy Agency* (IAEA) y la Directiva del Consejo Europeo (96/29/Euratom) creada el 13 de mayo de 1996 (IAEA, 2011, pp.6).

#### **2.4. Working Level Month (WLM)**

En la época en donde se realizaba minería de uranio, una concentración de 100 pCi/L fue asumida como valor límite para la concentración de radón, sin embargo, cuando se descubrió que la mayoría de dosis que reciben los pulmones proviene de los radionúclidos producto del decaimiento radiactivo del radón, un nuevo valor límite *Working Level* (WL) fue creado. Esta unidad se basó en la cantidad de energía depositada en los pulmones proveniente de los radionúclidos progenitores del radón (Scott, 2012).

Mientras el WL es una unidad que mide la tasa de exposición producida por los productos de decaimiento del radón, el *Working Level Month* es una unidad utilizada para expresar exposición acumulada en humanos proveniente de los productos de decaimiento del radón y tomando en cuenta que el horario laboral de un minero era 170 h/mes, se puede decir que 1 *Working Level Month* es equivalente a 1 WL por 170 horas (*The University of Texas at Austin*, 2014).

Todos los radionúclidos de vida corta que decaen del radón en un litro de aire tendrán una emisión de 13,000 MeV de energía potencial tipo alfa y se conoce que el *Working Level* es aproximadamente el total de energía alfa resultante del decaimiento radiactivo del radón en equilibrio con 100 pCi de radón por litro de aire (*The University of Texas at Austin*, 2014).

La unidad *Working Level Month* es frecuentemente usada en la evaluación del riesgo que representa la exposición al radón en lugar del cálculo de dosis en milisievert (mSv). La ventaja de utilizar este método es que la concentración puede ser medida directamente y no se debe asumir la distribución de la dosis en el cuerpo (*Bundesamt für Strahlenschutz*, s.f.).

## 2.5. Radiación Alfa

Al estudiar la radiación de partículas alfa, se sabe que un núcleo que posee un elevado número de masa puede emitir 2 protones y 2 neutrones, teniendo una carga de 2+, su radiación es poco penetrante y puede ser detenida con una simple barrera como una hoja de papel, sin embargo, tiene un riesgo significativo cuando se produce una exposición interna ya que en el caso del radón, esas partículas se situarán en los tejidos bronco pulmonares de las personas pudiendo causar daños en el ADN y cáncer pulmonar (Carrasco, 2003).

Los tipos de radiaciones pueden ser diferentes las unas de las otras dependiendo de su poder de penetración en diferentes tipos de materiales y por su diferente tipo de respuesta a los efectos de un alto magnetismo y campos eléctricos. Las partículas alfa pueden ser detectadas por diferentes mecanismos, entre ellos tenemos a: emulsiones nucleares, cámaras de nubes, cámaras de ionización, difusión y contadores de centelleo (Jha, 2004, pp.44-46).

## 2.6. Radón

Al ser la radiación, un fenómeno físico, no la podemos ver, sentir, oler o percibir. Sin embargo, el potencial daño que puede provocar el contacto con esta manera de energía depende del tipo de radiación, dosis y tasa de dosis, además del tipo de célula que recibe la radiación. El  $\text{Rn}^{222}$ , es un gas radioactivo de origen natural que se encuentra de manera libre en el ambiente, es resultado de la desintegración radiactiva del  $\text{Ra}^{226}$  y, este a su vez del  $\text{Th}^{230}$ . Este peligroso gas representa aproximadamente el 50% de toda la radiación que recibe una persona en su vida (Barros, 2014).

Cuando el  $\text{Rn}^{222}$  decae emite radiación en forma de partículas alfa, como lo son el  $\text{Po}^{218}$  y  $\text{Po}^{214}$ , estos dos últimos considerados los causantes de cáncer pulmonar (NRC, 1999).

## 2.7. Detectores

### 2.7.1. Métodos activos.

Los dispositivos activos requieren de una fuente eléctrica para funcionar permitiendo encontrar fluctuaciones en niveles de concentración de radón durante todo el periodo de medición, mientras que los dispositivos que se consideran pasivos no requieren de corriente eléctrica para funcionar y dentro de los más conocidos tenemos a los detectores de traza para las partículas alfa, detectores de adsorción de carbón activado y cámaras iónicas de electreto (OMS, 2015). Entonces básicamente existe una diferencia entre los llamados activo y pasivo instrumentos de monitoreo. Se los llama instrumentos activos cuando cualquier fuente de energía interna o externa es necesaria para poder utilizar dichos instrumentos de medición, mientras que en un dispositivo pasivo

ninguna fuente interna o externa de energía es necesaria para que un dispositivo entre en operación (*Porstendörfer*, 1996).

### **2.7.2. Cámaras de difusión**

La detección de radón está basada en el principio de que este gas se difunde dentro de una cámara de detección. Una vez que el radón decae, sus radionúclidos emiten particular de energía tipo alfa. Una vez ahí, las partículas alfa son detectadas por un fotodiodo de silicio. Todas las partículas alfa generan pequeñas señales eléctricas cuando se ponen en contacto con los fotodiodos. (Nabil, Poova, Zafarghandi, Taheri, 2012).

Además, se conoce que en una cámara de difusión, un campo eléctrico es establecido entre dos o más electrodos. Se permite que el aire filtrado entre en la cámara por difusión pasiva o si este no entra de manera normal, deberá ser bombeado, una vez adentro, la corriente causada por la ionización del gas dentro de la cámara es detectada. Existen electretos positivos que recogerán los iones negativos y la ionización medida es la causada por el decaimiento radiactivo del radón. Si bien la cámara mide la total ionización, es probable que la medición sea producida por las pulsaciones individuales de partículas alfa presentes. Este método es uno de los más conocidos y seguros al momento de medir concentraciones de radón (OMS, 2015).

### **2.7.3. Corentium Home by Airthings**

El medidor de radón Corentium Home está diseñado y fabricado en Noruega. Este dispositivo nos permite realizar mediciones de radón en periodos largos de tiempo que llegan hasta un año y en periodos cortos que van desde un día. El Corentium es un método activo de medición que funciona a través de una cámara de difusión, sin embargo, los primeros resultados de las mediciones aparecerán después de 24 horas. Las funciones operativas del Corentium Home nos permite



realizar estudios en condiciones ambientales como en cavernas ya que la humedad relativa a la que el equipo puede funcionar deberá ser menor a 95% y la temperatura deberá estar entre los 0 y 40 °C con un rango de medición que va de 0 a 9999 pCi/L y un rango de error en mediciones de periodo corto <20%.

El cálculo de la concentración de radón es complejo tomando en cuenta las múltiples fuentes de error que se deben considerar. Cuando el radón decae partículas alfa son liberadas, siendo el  $\text{Po}^{218}$  y  $\text{Po}^{214}$  las más notables. Estas partículas alfa podrían ser tomadas en cuenta como partículas de radón, dándonos así una medición incorrecta sobre la concentración de este gas, sin embargo, el Corentium Home utiliza algoritmos que son capaces de distinguir entre varias fuentes de energía de tipo alfa. La mayor aportación para estos algoritmos es la energía alfa de las partículas de decaimiento, combinadas con el conocimiento del espectro de energía del radón y los isotopos del polonio. El Corentium Home tiene una muy buena resolución al momento de medir energía utilizando algoritmos (Corentium, s.f.).



Figura 4. Corentium Home by Airthings.

## **2.8. Seguridad Radiológica**

Según la Organización Internacional de Energía Atómica, las normas para la seguridad radiológica se basan en la protección del hombre y el medio ambiente cuando este se encuentra expuesto a cualquier tipo de radiación ionizante. Estas normas estarán aplicadas a toda instalación y actividad que represente el uso, transporte o gestión de cualquier material radiactivo. Las aplicaciones de estas normas serán de mucha ayuda para prevenir accidentes o afectaciones al momento de manipular o estar en contacto con fuentes radiactivas, tanto para la exposición ocupacional, médica y la del público en general (OIEA, 2011).

Al hablar de protección radiológica debemos tomar en cuenta las siglas DBT que se refieren a la distancia que se debe tener sobre la fuente radiactiva, el blindaje necesario para no vernos expuestos a la radiación y el tiempo al que estemos expuestos a dicha fuente radiactiva (Ponce, 2013).

## **2.9. Normativa**

### **2.9.1. Cuerpo regulador en Ecuador**

En el Ecuador la autoridad reguladora encargado de controlar el uso de las radiaciones ionizantes es la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), que depende del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. La SCAN tiene la función de regular el uso de radiaciones ionizantes en las diferentes áreas de aplicación que existe, como la agricultura, medicina e industria, fomentando el uso adecuado de técnicas enfocadas a la protección radiológica. La SCAN brinda servicios como la calibración para equipos especializados en la detección de radiación, determinación de niveles de radiactividad considerando diferentes matices y todo lo referente a dosimetría personal.

En el Acuerdo Ministerial N.59 publicado el 1 de junio de 2017, se considera al radón como un agente carcinógeno humano, además según la resolución de la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (CEEAA), publicada el 7 de julio del 2000, debe existir como parte de las funciones de vigilancia ambiental radiactiva, monitoreos de radón.

En el Ecuador no existe un marco legal que regule temas referentes a concentración de radón en interiores o exteriores, sin embargo, se ha creado un reglamento de seguridad radiológica que busca informar y proteger a las personas de la exposición a radiaciones. Este reglamento se escribió tomando en cuenta las recomendaciones de organismo internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CEEAA, 1979).

Tabla 2.

*Absorción por inhalación de radón anual máxima permitida.*

Absorción Anual Máxima permitida por Ingestión e Inhalación para miembros de la población en (uCi) S: Soluble I: Insoluble		
Oficial – 8 de agosto de 1979		
Radionúclido	Ingestión uCi	Inhalación uCi
Rn-222		S:7.3x10

### 2.9.2. Normativa Internacional

El estudio del gas radón es un tema de salud pública a nivel mundial, sin embargo, cada país maneja diferentes niveles máximos de concentración.

La Organización Mundial de la Salud recomienda una concentración promedio anual de  $100 \text{ Bq/m}^3$  como referencia con una dosis efectiva de  $1 \text{ msv/año}$ . La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, propone un nivel máximo de  $4 \text{ pCi/L} \sim 148 \text{ Bq/m}^3$  de concentración (OMS, 2010) y el Comité Federal Territorial de Protección Radiológica de Canadá recomienda que los niveles de concentración no excedan los  $200 \text{ Bq/m}^3$  (FPTRPC, 2005)

### **3. Capítulo III. Metodología**

#### **3.1. Selección del área de estudio**

La selección del área de estudio fue determinada después de realizar una valoración sobre la geología del lugar y las características morfológicas de la caverna. Archidona se encuentra en la provincia de Napo en donde existen anomalías radiométricas y por este motivo se determinó a este lugar como una zona idónea para encontrar niveles altos de concentración de  $\text{Rn}^{222}$ . De igual manera fue importante tomar en cuenta las características tanto de dimensionamiento y forma de la caverna, así como también que exista un flujo diario de personas que estén expuestas al  $\text{Rn}^{222}$ .

Para poder ingresar a realizar monitorios en las cavernas de Jumandy fue necesario pedir autorización a la presidenta de la comunidad Kichwa Ruku Jumandy Kawsay, la Sr. Bertha Grefa, a quien se le explico el trabajo a ser realizado y los periodos en los que se ingresó a realizar las mediciones.

Una vez expuesto los motivos de la investigación a la comunidad, se pidió autorización para realizar agujeros con un taladro de roca dentro de la caverna pudiendo así colocar ganchos en donde se colgaron las mallas que llevaban el equipo de monitoreo ya que esta era la única manera de que el equipo no estuviera expuesto a riesgos.



*Figura 5.* Red y ganchos para colocar los equipos de medición.



*Figura 6.* Ubicación del monitor Corentium Pro en el tercer punto de monitoreo.

### 3.2. Ubicación del área de estudio

El estudio fue realizado en las cavernas de Jumandy, que se encuentran a 2km de la ciudad de Archidona, ubicada en la provincia de Napo, aproximadamente a 15 minutos de la ciudad del Tena en la región amazónica del Ecuador a una altura de 635 msnm, 75% de humedad relativa y una presión atmosférica de 903.15 hPa.

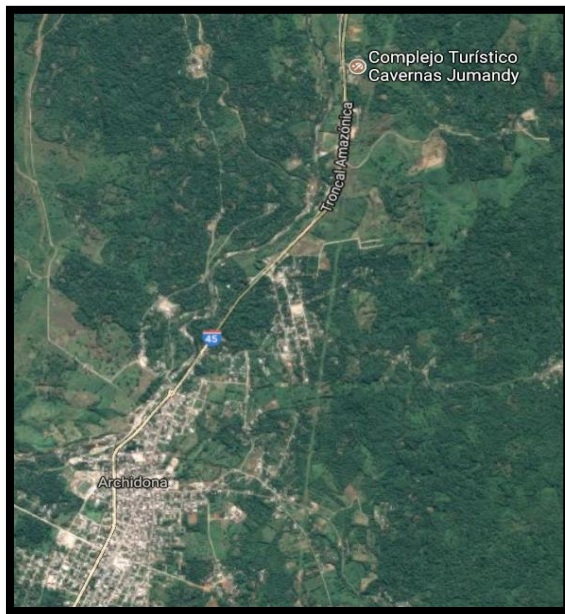


Figura 7. Distancia entre Archidona y las cavernas de Jumandy.

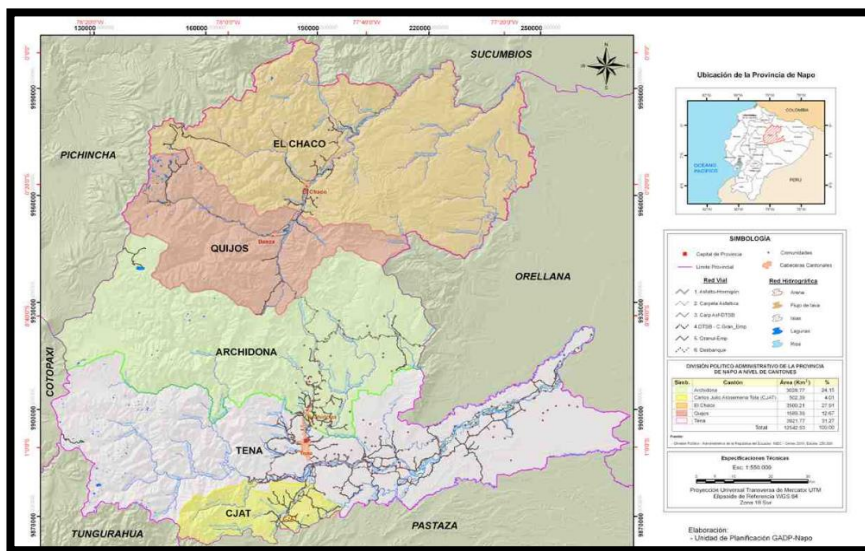


Figura 8. Mapa de división político administrativo de la provincia de Napo.

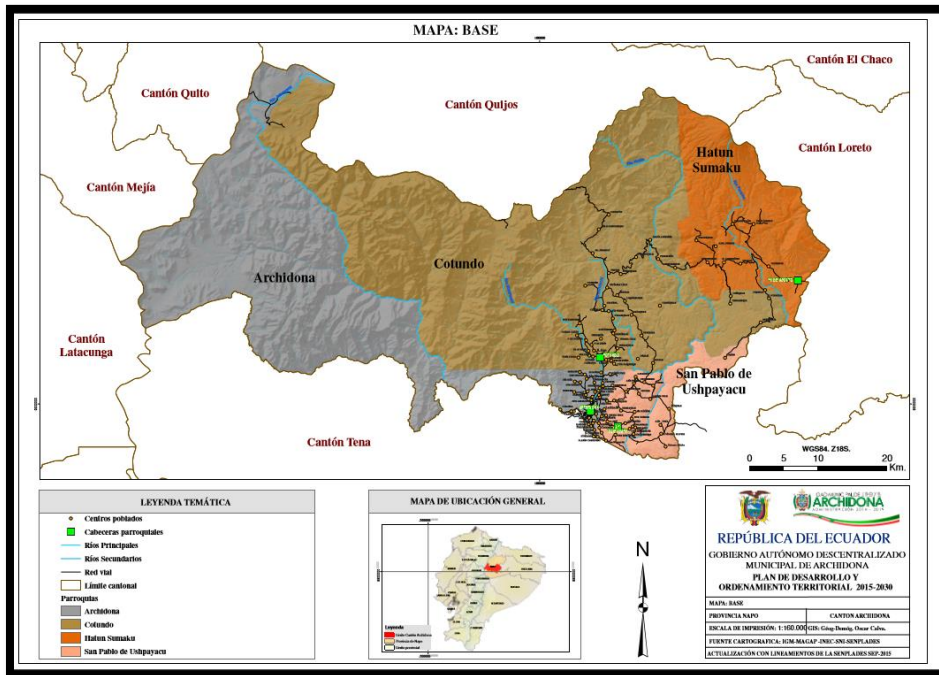


Figura 9. Mapa base del cantón Archidona.

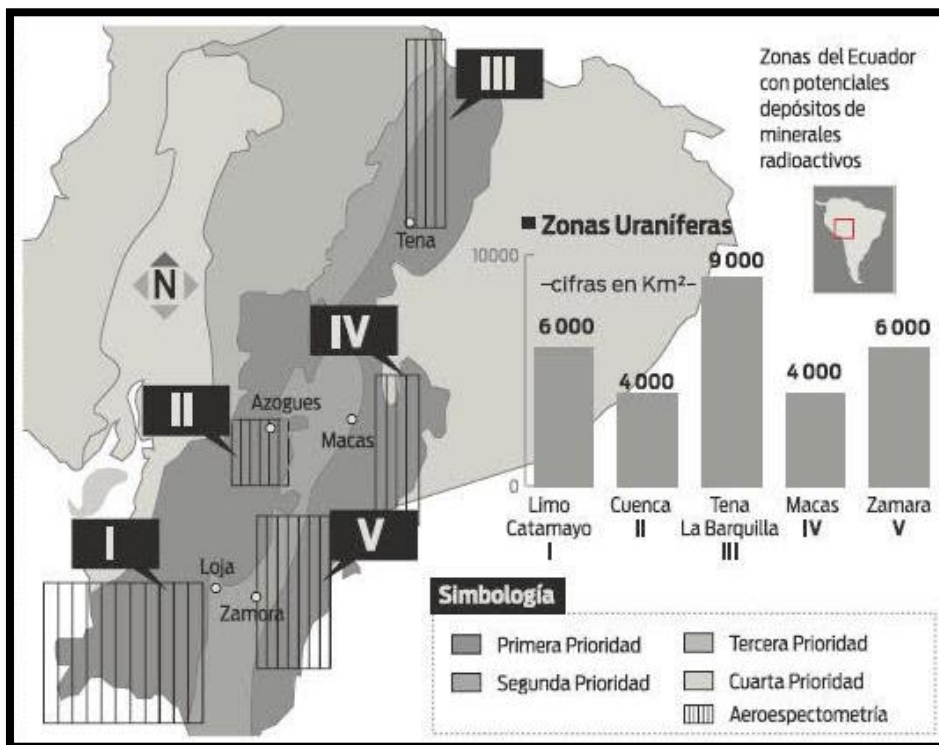


Figura 10. Áreas en Ecuador ubicadas con factibilidad uranífera

### 3.3. Descripción del monitoreo.

El monitoreo se realizó durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre del año 2017. Se tomó en cuenta que el Corentium Home, muestra resultados en las mediciones después de 24 horas, es por esto que se realizó monitoreos de concentración de radón en periodos de 4 días y 3 noches, durante 4 meses en 3 diferentes puntos dentro de caverna, un punto por día. Los parámetros físicos fueron medidos durante la mañana y en la tarde ya que este es el horario en el que se presenta mayor cantidad de turistas.

Los puntos de monitoreo fueron determinados según el flujo de turistas en las diferentes zonas de la cueva. El equipo se colocó por lo menos a 50 cm alejado del suelo y 25 cm alejado de la pared. Se realizó un monitoreo adicional mediante el uso de un monitor continuo de tipo activo Corentium Pro. De esta manera se pudo determinar con mayor precisión la concentración de radón dentro de las cavernas y realizar una comparación de datos entre el Corentium Home y el Corentium Pro, evaluando así la fiabilidad de datos del primer dispositivo de medición. El Corentium Pro es un monitor continuo de tipo activo y certificado por la Asociación de Científicos de Radón (*American Association of Radon Scientists and Technologists*). Este equipo cuenta con 4 cámaras por donde ingresa el radón, permitiendo generar y visualizar datos cada 25 minutos, posee un rango de medición de 0 a 2,700 pCi/L, además de un sensor de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.

### 3.4. Fechas de monitoreo

Tabla 3.

*Fechas en donde se realizaron las mediciones de Rn<sup>222</sup>.*

Medición	Fecha de Inicio	Fecha de Finalización
Primera Medición	18/07/2017	21/07/2017



Segunda Medición	26/08/2017	29/08/2017
Tercera Medición	28/09/2017	01/10/2017
Cuarta Medición	26/10/2017	29/10/2017

<b>Primera Medición</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>
Primer Punto	18/07/2017	19/07/2017
Segundo Punto	19/07/2017	20/07/2017
Tercer Punto	20/07/2017	21/07/2017

<b>Segunda Medición</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>
Primer Punto	26/08/2017	27/08/2017
Segundo Punto	27/08/2017	28/08/2017
Tercer Punto	28/08/2017	29/08/2017

<b>Tercera Medición</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>
Primer Punto	28/09/2017	29/09/2017
Segundo Punto	29/09/2017	30/09/2017
Tercer Punto	30/09/2017	01/10/2017

	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>
Primer Punto	26/10/2017	27/10/2017
Segundo Punto	27/10/2017	28/10/2017
Tercer Punto	28/10/2017	29/10/2017

<b>Cuarta Medición (Corentium Pro)</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>
Tercer Punto	28/10/2017	28/10/2017
Tercer Punto	29/10/2017	29/10/2017

### 3.5. Geología del área de estudio

Para determinar el área de estudio, fue importante realizar un levantamiento de información sobre las características geológicas del lugar, tomando en cuenta que el  $Rn^{222}$  presentará una mayor o menor concentración en cada tipo de suelo o mineral. En el Ecuador existe un mapa geológico creado en el año de 1986 por

el Instituto Ecuatoriano de Minería en donde Archidona, la zona evaluada, se encuentra ubicada entre la formación Tena y Formación Napo.

La formación Tena se encuentra ubicada en la sección de la carretera que está entre Tena y Archidona. Está formada por arenas calcáreas conglomeráticas, areniscas medias y finas intercaladas con limolitas y arcillolitas. Se ubica en una escala temporal geológica denominada Paleoceno Cretáceo. La formación Napo se encuentra en la zona elevada del río Napo y su litología se dividió en 3 partes, napo inferior, napo medio y napo superior. En la sección de napo inferior se encuentran areniscas glauconíticas y lutitas arenosas, además de calizas de textura clástica.

En la sección de napo medio se encuentran capas de caliza masiva y en la sección de napo superior se encuentran capas de lutitas duras de color negro con calizas de color gris oscuro, su escala temporal geológica se ubica en la Cretácica. Las dos últimas formaciones se ubican en la era geológica denominada Mesozoica (INIGEMM, 1986).

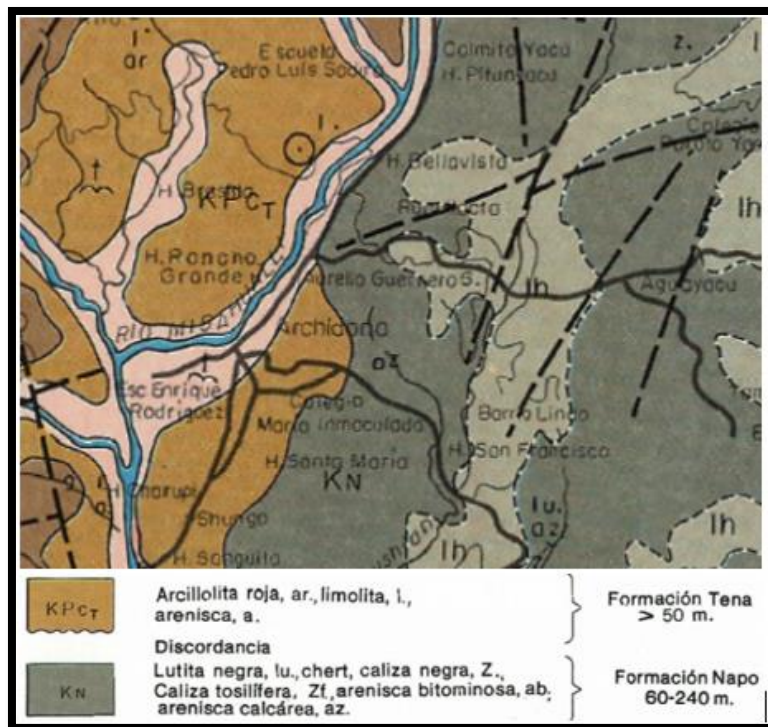


Figura 11. Mapa Geológico del Ecuador, escala 1:100000, Archidona.

### 3.6. Condiciones meteorológicas

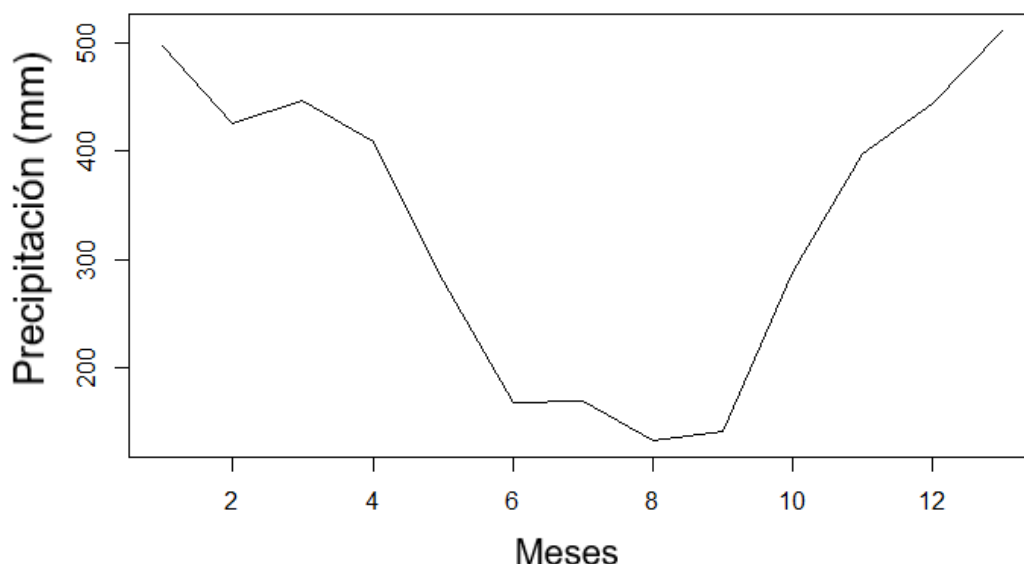
Fue importante determinar las condiciones meteorológicas de la zona porque al realizar la cuantificación de los niveles de concentración de radón<sup>222</sup>, se tuvo que conocer en que estación climática nos encontrábamos y así determinar variaciones en la concentración.

Para la estimación de la precipitación total en la superficie de la región amazónica del Ecuador, se tomó información desde el 1 de enero del 2016 hasta el 1 de enero del 2017, de la interfase web Giovanni de propiedad de la NASA que por sus siglas en ingles significa “*National Aeronautics and Space Administration*”. Los datos obtenidos fueron procesados en el software de Rstudio en donde se utilizó lenguaje de programación para organizar información obtenida de los diferentes satélites distribuidos en todas las zonas del mundo.

Tabla 4.

*Información sobre la precipitación en mm/mes (Giovanni).*

Mínimo	1er Cuartil	Mediana	Media	3er Cuartil	Máximo
100.1	182.9	326.9	317.4	437.6	646.8



*Figura 12.* Precipitación total (mm/mes) en la superficie de la región Amazónica del Ecuador desde el 1 enero de 2016 hasta 1 de enero de 2017.

### 3.6.1. Estaciones climáticas dentro de la región Amazónica Ecuatoriana

Por su ubicación geográfica, en el Ecuador existen dos estaciones climáticas, la primera está caracterizada por el incremento en el nivel de precipitación y se la conoce como invierno mientras que en el verano los niveles de precipitación bajan. El invierno comienza aproximadamente desde el mes de diciembre hasta junio y el verano desde junio hasta diciembre. Sin embargo, el Ecuador al tener 4 regiones (Costa, Sierra, Oriente y Región Insular), se van a poder encontrar variaciones en las fechas de comienzo y fin de las estaciones dadas la ubicación y altitud. En la región Amazónica que es donde se ubica la caverna a ser estudiada, encontramos un incremento en el nivel de precipitación durante casi

todo el año y los meses con menos precipitación son los de (junio a agosto) aproximadamente.

### **3.7. Parámetros físicos**

El monitoreo de los parámetros físicos se determinó mediante la medición de la humedad relativa, temperatura, presión y velocidad del viento. Todos estos parámetros permitieron hacer una relación entre los diferentes puntos de muestreo y la concentración de radón encontrado en dichos puntos (Gallego, 2015).

Para la determinación de la humedad relativa, temperatura y velocidad del viento se utilizó el equipo *Airflow* modelo TA440, el cual nos permitió obtener resultados de humedad relativa de 0 a 95% con un porcentaje de error de  $\pm 3\%$  en un tiempo de respuesta menor a 1 minuto. En cuanto a la temperatura, esta pudo ser medida en un rango de -10 a 60 °C obteniendo una precisión del  $\pm 0,3$  °C y una velocidad de respuesta de 2 minutos. Finalmente, la velocidad del viento se midió en un rango de 0 a 30 m/s con un porcentaje de error de  $\pm 0,015$  m/s y con una velocidad de respuesta de 200 msg.



*Figura 13.* Medición de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento utilizando el equipo Airflow modelo TA440.

### **3.8. Flujo mensual de turistas y guías**

Las cavernas son propiedad y se encuentran administradas por la familia Grefa que pertenecen a la comunidad *Kichwa Ruku Jumandy Kawsay*, sin embargo, la administración e instalaciones del área turística que se encuentra ahí como la piscina y restaurante, son administradas por parte de la prefectura del cantón Archidona. Para el levantamiento de los datos sobre la cantidad de turistas que visitan la caverna mensualmente, se realizó una petición a la comunidad, en donde la información fue entregada por la presidenta Bertha Grefa. Los datos obtenidos corresponden al número exacto de guías, edades, género, el tiempo de duración del recorrido y la cantidad de turistas que ingresan mensualmente al complejo durante todo el año 2016.

Esta información fue de gran ayuda para determinar la dosis recibida por guías que entran diariamente a las cavernas.

### 3.9. Calculo de dosis

Fue importante calcular la dosis efectiva estimada recibida por los guías dentro de las cavernas ya que el tiempo, concentración de  $Rn^{222}$ , factores de conversión de dosis y radiación alfa por parte de los hijos del  $Rn^{222}$  ( $Po^{214}$  y  $Po^{218}$ ), serán importantes para determinar el cálculo de dosis efectiva.

La dosis efectiva estimada fue determinada según los datos obtenidos en las mediciones dentro de los 3 puntos en la cueva y para la misma se usó la Ecuación de Papachristodoulou. Esta ecuación ha sido utilizada en muchos estudios similares dentro de cavernas en varios países del mundo (Papachristodoulou, 2004, pp 622).

#### 3.9.1. Ecuación de Papachristodoulou

$$E_{Rn} = C_{Rn} \times F \times t \times d \times u \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$E_{Rn}$ = dosis efectiva (mSv/año).

$C_{Rn}$ = concentración de radón dentro de la cueva ( $Bq/m^3$ ).

$F$ = el promedio del Factor de equilibrio entre el radón y los productos de decaimiento.  $F=0.57$

$t$ = representa el tiempo dentro de la cueva (Horas/Año).

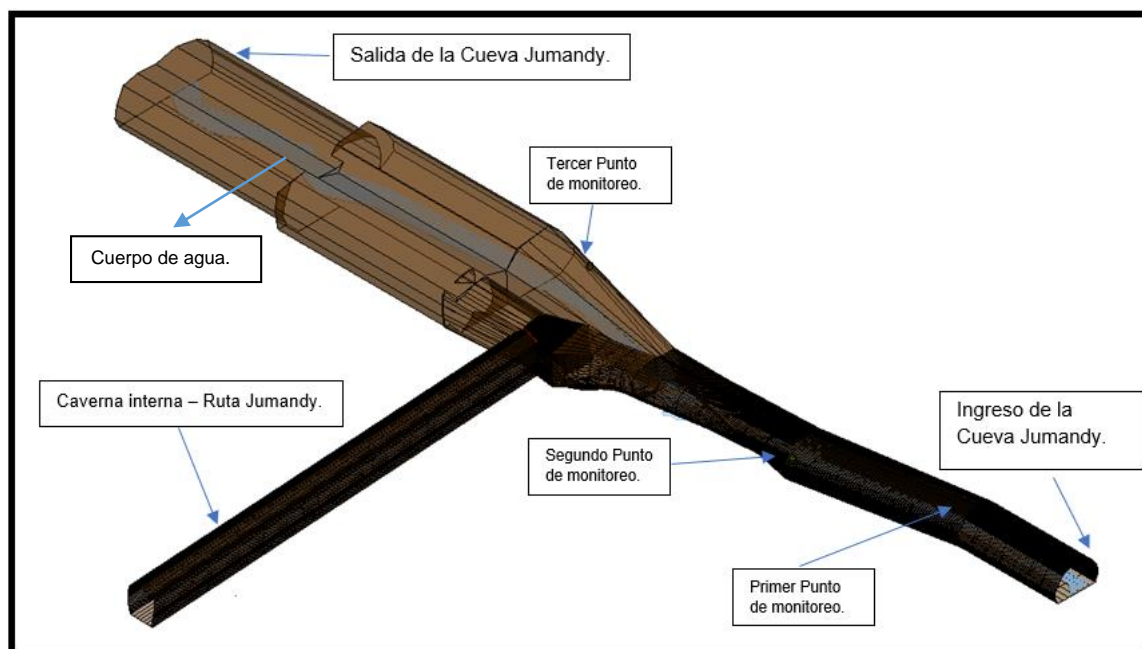
$d$ = factor de conversión de dosis. 1,4 para trabajadores ( $mSv/mJ h/m^3$ ).

$u$  = Constante- factor de unidad de  $5.6 \times 10^{-6} [(mJ/m^3)/Bq/m^3]$ .

(Papachristodoulou, 2004, pp 622).

### 3.10. Dimensionamiento del área de estudio

Para realizar el dimensionamiento del área de estudio se calculó, con la ayuda de un flexómetro, la distancia interna de la caverna tomando como punto de partida el ingreso y como punto final, la salida de la misma. Para la determinación de la altura de la caverna, se utilizó una escalera para medir desde el tope del techo hasta el tope del piso. De igual manera para determinar el ancho de la caverna se midió horizontalmente a la altura del pecho desde el extremo izquierdo hasta el extremo derecho. La toma de medidas representa una estimación del dimensionamiento de la caverna, ya que, al referirse de una formación natural, las dimensiones y estructura varían. La caverna tiene una longitud aproximada de 1300 metros, sin embargo, el área de interés fue delimitada por la distancia hasta donde llega la mayor parte de turistas, esta distancia representa los primeros 300 metros de la cueva. Las dimensiones de la cueva hasta este punto varían desde los 4 a 5 metros de ancho y con una altura de 6 a 7 metros.



*Figura 14.* Forma y puntos de interés dentro de la cueva Jumandy en Archidona-Ecuador.



### **3.11. Factores de Influencia**

Las condiciones de medición fueron catalogadas dentro de la vigilancia radiológica como mediciones en Condiciones Ambientales Extremas y por este motivo, se tuvieron que seguir parámetros para que la medición de radón sea segura, tanto en procedimiento como en resultados.

Fue importante realizar una caracterización física del área en donde se ejecutaran los estudios, ya que la presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa son características físicas que están presentes y deben ser tomadas en cuenta, dada su influencia en el correcto funcionamiento de la instrumentación para realizar las mediciones y la concentración del radón. Sin embargo, parámetros como la hora en que se realizó la medición, estación climática del año, duración del monitoreo y si el monitoreo se lo realizó durante el día o la noche, son factores que influirán en la correcta toma de muestra. La caracterización geológica del lugar de estudio es fundamental para determinar si la zona es idónea para la toma de muestras, ya que el Uranio es un elemento químico que tiene afinidad a un grupo determinado de estratos, minerales o rocas (ver mapa de uranio del país, Figura 10).

#### **3.11.1. Ruta y tiempos de recorrido guiado**

Los recorridos guiados se realizan en grupos de 3 a 10 personas. Cada recorrido tiene una duración de 1 hora aproximadamente para completar los 1300 metros de la caverna. El ingreso es en dirección hacia el este y la salida hacia el norte. Durante el recorrido, el guía encargado detiene al grupo en 3 puntos dentro de la cueva. En cada punto el guía realiza una explicación sobre temas referentes a la geología del lugar, flora, fauna, riesgos, así como datos históricos.

Tabla 5.

*Periodos de recorrido.*

Explicación	Tiempo (minutos)
Primera	5 minutos
Segunda	3 minutos
Tercera	10 minutos

Nota: Tiempo de duración de las explicaciones dentro de la caverna.



Figura 15. Ingreso a las cavernas Jumandy (Archidona-Ecuador).

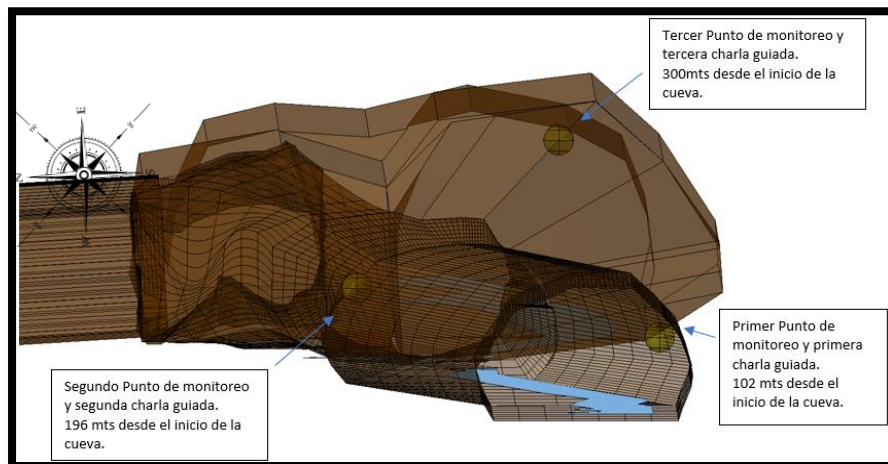


Figura 16. Ingreso y ubicación de puntos de monitoreo.

### 3.12. Puntos de monitoreo

#### 3.12.1. Primer punto de monitoreo

El primer punto en donde se realizaron las mediciones de concentración de  $Rn^{222}$  se ubicó después de los primeros 102 m de inicio de la caverna con una altura de 670 msnm. El equipo fue colocado a una altura de 2,65 m, se ubicó a 60 cm alejado del techo y a 65 cm alejado de la pared.

En este primer punto fue necesario subir un pequeño borde natural para colocar el equipo tomando en cuenta que no esté en contacto con el agua o sea de fácil alcance para la manipulación de los turistas. El punto fue encontrado de interés ya que en este lugar se realiza la primera explicación sobre lo que será el recorrido guiado.



*Figura 17.* Ubicación del equipo en el primer punto de muestreo.

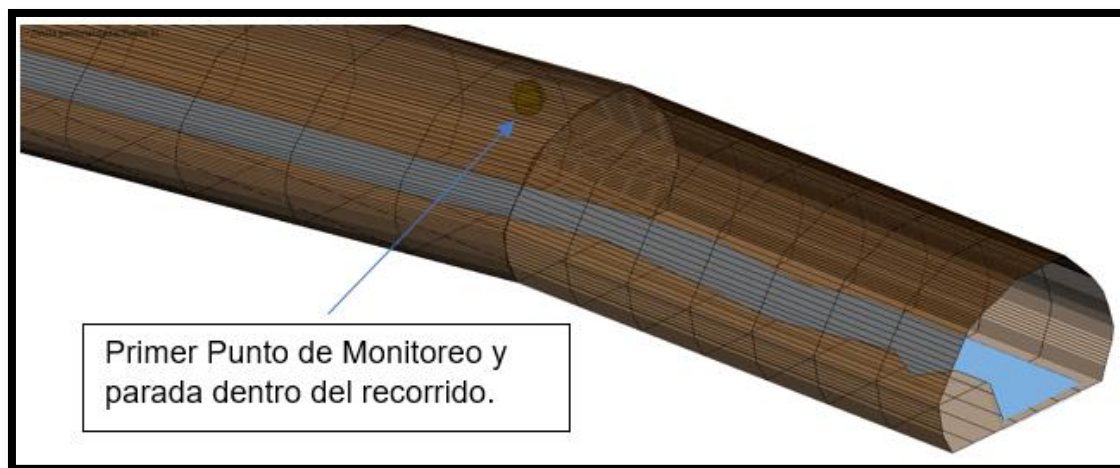


Figura 18. Ubicación del primer punto de monitoreo.

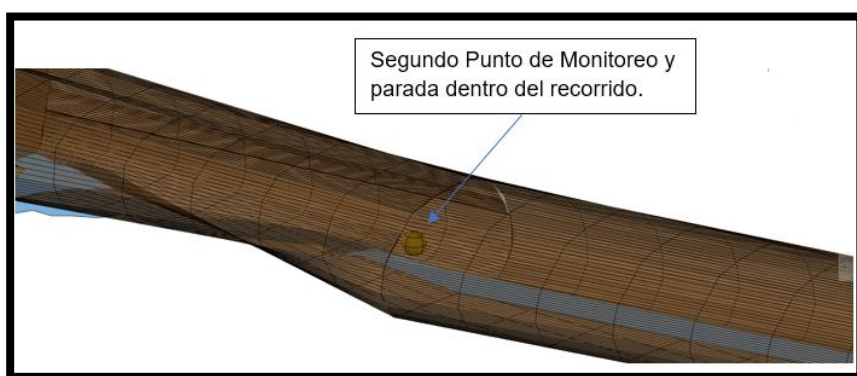
### 3.12.2. Segundo punto de monitoreo

El segundo punto en donde se realizaron los monitoreos de concentración de  $Rn^{222}$  se ubicó a 196 m desde la entrada de la caverna y a 94 m de distancia desde el primer punto de monitoreo en una elevación de 671 msnm.

Este punto se encuentra en una curva en donde fue necesario cruzar el río interno que pasa por la mitad de la caverna y con la ayuda de una escalera, el equipo fue colocado a una altura de 3,10 m ubicándolo a 70 cm alejado del techo y 65cm alejado de la pared. Se ubicó de tal manera que no se pueda mojar y que no sea accesible fácilmente para la manipulación de los turistas, como se mencionó en el primer punto. El punto fue encontrado de interés ya que es la segunda parada dentro del tour para explicaciones turísticas referentes antes de cruzar una cascada interna.



*Figura 19.* Segundo punto de monitoreo.



*Figura 20.* Ubicación del segundo punto de monitoreo.

### **3.12.3. Tercer punto de monitoreo**

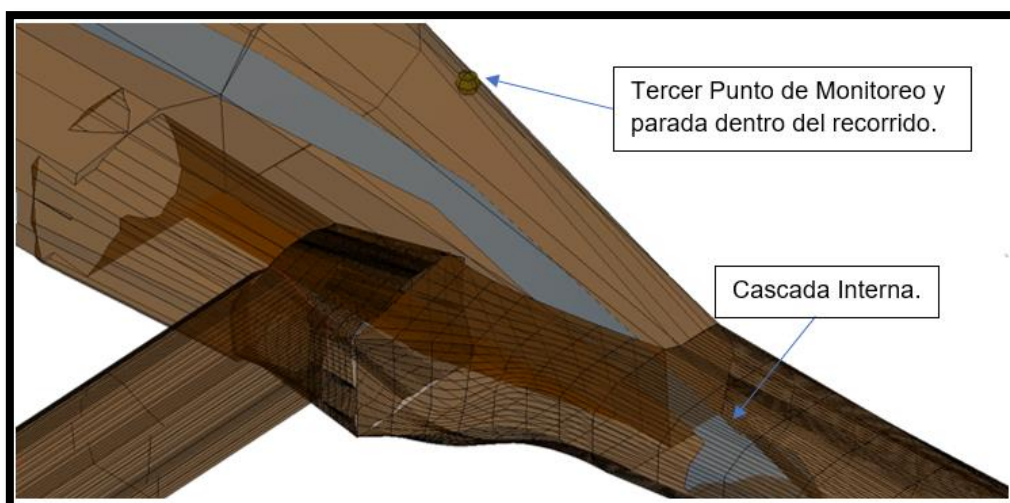
El tercer y último punto de monitoreo de  $Rn^{222}$  se encuentra a 300 m de la entrada a la caverna y a 104 m de distancia desde el segundo punto de monitoreo a una altura de 675 msnm. Para poder llegar a este punto, fue necesario cruzar una laguna interna y pasar una cascada de ubicación próxima a la laguna. El punto de muestreo se encuentra en una elevación interna natural formada por rocas en

donde el equipo fue colocado a 60 cm de altura desde el techo y a 1,4 m desde el suelo. El equipo se ubicó a 45 cm alejado de la pared.

Este punto es considerado el de mayor interés ya que es aquí en donde el recorrido se detiene para que los turistas puedan tomarse fotos y el guía imparta la explicación más larga.



*Figura 21.* Tercer punto de monitoreo.



*Figura 22.* Ubicación del tercer punto de monitoreo.

### **3.13. Análisis de puntos críticos**

Los puntos críticos fueron determinados según la concentración del radón en los puntos de muestreo y estos nos informan sobre la peligrosidad de una exposición prolongada al radón. Los puntos críticos nos permitieron determinar que dosis es la que más afectaciones puede causar a los turistas y guías según la concentración encontrada en un determinado periodo de tiempo. Una vez determinados los puntos críticos dentro de la caverna en Archidona, se calculó los periodos máximos de exposición cumpliendo así con las medidas de seguridad radiológicas y evitando posibles afectaciones a las personas que visitan y trabajan en las cavernas.

### **3.14. Correlación de datos**

Dentro de la metodología experimental, se aplicaron modelos que permitieron la correlación de datos obtenidos durante las mediciones. Es importante señalar que el fin no es encontrar una casualidad, sino determinar en qué grado existe una relación o algún tipo de dependencia entre las variables que se van a estudiar para de esta manera aplicar una regresión estadística y poder entender mejor la influencia de las variables sobre la concentración del radón.

Los datos obtenidos fueron procesados en un entorno de desarrollo integrado con la ayuda del software Rstudio para determinar la existencia de los diferentes tipos de correlación ya sea positiva, negativa, lineal, no lineal o simplemente que no existe. Los comandos utilizados se descargaron previamente en el software y corresponden a los conocidos como "Psych" en los que con la ayuda de la función "*Pairs Panels*" se pudo crear histogramas en los que se notaron la distribución de variables y coeficientes de correlación.



### 3.15. Caracterización mineralógica

Fue importante realizar una caracterización mineralógica para poder determinar qué tipo de minerales se encuentran dentro de la cueva ya que según IAEA (2003, p.19), los materiales radiactivos de origen natural, estarán presentes en mayor o menor cantidad dependiendo del tipo de roca.

Para realizar el reconocimiento mineralógico de las muestras tomadas en la caverna Jumandy, se procedió a raspar cada muestra con un rayador de carbonato de tungsteno para después con la ayuda de un imán y una lupa observar sus propiedades (Serrano, 2009, p.32). Posteriormente se aplicó ácido clorhídrico al 10% para verificar presencia de arenas en las muestras, tomando en cuenta que estas ya debían estar rayadas o pulverizadas como lo menciona Carretero y Pozo (2007, p.78).



*Figura 23.* Materiales y reactivos utilizados para la caracterización mineralógica.



## 4. Capítulo IV. Resultados y Análisis

### 4.1. Diagrama de resultados y análisis

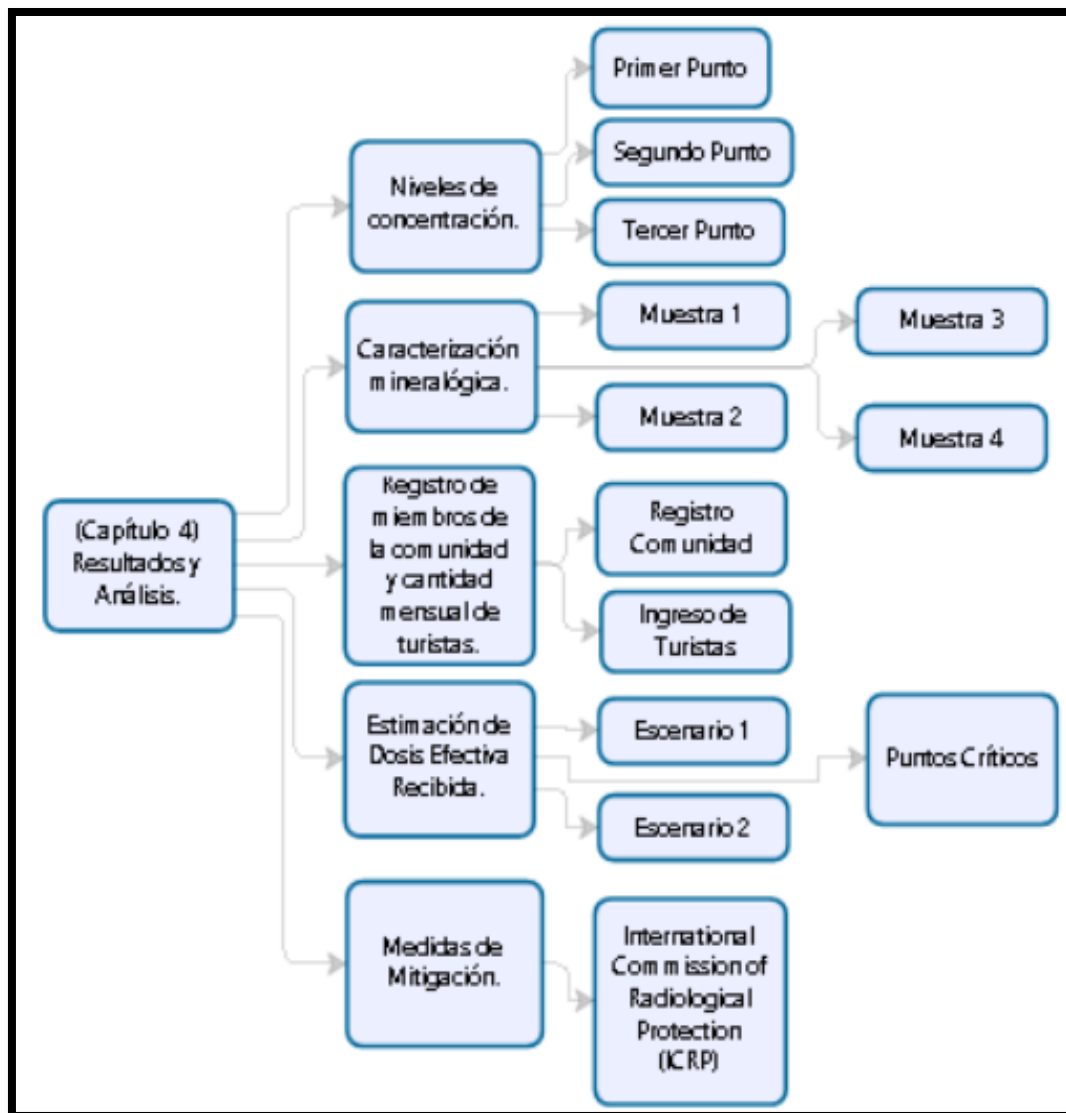


Figura 24. Resumen del Capítulo 4 - Resultados y Análisis.

## 4.2. Niveles de concentración

### 4.2.1. Primer punto de monitoreo - monitoreo diario

Tabla 6.

*Fechas y parámetros medidos en el primer punto.*

Primer Punto de Monitoreo					
Fecha	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (hPa)	Velocidad del Viento (m/s)
18/7/2017	1236	23.4	84.0	933.00	0.30
19/7/2017	1395	24.0	85.0	937.00	0.32
26/8/2017	476	24.2	83.4	939.03	0.03
27/8/2017	421	25.9	84.4	941.00	0.46
28/9/2017	1719	27.3	74.6	939.62	0.19
29/9/2017	1662	26.3	76.1	941.23	0.19
26/10/2017	2025	25.8	76.6	937.00	0.38
27/10/2017	2116	30.1	63.1	938.00	0.77

Nota: Se puede evidenciar la información obtenida de los parámetros que se tomaron en cuenta para los monitoreos dentro de la caverna en el primer punto de medición. Estas se realizaron desde el mes de julio hasta el mes de octubre en donde se obtuvieron 8 datos de cada parámetro. Es importante señalar que las mediciones fueron desarrolladas en 2 estaciones climáticas (invierno-verano) como recomienda INAC (2007, p.404). Se tomó en cuenta a la presión, temperatura y velocidad del viento como lo hizo Jovanovic (1996, pp. 11-29), sin embargo la humedad relativa fue tomada en cuenta como lo hizo RPD (2006, pp.117-12).

Los valores mínimos, máximos y medios obtenidos durante todas las mediciones en el primer punto de monitoreo fueron resumidos en la Tabla 6. El valor mínimo de concentración de Rn<sup>222</sup> fue de 412 Bq/m<sup>3</sup> en el mes de agosto. El máximo fue de 2116 Bq/m<sup>3</sup> en el mes de octubre y se obtuvo una media de 1381.25 Bq/m<sup>3</sup>. En este primer punto de monitoreo se encuentran los valores mínimos, así como media más elevados de los 3 puntos en donde los monitoreos fueron realizados durante 4 meses.

Tabla 7.

Valores máximos, mínimos y promedios de las mediciones en el primer punto.

Parámetro	Rn <sup>222</sup> (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (hPa)	Velocidad- Viento (m/s)
<b>Valor Mínimo</b>	421	23.4	63.1	933	0.03
<b>Media</b>	1381.25	25.8	78.4	938.2	0.33
<b>Valor Máximo</b>	2116	30.1	85	941.2	0.77

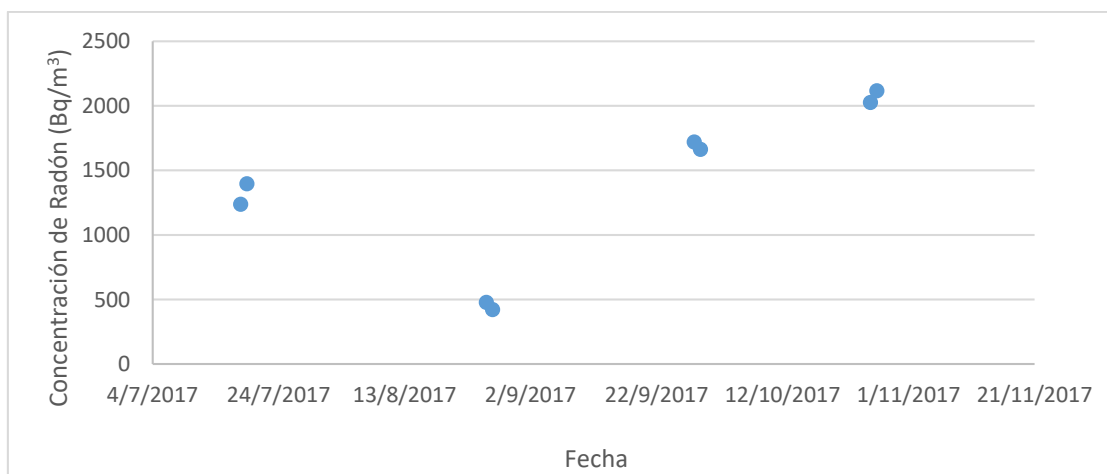


Figura 25. Concentración de Rn<sup>222</sup> en el primer punto de monitoreo durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

En la Figura 25, se puede observar como los niveles de Rn<sup>222</sup> empiezan a disminuir después del mes de julio en donde se encontraban valores de 1236 y 1395 Bq/m<sup>3</sup> al mes de agosto, con valores de 421 y 476 Bq/m<sup>3</sup>. Se determinó un incremento de los niveles de concentración en el mes de septiembre 1719 y 1662 Bq/m<sup>3</sup> y finalmente se encontraron los niveles máximos en el mes de octubre 2025 y 2116 Bq/m<sup>3</sup>. Esto puede ser debido al incremento en la precipitación como se puede ver en la Figura 12 (Capítulo 3.6).

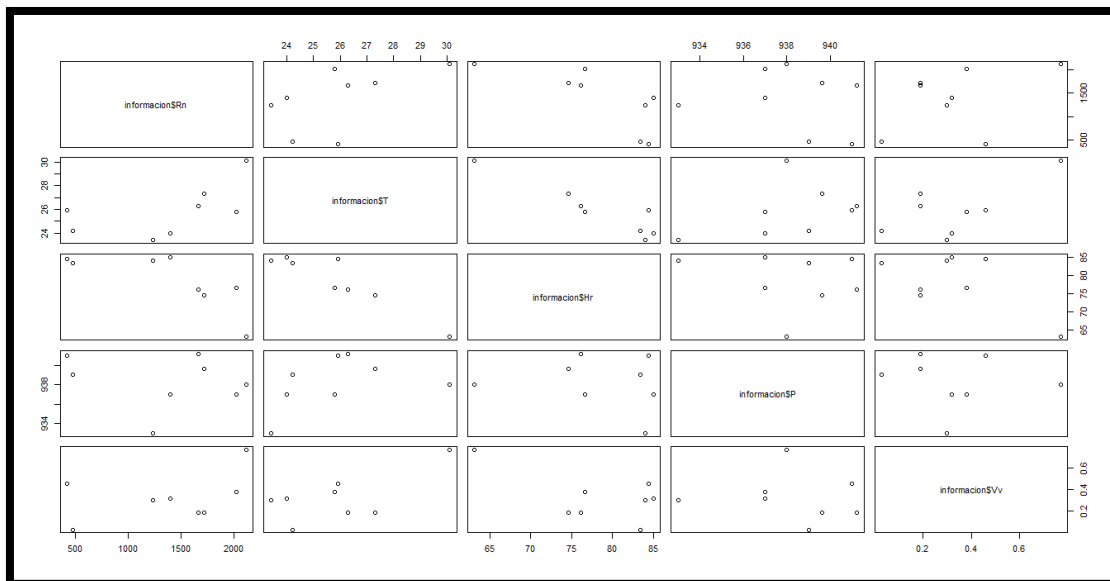


Figura 26. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  con temperatura, humedad relativa, presión y velocidad del viento en el primer punto de monitoreo.

Después de analizar la información obtenida durante todas las mediciones realizadas en el primer punto de monitoreo y como se puede observar en la Figura 27, encontramos que existen dos correlaciones positivas entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura, así como la velocidad del viento.

La concentración de  $Rn^{222}$  tiene una correlación positiva de 0.56 con la temperatura y de 0,42 con la velocidad del viento (Figuras 28 y 31).

Los parámetros como humedad relativa y presión presentaron una correlación negativa de -0.75 y -0.19, respectivamente (Figuras 29 y 30). La correlación entre la concentración de radón y la temperatura es positiva así como con la velocidad del viento y esto podría ser el resultado de la ubicación de este punto ya que está situado al final de la ruta en la que el viento sigue su dirección. Es importante señalar que las elevadas concentraciones pueden ser resultado de una acumulación producida por el transporte y el área, misma que en este punto se reduce.

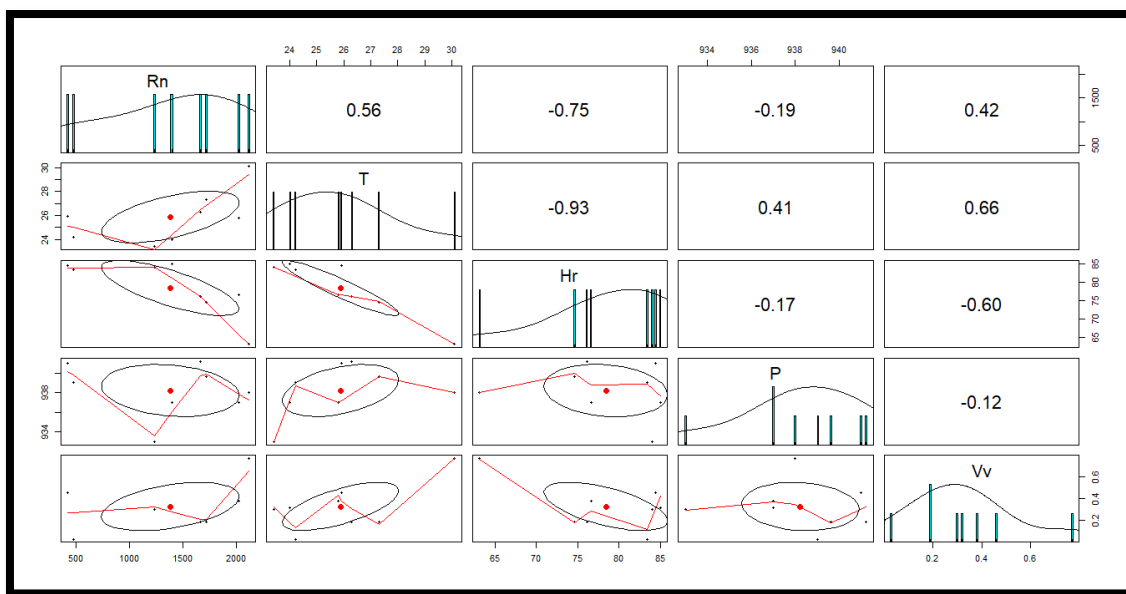


Figura 27. Correlación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y parámetros físicos en el primer punto de monitoreo.

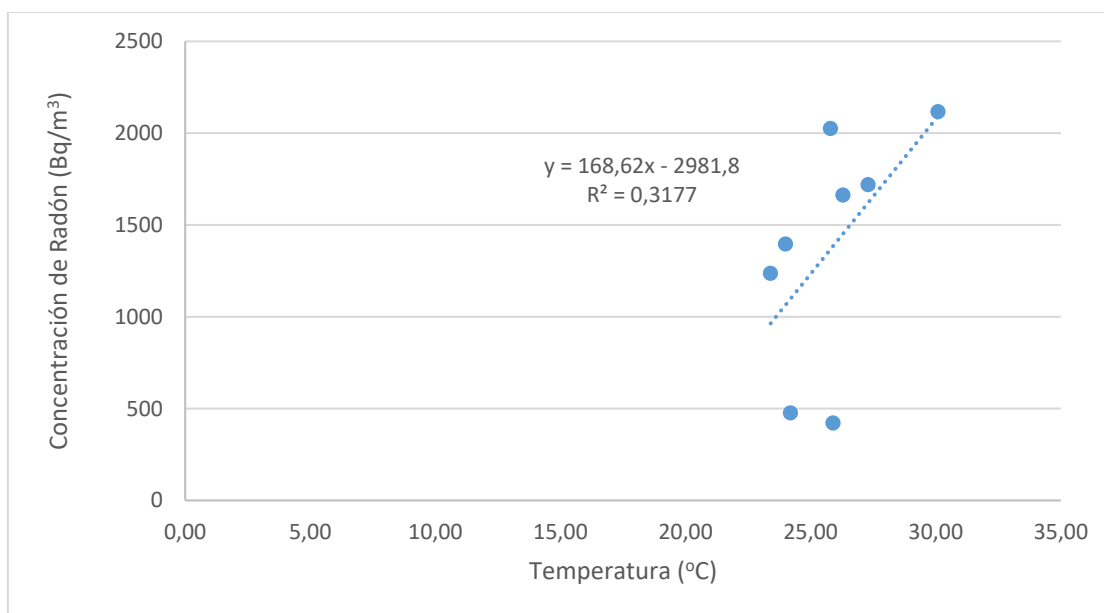
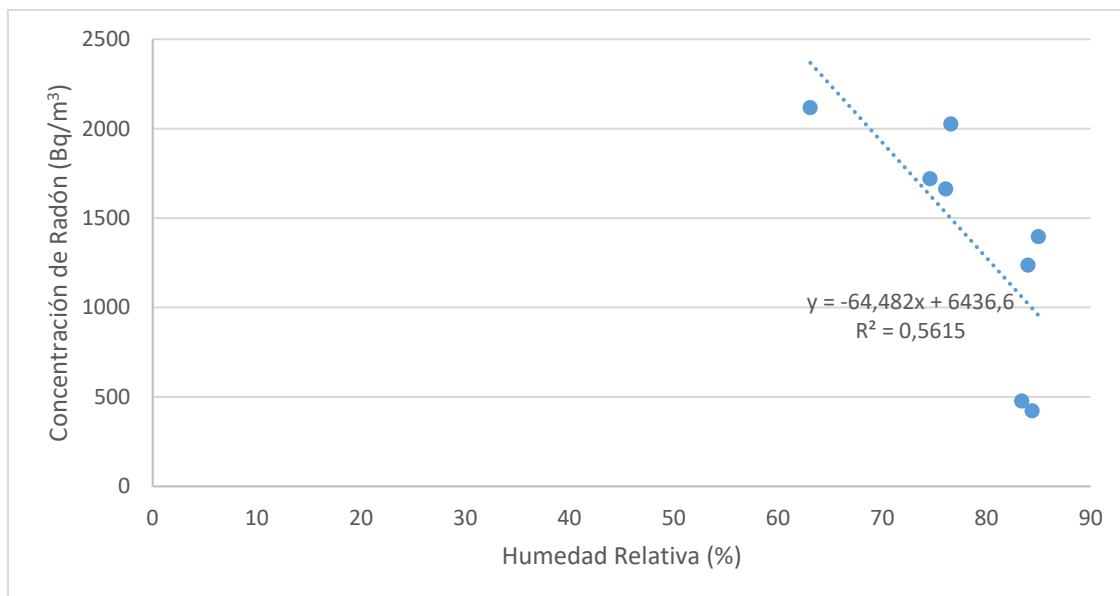
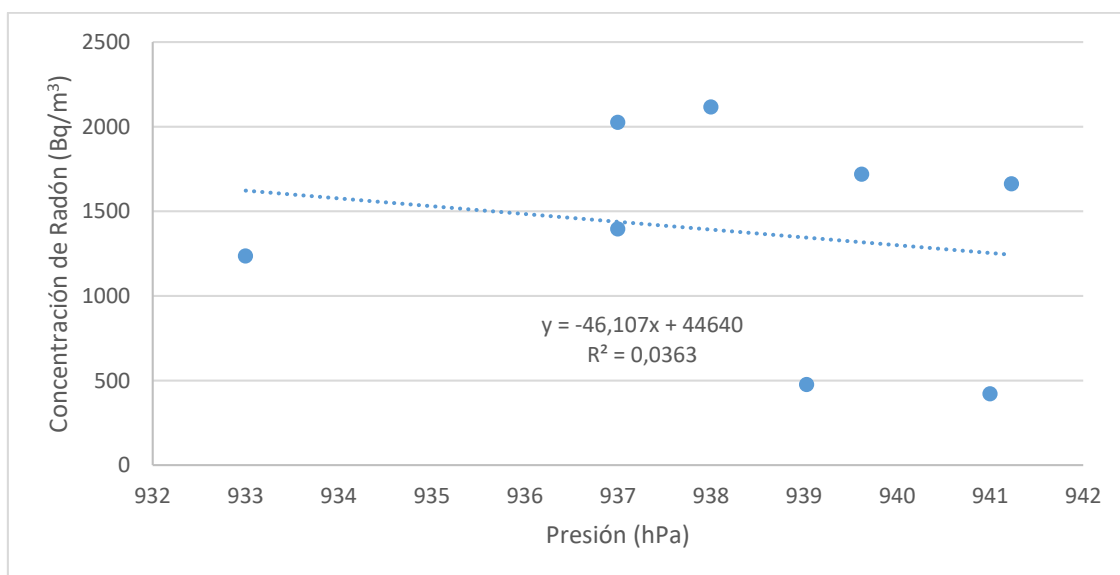


Figura 28. Relación entre los niveles de concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en el primer punto de monitoreo.



*Figura 29.* Relación entre los niveles de concentración de radón y la humedad relativa en el primer punto de monitoreo.



*Figura 30.* Relación entre los niveles de concentración de radón y la presión atmosférica en el primer punto de monitoreo.

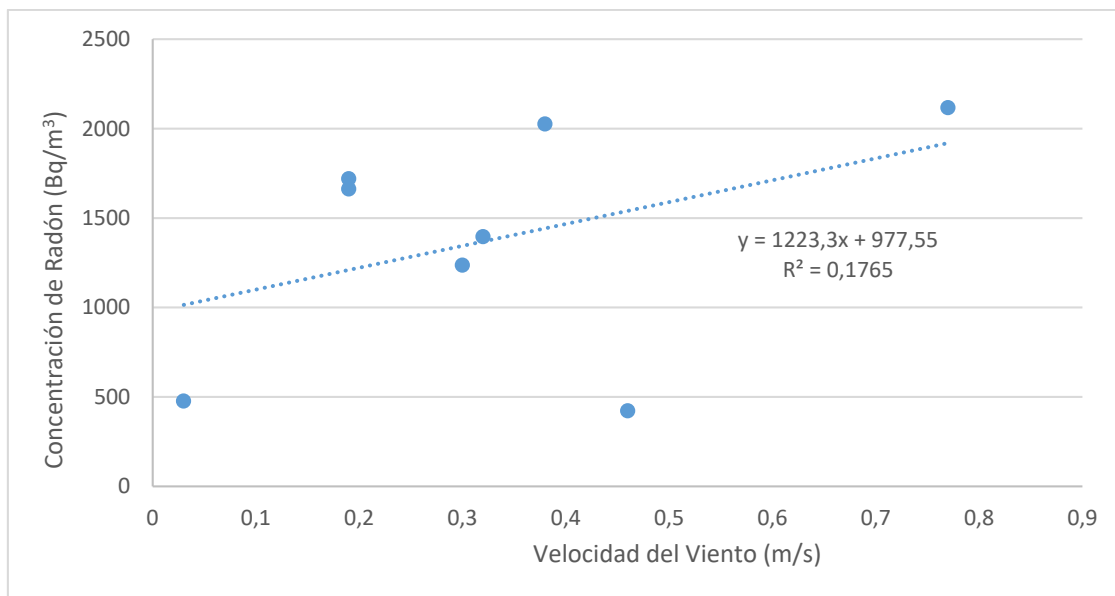


Figura 31. Relación entre los niveles de concentración de radón y la velocidad del viento en el primer punto de monitoreo.

#### 4.2.2. Segundo punto de monitoreo – monitoreo diario

Tabla 8.

Fechas y parámetros medidos en el segundo punto.

Segundo Punto de Monitoreo					
Fecha	Concentración de Radón (Bq/m3)	Temperatura °C	Humedad Relativa %	Presión hPa	Velocidad del Viento (m/s)
19/7/2017	156	23.5	79.8	938.00	0.40
20/7/2017	167	24.0	83.5	940.20	0.43
27/8/2017	637	26.2	82.1	943.34	0.35
28/8/2017	703	26.2	77.2	941.00	0.51
29/9/2017	1380	26.7	78.2	934.88	0.22
30/9/2017	1388	23.1	85.3	935.00	0.64
27/10/2017	3789	24.2	86.6	937.00	0.33
28/10/2017	1144	23.9	86.7	938.00	0.08

Nota:

Como se observa en la Tabla 8, los parámetros fueron medidos en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre para poder considerar dos estaciones climáticas (invierno y verano). Si bien en este punto no se encontró la mayor concentración de  $Rn^{222}$  en comparación con los otros 2 puntos, los niveles máximos obtenidos representan un riesgo no solo para los guías sino también

para las personas que realizan la investigación ya que de todas formas exceden los límites máximos permisibles (Oana y Bodgan, 2015, pp.153-161).

Los valores mínimos, máximo y medios fueron obtenidos durante todas las mediciones en el segundo punto de monitoreo y resumidos en la Tabla. El valor mínimo de concentración de  $Rn^{222}$  fue de  $156 \text{ Bq/m}^3$  en el mes de julio. El máximo fue de  $3789 \text{ Bq/m}^3$  en el mes de octubre y se obtuvo una media de  $1170.0 \text{ Bq/m}^3$ .

Se encontró que los valores mínimos así como el valor medio de concentración de  $Rn^{222}$  en este punto, representan los valores más bajos de todas las mediciones. Se puede observar que en este punto, la concentración máxima de  $Rn^{222}$  es después de la encontrada en el tercer punto, la más elevada de todas las mediciones realizadas durante los 4 meses.

Tabla 9. *Valores máximos, mínimos y promedios de las mediciones en el segundo punto.*

<b>Parámetro</b>	<b><math>Rn^{222}</math> (<math>\text{Bq/m}^3</math>)</b>	<b>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>	<b>Presión (hPa)</b>	<b>Velocidad- Viento (m/s)</b>
<b>Valor Mínimo</b>	156	23.10	77.2	934.9	0.08
<b>Media</b>	1170.5	24.73	82.42	938.4	0.37
<b>Valor Máximo</b>	3789	26.7	86.7	943.3	0.64

En la Figura 32 se puede observar como los niveles de concentración de radón en el segundo punto de monitoreo, mantienen un incremento en sus valores desde el mes de julio hasta el mes de septiembre con concentraciones de  $156\text{-}167 \text{ Bq/m}^3$ ,  $637\text{-}703 \text{ Bq/m}^3$  y  $1380\text{-}1388 \text{ Bq/m}^3$  respectivamente, sin embargo en el mes de octubre existe un incremento considerable en los niveles de concentración de  $3789 \text{ Bq/m}^3$ , mismo que disminuirá posteriormente a  $1144 \text{ Bq/m}^3$ . Como se puede apreciar en el primer punto, octubre es el mes en donde



la concentración alcanza sus más altos valores y esto podría ser por el aumento en la precipitación.

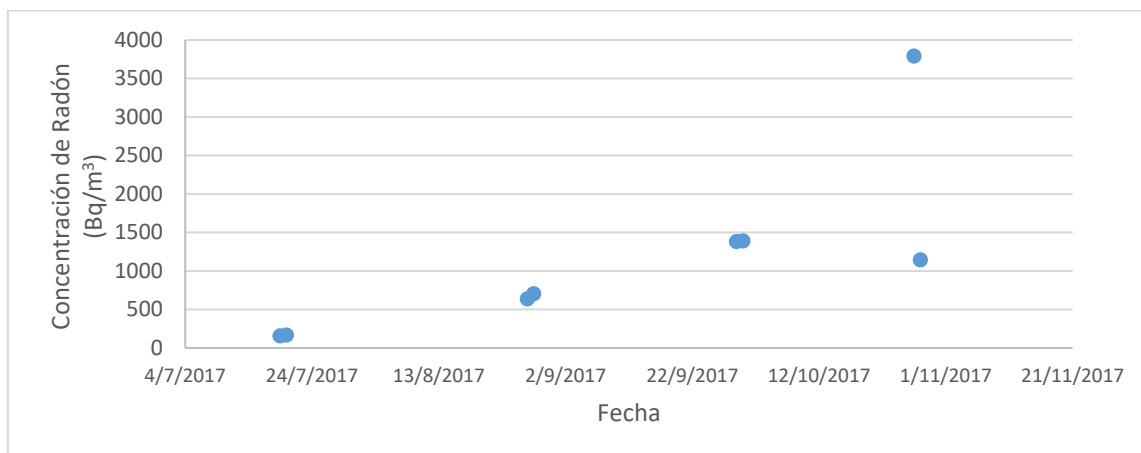


Figura 32. Concentración de  $Rn^{222}$  en el segundo punto de monitoreo durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

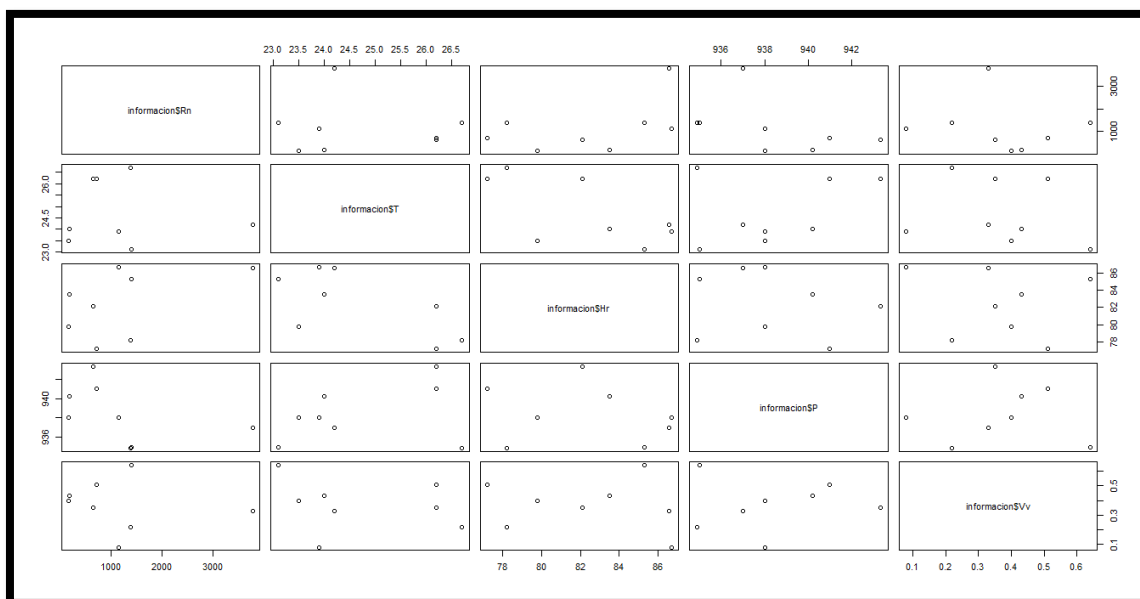


Figura 33. Relación entre concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en el segundo punto de monitoreo.

Después analizar la información obtenida durante todas las mediciones realizadas en el segundo punto de monitoreo, encontramos que existe una correlación positiva de 0.49 entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa.

Los parámetros como temperatura, presión y velocidad del viento presentaron una relación negativa con los niveles de concentración de  $Rn^{222}$ , la correlación encontrada fue de -0.07, -0.43 y -0.15, respectivamente.

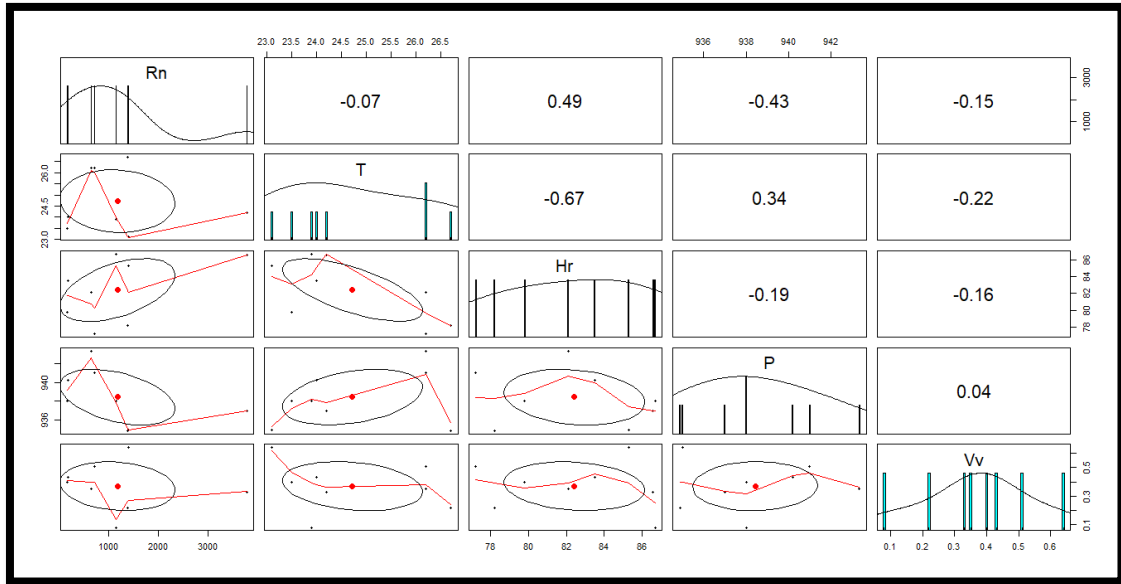


Figura 34. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura, humedad relativa, presión y velocidad del viento en el segundo punto de monitoreo.

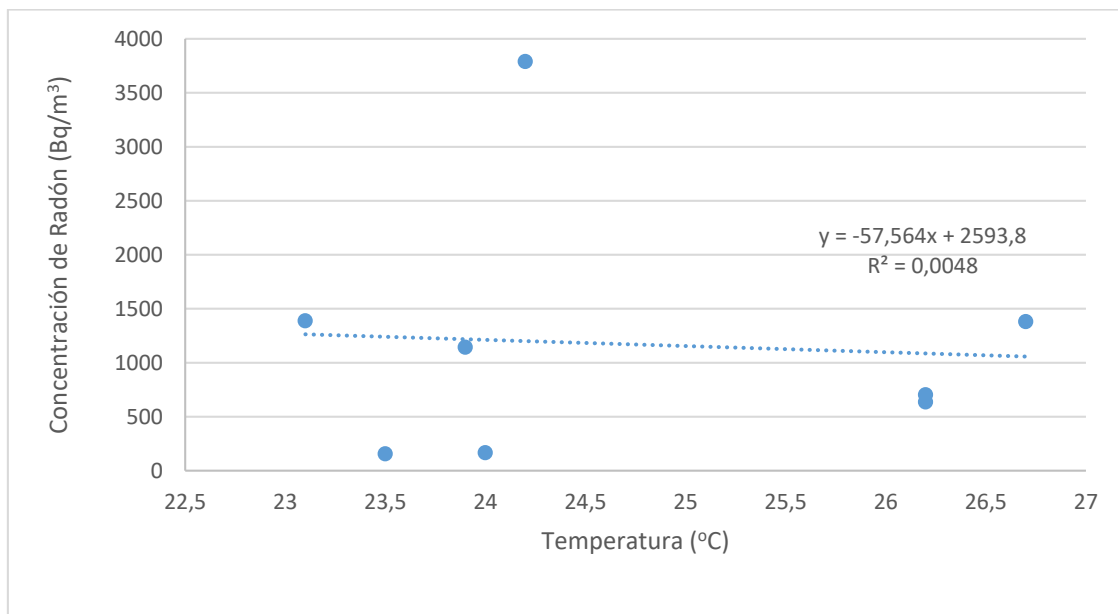
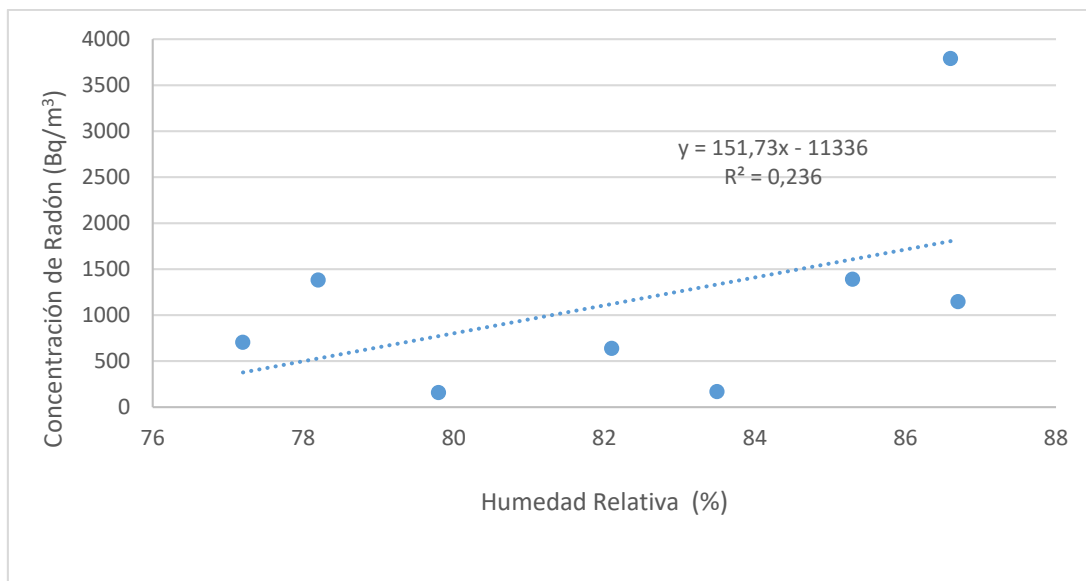
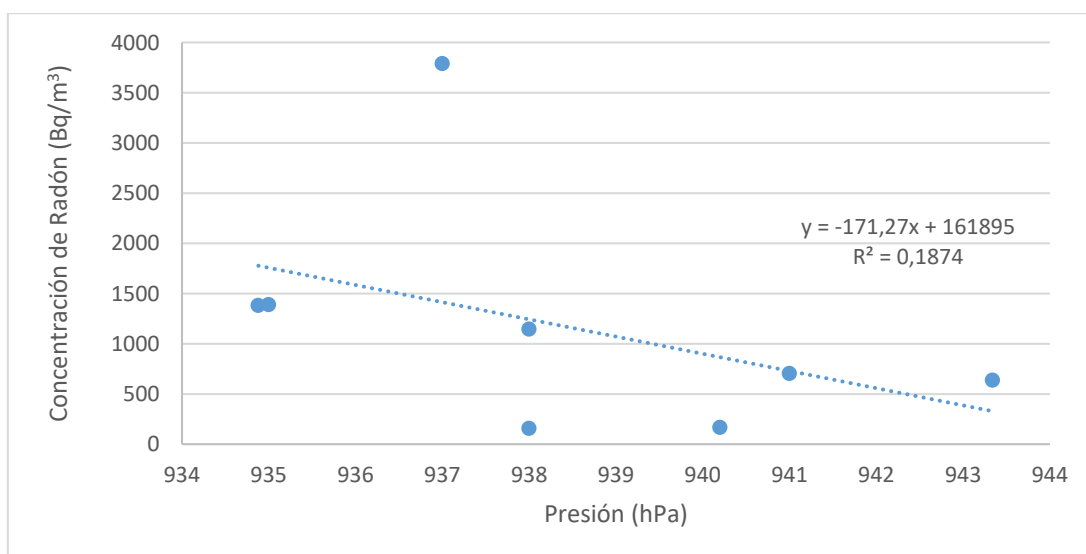


Figura 35. Relación entre los niveles de concentración de radón y temperatura en el segundo punto de monitoreo.



*Figura 36.* Relación entre los niveles de concentración de radón y humedad relativa en el segundo punto de monitoreo.



*Figura 37.* Relación entre los niveles de concentración de radón y presión en el segundo punto de monitoreo.

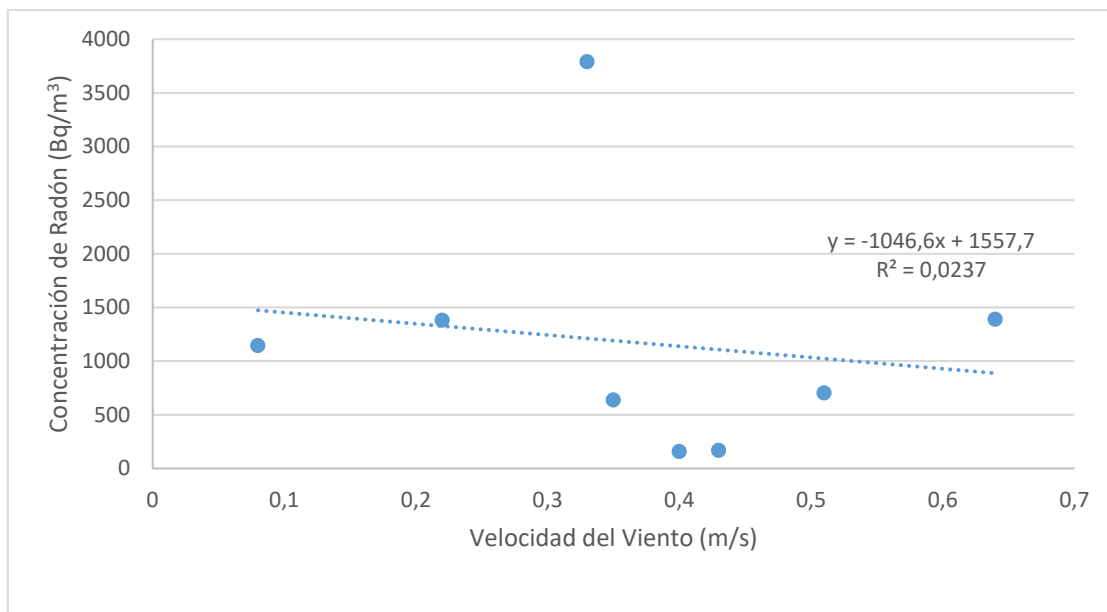


Figura 38. Relación entre los niveles de concentración de radón y la velocidad del viento en el tercer punto de monitoreo.

#### 4.2.3. Tercer punto de monitoreo – monitoreo diario

Tabla 10.

*Fechas y parámetros medidos en el tercer punto.*

Tercer Punto de Monitoreo					
Fecha	Concentración de Radón (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura °C	Humedad Relativa %	Presión hPa	Velocidad del Viento (m/s)
20/7/2017	174	24.0	83.5	938.00	0.43
21/7/2017	167	30.3	71.6	937.00	0.54
28/8/2017	811	24.5	84.0	943.30	0.63
29/8/2017	761	27.9	68.6	942.00	0.96
30/9/2017	777	26.6	78.0	930.95	0.48
1/10/2017	803	26.8	79.0	933.40	0.22
28/10/2017	4100	24.2	86.6	942.00	0.33
29/10/2017	3087	22.0	85.6	941.00	0.28

Nota: Se puede observar en la Tabla 10 los datos obtenidos de las mediciones realizadas en el tercer punto de monitoreo durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre. Las concentraciones de  $Rn^{222}$  son elevadas y sobrepasan los límites máximos permisibles como en la investigación realizada por Ruano, Naranjo y Pérez (2015, pp.1-5).

Tabla 11.

*Valores máximos, mínimos y promedios de las mediciones en el tercer punto.*

<b>Parámetro</b>	<b><math>Rn^{222}</math> (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>	<b>Presión (hPa)</b>	<b>Velocidad- Viento (m/s)</b>
<b>Valor Mínimo</b>	167	22	68.6	931	0.22
<b>Media</b>	1335	25.79	79.61	938.5	0.48
<b>Valor Máximo</b>	4100	30.30	86.6	943.3	0.96

Los valores mínimos, máximo y promedios fueron obtenidos durante todas las mediciones en el tercer punto y resumidos en Tabla 11. El valor mínimo de concentración de  $Rn^{222}$  fue de 167 Bq/m<sup>3</sup> en el mes de julio, el máximo fue de 4100 Bq/m<sup>3</sup> en el mes de octubre y se obtuvo una media de todas las mediciones de 1335 Bq/m<sup>3</sup>. Se determinó que en este punto se encuentran los valores máximos de concentración de  $Rn^{222}$  obtenidos durante los 4 meses de medición, sin embargo, el valor de la media obtenida, es superado por 46.25 Bq/m<sup>3</sup> de la media del primer punto de monitoreo (ver Tabla 7).

En la Figura 39, se puede observar que los niveles más altos de concentración de  $Rn^{222}$  son durante el mes de octubre con concentraciones de 4100 y 3087 Bq/m<sup>3</sup> y los niveles más bajos son en el mes de julio con concentraciones de 174 y 167 Bq/m<sup>3</sup>, notándose así un incremento progresivo de los niveles de concentración de radón desde julio a octubre.

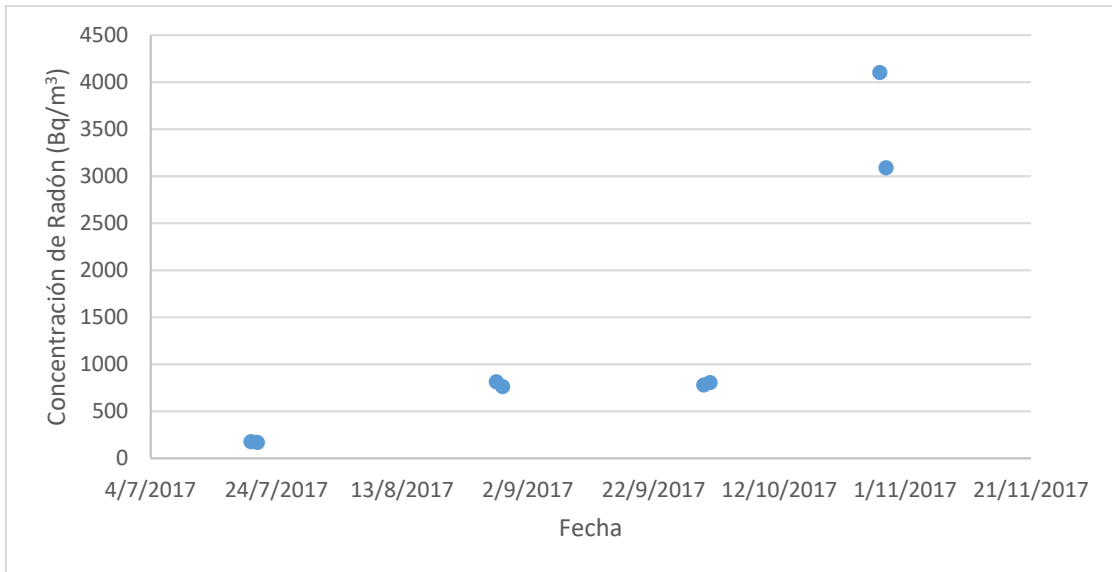


Figura 39. Concentración de  $Rn^{222}$  en el tercer punto de monitoreo durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

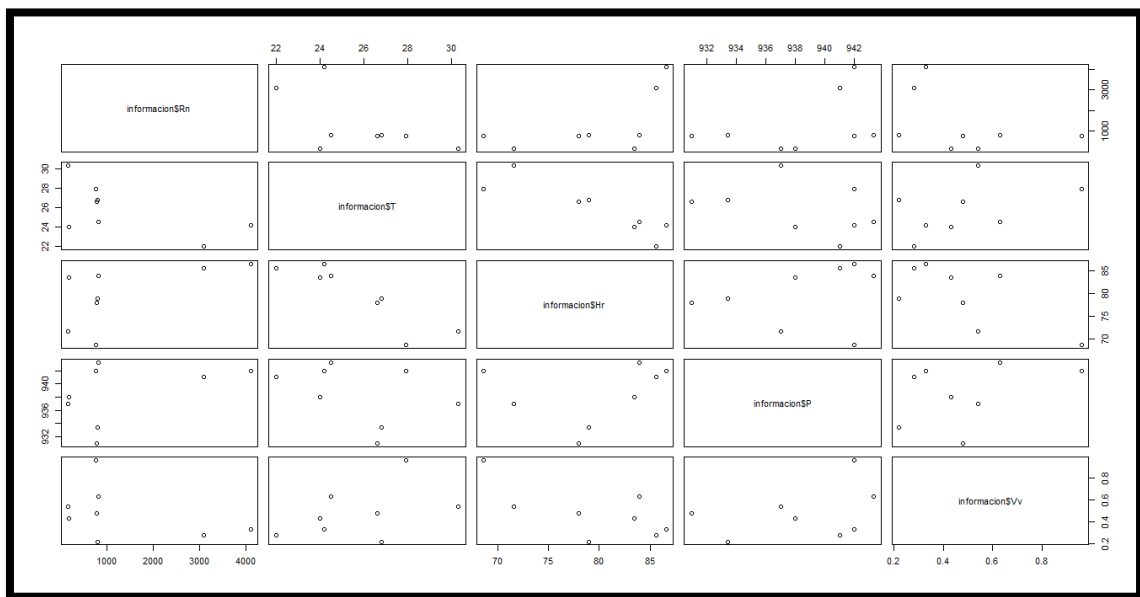


Figura 40. Relación entre los niveles de concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos medidos en el tercer punto de monitoreo.

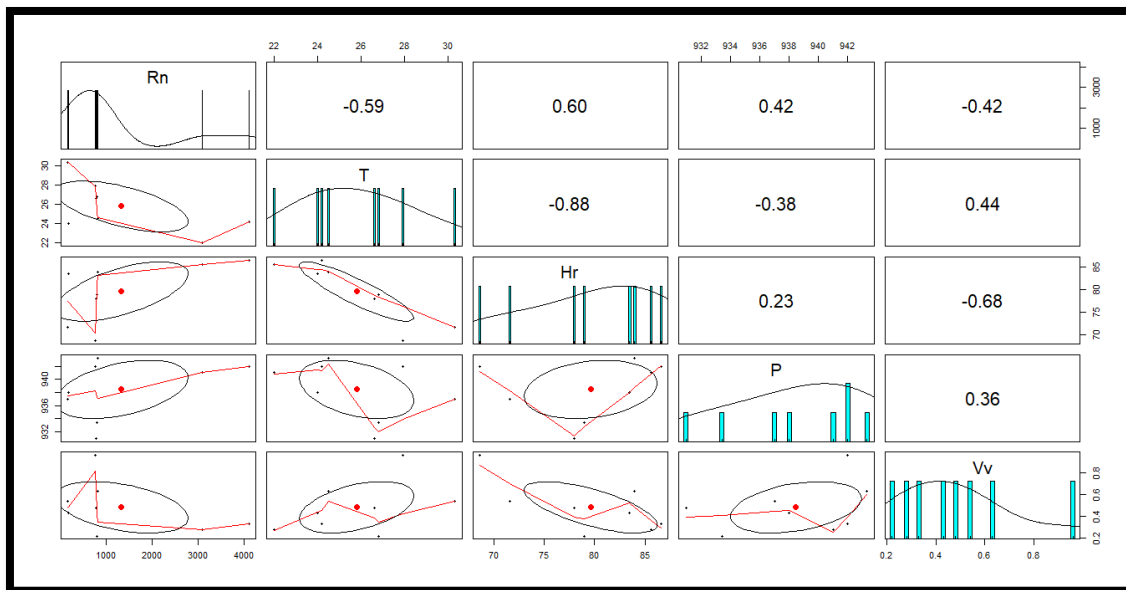
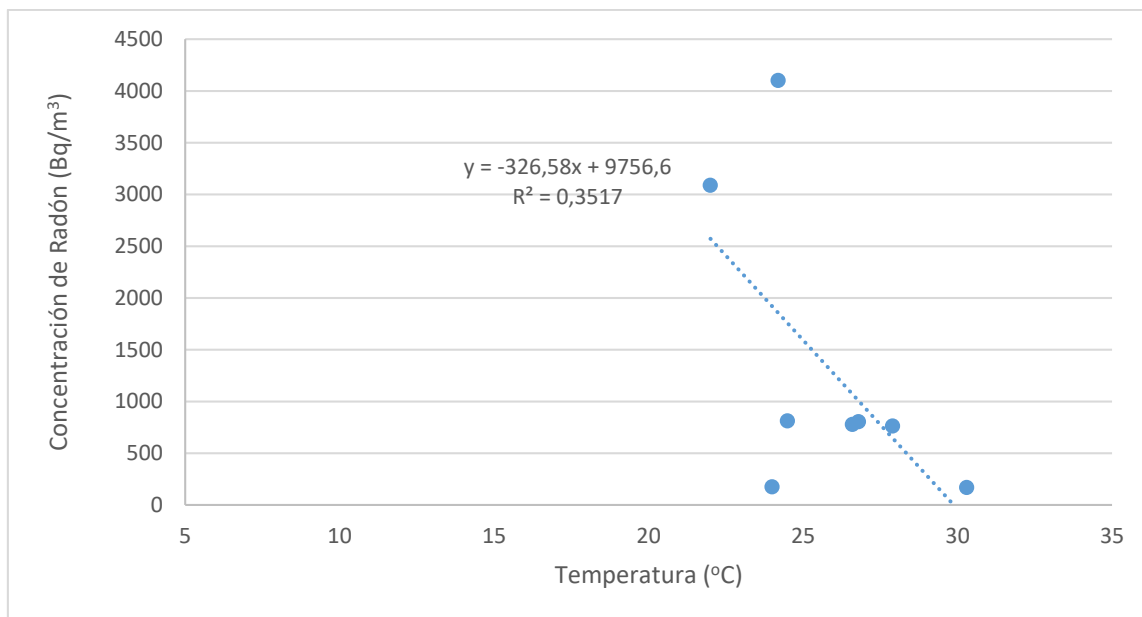


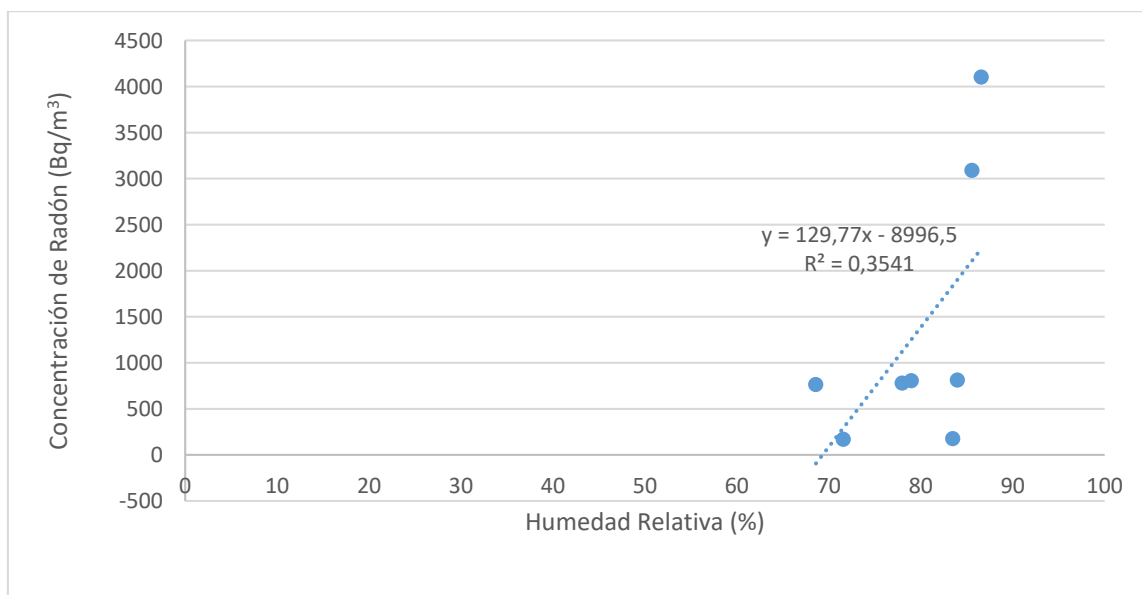
Figura 41. Correlación entre los niveles de concentración de Rn<sup>222</sup> con temperatura, humedad relativa, presión y velocidad del viento.

Después de analizar la información obtenida durante todas las mediciones realizadas en el tercer punto de monitoreo, encontramos que existen dos correlaciones positivas entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la humedad relativa (R=0.6), así como la presión (R=0.42).

Los parámetros como temperatura y velocidad del viento presentaron una correlación negativa de -0.59 y -0.42 respectivamente. Es importante tomar en cuenta el dimensionamiento físico de este punto ya que se encuentra ubicado en un ensanchamiento natural en donde el área al interior de la cueva es mayor.

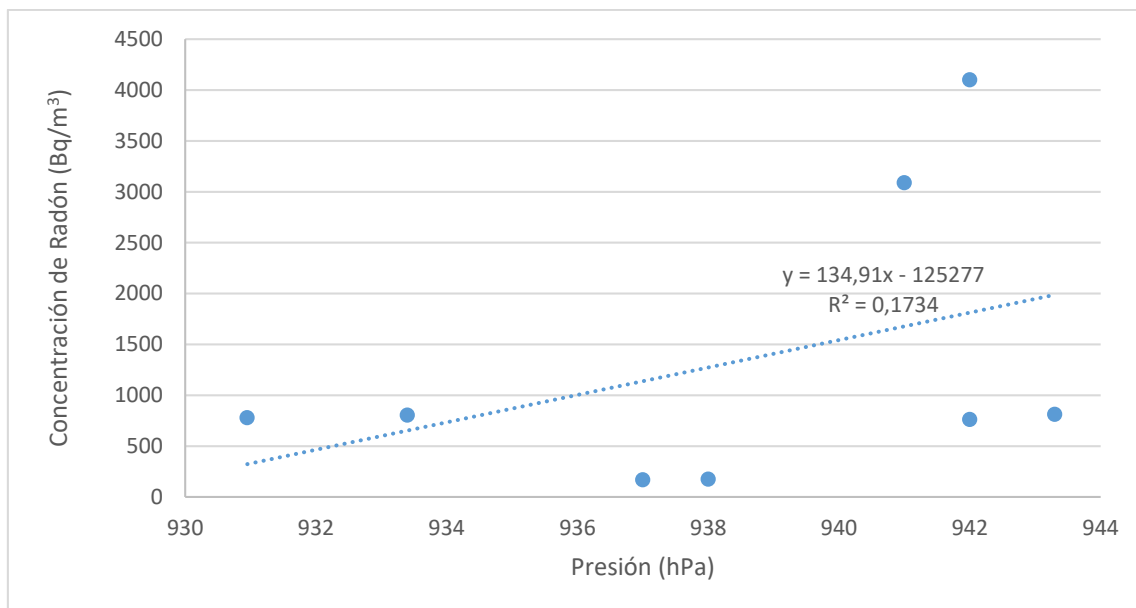


*Figura 42.* Relación entre los niveles de concentración de radón y la temperatura en el tercer punto de monitoreo.

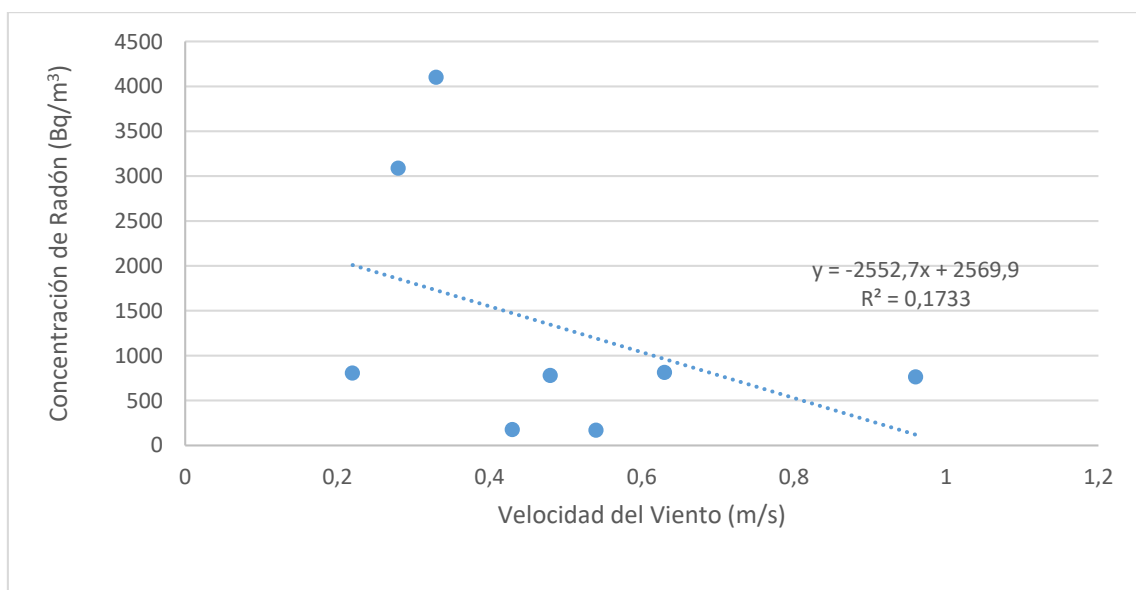


*Figura 43.* Relación entre los niveles de concentración de radón y humedad relativa en el tercer punto de monitoreo.





*Figura 44.* Relación entre la concentración de radón y la presión en el tercer punto de monitoreo.



*Figura 45.* Relación entre la concentración de radón y velocidad del viento en el tercer punto de monitoreo.

#### 4.2.4. Tercer punto de monitoreo con Corentium Pro – monitoreo horario

Tabla 12.

*Fechas y parámetros medidos en el tercer punto utilizando Corentium Pro.*

Tercer Punto de Monitoreo (Corentium Pro)						
Fecha	Hora	Concentración de Radón (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura °C	Humedad Relativa %	Presión hPa	Velocidad del Viento (m/s)
28/10/2017	13:13	1295	26	84	938.95	0.33
28/10/2017	14:13	3137	23	88	944.95	0.70
28/10/2017	15:13	3497	23	88	935.95	0.40
28/10/2017	16:13	2851	24	86	942.95	0.45
28/10/2017	17:13	2120	24	86	950.95	0.50
29/10/2017	11:13	1374	25	84	937.95	0.55
29/10/2017	12:13	3670	23	89	940.95	0.30
29/10/2017	13:13	3311	23	88	937.95	0.33
29/10/2017	14:13	4529	23	87	943.95	0.45
29/10/2017	15:13	3833	23	88	938.95	0.27
29/10/2017	16:13	3691	23	87	935.95	0.29
29/10/2017	17:13	3944	23	88	943.95	0.60
29/10/2017	18:13	3006	24	86	944.95	0.65
29/10/2017	19:13	2895	24	86	936.95	0.42

Nota: Se pueden observar que los valores obtenidos cada hora durante los días de medición utilizando el monitor continuo Corentium Pro, sobrepasan los valores de los otros 3 puntos de monitoreo tanto en valores mínimos, máximos y de medias. Sin embargo, para poder comparar estos valores con los de las otras mediciones es necesario realizar monitoreos con la misma frecuencia de tiempo como lo hace Gallego, Garcia, Fernandez, Cuezva y Sanches (2015, pp.19-29).

Tabla 13.

*Valores máximos, mínimos y promedios de las mediciones en el tercer punto utilizando el monitor Corentium Pro.*

Parámetro	Rn <sup>222</sup> (Bq/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (hPa)	Velocidad-Viento (m/s)
<b>Valor Mínimo</b>	1295	23	84	936	0.27
<b>Media</b>	3082	23.64	86.79	941.1	0.44
<b>Valor Máximo</b>	4529	26	89	951	0.7

Nota: Los valores mínimos, máximo y promedios fueron obtenidos durante todo el periodo de monitoreo en el tercer punto y resumido en la Tabla 12. El valor mínimo de concentración de  $Rn^{222}$  durante todas las horas de monitoreo fue de  $1295 \text{ Bq/m}^3$ , el máximo fue de  $4529 \text{ Bq/m}^3$  y se obtuvo una media de  $3082 \text{ Bq/m}^3$ . En este punto de monitoreo se encontraron los valores más elevados de concentración de  $Rn^{222}$  en comparación con los resultados obtenidos en los otros puntos. La medición fue realizada en el mes de octubre y es considerada como una medición de periodo corto según la ANSI (2015, pp.9-11).

En la Figura 46 podemos observar que no existen cambios significativos en los niveles de concentración de radón durante las horas en las que se realizó el monitoreo, sin embargo el día 28 de octubre a las 13:13 y el 29 de octubre a las 11:13, se encontraron los valores más bajos de concentración con  $1295$  y  $1374 \text{ Bq/m}^3$  respectivamente. Por otro lado, los valores más altos de concentración se encontraron el día 29 de octubre a las 14:13 y 17:13 con valores de  $4529$  y  $3944 \text{ Bq/m}^3$ , respectivamente. Este es el punto en donde se encontró la mayor concentración tanto para valores mínimos, máximos y promedios de  $Rn^{222}$  en comparación con los otros puntos monitoreados. Los resultados obtenidos utilizando el Corentium Pro en el tercer punto son similares a los obtenidos utilizando el Corentium Home en el mismo punto. Esto demuestra y nos afirma que las concentraciones encontradas son correctas en el tercer punto son correctas.

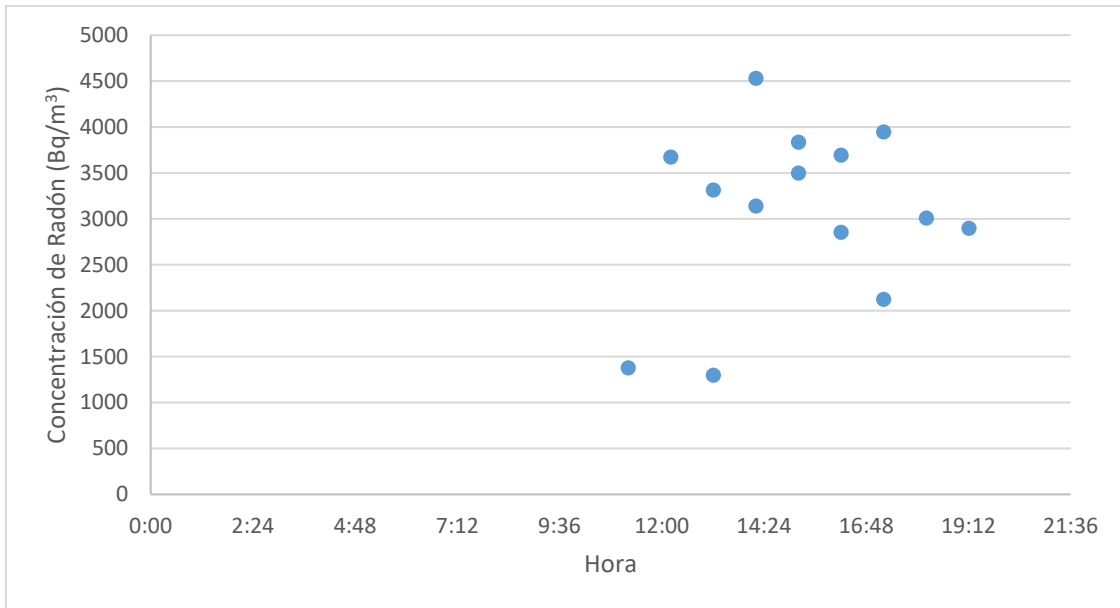


Figura 46. Niveles de concentración de  $Rn^{222}$  por horas, los días 28 y 29 del mes de octubre en el tercer punto de monitoreo.

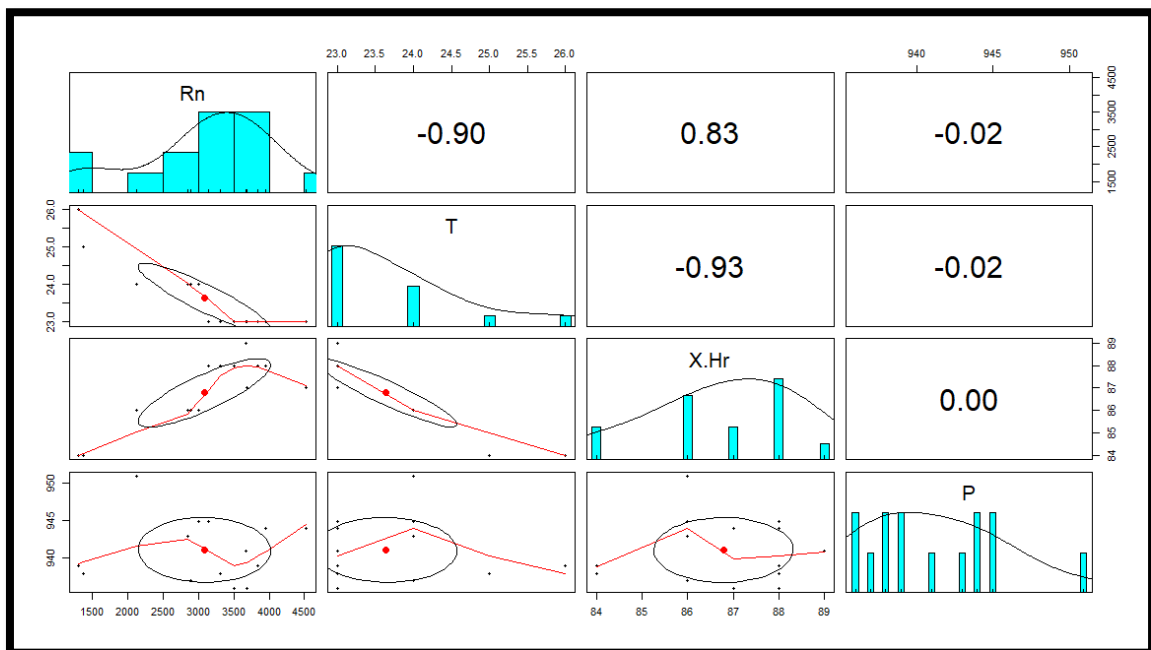
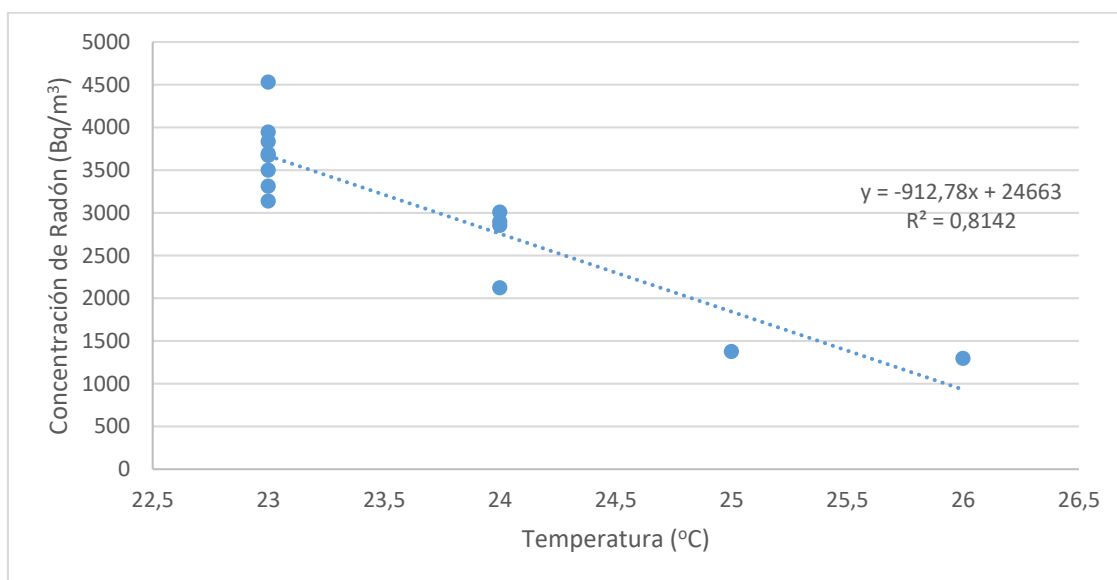


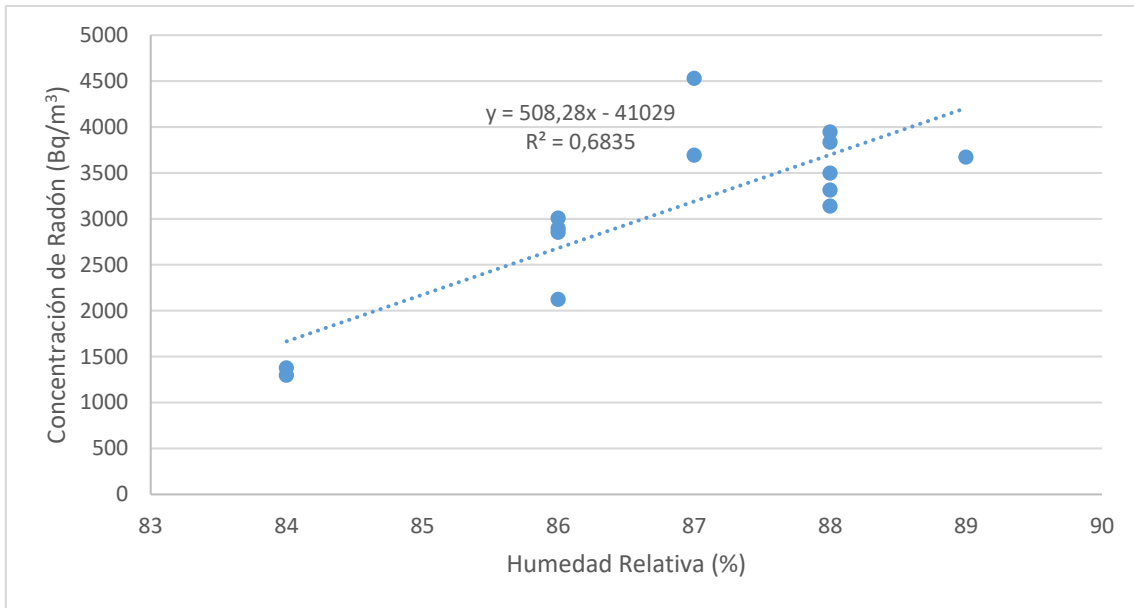
Figura 47. Correlación entre los niveles de concentración de radón y parámetros físicos como temperatura, humedad relativa y presión.

Después analizar la información obtenida durante los dos días de mediciones realizadas en el tercer punto de monitoreo con la ayuda del Corentium Pro, encontramos que existe una correlación positiva entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa. La concentración de  $Rn^{222}$  tiene una correlación positiva de 0.83 con la humedad relativa. Los parámetros como temperatura y presión presentaron una correlación negativa de -0.90 y -0.02, respectivamente. Encontramos que la correlación con respecto a la presión no es tan significativa y esto podría ser probablemente por la duración más corta en el periodo de monitoreo.

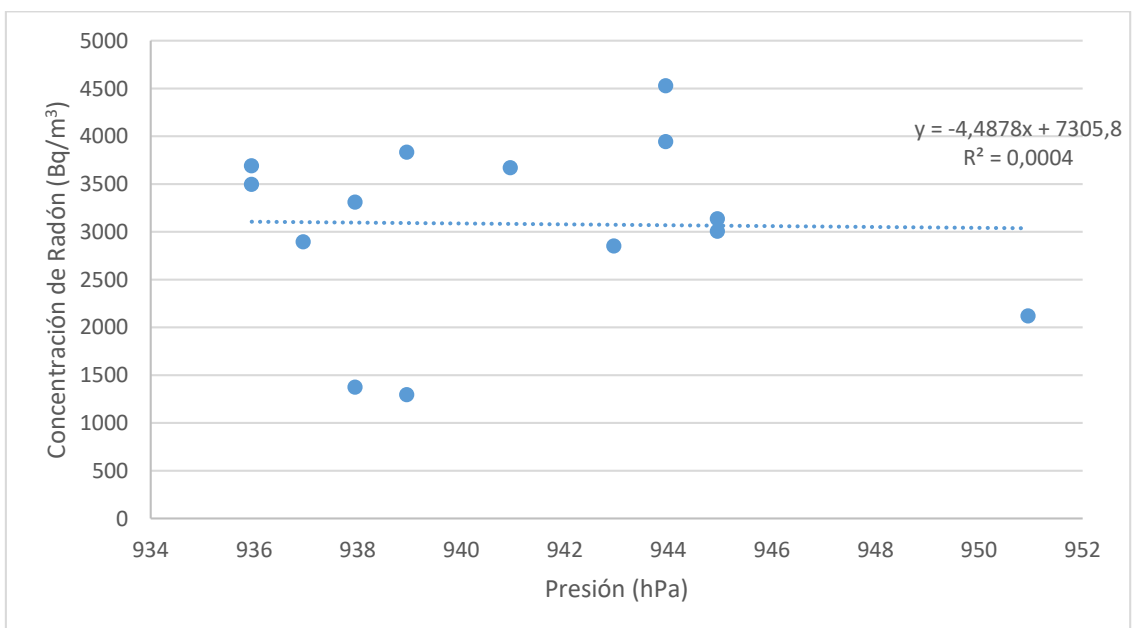
Los 3 puntos de monitoreo dentro de la caverna presentan características similares en algunos casos y en otros no. Todos los factores fueron de influencia para determinar el aumento o disminución de la concentración de  $Rn^{222}$  así como el riesgo que podría representar exposiciones de turistas y guías frente a estas concentraciones.



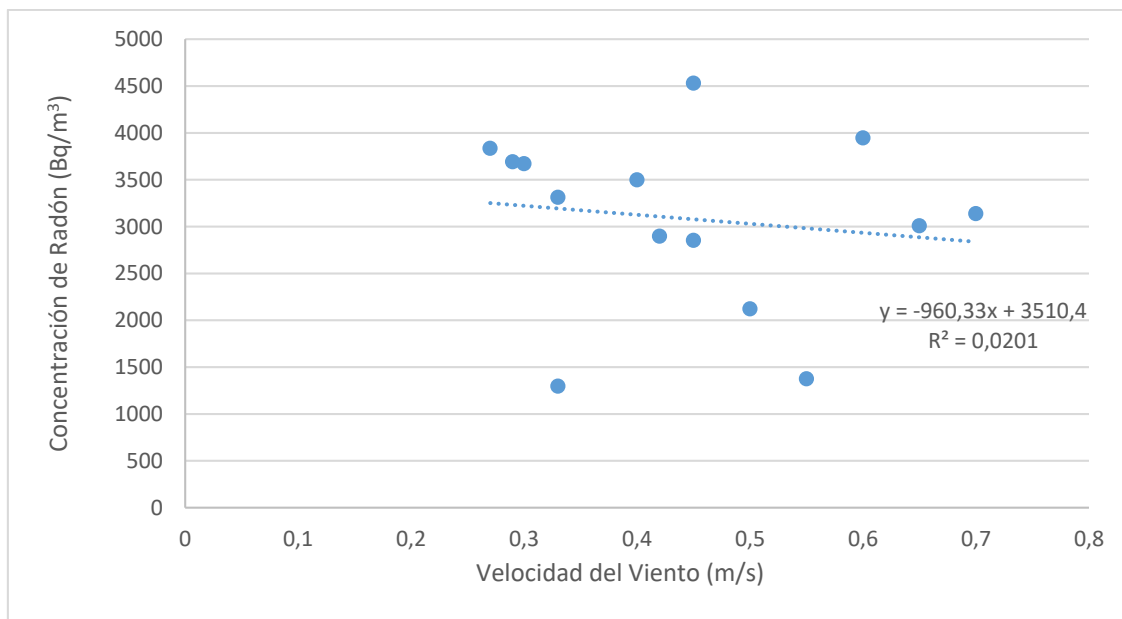
*Figura 48.* Relación entre los niveles de concentración de radón y la temperatura en el tercer punto de monitoreo utilizando el equipo de medición continua Corentium Pro.



*Figura 49.* Relación entre los niveles de concentración de radón y la humedad relativa en el tercer punto de medición utilizando el monitor continuo Corentium Pro.



*Figura 50.* Relación entre la concentración de radón y presión en el tercer punto de medición utilizando el monitor continuo Corentium Pro.



*Figura 51.* Relación entre la concentración de radón y la velocidad del viento en el tercer punto de medición utilizando el monitor continuo Corentium Pro.

### 4.3. Caracterización mineralógica.

Las muestras geológicas recogidas dentro de la cueva Jumandy fueron caracterizadas con la ayuda de un rayador de carbonato de tungsteno, imán, ácido clorhídrico al 10% y agua.

Según Bohus, Greaves, Palfalvi, Urbani y Merlo (1997, pp.725-727) es importante realizar una caracterización geológica del área de estudio para determinar la relación entre esta y la concentración de  $Rn^{222}$  presente.



*Figura 52.* Muestra Formación Napo, Marga=Arena con carbonato de calcio, Arenisca Calcárea.



*Figura 53.* Muestra Arenisca Calcárea





*Figura 54. Muestra Arenisca Bituminosa*



*Figura 55. Muestra Arenisca Conglomeratica*

Según PRI (2011, p.3) las areniscas poseen cantidades de  $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ,  $K^{40}$ ,  $Th^{232}$ ,  $Ra^{226}$  y como se pudo determinar en la caracterización mineralógica, las 4 muestras corresponden a areniscas bituminosas, conglomeraticas y calcáreas. Dependiendo la clase de arenisca que obtengamos, se debe tomar en cuenta que los niveles en ppm para Torio<sup>232</sup> pueden ir desde 0.7 a 227 y para Uranio<sup>238</sup>

de 0.1 a 62. (Mously y Cowie, 2010, p.5). Como sabemos, el Rn <sup>222</sup> proviene del decaimiento radiactivo del U<sup>238</sup> y la presencia de este último en rocas nos da una guía para encontrar Rn<sup>222</sup> (Fisher, 1995, pp.15-35). Según el mapa de factibilidad uranífera del Ecuador (ver Figura 10), el tipo de geología encontrada nos afirma la presencia de uranio y por este motivo, la concentración de radón encontrada, fue elevada.

#### 4.4. Registro de miembros de la comunidad y cantidad mensual de turistas.

La información sobre el flujo mensual de turistas y guías fue proporcionada por la presidenta de la comunidad y la información corresponde a un estudio realizado durante todo el 2016.

Cada recorrido dura aproximadamente 1 hora y se necesita de 1 guía en cada recorrido. La comunidad está conformada por 10 familias, 24 personas adultas, 2 jóvenes y 6 niños. El horario de atención es de lunes a domingo: 08:00am a 16:30pm.

Tabla 14.

*Registro de la comunidad Kichwa Ruku Jumandy Kawsay.*

<b>Número de miembros de Comunidad “Kichwa Ruku Jumandy Kawsay”</b>					
Hombres (21-63 años)	Mujeres (18-62 años)	Adolescentes (16-17 años)	Niños (2-9 años)	Guías Hombres	Guías Mujeres
13	11	2	6	11	9

Como se puede apreciar en la Tabla 15 y en la Figura 56, la mayor cantidad de turistas están presentes en el mes de agosto y es en este mismo mes en donde se registran los niveles más bajos de concentración de Rn<sup>222</sup>. Además es importante señalar que los niveles máximos de concentración de Rn<sup>222</sup> ocurren en octubre en donde hay menos cantidad de turistas. Los meses de octubre y abril es en donde existe mayor precipitación (Figura 12), esto se podría

correlacionar con los niveles elevados de radiación ( $R^2=0.49$ ). Además, en dos de los puntos de estudio se encontraron correlaciones entre la concentración de  $Rn^{222}$  y humedad relativa, sosteniendo la explicación del incremento de la precipitación con la concentración. Es importante señalar que el incremento en el flujo de turistas ocurre en los meses en donde existe menos precipitación y los niveles de concentración son menores.

Tabla 15.

*Ingreso de turistas durante el año 2016.*

Meses	Turistas		Total
	Nacionales	Extranjeros	
Enero	2069	360	<b>2429</b>
Febrero	2724	339	<b>3063</b>
Marzo	1673	265	<b>1938</b>
Abril	854	122	<b>976</b>
Mayo	1856	178	<b>2034</b>
Junio	1340	178	<b>1518</b>
Julio	2384	311	<b>2695</b>
Agosto	5970	259	<b>6229</b>
Septiembre	1798	116	<b>1914</b>
Octubre	928	146	<b>1074</b>
Noviembre	2335	174	<b>2509</b>
Diciembre	1693	112	<b>1805</b>
<b>Total</b>	<b>25624</b>	<b>2560</b>	<b>28184</b>

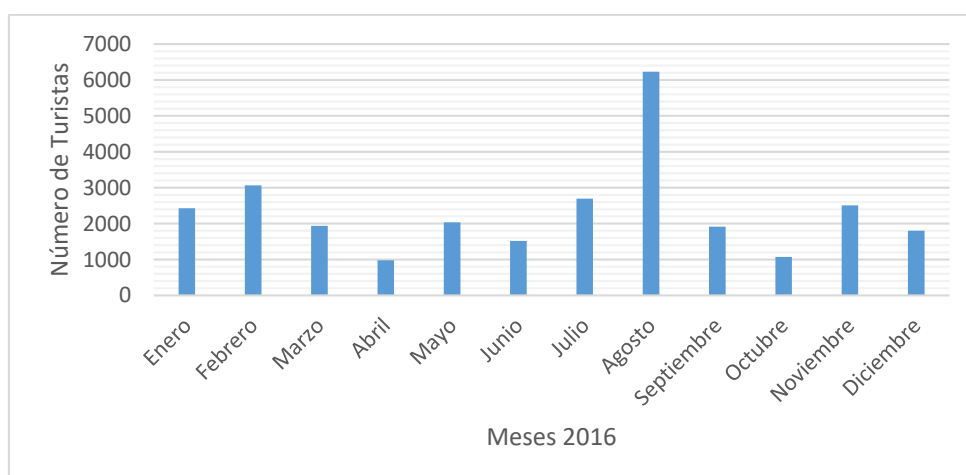


Figura 56. Presencia de turistas durante todo el 2016.

#### 4.5. Dosis efectiva recibida

La estimación de la dosis efectiva recibida anual se realizó tomando en cuenta dos situaciones.

- 1) Dosis efectiva según los niveles de concentración y periodos de permanencia en cada punto de monitoreo para turistas y guías.
- 2) Dosis efectiva según los niveles de concentración y periodos de permanencia tomando en cuenta un promedio de concentración de los 3 puntos de monitoreo para guías.

En la primera estimación se tomaron en cuenta los minutos que permanecían los turista y guías en cada punto de monitoreo y se promedió la concentración de Rn<sup>222</sup> encontrada en cada punto.

- Punto 1:  $1,381.25 \text{ Bq/m}^3 \times 0.57 \times 0.083 (\text{h/año}) \times 1.4 \times 5.6 \times 10^{-6}$   
 $[(\text{mJ/m}^3)/\text{Bq/m}^3] = 5.12 \times 10^{-4} \text{ mSv/año.}$
- Punto 2:  $1,170.5 \text{ Bq/m}^3 \times 0.57 \times 0.05 (\text{h/año}) \times 1.4 \times 5.6 \times 10^{-6}$   
 $[(\text{mJ/m}^3)/\text{Bq/m}^3] = 2.61 \times 10^{-4} \text{ mSv/año.}$
- Punto 3:  $1,335 \text{ Bq/m}^3 \times 0.57 \times 0.166 (\text{h/año}) \times 1.4 \times 5.6 \times 10^{-6}$   
 $[(\text{mJ/m}^3)/\text{Bq/m}^3] = 9.90 \times 10^{-4} \text{ mSv/año.}$

En la segunda estimación se consideró un promedio de concentración de los tres puntos de monitoreo en todas las fechas de medición, se tomaron en cuenta días laborales de 5 horas diarias por 7 días semanales para guías.

- Punto 1, 2 y 3 :  $1,295.58 \text{ Bq/m}^3 \times 0.57 \times 1680 (\text{h/año}) \times 1.4 \times 5.6 \times 10^{-6}$   
 $[(\text{mJ/m}^3)/\text{Bq/m}^3] = 9.72 \text{ mSv/año}$

#### 4.6. Determinación de puntos críticos

Como se puede apreciar en la Figura 57 el punto en donde se estima que los guías y turistas reciben la mayor cantidad de dosis efectiva es en el tercer punto. Se debe tomar en cuenta que en este punto no es en donde existe mayor concentración de  $Rn^{222}$  pero si en donde los turistas y guías se detienen por un mayor periodo de tiempo.

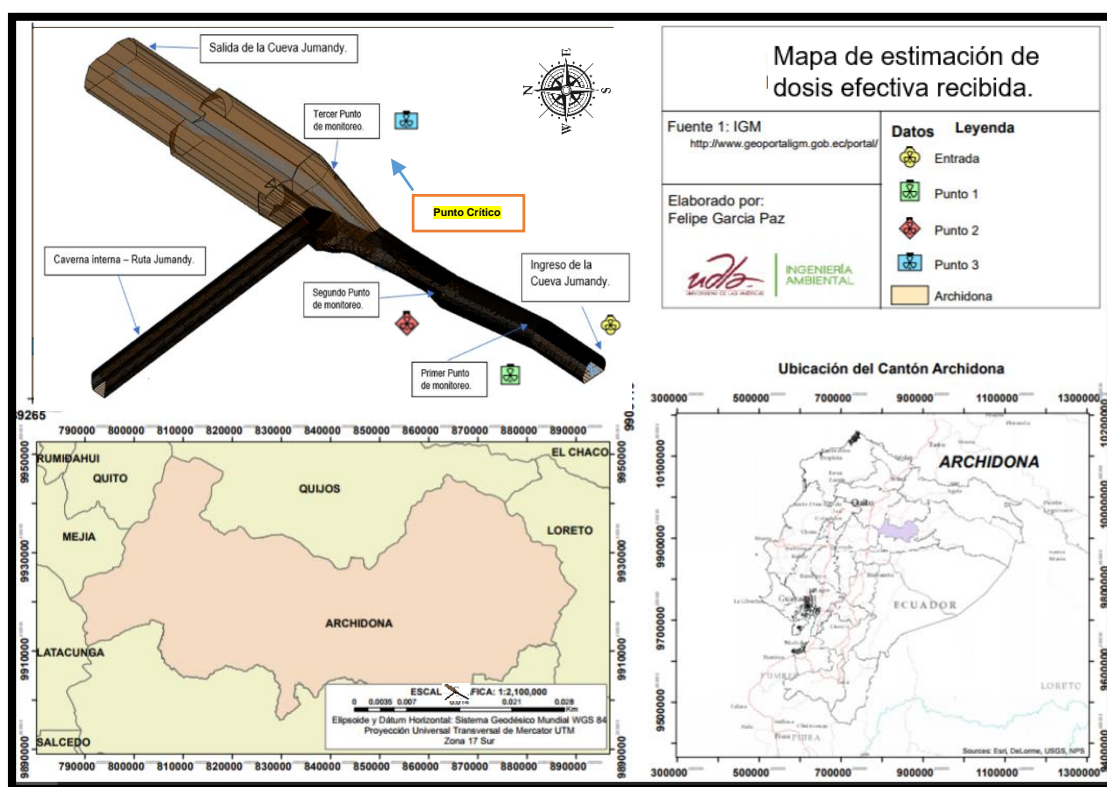


Figura 57. Mapa de estimación de dosis efectiva recibida.

#### 4.7. Medidas de mitigación

Tomando en cuenta que los niveles tanto de concentración de  $Rn^{222}$  como estimación de dosis efectiva recibida superan los límites máximos, se deberían tomar en cuenta los principios de protección radiológica (PPR) expuestos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en su publicación Nr. 103, en donde se habla sobre el tiempo de exposición, el blindaje y la distancia

que se deben implementar como medidas para la protección radiológica (ICRP,2007).

Una de las medidas de mitigación más comunes y efectivas para tratar la presencia de Radón, es la implementación de adecuados sistemas de ventilación, además del control sobre el tiempo de exposición de personas expuestas al gas, pero sin duda la mejor manera de prevenir la contaminación por contacto es la temprana detección y cuantificación del radón (CSN,2012).

Los estudios referentes al Gas radón a nivel mundial son extensos, los países que más estudian sus propiedades son aquellos que pertenecen a organismos internacionales como la IAEA. Su presencia es medida en áreas públicas, espacios de trabajo e industria, además, es tomada en cuenta tanto en el suelo, aire y el agua. Los mapas de radón, son muy comunes en ciudades en donde el estudio e importancia de este gas es conocido (White,1994).

Se determinó que las medidas más adecuadas de PPR para implementar dentro de las cavernas de Jumandy, tienen que ver con el tiempo de exposición ya que la distancia y blindaje no son parámetros que podamos aplicar en la comunidad Kichwa Ruku Jumandy Kawsay. Se estimó que los guías deben trabajar 2,5 horas diarias, 3 veces por semana durante dos semanas cada mes para que su dosis sea 1,04 mSv/ año, cumpliendo así con las recomendaciones de los principios de protección radiológicos (ICRP,1987).

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Después de realizar el monitoreo de concentración de  $Rn^{222}$  durante los 4 meses, dentro de las cavernas de Jumandy, a través de métodos activos de detección, se determinó que la mayor concentración de  $Rn^{222}$  se encuentra en el primer punto. Se tiene una concentración promedio de  $1381,25 \text{ Bq/m}^3$ . Esto puede ser debido a que este punto se encuentra en la última parte del recorrido que sigue la dirección del viento, el mismo que es generado por las dos cascadas internas de la caverna. El viento podría ser el responsable del transporte de  $Rn^{222}$  desde el interior de la cueva. Se encontró una correlación positiva en cuanto a la concentración de radón con la temperatura así como también con la velocidad del viento.

El tercer punto de monitoreo es el que más concentración de  $Rn^{222}$  posee después del primer punto. En este punto se encontraron concentraciones promedios de  $1335 \text{ Bq/m}^3$ , sin embargo después de realizar el último monitoreo de 2 días con el Corentium Pro, se determinó en el tercer punto una concentración media de  $3082 \text{ Bq/m}^3$ . Se encontraron concentraciones elevadas de  $Rn^{222}$  y esto podría ser debido a que este punto de monitoreo se encuentra ubicado en la parte más amplia de la cueva, es decir donde el área interna es más grande. En este punto tenemos una correlación negativa entre la concentración de radón y la temperatura así como la velocidad del viento.

El segundo punto de monitoreo es el que presenta los niveles de concentración más baja, se tienen concentraciones promedio de  $1170,5 \text{ Bq/m}^3$ . Esto podría ser el resultado de la ubicación de este punto ya que se encuentra inmediatamente después de una cascada interna, la cual modifica la ventilación del área.

La estimación de dosis efectiva recibida anual para turistas y guías no superó el límite máximo permisible de 1 mSv/año, sin embargo en el último punto de monitoreo es en donde los turistas y guías reciben la mayor cantidad de dosis, la dosis es de  $9,90 \times 10^{-4}$  mSv/año. Esto se debe a que en este punto es en donde más tiempo permanecen por explicaciones de los guías.

La estimación de dosis efectiva recibida anual para guías, tomando en cuenta el promedio de concentración de  $Rn^{222}$  en todos los puntos de monitoreo durante todas las fechas, superó el límite máximo permisible de 1 mSv/año. La dosis estimada recibida por guías fue de 9,72 mSv/año.

Las muestras geológicas recogidas coinciden con la información entregada por el INEGEMM, ya que en todas las muestras podemos observar características geológicas propias de la Formación Napo.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda aplicar los principios de protección radiológicos a los guías que por su trabajo están expuestos a niveles de radiación muy por encima de los límites máximos permisibles tanto en concentración como en dosis efectiva.

Se recomienda crear una normativa nacional relacionada a concentraciones máximas permisibles de radón en interiores, así como tasa de dosis máxima a ser recibida.

Se recomienda realizar monitoreos de  $Rn^{222}$  por periodos mayores a 1 año para poder tener un promedio de concentración más detallado.



Se recomienda realizar monitoreos periódicos anuales en los puntos analizados, así como en otros puntos, para determinar el nivel de influencia provocada por factores externos sobre la concentración de  $Rn^{222}$ .

Se recomienda realizar monitoreos para determinar la concentración de  $Rn^{222}$  presente en el agua ya que en este recurso podría existir una concentración significativa de  $Rn^{222}$ .

## Referencias

- An American National Standard. (2015). *Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Schools and Large Buildings*. North Carolina, USA: ANSI
- Barros, X. (2014). *La Exposición Residencial al Radón - Un Problema de Salud Pública*. Santiago de Compostela, España: Complejo Hospitalario Universitario de Santiago.
- Bohus, S., Greaves, L., Palfalvi, E., Urbani, J. y Merlo, G. (1997). *Radon Concentration measurements in venezuelan caves using SSNT*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350448797001728>
- Bundesamt fur Strahlenschutz.(s.f.).*Radon*. Recuperado el 14 de septiembre de 2017 de <http://www.bfs.de/SharedDocs/Glossareintraege/EN/W/wlm.html>.
- Carrasco, J. (2003). Radiaciones Ionizantes y no Ionizantes, aplicaciones y riesgos. Recuperado el 11 de octubre de 2017 de <http://www.marcoshurvitz.com.ar/Archivos/Docen/ISFT%20190/Radiaciones%20y%20patologia.pdf>
- Carretero,L. y Pozo, M. (2007). *Mineralogía Aplicada: Salud y Medio Ambiente*. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=X6aHoUtXW44C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=X6aHoUtXW44C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Cigna, A. (2005). *Radon in caves* Bologna, Italy. Recuperado el 15 de noviembre de 2017 de

<http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1203&context=ijs>

Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica. (1979). *Reglamento de seguridad radiológica del Ecuador*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de <http://www.energia.gob.ec/wpcontent/uploads/2016/06/REGLAMENTO-DE-SEGURIDAD-RADIOLOGICA.pdf>

Consejo de Seguridad Nuclear. (2012). *Protección radiológica*. Recuperado el 17 de noviembre de 2017 de <https://www.csn.es/proteccion-radiologica>

Corentium Technology. (s.f.). Recuperado el 14 de septiembre de 2017 de [https://www.corentium.ca/ca\\_en/corentium-home/](https://www.corentium.ca/ca_en/corentium-home/)

Eriksen, D. (2013). *Naturally occurring radioactive material (NORM) in North Sea produced water: Environmental consequences*. Recuperado el 20 de noviembre de 2017 de [https://pdfsecret.com/download/naturally-occurring-radioactive-material-norm-in-north-sea\\_59f75426d64ab20a75179ff3\\_pdf](https://pdfsecret.com/download/naturally-occurring-radioactive-material-norm-in-north-sea_59f75426d64ab20a75179ff3_pdf)

Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee. (2005). *Canadian Guideline for the Management of Naturally Occurring Radiactive Materials (NORM)*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017 de <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/canadian-guidelines-management-naturally-occurring-radioactive-materials-norm-health-canada-2000.html>

Gallegos, M. (2015). *High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castañar cave, Spain)*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25863322>

Gruppen, C. y Rodgers, M. (2016). *What are Radioactivity and Radiation*. Recuperado el 21 de noviembre de 2017 de [https://books.google.com.ec/books?id=QkdxDQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=Gruppen,+C.+y+Rodgers,+M.+\(2016\).+What+are+Radioactivity+and+Radiation.&source=bl&ots=TjDVlHwSuK&sig=E-r5tt3xxfSptSHYpQB3GeeydDo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjD76aw8NrZAhUKsIMKHVS2AO0Q6AEILTAB#v=onepage&q=Gruppen%2C%20C.%20y%20Rodgers%2C%20M.%20\(2016\).%20What%20are%20Radioactivity%20and%20Radiation.&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=QkdxDQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=Gruppen,+C.+y+Rodgers,+M.+(2016).+What+are+Radioactivity+and+Radiation.&source=bl&ots=TjDVlHwSuK&sig=E-r5tt3xxfSptSHYpQB3GeeydDo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjD76aw8NrZAhUKsIMKHVS2AO0Q6AEILTAB#v=onepage&q=Gruppen%2C%20C.%20y%20Rodgers%2C%20M.%20(2016).%20What%20are%20Radioactivity%20and%20Radiation.&f=false)

Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (1986). *Mapa Temático*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.

International Atomic Energy Agency. (2011). *Naturally Occurring Radioactive Material*. Recuperado el 24 de noviembre de 2017 de <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>

International Atomic Energy Agency. (2003). *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry, Safety Reports Series No. 34*. Recuperado el 25 de noviembre de 2017 de <https://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6747/Radiation-Protection-and-the-Management-of-Radioactive-Waste-in-the-Oil-and-Gas-Industry>

International Atomic Energy Agency. (2003). *Technical Reports Series no.419: Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation*. Recuperado el 25 de noviembre de 2017 de <https://www->

pub.iaea.org/books/iaeabooks/6789/Extent-of-Environmental-Contamination-by-Naturally-Occurring-Radioactive-Material-NORM-and-Technological-Options-for-Mitigation

International Commission of Radiological Protection. (2007). *The Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*. Recuperado el 26 de noviembre de 2017 de <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>

International Commission of Radiological Protection. (1987). *Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters*. Recuperado el 25 de noviembre de 2017 de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/8/1/409/pdf>

International Nuclear Atlantic Conference. (2007). *Radon concentration in caves of Parque Estadual do Alto Ribeira*. Recuperado el 27 de junio de 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0531513104017686>

Jha, D. (2004). *Radioactivity and Radioactive Decay*. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de <https://www.abebooks.com/Radioactivity-Radioactive-Decay-D.K-Jha-Discovery/9201088568/bd>

Jovanovic, P. (1996). *Radon measurements in karst caves*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017 de [http://aars-nrpp.com/proceedings/2015/MEASUREMENT\\_OF\\_RADON\\_LEVELS\\_IN\\_CAVES\\_LOGISTICAL\\_HURDLES\\_AND\\_SOLUTIONS.pdf](http://aars-nrpp.com/proceedings/2015/MEASUREMENT_OF_RADON_LEVELS_IN_CAVES_LOGISTICAL_HURDLES_AND_SOLUTIONS.pdf)

Jovanovic, P. (1996). *Radon measurements in the cave Vilenica*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017 de [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:28007587](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28007587)

- Kendall, G. M. y Smith, T. (2002). *Doses to organs and tissues from radon and its decay products*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12546226>
- Laurence, E. (2015). *Measurement of radon levels in caves: logistical hurdles and solutions*. Recuperado el 2 de noviembre de 2017 de [http://aarst-nrpp.com/proceedings/2015/MEASUREMENT\\_OF\\_RADON\\_LEVELS\\_IN\\_CAVES\\_LOGISTICAL\\_HURDLES\\_AND\\_SOLUTIONS.pdf](http://aarst-nrpp.com/proceedings/2015/MEASUREMENT_OF_RADON_LEVELS_IN_CAVES_LOGISTICAL_HURDLES_AND_SOLUTIONS.pdf)
- Mously, K. y Cowie, M. (2010). *Overview and Management of NORM in Saudi Aramco*. Recuperado el 24 de noviembre de 2017 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23089032>
- Nabil, F., Pooya, S., Zafarghandi, M. y Taheri, M. (2012). *A diffusion chamber for passive separated measurements of radon/thoron concentration in dwellings*. Recuperado el 15 de noviembre de 2017 de [https://nanopdf.com/download/here-rad-2012-9\\_pdf](https://nanopdf.com/download/here-rad-2012-9_pdf)
- National Research Council. (1999). *Health effects of exposure to radon: BEIR VI (Vol. 6)*. Recuperado el 12 de noviembre de 2017 de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=\\_AkCdXj3Se0C&oi=fnd&pg=PT15&dq=National+Research+Council.+ \(1999\).+Health+effects+of+exposure+to+radon:+BEIR+VI+\(Vol.+6\).&ots=VZUtzAglgX&sig=tH\\_P4Va6vnTD5NjN58y-QY0448g#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=_AkCdXj3Se0C&oi=fnd&pg=PT15&dq=National+Research+Council.+ (1999).+Health+effects+of+exposure+to+radon:+BEIR+VI+(Vol.+6).&ots=VZUtzAglgX&sig=tH_P4Va6vnTD5NjN58y-QY0448g#v=onepage&q&f=false)
- Oana, A. y Bogdan, P. (2015). *Radon levels in caves from San Salvador, the Bahamas: A reconnaissance survey*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017 de [https://www.researchgate.net/publication/277925622\\_Radon\\_levels\\_in\\_caves\\_from\\_San\\_Salvador\\_the\\_Bahamas\\_a\\_reconnaissance\\_survey](https://www.researchgate.net/publication/277925622_Radon_levels_in_caves_from_San_Salvador_the_Bahamas_a_reconnaissance_survey)

Organización Mundial de la Salud. (2016). *Radiaciones Ionizantes: Efectos en la Salud y medidas de protección*. Recuperado el 15 de mayo de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>

Organización Mundial de la Salud. (2016). *El Radón y sus efectos en la salud*. Recuperado el 12 de mayo de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>

Organización Mundial de la Salud. (2009). *Manual de la OMS sobre el Radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*. Recuperado el 13 de mayo de 2017 de <http://www.ipen.gob.pe/radon/OMS-manual-sobre-el-radon-en-interiores.pdf>

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2011). *Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación, Normas Básicas Internacionales de Seguridad*. Recuperado el 8 de noviembre de 2017 de.   
[https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC60/GC60Documents/Spanish/gc60-9\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC60/GC60Documents/Spanish/gc60-9_sp.pdf)

Otton, J. (1992). *The geology of radon*. Recuperado el 9 de noviembre de 2017 de <https://pubs.usgs.gov/gip/7000018/report.pdf>

Paleontological Research Institution. (2011). *Understanding Naturally Occuring Radioactive Material in the Marcellus Shale*. Recuperado el 10 de noviembre de 2017 de [http://priweb.org/downloads/marcellus/Marcellus\\_issue4.pdf](http://priweb.org/downloads/marcellus/Marcellus_issue4.pdf)

Papachristodoulou, C. (2004). *Radon activity levels and effective doses in the perama cave*. Recuperado el 12 de diciembre de 2017 de <https://journals.lww.com/health->

physics/Abstract/2004/06000/Radon\_Activity\_Levels\_and\_Effective\_Doses\_in\_the.7.aspx

Porstendörfer, J. (1996). *Radon: measurements related to dose, Environment international*. Recuperado el 17 de diciembre de 2017 de <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/about/researchsupport/reportabstracts/RSP-0290-Final-report.pdf>

Quindos, L. (1995). *Radón (Un Gas Radiactivo de Origen Natural en su Casa)*. Recuperado el 19 de diciembre de 2017 de <http://www.elradon.com/web/wp-content/uploads/2011/08/Radon-Un-gas-radioactivo-de-Origen-Natural-en-su-Casa-1.pdf>

Radiation Protection Dosimetry. (2006). *Radon measurements in the caves of Zonguldak*. Recuperado el 22 de diciembre de 2017 de <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/118/1/117/1597011>

Robert, N. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Radiaciones Ionizantes*. Recuperado el 12 de diciembre de 2017 de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf>

Ruano, B., Naranjo, F. y Perez, A. (2015). *Measuring radon concentration and estimating dose in tourist caves*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017 de <https://academic.oup.com/rpd/issue/167/1-3>

Scott, A. (2012). *Health Physics Society, Environmental and background radiation*. Recuperado el 12 de septiembre del 2017 de <https://hps.org/publicinformation/ate/q10245.html>.

Serrano, L. (2009). *Geología General: Como se reconocen los minerales*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017 de



<https://es.scribd.com/document/281588610/Como-Se-Reconosen-Los-Minerales>

Smith, T. (2002). *Doses to organs and tissues from radon and its decay products*. Recuperado el 12 de noviembre de 2017 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12546226>

The University of Texas at Austin. (2014). *Radon decay*. Recuperado el 15 de septiembre del 2017 de <https://www.ma.utexas.edu/users/mks/RA/radondecay.pdf>.

White, S. (1994). *Making mitigation decisions based on short-term tests of  $^{222}\text{Rn}$* . Recuperado el 18 de noviembre de 2017 de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.539.5143&rep=rep1&type=pdf>

Wood, A. y Roy, C. (2017). *The Electromagnetic Spectrum and Nonionizing Radiation. Non-ionizing Radiation Protection: Summary of Research and Policy Options*. Recuperado el 10 de noviembre de 2017 de <https://www.wiley.com/en-us/Non-ionizing+Radiation+Protection%3A+Summary+of+Research+and+Policy+Options-p-9780471446811>

World Nuclear Association. (s.f.). *Naturally-Occurring Radioactive Materials (NORM)*. Recuperado el 15 de septiembre dl 2017 de <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-andhealth/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>

