



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN CUEVAS
TURÍSTICAS DE LA PROVINCIA DE NAPO

Autor

Mateo Alzate Pemberthy

Año
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN CUEVAS
TURÍSTICAS DE LA PROVINCIA DE NAPO

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

Profesor Guía

MSc. Yasser Alejandro González Romero

Autor

Mateo Alzate Pemberthy

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación de la concentración de radón en cuevas turísticas de la provincia de Napo, a través de reuniones periódicas con el estudiante Mateo Alzate Pemberthy, en el semestre 201920, 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

Master en Ingeniería Ambiental

C.I.: 0703737627

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de la concentración de radón en cuevas turísticas de la provincia de Napo, de Mateo Alzate Pemberthy, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Rasa Zalakeviciute
Doctor of Engineering Science
C.C.:1757076797

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.”

Mateo Alzate Pemberthy

C.I.: 1719024703

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia por el apoyo brindado y por siempre estar pendiente de mí. A AFAC por formar parte de mi vida y ser un apoyo incondicional. A mis compañeros y profesores que formaron parte de esta etapa inolvidable. Al profesor Alejandro González y la profesora Rasa Zalakeviciute por guiarme en la realización de este proyecto. Finalmente, al personal del Laboratorio de ARAD de la SCAN y a los guías de las cuevas por su colaboración.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Osiris y Benjamín y a mi hermana Paula quienes son mi mayor motivación y por siempre permanecer juntos a pesar de las dificultades que se hayan presentado.

RESUMEN

El turismo es un eje importante en la economía de Ecuador, y es una de las principales actividades económicas en Napo, provincia que cuenta con varios atractivos como cuevas y cavernas. El objetivo del presente estudio es cuantificar y analizar la concentración de radón de cuatro cuevas destinadas al turismo del Cantón Archidona, Napo. En esta región se han realizado estudios radiométricos que determinan que existen áreas con actividad de 600 a 800 cps, sin embargo, no se cuenta con datos de estas mediciones al interior de cavernas. El radón es un material radiactivo de origen natural que forma parte de la cadena de desintegración del uranio y puede estar presente en el suelo o rocas que conforman las cuevas. Este elemento representa un riesgo a la salud, siendo este la segunda causa de cáncer pulmonar de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS). Al ser un gas, el radón, mediante procesos de emanación y exhalación, se transfiere al aire donde puede ser respirado, principalmente el isótopo ^{222}Rn , cuyo tiempo de vida media es de 3.8 días, estando disponible a la exposición de las personas en proximidad. La medición de la concentración de Rn se realizó usando el RAD7 de DurrIDGE durante varias horas a lo largo del día en ciclos de tres horas en cada cueva. Se estimó la tasa de dosis que reciben los trabajadores de las cuevas en base a la concentración medida y al tiempo de permanencia en el interior de estas. Se encontró que una de las cuatro cuevas medidas excede el límite de concentración de Rn en interiores recomendado por la OMS y la Unión Europea (UE) de 300 Bq/m^3 . La misma cueva, en función del tiempo de permanencia, sobrepasa el límite de dosis efectiva de 1 mSv/año para trabajadores determinado en el Acuerdo Ministerial 283 del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER).

Palabras clave: radón (^{222}Rn), concentración de radón, RAD7, cuevas turísticas

ABSTRACT

Tourism is an important axis in the economy of Ecuador and, specifically in Napo, a province famous for several attractions such as caves. The objective of the present study is to quantify and analyze the radon concentration of four caves destined to tourism in Archidona, Napo. In this region radiometric studies have been carried out that determine that there are areas with radioactivity of 600 to 800 cps, however, there is no data from inside the caves. Radon is a naturally occurring radioactive material that is part of the decay chain of uranium and may be present in the soil or rocks that make up the caves. This element represents a risk to human health, being the second cause of lung cancer according to the World Health Organization (WHO). Because it is a gas, radon, through processes of emanation and exhalation, is transferred to the air where it can be inhaled by human beings. It is mainly the isotope ^{222}Rn , whose average lifetime is 3.8 days, that people are exposed more. The measurement of the Rn concentration was performed using DurrIDGE's RAD7 for several hours throughout the day in three-hour cycles in each cave. The dose rate received by workers in the caves was estimated based on the concentration measured and the time spent in the interior of the caves. It was found that one of the four measured caves exceeded the indoor concentration limit of Rn recommended by the WHO and the European Union (300 Bq / m³). The same cave, according to the time of permanence, exceeds the effective dose limit of 1 mSv/year for workers determined in Ecuador's Acuerdo Ministerial 283 (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable)

Keywords: radon (^{222}Rn), radon concentration, RAD7, tourist caves

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Alcance	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Radiación.....	4
2.1.1 Radiación No Ionizante.....	5
2.1.2 Radiación Ionizante	5
2.1.3 Radiación Ionizante de Origen Natural.....	5
2.1.4 Radiación Ionizante Artificial.....	6
2.2 Efectos para la Salud	7
2.2.1 Radiosensibilidad	8
2.3 Radón	9
2.3.1 Formación	10
2.3.2 Propiedades	11
2.3.3 Radón 222 (²²² Rn).....	12
2.3.4 Geología del Radón	13
2.3.5 Radón en Interiores.....	14
2.3.6 Afectaciones a la Salud.....	15

2.3.7 Medición.....	15
2.3.8 Detector Durridge RAD7	16
2.4 Normativa.....	17
3. METODOLOGÍA.....	18
3.1 Selección de los lugares analizados.....	18
3.2 Descripción de los lugares analizados	19
3.2.1 Caverna USA YAKU.....	19
3.2.2 Cavernas Chikillu Elefante y Templo de Ceremonia.....	20
3.2.2.1 Caverna Chikillu Elefante	20
3.2.2.2 Caverna Templo de Ceremonia	20
3.3 Selección de los Puntos de Monitoreo	22
3.4 Concentración de radón y dimensionamiento de cuevas.....	25
3.4.1 Dimensionamiento de las cuevas.....	26
3.4.2 Medición de la concentración de radón.....	27
3.4.2.1 Cueva USA YAKU.....	29
3.4.2.2 Cueva Templo de Ceremonia	30
3.4.2.3 Cueva Chikillu Elefante	31
3.4.2.4 Cueva Templo de Ayawaska.....	31
3.4.3 Recolección de Muestras de Rocas.....	32
3.4 Estimación de Dosis Efectiva	32
3.5 Caracterización de Rocas	34
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	36
4.1 Rocas encontradas al interior de las cavernas	36
4.2 Concentración de radón	40

4.2.1 Cavernas USA YAKU.....	40
4.2.2 Caverna Templo de Ceremonia	45
4.2.3 Caverna Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska	49
4.3 Tasa de Dosis	51
4.3.1 Caverna USA YAKU.....	52
4.3.2 Cavernas Templo de Ceremonia, Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska	53
4.4 Relación entre los niveles de concentración de las diferentes cuevas.....	54
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Recomendaciones	58
REFERENCIAS	60
ANEXOS	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los efectos de la salud se han estudiado extensivamente en personas expuestas al radón, principalmente por la elevada incidencia de cáncer de pulmón. El ^{222}Rn es un gas radiactivo que carece de color y olor y cuya vida media es de 3.8 días. Procede de la cadena de desintegración del Uranio 238 (^{238}U) que está presente en rocas, cuevas, túneles, bodegas de viviendas, entre otras (Aicardi-Carrillo, Asmat-Inostrosa, & Barboza-Rangel, 2015). Según la OMS, la exposición a Rn es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco. Los estudios epidemiológicos han demostrado una asociación entre la exposición a este elemento en interiores y el cáncer, incluso para niveles relativamente bajos, mismo que pueden existir incluso en edificios residenciales (Organización Mundial de La Salud, 2015).

El radón es un elemento radiactivo de origen natural, y es parte de un grupo de aproximadamente 70 radionúclidos presentes en la corteza terrestre, agua, comida, tejidos de organismos, y demás materiales (Desideri, Roselli, Feduzi, & Assunta Meli, 2006). Existen tres tipos de isótopos presentes en la naturaleza: ^{222}Rn , proveniente del decaimiento de Uranio, ^{220}Rn de Torio y ^{219}Rn del Actinio (Tabla 1) (Ishimori, Lange, Martin, Mayya, & Phaneuf, 2013).

Tabla 1.

Características de los isótopos del radón

Parámetro	Símbolo	^{222}Rn	^{220}Rn	^{219}Rn
Tiempo de vida medio	$T_{1/2}$	3.8232 (8) d	55.8 (3) s	3.98 (3) s

Constante de decaimiento	λ	2.0984×10^{-6} /s	1.242×10^{-2} /s	1.74×10^{-1} /s
Coeficiente de difusión en aire	D_{MA}	1×10^{-5} m ² /s	-	-
Coeficiente de difusión en agua	D_{MW}	1×10^{-9} m ² /s	-	-

Adaptado de Cigna, A. 2012.

La presencia de radón en cuevas ha sido estudiada por muchos años y existe un amplio conocimiento del comportamiento de este gas en dichos lugares. Como se mencionó anteriormente, la inhalación de este radioisótopo acarrea problemas a la salud, y es de gran importancia realizar mediciones para estimar la Tasa de Dosis a la que están expuestas las personas que acuden a estos lugares (Cigna, 2012). El riesgo de estar expuesto a una fuente radiactiva se evalúa mediante la dosis absorbida, que se define como la energía impartida a una masa definida de tejido, la cual no es uniforme en todo el cuerpo, y cada sustancia radiactiva es selectiva a cada órgano o tejido (*Institute for Energy and Environmental Research*, 1999).

En un estudio realizado en 2017 en cuevas ubicadas en Archidona, Ecuador sobre la detección y cuantificación del isótopo radiactivo ²²²Rn, se detectaron niveles de concentración que varían entre 1381.25 Bq/m³ y 3082 Bq/m³, lo que indica que en dichas cuevas estos niveles sobrepasan el límite máximo permisible de aproximadamente 148 Bq/m³ (García, 2018). Este estudio expone un problema en particular en las Cavernas de Jumandi, sin embargo, por similares características geológicas, pueden existir más cavernas ubicadas en la misma región en donde el radón e isótopos estén presentes.

1.2 Justificación

Existen varios estudios que indican los peligros de la exposición al radón y los efectos que este tiene en los seres humanos, principalmente en el sistema respiratorio. Este elemento al estar de manera natural en el medio representa un mayor peligro debido al desconocimiento de su presencia, lo que acarrea graves consecuencias para las personas que se exponen de manera frecuente a su presencia (Núñez, 2008).

El radón es un elemento que puede estar presente en materiales comunes como los de construcción como el hormigón, por lo que la exposición a este puede darse en el interior de edificaciones y subsuelos (Finne et al., 2019). Sin embargo, la existencia de este elemento no se ve limitada a actividades antropogénicas sino en zonas naturales donde por las mismas formaciones geológicas, el radón puede estar presente. Este elemento, al estar en estado gaseoso, se filtra fácilmente por grietas en la estructura o poros en el suelo, acumulándose en interiores de edificios, casas y formaciones naturales como cuevas.

Varios estudios realizados en cuevas de distintos países han encontrado que el radón es un elemento natural de estas formaciones (Cigna, 2012). Por estas razones, es necesario realizar estudios de evaluación de los niveles de este elemento presentes en cuevas, principalmente las de carácter turístico, para alertar, prevenir o tomar las medidas necesarias al personal y turistas que acuden a estos lugares.

1.3 Alcance

El presente estudio pretende medir, mediante métodos activos de detección, la concentración de radón de cuatro cuevas distintas destinadas al turismo en la provincia de Napo en diferentes puntos de monitoreo a lo largo de las cuevas. De esta manera, analizar la concentración al interior de las cuevas y estimar la

tasa de dosis efectiva a la que están expuestos los trabajadores, y en función de esta dosis, proponer medidas de protección y prevención para el personal que trabaja en estos lugares con el fin de prevenir posibles afectaciones a la salud relacionadas con el elemento radiactivo en cuestión, sin detener la actividad económica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la presencia de radón en cuatro cavernas turísticas de la Provincia de Napo a través de métodos activos de detección.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Cuantificar niveles de concentración de radón en el interior de las cuevas
- b. Calcular la dosis estimada por turistas y trabajadores mediante modelos de inhalación
- c. Relacionar los niveles de concentración entre las diferentes cuevas

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Radiación

La radiación puede ser descrita como la energía liberada en forma de ondas de partículas electromagnéticas. Fuentes comunes son los rayos cósmicos en el espacio exterior, Rayos-X o la energía que liberan los radioisótopos. La radiación

puede afectar negativamente a las células, pero otros usos en la industria o la medicina son beneficiosos (*National Cancer Institute, 2018*).

2.1.1 Radiación No Ionizante

La radiación no ionizante se describe como una serie de ondas de energía compuesta por campos eléctricos y magnéticos que viajan a la velocidad de la luz. Esto incluye el espectro de diferentes tipos de luz como la UV, visible, infrarrojo u ondas como microondas, radiofrecuencia. La radiación no ionizante puede encontrarse en una amplia gama de aplicaciones industriales que pueden resultar riesgosas para la salud si no se controlan propiamente (*US Department of Labor, 2000*).

2.1.2 Radiación Ionizante

Radiación ionizante es un tipo de energía que liberan los átomos en forma de ondas electromagnéticas. Se denomina radiactividad cuando los átomos se desintegran de manera espontánea y la energía que emiten es una forma de radiación ionizante. Estos átomos, o radionúclidos, se caracterizan por el tipo de radiación o el tiempo de vida media. Los rayos gamma o rayos X son ejemplos de radiación ionizante (*Organizacion Mundial de la Salud (OMS), 2016*).

2.1.3 Radiación Ionizante de Origen Natural

Las exposiciones de la radiación natural son el componente más significativo de todas las exposiciones para la mayoría de las personas, y forman la línea base de la cual se parte para analizar la exposición a radiación de fuentes artificiales. La dosis efectiva promedio anual es aproximadamente 2.4 mSv. La mitad de esta

exposición proviene del radón y los productos de su decaimiento (Bølviken, 2002).

Parte de esta radiación es emitida materiales radiactivos de origen natural (NORM por sus siglas en inglés). Gran parte de estos elementos los conforman el radio y el radón. La exposición en hogares puede ser alta, particularmente en aquellas construidas con rocas que contienen radón. Las actividades humanas y procesos tecnológicos, como la extracción de combustibles fósiles o minerales pueden incrementar la concentración de estos radionúclidos. Por ejemplo, la producción de gas y petróleo pueden movilizar grandes cantidades de NORM de las excavaciones o perforaciones que se realizan, y los radionúclidos que priman son el ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{210}Pb , que se presentan en los lodos residuales o en los residuos de las perforaciones (Ojovan & Lee, 2007).

2.1.4 Radiación Ionizante Artificial

Los rayos X son un ejemplo común de radiación obtenida de manera artificial. Estos rayos son ondas electromagnéticas que se originan por el choque de electrones de un determinado material dentro de un tubo de vacío. Desde su descubrimiento se han hallado varias aplicaciones para este tipo de radiación lo que ha llevado a los investigadores a desarrollar nuevos métodos de obtención de radiación (Consejo de Seguridad Nuclear, 2019)

La radiación ionizante puede clasificarse según su forma de desintegración y el tipo de energía que liberan. Estas pueden ser radiaciones alfa, beta, rayos-x, gamma y por neutrones (Figura 1).

Radiaciones alfa son radiaciones que se emiten en determinadas desintegraciones nucleares formadas por dos neutrones y dos protones, tienen mucha masa sin embargo son poco penetrantes. Una hoja de papel o la piel son barrera suficiente para protegerse de sus efectos.

Radiaciones beta son flujos de electrones o positrones, betas negativas o betas positivas respectivamente. Se liberan en determinadas desintegraciones nucleares. Al poseer menos masa que las radiaciones alfa son más penetrantes, sin embargo, una lámina de aluminio es suficiente para impedir su paso.

Radiación por Rayos X y Gamma al ser radiaciones electromagnéticas que no poseen carga ni masa son bastantes penetrantes, se requieren láminas de plomo del grosor suficiente para detener este tipo de radiación.

Radiación por Neutrones es un tipo de radiación muy penetrante, no poseen carga eléctrica y pueden penetrar fácilmente la estructura de los átomos lo cual provoca su división. Determinados elementos químicos, como el boro o el cadmio, son capaces de absorberlos.

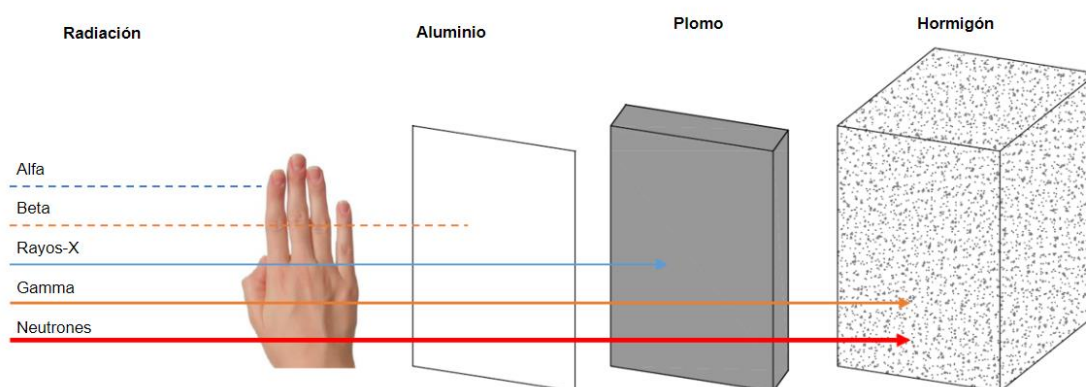


Figura 1. Tipos de radiación.

Adaptado de Miranda, 2014.

2.2 Efectos para la Salud

Según la OMS, los daños que causan las radiaciones a los órganos o tejidos están en función de la dosis absorbida (Figura 2). La radiación puede afectar el funcionamiento y desarrollo de órganos y tejidos de manera aguda, como quemaduras, caída del cabello o irritación. Esto se da cuando la exposición es a dosis altas con mayores tasas de dosis. Cuando la exposición es prolongada y a bajas tasas de dosis, pueden existir riesgos a largo plazo como el cáncer o

problemas reproductivos, los mismos que se pueden presentar mucho después de la exposición. Los grupos etarios más propensos a ser afectados son los niños y adolescentes ya que son más radiosensibles (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2016).

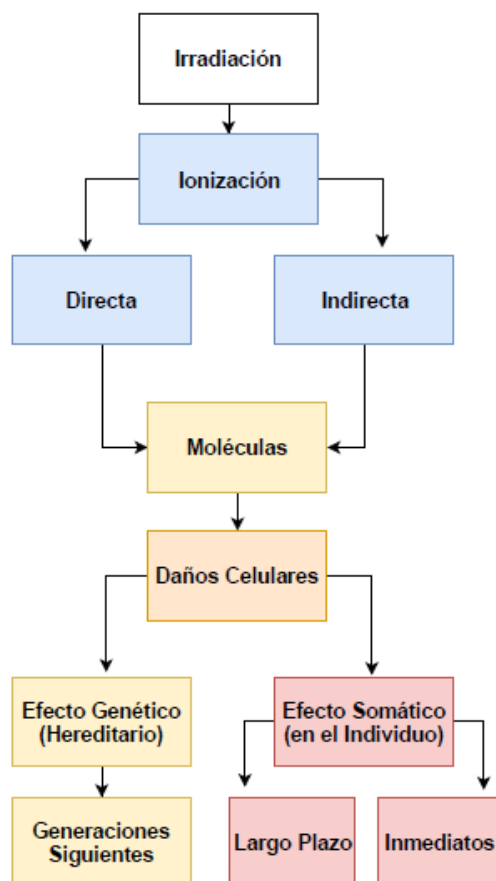


Figura 2. Esquema de afectaciones por radiación.

Adaptado de Gadea, 2010.

2.2.1 Radiosensibilidad

Los efectos para la salud causados por la radiación dependen del área del cuerpo que ha sido expuesta y a la distribución de la dosis en el organismo. La radiosensibilidad se expresa en por las leyes Bergonie y Tribondeau, las cuales indican que una célula es más radiosensible por tres factores:

- Mayor actividad reproductiva
- Número de divisiones que deba realizar la célula
- Menor diferenciación de funciones celulares

Los cromosomas son una de las estructuras que más sufren cambios en su organización por acción de la radiación. Algunos de los cambios estructurales son las roturas simples o dobles. También se producen efectos en el ADN y como consecuencia, presentar mutaciones que pueden variar en alguna función celular la cual puede transmitirse a la descendencia (Alegre N., 2001).

2.3 Radón

El radón es un gas radiactivo de origen natural, se forma a partir de la desintegración del ^{226}Ra . Este gas es responsable de una fracción de la radiación natural que recibe el ser humano ya que existen en el aire una pequeña porción de este elemento. Este fenómeno se denomina “fondo radiactivo” que es el conjunto de radiactividad a la que están expuestos los humanos de manera natural (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 1995).

Este elemento radiactivo, incoloro e inodoro, con un tiempo de vida medio de 3.8 días, pertenece a la cadena de decaimiento del ^{238}U , que puede ser encontrado en rocas y suelo en diferentes condiciones o ambientes como minas, túneles, excavaciones, cuevas y construcciones subterráneas. Al ser un gas inerte, al ser inhalado es exhalado en su totalidad, sin embargo, el radioisótopo de ^{222}Rn , decae de manera que forma otros radioisótopos sólidos que al ser inhalados pueden causar afectaciones, principalmente en los pulmones (Carrillo, Inostrosa, & Rangel, 2015).

El radón es el segundo causante de cáncer pulmonar después del tabaco. Se ha demostrado, mediante estudios epidemiológicos, que existe una convincente asociación entre la exposición al radón y el cáncer pulmonar, sobre todo en

interiores de edificios residenciales. La OMS establece que se deben elaborar programas integrales respecto al radón en los que se analice la calidad del aire en el interior de viviendas o edificaciones para alcanzar el objetivo de reducir la carga para la salud asociada al radón mediante medidas de prevención y protección (Organización Mundial de La Salud, 2015).

El principal problema del radón es que, al ser un elemento presente de forma natural en elementos propios del suelo, se desconoce de su existencia en distintos tipos de edificaciones o formaciones naturales, como las cuevas. Esto causa que las personas estén constantemente en exposición. Al ser un gas, este atraviesa las distintas capas del suelo a través de grietas o poros en lo que se conoce como exhalación de Rn (Figura 3) (Ishimori et al., 2013).

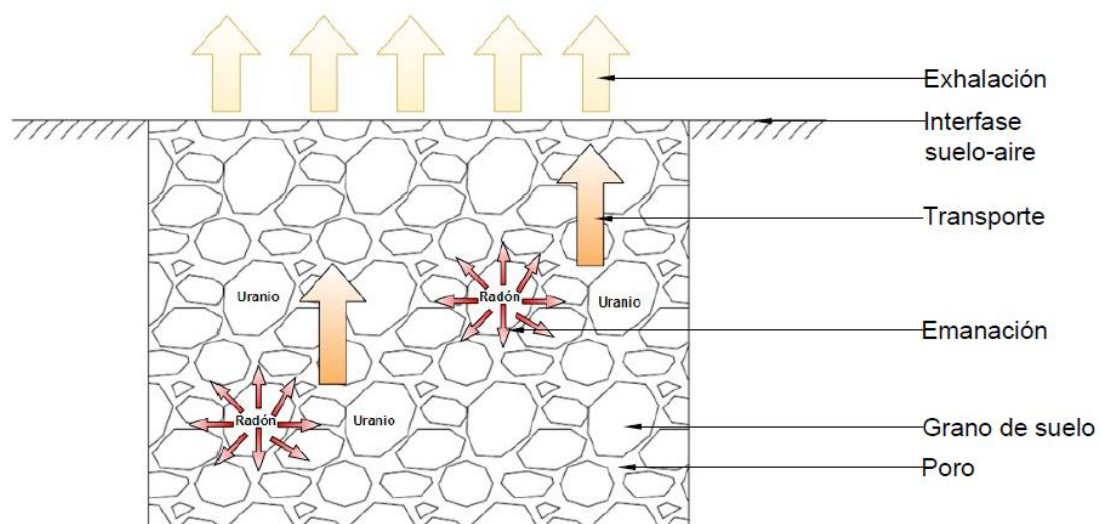


Figura 3. Proceso de exhalación de Rn en el suelo.

Adaptado de Grupo Gestar, 2018.

2.3.1 Formación

Los radioisótopos de radón que se forman naturalmente son el ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{219}Rn , que se forman por el decaimiento alfa de sus padres radio: ^{226}Ra , ^{224}Ra y

^{223}Ra respectivamente. La cadena de decaimiento (Figura 4) empieza en el ^{238}U , un radioisótopo inestable, que decae liberando radiación en cada proceso hasta llegar a su forma más estable como un isótopo de ^{206}Pb (*New Jersey State, 2014*)

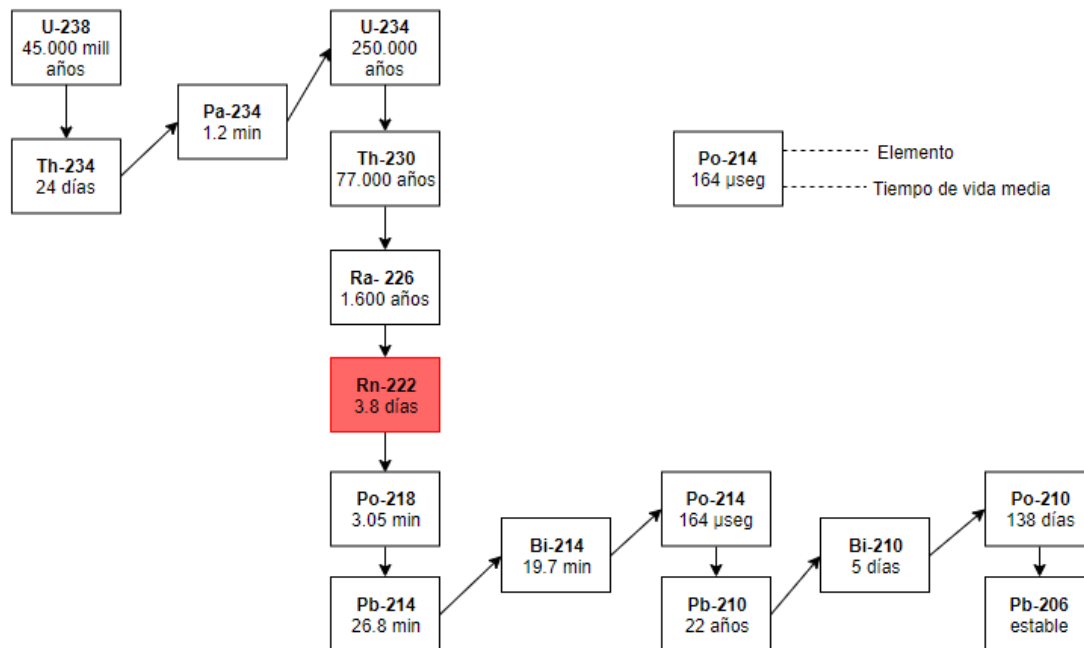


Figura 4. Cadena de decaimiento del ^{238}U .

Adaptado de Science Unit, s.f.

2.3.2 Propiedades

A pesar de que el radón es frecuentemente denominado como un elemento inerte, es un metaloide, un elemento que se ubica de forma diagonal en la Tabla Periódica entre los metales y los no metales y puede presentar características de ambos. Reacciona con compuestos relacionados con el flúor como sales de flúor-nitrógeno o halógenos flúor-metal (Stein, 2009). Este elemento puede disolverse en el agua y se dispersa rápidamente en la atmósfera una vez deja el suelo y entra en contacto con el aire. Como característica atómica, es un átomo pesado y más denso que otros gases naturales, por lo que se acumula más fácilmente en espacios cerrados.

En exteriores, la concentración de radón se ve afectada por condiciones geológicas y meteorológicas. Al ser descendiente del uranio, el radón puede estar presente en la corteza terrestre, y como consecuencia puede ser encontrado en cualquier parte. El tiempo de vida media del radón es corto, siendo de 3.82 días, del radioisótopo ^{222}Rn el mayor (EDP-Sciences, s.f.).

2.3.3 Radón 222 (^{222}Rn)

El radón al ser un producto de decaimiento del ^{238}U , está presente como diferentes radioisótopos (^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn). Sin embargo, debido a la poca concentración y corto tiempo de vida media, los impactos radiológicos del ^{220}Rn y ^{219}Rn son mucho menos significativos que los del ^{222}Rn ya que el tiempo de vida media de estos es de segundos, mientras que del último es de 3.8 días. Esto se traduce en que el tiempo de exposición de las personas a este gas es mayor, además de tener más tiempo de concentrarse en ambientes cerrados (Budnitz, s.f.)

Estudios epidemiológicos confirman que la exposición de mineros en minas subterráneas a ^{222}Rn es un factor determinante para el desarrollo de cáncer pulmonar. La relación dosis-respuesta para la acumulación de ^{222}Rn y sus productos de decaimiento exhibe una tendencia lineal en los estudios realizados a los mineros, lo que sugiere que la exposición a largo plazo, aún a bajas concentraciones, a este radioisótopo en lugares residenciales puede resultar un riesgo para la salud. Esto se debe a numerosos factores, ya que, por su tiempo de vida media, y al ser un gas, la infiltración del mismo puede darse si las condiciones de estructura del suelo y/o de los materiales de construcción es la óptima para su infiltración, así como la temperatura del aire o existencia de sistemas de ventilación y condiciones climáticas (Field et al., 1996).

2.3.4 Geología del Radón

Varios estudios geológicos del radón demuestran cómo las fuentes de uranio y radón están distribuidas en diferentes tipos de rocas y suelos (Tabla 2). Para entender la geología del radón, es necesario empezar con el origen de este, el uranio. Existen rocas que pueden contener fracciones muy pequeñas de uranio. Al romperse estas rocas de manera natural o artificial, este elemento pasa a formar parte del suelo. Existen tipos de rocas que contienen más concentración que otras, como rocas volcánicas, granito, rocas sedimentarias que contienen fosfatos, estas pueden contener hasta concentraciones de 100 ppm (Johnson, s.f.).

En base a lo mencionado, existe una correlación entre la geología del suelo y la concentración de radón, por lo que se pueden generar varios modelos de predicción fundamentándose en el tipo de suelo. Los diferentes tipos de roca tienen su propia identidad radiológica que puede usarse para determinar si cierto tipo de roca puede o no usarse para diferentes aplicaciones, indistintamente de su ubicación (Gundersen, 1993).

Los diferentes tipos de rocas ígneas como granito, pegmatita, toba volcánica y riolita, se forman tras el enfriamiento y solidificación del magma al interior de la tierra. A menudo estas rocas pueden contener elementos radiactivos que se distribuyen dentro de las partículas cristalinas.

Los depósitos de rocas formadas por acumulación (rocas sedimentarias como arcillas, calizas, conglomerados y areniscas) también pueden poseer elementos radiactivos ya que al ser porosas tienden a alojar elementos como U y Th, los que al desintegrarse dan como resultado isótopos de Rn. (Hurley, 2009)

Existen otras rocas, como las metamórfica (mármol, cuarcita, pizarra) y depósitos de fosfatos, que, al formarse a partir de rocas ígneas o sedimentarias, depositan en ellas altas concentraciones de uranio y torio. (Válgoma, 2014)

Tabla 2.

Concentración promedio de radón por tipo de roca.

Roca	Concentración promedio de radón [pCi/L]
Filita	3.2
Rocas ígneas libres de hierro	2.7
Gneis	2.5
Esquito	3.6
Rocas granitoide	2.3
Rocas sedimentarias	2.3
Estrato sedimentario	1.7

Adaptado de Mose, 1998

2.3.5 Radón en Interiores

El principal problema relacionado con el radón es la falta de información referente a la existencia o no de este elemento en el interior de edificaciones o formaciones naturales. Sin embargo, existen varios estudios que determinan que la concentración al interior de formaciones naturales, como cavernas o cuevas, puede ser mucho mayor que en edificaciones. Los diferentes tipos de radioisótopos del radón tienen diferentes tiempos de vida media, el que más perdura es el ^{222}Rn el cual tienen un tiempo de vida media de 3.8 días a diferencia del ^{219}Rn cuyo tiempo de vida media es apenas de 3.9 segundos, por lo que es poco probable encontrar concentraciones elevadas de este radioisótopo en la atmósfera (Cigna, 2012).

2.3.6 Afectaciones a la Salud

Varios estudios epidemiológicos confirman que el radón es uno de los principales causantes de cáncer al pulmón en la población general. Entre un 3% y 14% de los casos de cáncer al pulmón se asocian con el gas, sin embargo, no se conoce una concentración umbral en la que la exposición al radón no represente ningún riesgo. Otras enfermedades asociadas al radón son afectaciones, en menor cantidad, al epitelio bronquial, riñones y médula ósea ya que estos órganos pueden recibir pequeñas dosis. De igual manera, el radón, al disolverse en el agua, si una persona bebe agua con este elemento, podría también afectar al sistema digestivo, en especial el estómago (Organización Mundial de La Salud, 2015).

2.3.7 Medición

La OMS establece que las mediciones de este elemento son fáciles de llevar a cabo, y de preferencia se deben realizar mediciones integradas a largo plazo y así evaluar la concentración en un tiempo determinado, por lo general anual, en el interior de una vivienda o edificación. Existen varios tipos de detectores para realizar las mediciones correspondientes. Los más comunes son:

- **Detectores de gas radón**
 - Detectores de trazas para partículas alfa (DTPA)
 - Detectores de adsorción de carbón activado (DCA)
 - Cámaras iónicas de electreto (CIE)
 - Dispositivos de integración electrónicos (DIE)
 - Monitores continuos de radón (MCR)
- **Detectores especiales de radón y sus productos de desintegración**
 - Dispositivos de medición de torón

- Dispositivos de medición de productos de desintegración de torón y radón
- **Dispositivos de medición de radón en agua**
 - Recuento por centelleo líquido
 - Recuento por desemanación

2.3.8 Detector DurrIDGE RAD7

El detector de radón RAD7 es un equipo de alto rendimiento que es usado ampliamente debido a su simple uso y resistencia (Figura 5). Los resultados generados, son integrados a largo plazo y es altamente sensible a radiación de partículas alfa (Ravikumar & Somashekar, 2017). El RAD7 mide la concentración de gas radón usando un detector sólido de partículas alfa que analiza la espectrometría de este tipo de partículas al decaer (Wang et al., 2019).

Su sistema sofisticado de medición y durabilidad lo hacen idóneo para trabajar en minas, volcanes, cuevas y océanos, sin embargo, por su versatilidad resulta apto para hogares y laboratorios también. Es, además, uno de los detectores con el sistema de computación más simple, con tareas y comandos preprogramados o la habilidad de configurarlo en función de las necesidades. El RAD7 es un dispositivo muy completo que cuenta con bomba de aire, baterías recargables, impresora inalámbrica y conectividad a un PC mediante el software propio *CAPTURE* (XPRT Environmental, s.f.).



Figura 5. Equipo de medición RAD7.

Tomado de DurrIDGE, 2014.

2.4 Normativa

Debido a la peligrosidad de las radiaciones ionizantes, es necesario establecer medidas para garantizar la protección de las personas expuestas. En 1997, la Comisión Internacional de Protección Radiológica establecía normas o guías para reducir el riesgo asociado a la exposición radiológica. El eje central era que solo se debe exponer a una persona si era absolutamente necesario y si las ventajas eran más representativas que las afecciones a la salud. Bajo este eje, se establecieron límites de la dosis efectiva a la que una persona, dependiendo de su condición, puede estar expuesta (Pascual, Ingeniero, Químico, & Carrera, 2001).

En Ecuador existen diferentes acuerdos y reglamentos que controlan las actividades relacionadas con la radiactividad. El Acuerdo Ministerial 283 publicado en el Registro Oficial No. 132 el 23 de julio de 2007, establece las

responsabilidades, requisitos, lineamientos técnicos y procedimientos relacionados con desechos radiactivos en Ecuador. Este acuerdo se basa en los principios de protección a la salud humana y al medio ambiente, así como al control de la generación de desechos radiactivos. En el caso de irradiación por materiales radiactivos de origen natural, el Artículo 31 del Acuerdo Ministerial mencionado, establece que, la dosis efectiva no debe ser mayor a 1 mSv/año para trabajadores ni 0.3 mSv/año para miembros del público (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2007).

3. METODOLOGÍA

3.1 Selección de los lugares analizados

Usando el mapa de radiación ionizante del Ecuador proporcionado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) (Anexo 1) se identificó que en la provincia de Napo existen regiones en las que se realizó mediciones en un rango de 0.73 a 1.85 mSv/año. De igual manera, mediante mapas geológicos (Anexo 2) obtenidos en el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador (INIGEMM) se determinó que en la misma provincia existen áreas con distintas características geológicas sujetas al estudio.

Se realizó un recorrido por las principales localidades del Cantón Archidona, provincia de Napo y mediante consulta de los habitantes se ubicaron los establecimientos que poseían cuevas como parte de los servicios que prestaban (Figura 6). Una vez seleccionados los lugares se contactó con los responsables del lugar para acordar una reunión con la finalidad de abordar los objetivos del estudio a realizar y la metodología que se aplicaría. Las visitas a las cuevas se realizaron el día 21 de abril de 2019. Se obtuvo la autorización para realizar los

estudios en las cuevas seleccionadas y acordar las fechas para realizar las mediciones.

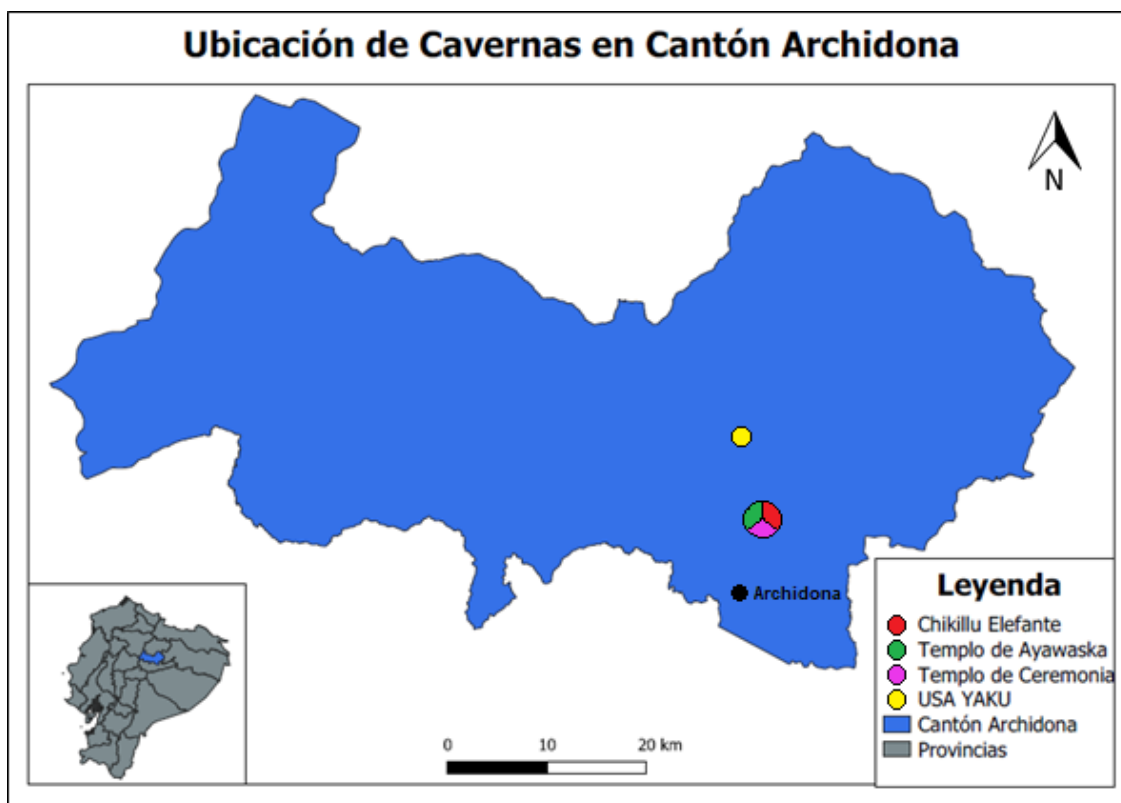


Figura 6. Puntos de ubicación de cavernas en el Cantón Archidona

3.2 Descripción de los lugares analizados

3.2.1 Caverna USA YAKU

La caverna del establecimiento turístico USA YAKU, se encuentra ubicada entre las poblaciones de Jondachi y Cotundo, en el cantón Archidona. Es una caverna epigenética o secundaria que se encuentra a aproximadamente 580 m.s.n.m destinada principalmente al turismo ya que cuenta con estalactitas y estalagmitas de gran tamaño con llamativas formas, varias especies de murciélagos y arácnidos. De igual manera presenta gran cantidad de arcilla al

interior que se usa como agente medicinal según las creencias locales. Es una cueva con un largo de 131 metros aproximadamente formada por tres cámaras conectadas entre sí por pasadizos. No posee salida al final sino canales más angostos a los que no acceden los turistas, por lo tanto, para salir, es necesario retornar.

3.2.2 Cavernas Chikillu Elefante y Templo de Ceremonia

Es un complejo conformado por 2 establecimientos: Chikillu Elefante y Templo de Ceremonia que cuenta con 3 cavernas. Se encuentran en la misma ubicación geográfica, a 5 minutos de la localidad de Mondayacu, en el Cantón Archidona. Son cuevas secundarias que se encuentran aproximadamente a 577 m.s.n.m.

3.2.2.1 Caverna Chikillu Elefante

Este complejo consta de dos cavernas: Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska. Chikillu Elefante es una cueva mayormente subterránea que consta de un pasadizo largo y angosto cuyo recorrido toma en promedio 45 minutos ya que para atravesarlo es necesario escalar y nadar en algunos tramos debido a la presencia de un pequeño río subterráneo. Al finalizar el pasadizo se llega a una cámara que se conecta con la salida a través de otro pasadizo más corto.

La Caverna Templo de Ayawaska es una cueva pequeña, a la cual se accede por un pasadizo angosto a nivel del suelo y la parte superior descubierta. El trayecto es corto y el destino final es la cueva donde principalmente se realizan actos religiosos. No cuenta con salida al final de la cueva.

3.2.2.2 Caverna Templo de Ceremonia

Es una caverna secundaria, mayormente subterránea de aproximadamente 105 metros. Cuenta con dos cámaras principales, una de ellas posee un río subterráneo y a la que hay que acceder atravesando un pasadizo angosto. El uso principal de esta caverna es la realización de ritos ancestrales que se realizan en la cámara principal de la misma. Sin embargo, los turistas también se acceden por la presencia del río subterráneo y de estalactitas y estalagmitas de gran tamaño. Al finalizar el recorrido, existe una pequeña cascada (Anexo 22), y tras esta, la salida de la cueva. Posee una ventilación considerable debido a que posee salidas de aire a lo largo de la cueva.

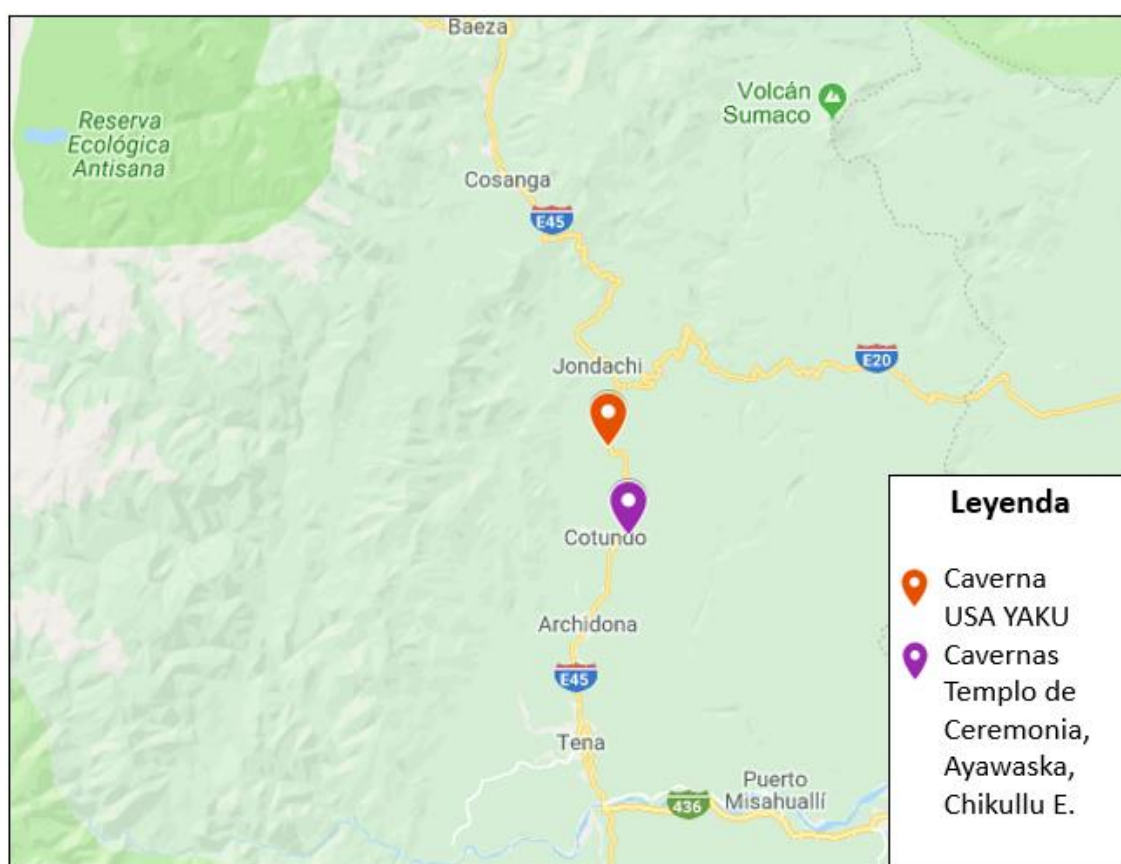


Figura 7. Ubicación de las cavernas analizadas.

Adaptado de Google Maps, 2019.

3.3 Selección de los Puntos de Monitoreo

De acuerdo con el manual del equipo de medición RAD7, se debe ubicar el equipo en un lugar donde las personas permanezcan la mayor parte del tiempo, y en áreas espaciosas donde se permita el acceso a más de una persona al mismo tiempo. Se debe ubicar el RAD7 cerca del centro de la cámara, a aproximadamente un metro arriba del piso. Evitar las paredes, aberturas, corrientes de aire, y la luz directa del sol (Durridge, 2014). Se determinó el tiempo de permanencia en las cuevas realizando el recorrido habitual que efectúan los turistas en el interior de estas. Con la ayuda de un cronómetro se midió el tiempo en cada una de las cámaras, los pasadizos y el tiempo que toma salir de la caverna. Una vez identificados los puntos de mayor permanencia, se buscó un sitio con las características descritas en el manual y se midió la distancia aproximada del punto a la entrada de la cueva para tener una referencia de la ubicación de este.

Los tiempos de permanencia y puntos de monitoreo en cada cueva están resumidos en las Figuras 8, 9, 10 y 11 y en las Tablas 3, 4, 5 y 6.

Caverna USA YAKU

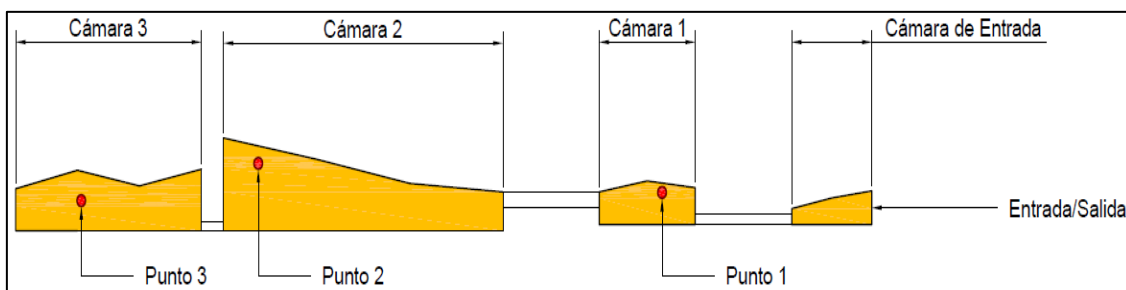


Figura 8. Esquema de caverna y puntos de monitoreo seleccionados

Tabla 3.

Tiempos de permanencia en puntos de monitoreo en caverna USA YAKU

Caverna USA YAKU			
Lugar	Tiempo	Punto de Monitoreo	Distancia a Entrada
Cámara de entrada	15 minutos		
Cámara 1	30 minutos	Punto 1	32 m
Cámara 2	40 minutos	Punto 2	94 m
Cámara 3	45 minutos	Punto 3	122 m
Regreso	20 minutos		
Total	2.5 horas		

Caverna Templo de Ceremonia

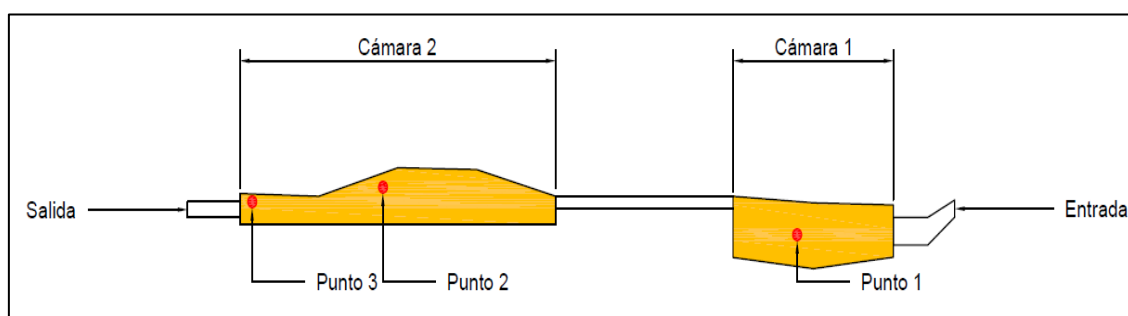


Figura 9. Esquema de caverna y puntos de monitoreo seleccionados

Tabla 4.

Tiempos de permanencia en puntos de monitoreo en caverna Templo de Ceremonia

Caverna Templo de Ceremonia			
Lugar	Tiempo	Punto de Monitoreo	Distancia a Entrada
Cámara 1	40 minutos	Punto 1	24 m

Cámara 2	30 minutos	Punto 2	88 m
		Punto 3	108 m
Trayecto entre cámaras	5 minutos		
Salida	10 minutos		
Total	1 h 25 min		

Caverna Chikillu Elefante

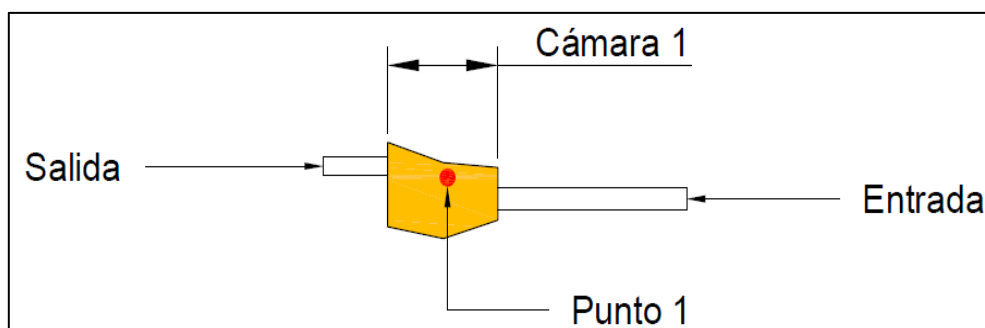


Figura 10. Esquema de caverna y puntos de monitoreo seleccionados

Tabla 5.

Tiempos de permanencia en puntos de monitoreo en caverna Chikillu Elefante

Caverna Chikillu Elefante			
Lugar	Tiempo	Punto de Monitoreo	Distancia a Entrada
Pasadizo	45 minutos		
Cámara 1	20 minutos	Punto 1	19 m
Salida	5 minutos		
Total	1 h 10 min		

Caverna Templo de Ayawaska

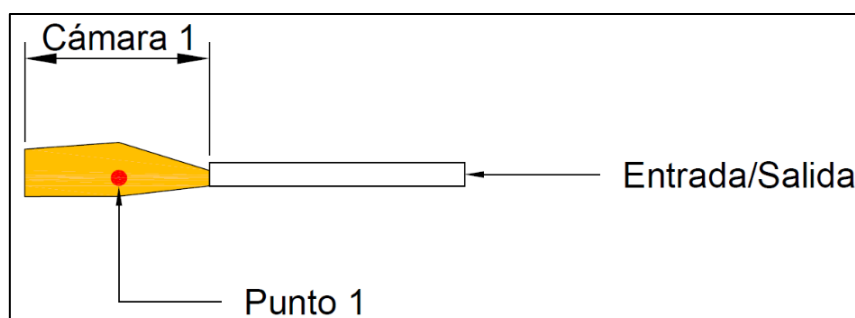


Figura 11. Esquema de caverna y puntos de monitoreo seleccionados

Tabla 6. *Tiempos de permanencia en puntos de monitoreo en caverna Templo de Ayawaska*

Caverna Templo de Ayawaska			
Lugar	Tiempo	Punto de Monitoreo	Distancia a Entrada
Pasadizo	5 minutos		
Cámara 1	30 minutos	Punto 1	7 m
Salida	5 minutos		
Total	35 min		

3.4 Concentración de radón y dimensionamiento de cuevas

Las mediciones se realizaron entre el 6 y el 17 de mayo en las 4 cavernas seleccionadas para el estudio. Para la concentración se usó el equipo RAD7 fabricado por DurrIDGE proporcionado por el Laboratorio de Análisis de Radioactividad de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables.



Figura 12. Equipo RAD7 ubicado en cueva USA YAKU para medición

3.4.1 Dimensionamiento de las cuevas

Con la finalidad de graficar los esquemas de cada cueva y de conocer las distancias de cada punto de medición y las dimensiones de las cuevas analizadas (Anexos 3, 4, 5, 6, 7 y 8), se usó un flexómetro Truper de 50 metros y un medidor láser marca Bosch (GLM-50). Para determinar el largo de cada cámara y pasadizo, se utilizó el flexómetro. Se tomó como puntos de referencia las entradas a cada cámara o pasadizo y se dividió el largo obtenido en secciones iguales de las cuales se tomaría la altura y el ancho utilizando el medidor láser.



Figura 13. Medición del largo de la cámara de entrada de la cueva USA YAKU

3.4.2 Medición de la concentración de radón

Una vez seleccionados los puntos de monitoreo, se instaló el equipo (RAD7) en los lugares escogidos. Este equipo es sumamente exacto para la medición de radón y requiere cerca de 2 horas para realizar una medición completa de este gas en el aire (Nemangwele, 2005). De acuerdo con el manual del equipo, entre más tiempo se realice la prueba de medición, los resultados tendrán una menor incertidumbre (Durrige, 2014). Debido a las constantes variaciones de humedad, temperatura y velocidad del viento al interior de la cueva, se realizaron varias pruebas de 2 y 3 horas en cada punto, procurando realizar las pruebas en la mañana y noche.

Para realizar cada prueba se debe configurar el RAD7 para su correcto funcionamiento. El procedimiento de configuración realizado fue el siguiente:

- a) Cargar el equipo 48 horas antes de realizar la primera medición.

- b) Ubicar el equipo en el sitio seleccionado.
- c) Conectar mediante el tubo, la unidad de secado de gas con el filtro, el cual se conecta a la entrada (*input*) del RAD7.
- d) Ubicar la impresora de tal manera que los puertos infrarrojos de esta y del RAD7 estén alineados.
- e) Purgar el equipo por 20 minutos. El objetivo es limpiar el interior del dispositivo del aire residual de mediciones anteriores y el de disminuir la humedad relativa al interior del equipo, ya que para obtener datos más exactos el índice máximo de humedad relativa debe ser 10%.
- f) Configurar el protocolo (duración del ciclo y número de reciclados).
- g) Realizar la prueba.
- h) Apagar y guardar todos los elementos utilizados.

Nota: Para conservar el correcto funcionamiento de las baterías del equipo, es importante procurar que el nivel de carga de estas no esté por debajo de los 6.00 V.

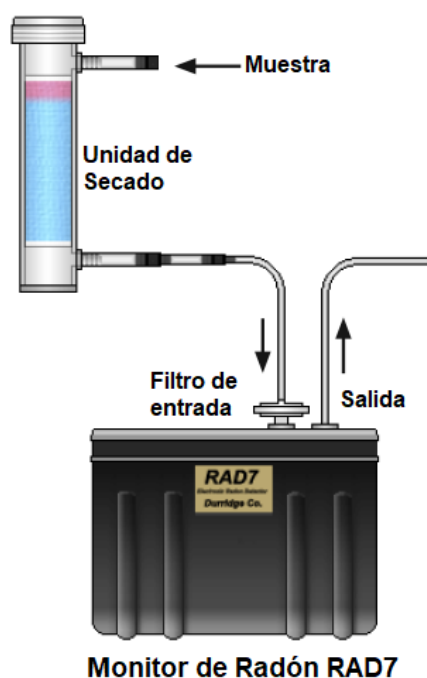


Figura 14. Configuración normal del equipo para realizar una medición. Adaptado de DurrIDGE, 2014.


```

Current settings
TUE 07-MAY-19 09:19

Protocol: (None)
Cycle: 00:15
Recycle: 12
Mode: Auto
Thoron: .Off
Pump: Auto
Tone: Geiger
Format: Med
Units: Bq/m3 °C

```

Figura 15. Encabezado de medición.

a) Datos con las configuraciones para la prueba realizada.

3.4.2.1 Cueva USA YAKU

En la cueva USA YAKU se identificaron 3 puntos principales (Figura 8) en donde se realizaban paradas largas (Tabla 3) para realizar diferentes actividades al interior. Se excluyó de la medición a la cámara cerca de la entrada ya que, según el manual del fabricante, la medición debe realizarse en lugares donde no exista ventilación ni luz solar excesiva.

Se realizaron 3 mediciones por punto debido a la facilidad de transporte y de instalación del equipo al interior. Se procuró que las mediciones se realicen en la mañana, en la tarde y en la noche para tener datos de la concentración de radón a lo largo del día.

Tabla 7.

Duración de las pruebas realizadas en la caverna USA YAKU

Duración de la Medición					
Punto	Fecha	Hora de inicio	Tiempo de ciclos (min)	Núm. de reciclados	Duración de la prueba (h)
P1	6/05/2019	22:20	15	12	3

	7/05/2019	09:19	15	12	3
		13:04	15	12	3
P2	7/05/2019	20:02	15	8	2
	8/05/2019	09:59	15	12	3
		13:38	15	12	3
P3	8/05/2019	19:29	15	12	3
	9/05/2019	10:07	15	12	3
		14:03	15	12	3

3.4.2.2 Cueva Templo de Ceremonia

En esta cueva se identificaron 3 puntos de monitoreo (Figura 9). El primero al inicio de la caverna, en la primera cámara. En esta se realizan ritos ancestrales por lo que la permanencia era variable, sin embargo, en un recorrido habitual, el tiempo es de 40 minutos. Cuando se realizan estos ritos la permanencia puede variar de 5 a 8 horas. Los dos puntos de monitoreo siguientes quedan en la cámara continua, que, al ser una cámara larga, se divide en 2 paradas, una aproximadamente en la mitad, y la última al finalizar el recorrido en una cascada al interior de la cueva (Tabla 4). En los puntos de monitoreo 2 y 3, la instalación del equipo tuvo que adaptarse a las condiciones de la cueva ya que en este tramo existe un río (Anexo 20) y la ubicación del equipo debía ser adecuada para que no se moje y afecte su funcionamiento.

Las mediciones en esta cueva se efectuaron entre el 13 y 16 de mayo y se realizaron 2 mediciones en cada punto, procurando que sean en la mañana y en la tarde.

Tabla 8.

Duración de las pruebas realizadas en la caverna Templo de Ceremonia

Duración de la Medición					
Punto	Fecha	Hora de inicio	Tiempo de ciclos (min)	Núm. de reciclados	Duración de la prueba (h)

P1	13/05/2019	20:23	15	12	3
	14/05/2019	08:42	15	12	3
P2	14/05/2019	20:50	15	12	3
	15/05/2019	09:40	15	12	3
P3	15/05/2019	19:27	15	12	3
	16/05/2019	09:55	15	12	3

3.4.2.3 Cueva Chikillu Elefante

La cueva estudiada poseía solo una cámara grande, el resto es un pasadizo subterráneo que a pesar de que el recorrido dura 45 minutos, los turistas solo se detienen pocos minutos a descansar. Se seleccionó solo un punto de monitoreo (Figura 10) en el cual se realizaron 2 mediciones, una en la tarde y otra en la noche.

Tabla 9.

Duración de las pruebas realizadas en la caverna Chikillu Elefante

Duración de la Medición					
Punto	Fecha	Hora de inicio	Tiempo de ciclos (min)	Núm. de reciclados	Duración de la prueba (h)
P1	14/05/2019	13:11	15	12	3
	14/05/2019	16:47	15	12	3

3.4.2.4 Cueva Templo de Ayawaska

Esta pequeña cueva cuenta con un recorrido y tiempo de permanencia corto, los turistas solo asisten a realizar ritos ancestrales de poca duración. Al ser una caverna pequeña, en donde los turistas no permanecen más de 30 minutos, se realizó una medición (Figura 11) de 5 horas continuas procurando que abarquen la tarde y noche.

Tabla 10.

Duración de las pruebas realizadas en la caverna Templo de Ayawaska

Punto	Fecha	Duración de la Medición			Duración de la prueba (h)
		Hora de inicio	Tiempo de ciclos (min)	Núm. de reciclados	
P1	15/05/2019	14:01	15	20	5

3.4.3 Recolección de Muestras de Rocas

La recolección de rocas se realizó paralelamente a la medición de la concentración en cada cámara (Figuras 8, 9, 10 y 11). Se procuró recolectar rocas de distintas características que estuvieran, de ser posible, incrustadas en las paredes de la cueva. Para el almacenamiento se usaron bolsas zip-lock debidamente etiquetadas con el nombre de la cueva y el punto de recolección.



Figura 16. Muestras recolectadas al interior de las cavernas

3.4 Estimación de Dosis Efectiva

Para estimar la dosis efectiva se usó la ecuación recomendada por la UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee's Publication on the Effects of Atomic Radiation*) que sirve para calcular la dosis efectiva anual por exposición al radón (Ravikumar & Somashekar, 2017). Se determinó el tiempo de permanencia de los guías en base a los tiempos obtenidos en el capítulo 3.3 y en la información del número de recorridos y la frecuencia de estos que proporcionó el personal de los establecimientos. La ecuación usada fue la siguiente:

$$HE = CRn * F * T * DCF$$

Donde:

H_E	Tasa de dosis efectiva [mSv/año]
CRn	Media aritmética de concentración de radón [Bq/m ³]
F	Factor de equilibrio típico usado en interiores (0.4)
T	Tiempo de ocupación anual (estimación de horas al año de ocupación)
DCF	valor de conversión de la concentración de radón equilibrio – equivalente a dosis efectiva (9 nSv/Bq h m ⁻³)

Los resultados del tiempo de permanencia anual se obtuvieron realizando la estimación con los datos mencionados. Se estableció que, los fines de semana son los días que más asisten turistas a las cuevas. De los 52 fines de semana al año, asisten en promedio 40 de estos y se realizan 2 recorridos por semana. Para determinar el tiempo de ocupación anual T [horas/año] se estableció la siguiente ecuación:

$$T \frac{h}{año} = \frac{FDS}{año} * \frac{R}{FDS} * TDR \frac{h}{recorrido}$$

Donde:

<i>T</i>	Tiempo de ocupación anual
<i>FDS</i>	Fines de semana promedio al año en los que se realiza recorridos
<i>R</i>	Números de recorridos realizados cada fin de semana
<i>TDR</i>	Tiempo promedio de cada recorrido por la cueva

Se calculó la tasa de dosis con el promedio de las mediciones en cada punto, así como con el promedio general de la cueva, datos obtenidos mediante el software *CAPTURE* (Anexo 25) de la empresa fabricante del RAD7. Como límite máximo permisible se usó 1 mSv/año descrito en el Acuerdo Ministerial 283 del MEER aplicable para trabajadores. No se usó el límite para el público general (0.3 mSv/año) ya que el estudio realizado se centra en el personal que trabaja en las cuevas por permanecer significativamente más tiempo al interior, y como resultado estar más expuestos a la contaminación radiactiva.

3.5 Caracterización de Rocas

Debido a la formación geológica Napo, la mayoría de las rocas son de tipo calizas fosilíferas (grises a negras) entremezcladas con areniscas calcáreas y lutitas negras y con bituminosos (Jaramillo, 2000). Para determinar si las rocas obtenidas son sedimentarias, compuestas por carbonato de calcio (CaCO_3) o calizas, formadas por calcita se añade una cantidad pequeña de ácido clorhídrico [1 N] (HCL) en la roca. Si se evidencia que efervesce (se desprenden burbujas de dióxido de carbono) (Figura 15), macroscópicamente se podría clasificar como caliza (Carmelo, Jaraba, Rojas Martinez, & Gomez, 2014).



Figura 17. Serie de pruebas realizadas con HCl en diferentes rocas

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Rocas encontradas al interior de las cavernas

En las cavernas analizadas se recolectaron varias muestras en cada cámara donde se realizaron los monitoreos. Las rocas encontradas coinciden con las descritas en el Léxico Estratigráfico mencionado en la metodología, siendo la mayoría rocas calizas de varios tipos y conglomerados de varios materiales.



Figura 18. Calizas encontradas en el P1 de la cueva USA YAKU



Figura 19. Rocas calizas recolectadas del P2 de la caverna USA YAKU



Figura 20. Calizas recolectadas en el P3 de la caverna USA YAKU



Figura 21. Rocas sedimentarias bituminosas encontradas en el P1 de la caverna Templo de Ceremonia



Figura 22. Calizas bituminosas recolectadas en el P3 de la caverna Templo de Ceremonia



Figura 23. Conglomerados recolectados del P3 de la caverna Templo de Ceremonia



Figura 24. Diferentes tipos de roca caliza recolectados en la caverna Chikillu Elefante



Figura 25. Rocas sedimentarias recolectadas en la cueva Templo de Ayawaska

4.2 Concentración de radón

4.2.1 Cavernas USA YAKU

En la Tabla 11 se puede observar que la concentración promedio en la cueva, de 3500 Bq/m^3 , sobrepasa el nivel de referencia recomendado por la OMS y la Unión Europea de 300 Bq/m^3 , sin embargo, estos niveles están dirigidos a la prevención y mitigación de problemas relacionados con el radón al interior de viviendas. Al tratarse de una cueva no habitada, no existe ninguna referencia a niveles máximos, no obstante, al realizarse actividades turísticas al interior de la cueva, se deben tomar en cuenta el tiempo que se permanece en ellas, en especial los guías o personal que trabaje en estas cuevas. La concentración máxima de 12008 Bq/m^3 se midió en el Punto 3, la mínima de 22.2 Bq/m^3 fue medida en el Punto 1.

Se realizaron varias mediciones a lo largo del día en cada punto. Las Figuras 27 y 28 evidencian un aumento en la concentración del gas en la tarde, entre las 15:00 y 16:00. Estos resultados concuerdan con estudios realizados por Podstawczyńska A. (2015) y G. V. Ashok, N. Nagaiah y N. G. Shiva Prasad (2010) en interiores, en los cuales describen una tendencia similar. En la Figura 26 se observa que la concentración, a diferencia de los otros puntos, disminuye drásticamente en el mismo rango de horas. Esto se debe a que la medición en el punto P1 fue la más cercana a la entrada en donde existe mayor ventilación, y el gas puede salir de la cueva con más facilidad.

Tabla 11.

Concentración de radón al interior de la caverna USA YAKU.

Caverna USA YAKU					
Punto de Monitoreo	Concentración Máxima [Bq/m³]	Concentración Mínima [Bq/m³]	Concentración Promedio [Bq/m³]	Temperatura Promedio del Aire [°C]	Dist. del Punto a Entrada [m]
P1	6650	22.2	1200	22.7	32
P2	9370	311	2673	22.6	94
P3	12008	422	6379	22.6	122
General	12008 (P3)	22.2 (P1)	3500	22.6	

Nota: "General" hace referencia a toda la cueva. Datos obtenidos usando el programa CAPTURE de DurrIDGE.

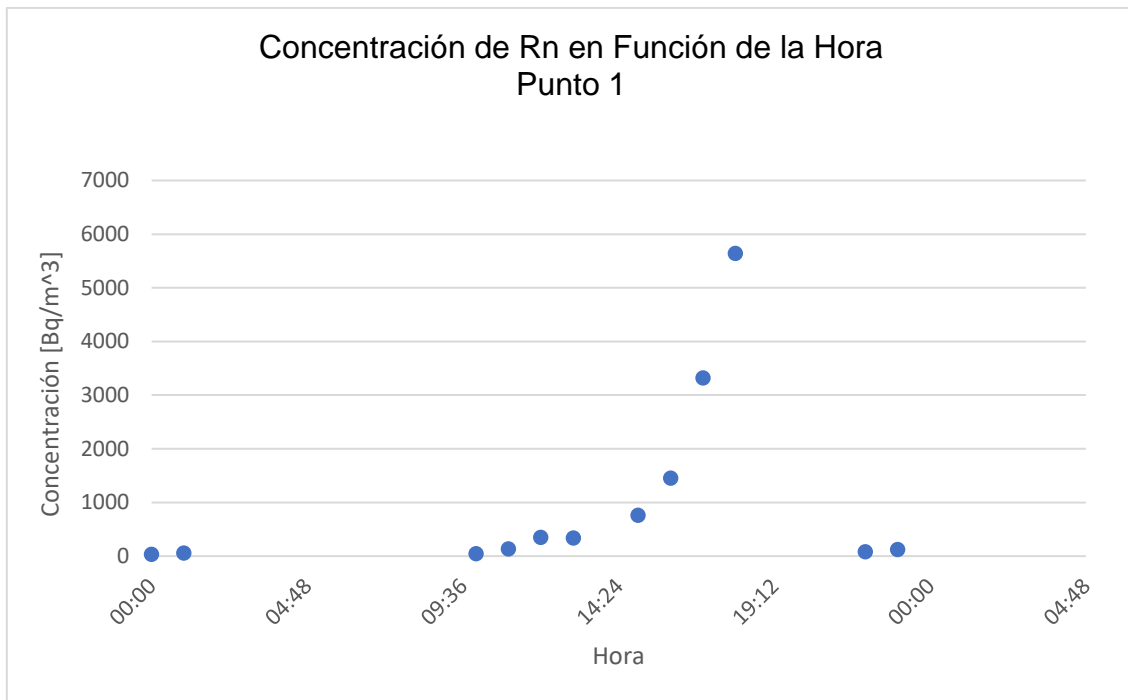


Figura 26. Concentración de radón en función de la hora en el P1.

En la Figura 26 se puede observar la concentración medida a lo largo del día en intervalos de tres horas cada medición. La concentración mínima de 22.2 Bq/m³ se obtuvo a las 23:00 y la máxima de 6650 Bq/m³ a las 19:00. Se evidencia que en las horas de la mañana y tarde la concentración desciende en comparación con la de la tarde. Esta variación se debe a la proximidad del punto de monitoreo a la entrada lo que causa una fluctuación en la temperatura, a menor temperatura, el aire frío impide que el radón exhale de las rocas por lo que la concentración disminuye (Przylibski, 1999).

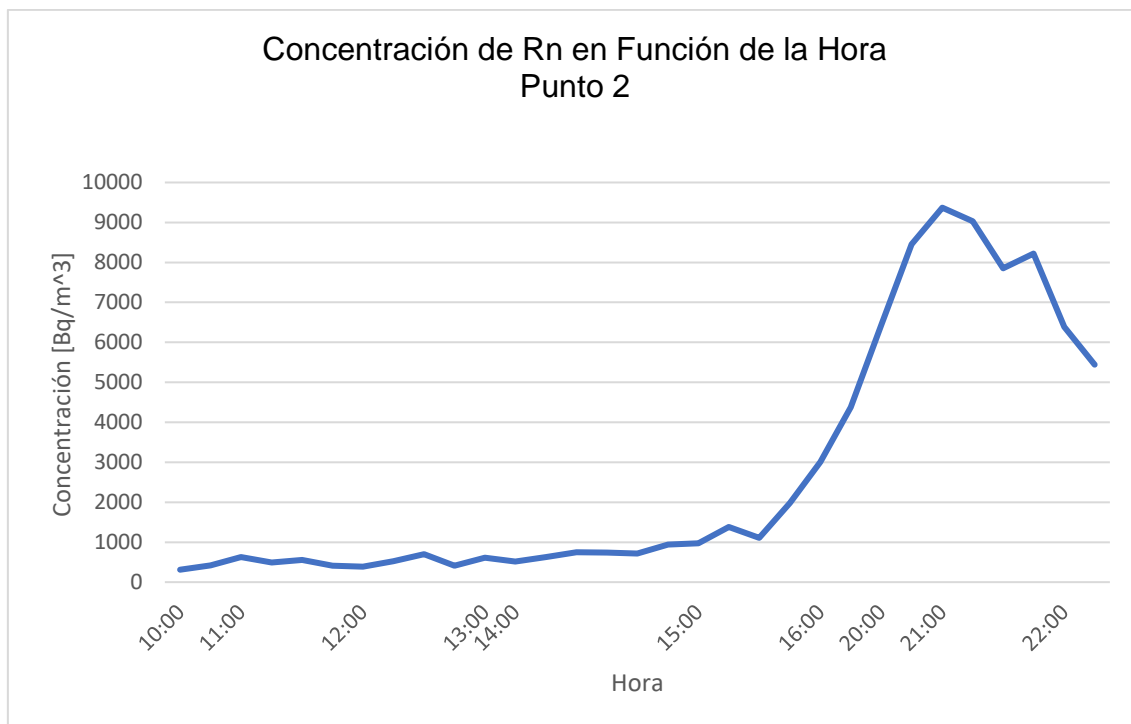


Figura 27. Concentración de radón en función de la hora en el P2



Figura 28. Concentración de radón en función de la hora en el P3

En las Figuras 27 y 28 se puede observar que la concentración aumentaba en las noches y disminuía en las mañanas, siendo la concentración máxima 12008 Bq/m³ medido en el punto P3 a las 17:00 y la mínima 311 Bq/m³ en el punto P2 a las 10:00. Debido a que se presentó lluvia en las horas de la mañana, puede asociarse la disminución de la concentración en estas horas ya que la lluvia puede aumentar el nivel freático, lo cual es un factor que afecta la exhalación del radón debido al efecto de limitación (*capping effect*) (Podstawczyńska, 2015).

Las mediciones se hicieron en los puntos de monitoreo seleccionados en función a las características mencionadas en el capítulo 3.3. En la Figura 29 se puede observar la tendencia de la concentración a ser mayor al estar más alejado de la entrada el punto de monitoreo. En el caso del P1, a 32 metros de la entrada la concentración promedio medida fue de 1200 Bq/m³ y a 122 metros de 6379 Bq/m³. En estudios realizados por Wang Y., Luo W., Zeng G. y Wang Y. en la cueva Shawan ubicada al suroeste de China, se explica que esto se debe a que en la entrada existe un mayor intercambio de aire entre el exterior e interior de la cueva, cambiando así la temperatura (Wang et al., 2019). Los cambios de presión son también más evidentes en la entrada por lo que, al estar más cerca del ingreso, existe mayor flujo de aire. El punto P3, al estar más alejado no presenta esta interacción con el exterior, además, el radón al ser un gas tiende a concentrarse más en ambientes cerrados.

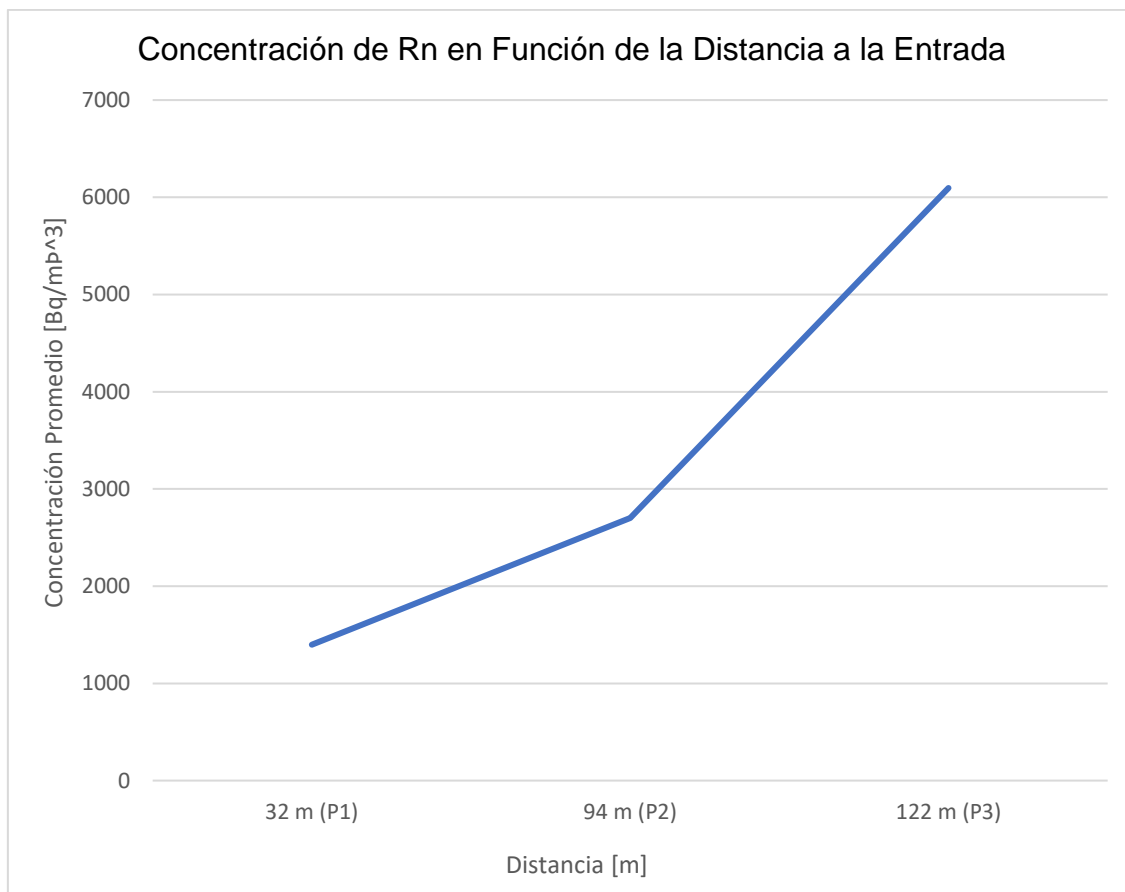


Figura 29. Concentración de radón en función de la distancia del punto de monitoreo a la entrada en la cueva USA YAKU

4.2.2 Caverna Templo de Ceremonia

En las concentraciones descritas en la Tabla 12 se puede observar que los niveles de concentración promedio, 69.6 Bq/m^3 , no superan los recomendados por la OMS y la UE. La concentración máxima medida fue de 199 Bq/m^3 en el punto P3 de la caverna y la mínima de 11 en los tres puntos medidos. Se puede vincular las bajas concentraciones con la mayor ventilación que existe en la cueva (ver capítulo 3.2.1.2). De igual manera, al existir un río subterráneo, este impide la exhalación del radón al aire, además, como explica Michael Kitto en su publicación, “*Radon in Water*”, este elemento es soluble en agua, por lo tanto, la existencia del río en el interior puede relacionarse con las bajas concentraciones medidas (Makinde-Odusola, 2005).

Tabla 12.

Concentración de radón al interior de la caverna Templo de Ceremonial.

Caverna Templo de Ceremonia					
Punto de Monitoreo	Concentración Máxima [Bq/m³]	Concentración Mínima [Bq/m³]	Concentración Promedio [Bq/m³]	Temperatura Promedio del Aire [°C]	Dist. del Punto a Entrada [m]
P1	122	11	50	22.8	24
P2	154	11	76	23.1	88
P3	199	11	81	23.0	108
General	199 (P3)	11	69.6	23.0	

Nota: "General" hace referencia a toda la cueva. Datos obtenidos usando el programa CAPTURE de Durrige.

Las Figuras 30, 31, 32 describen la concentración medida a lo largo del día en los diferentes puntos de monitoreo. La concentración mínima de 11 Bq/m³ en los tres puntos fue medida en las horas de la mañana. La máxima, en el punto P3 de 199 Bq/m³.

A diferencia de la Caverna USA YAKU, las concentraciones varían ampliamente a lo largo del día, esto se debe, como se mencionó anteriormente, a que presenta una mayor ventilación al interior.

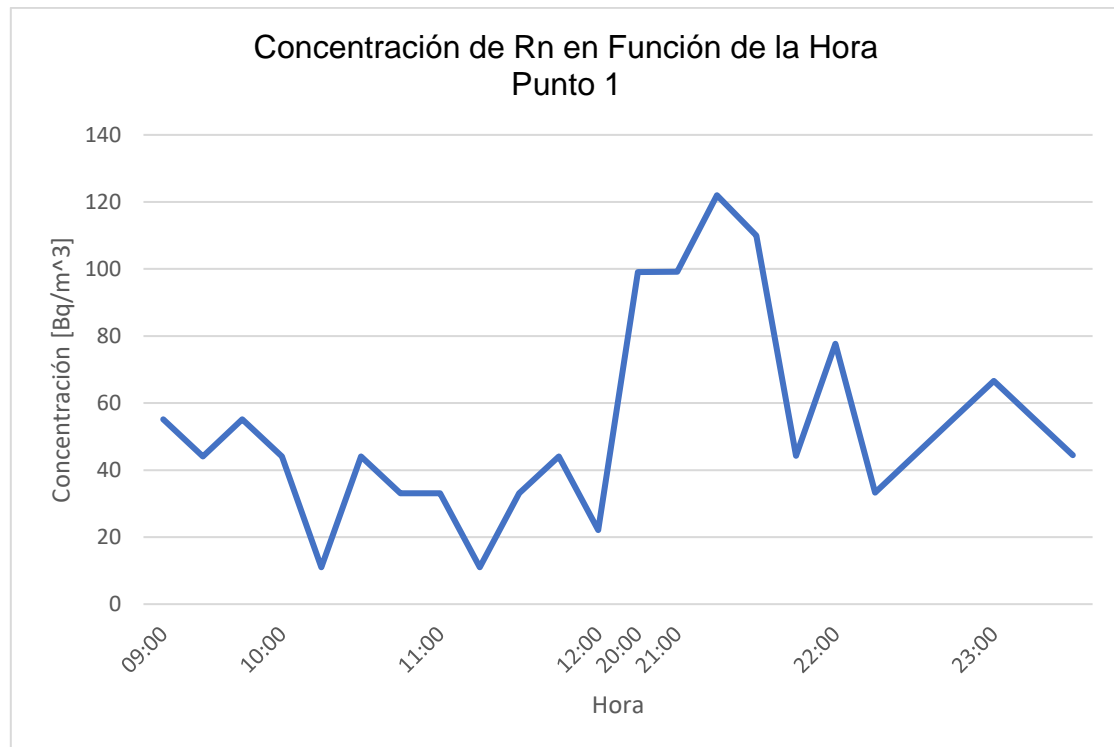


Figura 30. Concentración de radón en función de la hora en el P1

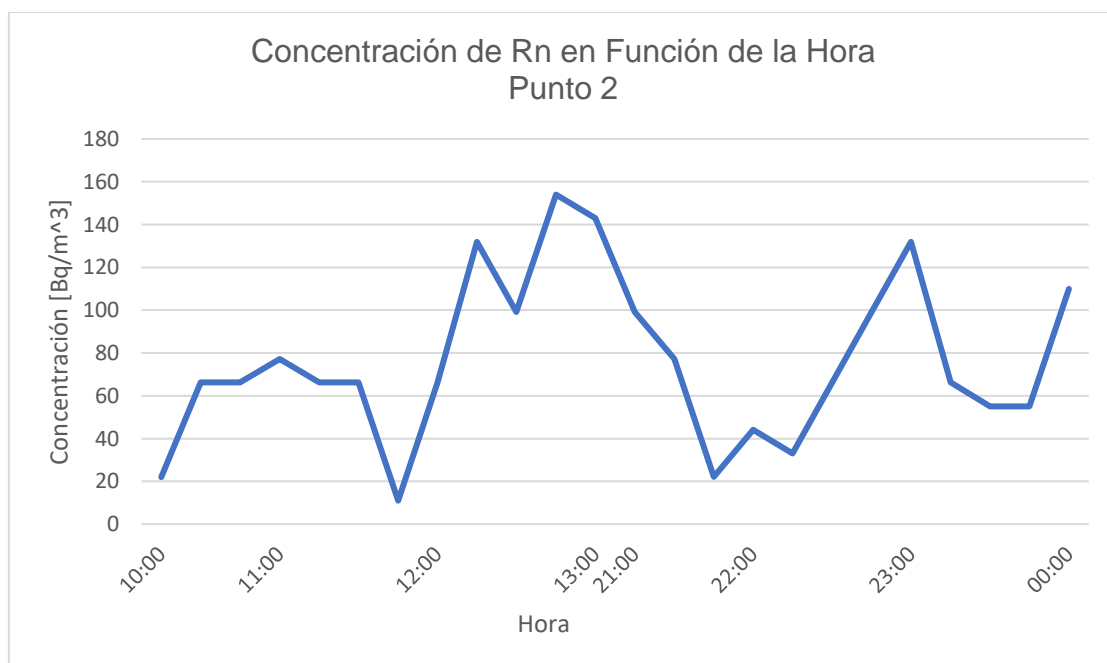


Figura 31. Concentración de radón en función de la hora en el P2

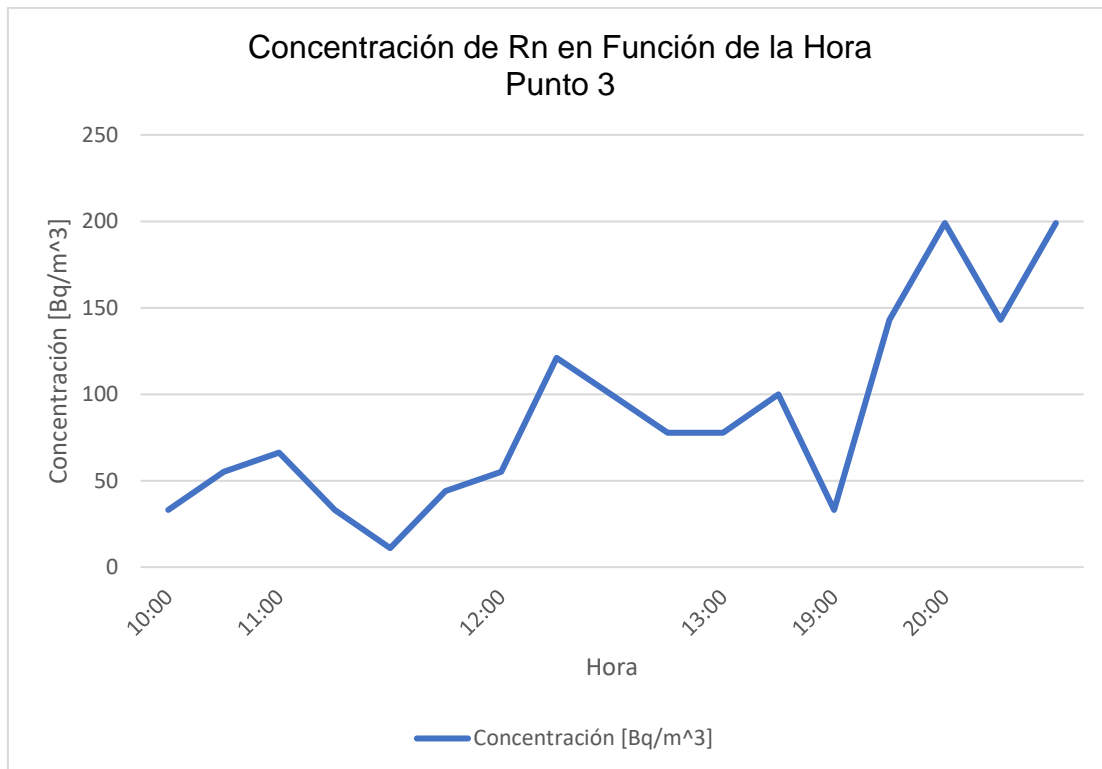


Figura 32. Concentración de radón en función de la hora en el P3

Al igual que la caverna USA YAKU, la concentración era mayor a medida que se profundizaba al interior de la cueva como se puede observar en la Figura 33. La concentración máxima, medida a 108 metros de la entrada fue de 199 Bq/m³.

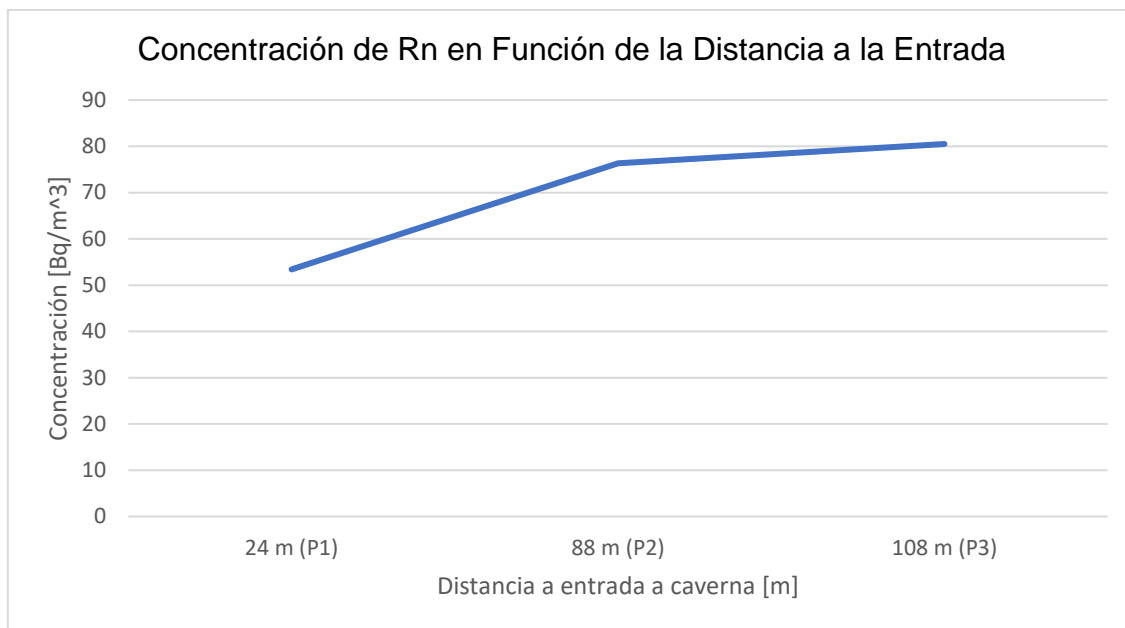


Figura 33. Concentración de radón en función de la distancia del punto de monitoreo a la entrada en la cueva Templo de Ceremonia

4.2.3 Caverna Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska

En la Tabla 13 de las Cavernas Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska, se puede observar que las concentraciones obtenidas no superan tampoco los límites establecidos por la OMS y la UE al ser menores a 300 Bq/m³. En estas cuevas tampoco se permanece un tiempo considerable por lo que no se considera que exista riesgo de afectación a la salud debido al radón. La concentración máxima de 287 Bq/m³ se midió en la caverna Chikillu Elefante entre las 18:00 y 19:00 (Figura 34). En la caverna Templo de Ayawaska la concentración máxima fue de 55.1 Bq/m³ (Figura 35).

Tabla 13.

Concentración de radón al interior de las cavernas Templo de Ayawaska y Chikillu Elefante.

Cueva	Concentración Máxima [Bq/m ³]	Concentración Mínima [Bq/m ³]	Concentración Promedio [Bq/m ³]	Temperatura Promedio del Aire [°C]	Dist. del Punto a Entrada [m]
Templo Ayawaska	55.1	11	28.1	22.7	7
Chikillu Elefante	287	44.4	139	23.2	19

Nota: Datos obtenidos usando el programa CAPTURE de DurrIDGE.

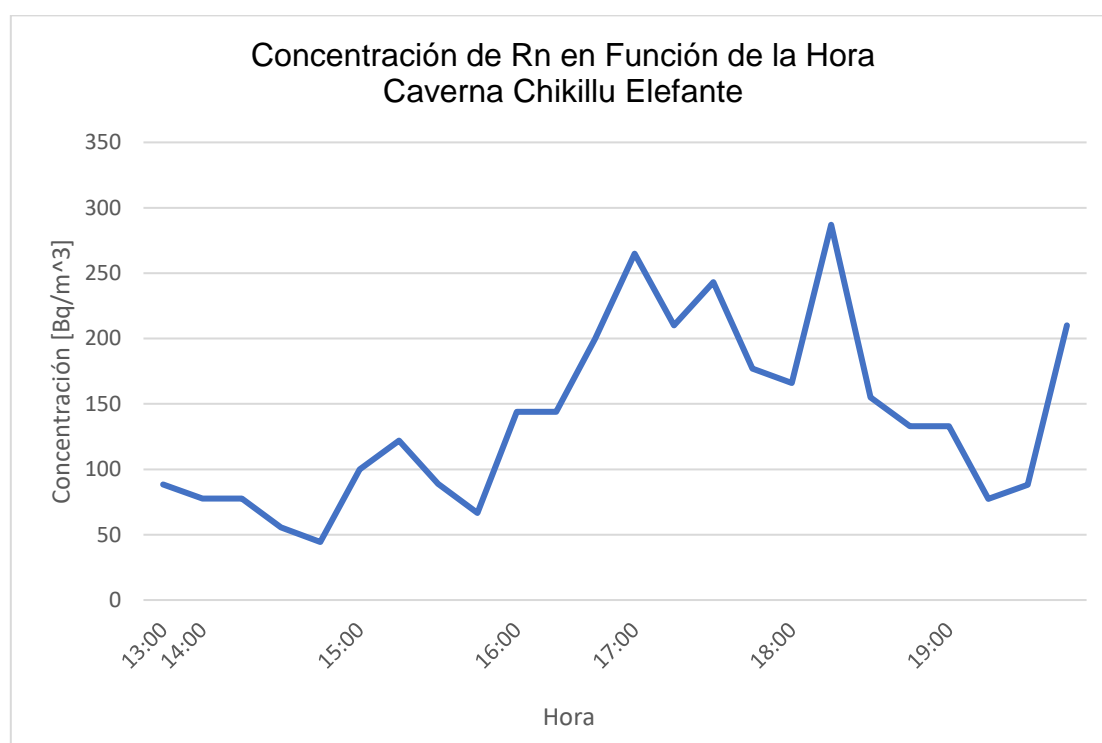


Figura 34. Concentración de radón en función de la hora en la caverna Chikillu Elefante

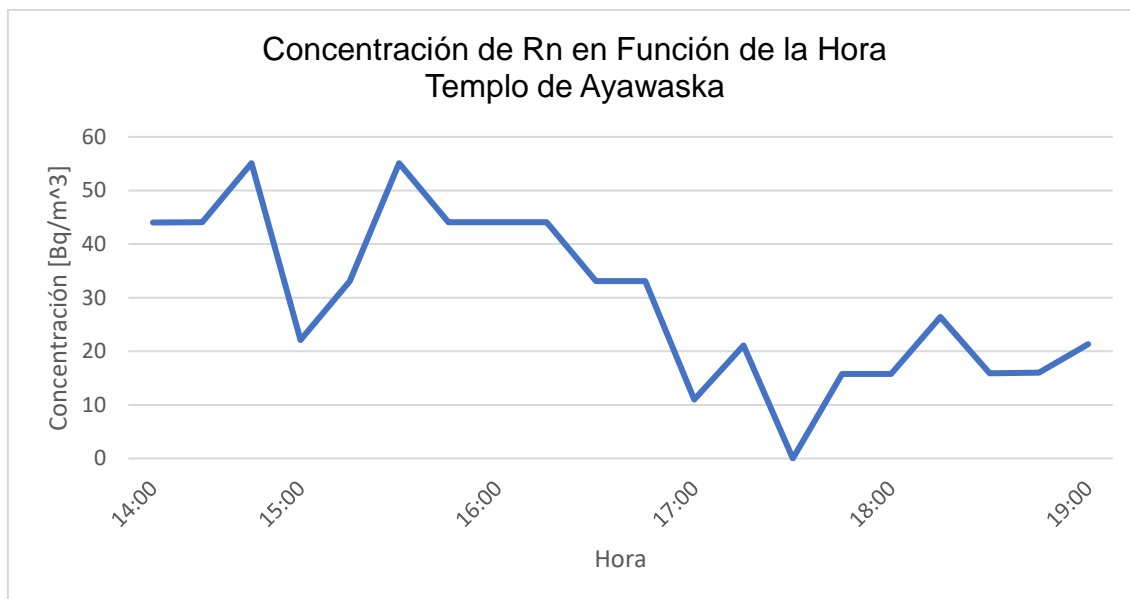


Figura 35. Concentración de radón en función de la hora en la caverna Templo de Ayawaska

4.3 Tasa de Dosis

En la Tabla 14 se describe la tasa de dosis efectiva estimada en cada cueva. En función del tiempo de permanencia, la Caverna USA YAKU es la única que sobrepasa los límites de exposición de 1 mSv/año por NORM determinados en el Acuerdo Ministerial 283 del MEER. Los resultados realizados en un estudio en cavernas cercanas, se estimó una tasa de dosis efectiva máxima de 9.73 mSv/año (García F., 2018). En el estudio mencionado, las concentraciones obtenidas serán similares a las obtenidas en este estudio, sin embargo, el tiempo de exposición era mayor, lo que aumenta la HE considerablemente.

Tabla 14.

Tasa de dosis estimada en cada cueva

Caverna	HE (mSv/año)
USA YAKU	2.45520
Templo de Ceremonia	0.02864

Chikillu Elefante	0.04738
Templo de Ayawaska	0.00472

4.3.1 Caverna USA YAKU

En la Figura 36 se puede observar la tasa de dosis efectiva (HE) estimada en cada punto de monitoreo, así como la estimada usando la concentración promedio en la cueva. Se evidencia una mayor HE en función con la concentración detallada en el punto 4.2.1, sin embargo, la HE también se relaciona con el tiempo de permanencia, lo cual acorde con la Tabla 3 del capítulo 3.3 el P3, es en el que más permanecen los turistas y guías. Para disminuir la exposición es necesario permanecer no más de una hora al interior de la cueva. Reduciendo este tiempo, $HE=0.98$ mSv/año la cual está por debajo del límite estipulado en el Acuerdo Ministerial.

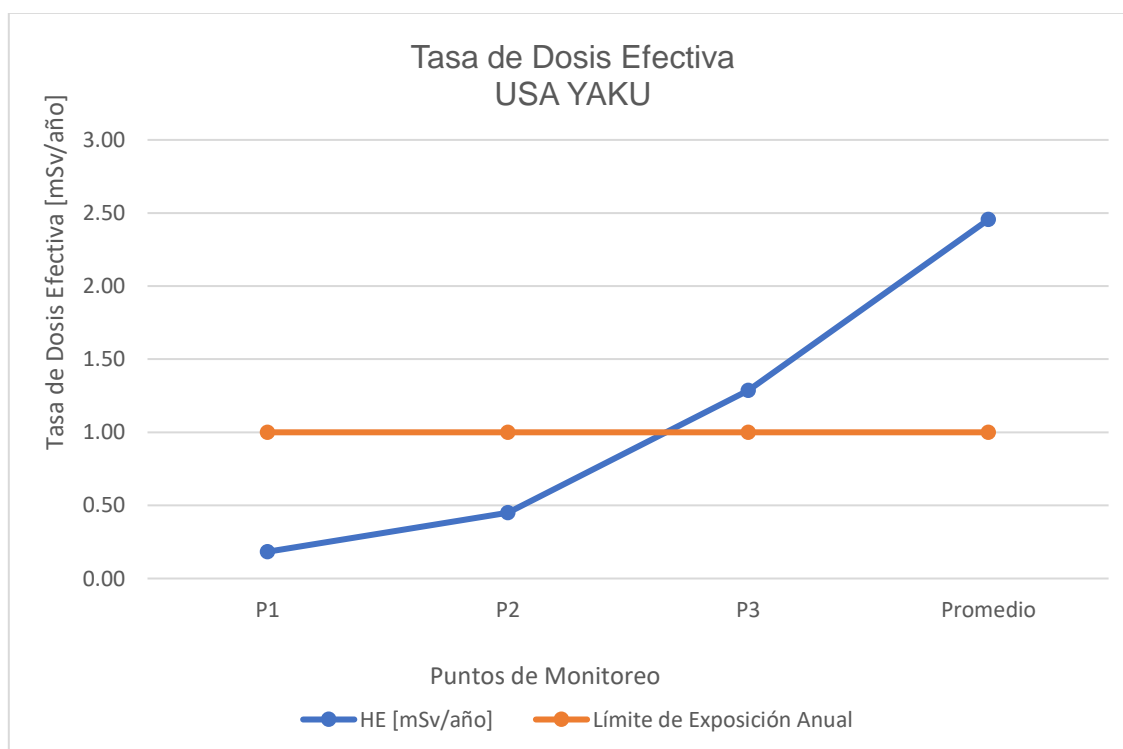


Figura 36. Tasa de dosis estimada al interior de la cueva USA YAKU y límite de exposición anual permitido

4.3.2 Cavernas Templo de Ceremonia, Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska

La dosis efectiva estimada en las cuevas Templo de Ceremonia (Figura 37), Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska (Figura 38) no se acerca a los límites permisibles. Esto se debe tanto a la baja concentración al interior como a los cortos tiempos de permanencia que se tiene en las cuevas. Con 0.04738 mSv/año, la Caverna Chikillu Elefante cuenta con la segunda mayor tasa de dosis calculada, sin embargo, como se describe en el capítulo 3.3, el tiempo de permanencia en esta es corto, sin embargo, solo se midió en un punto y no en todo el recorrido, lo cual puede aumentar la HE, pero en base a los análisis realizados, esta no sobrepasaría los límites realizando el recorrido habitual.

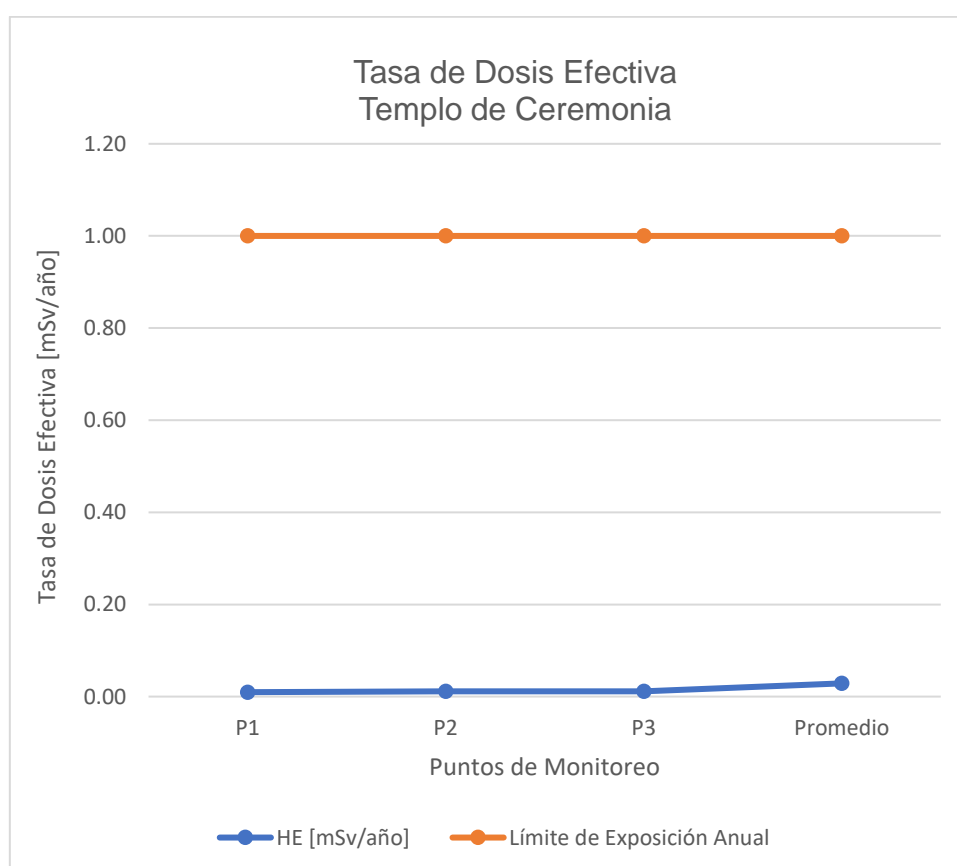


Figura 37. Tasa de dosis estimada al interior de la cueva Templo de Ceremonia y límite de exposición anual permitido

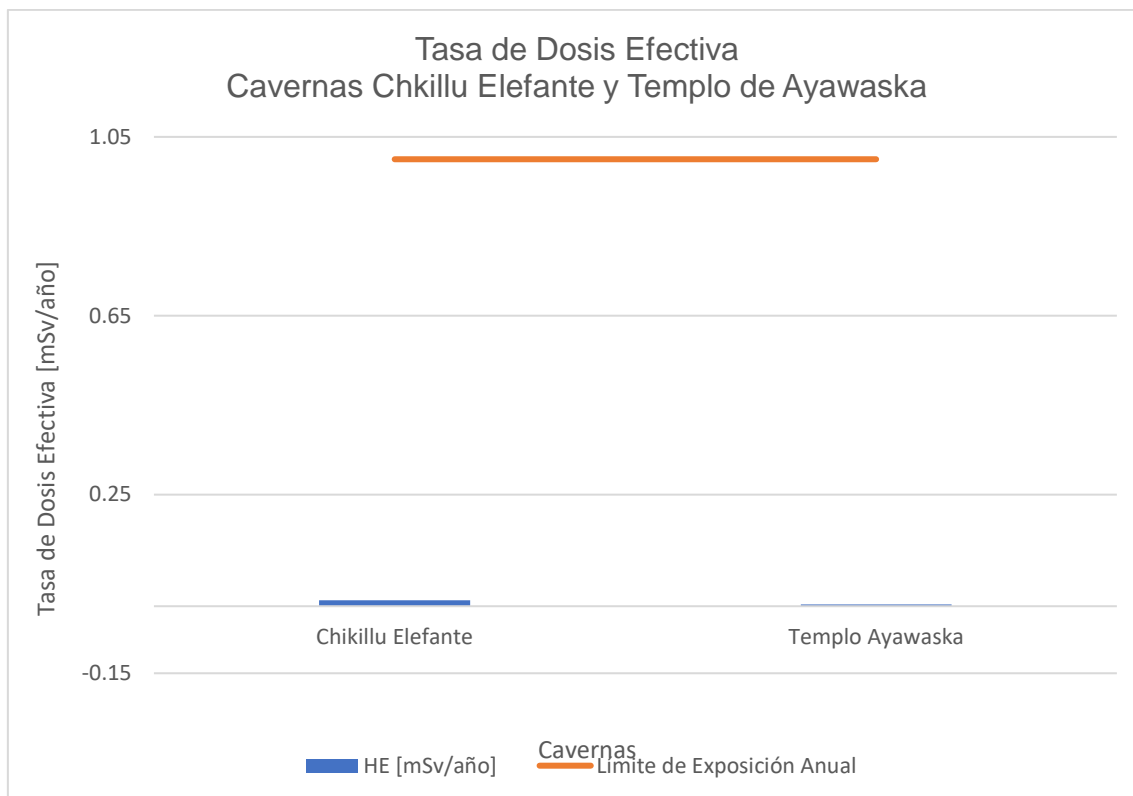


Figura 38. Tasa de dosis estimada al interior de las cuevas Chikillu Elefante y Templo de Ayawaska y límite de exposición anual permitido

4.4 Relación entre los niveles de concentración de las diferentes cuevas

Se recolectaron varias muestras de rocas a lo largo de las cuevas analizadas, de las cuales, de acuerdo con el análisis realizado, la mayoría son rocas sedimentarias. Según el Léxico Estratigráfico del Ecuador, en la Formación Napo, donde se ubica el área de estudio, se pueden encontrar varios tipos de calizas fosilíferas, grises a negras, entremezcladas con areniscas calcáreas y lutitas negras. Esto concuerda con la Guía Espeleológica del de la Provincia de Napo que indica que las rocas sedimentarias son el tipo de rocas más común encontrado en la región, principalmente en los cantones Archidona y Tena. A pesar de la baja concentración de uranio en las calizas, puede ocurrir un fuerte enriquecimiento de uranio durante la erosión de las rocas carbonatadas, lo que lleva a un alto contenido de uranio que se extiende a lo largo de las fisuras (Wang

et al., 2019). La presencia de radón puede deberse a la existencia de este tipo de rocas al interior de las cavernas, pero es recomendable realizar un estudio más profundo para afirmar esta teoría.

Los niveles de radón medidos en las cuatro cuevas presentaban comportamientos similares en las mediciones realizadas a lo largo del día. En la Figura 39 se puede observar como la concentración de ^{222}Rn tiende a aumentar en la tarde mientras que en la mañana es evidentemente menor. En un estudio similar realizado en la misma área, se determinó que la concentración del gas medido en la cueva sigue la misma tendencia que las cuevas estudiadas (García, 2018). En el estudio realizado por García F., la concentración de radón aumenta cuando la humedad relativa de la cueva es mayor, misma que, según mediciones realizadas, era mayor en horas de la tarde, lo que coincide con el comportamiento de la concentración de radón del presente estudio.

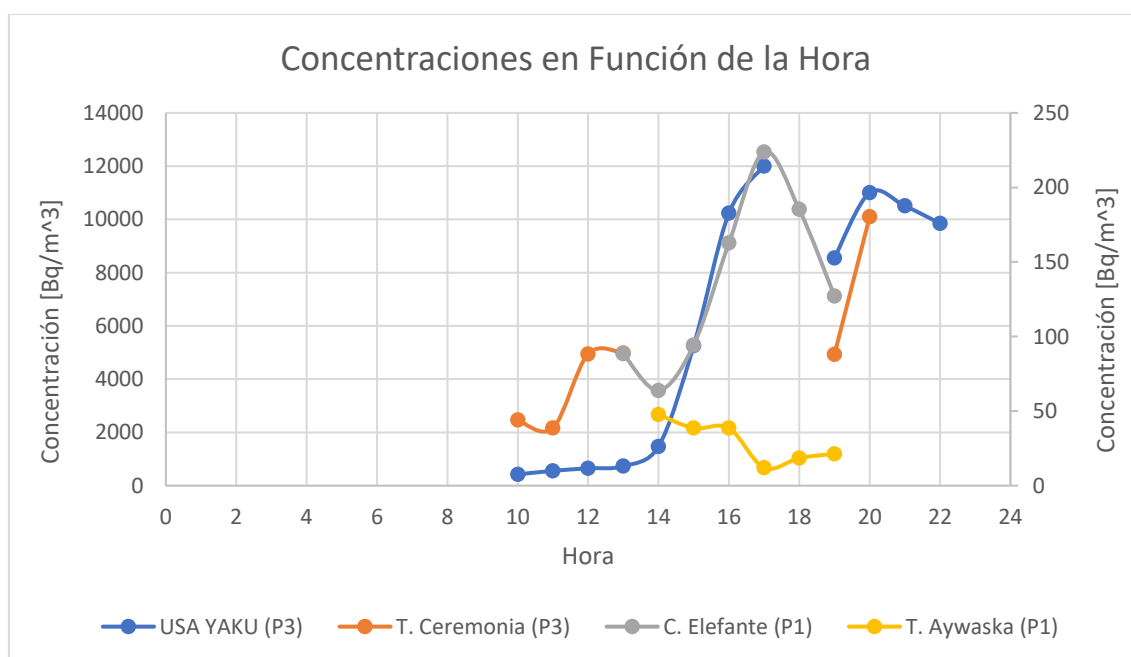


Figura 39. Concentraciones promedio de las cuatro cuevas analizadas en función de la hora.

a) En las cuevas USA YAKU y Tempo de Ceremonia, donde se realizaron tres puntos de medición, se tomaron para la gráfica los puntos donde la concentración era mayor.

En la Figura 40 se determinó el promedio de las concentraciones de los puntos donde la concentración de radón fue mayor para observar el comportamiento de la concentración medida. Se puede evidenciar, que al igual que las mediciones individuales, en general, la concentración del gas aumenta en horas de la tarde, se puede deber al incremento de la humedad relativa en la zona.

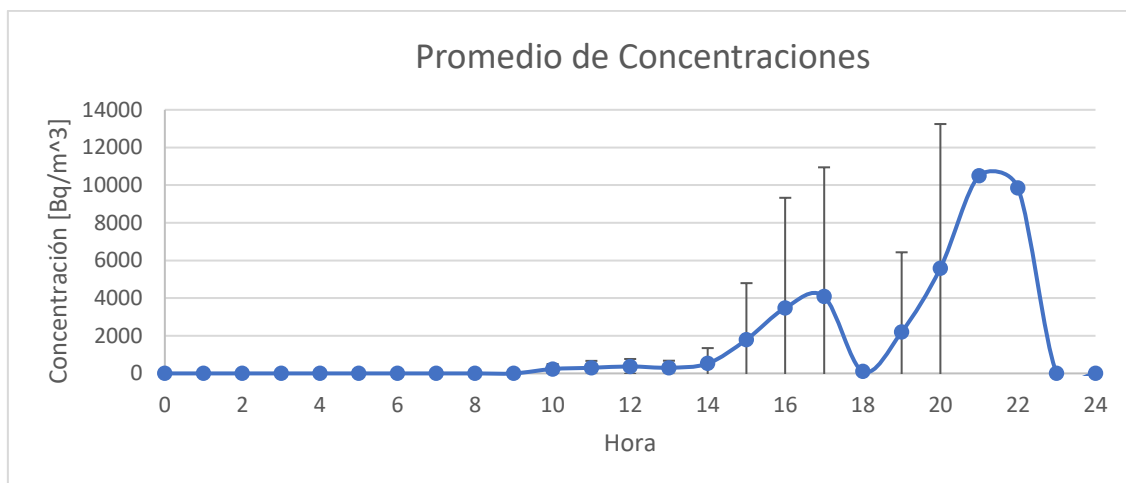


Figura 40. Promedio de concentraciones de las cuatro cuevas.

a) Desde las 0:00 hasta las 8:00 no se realizaron mediciones por lo tanto la concentración es 0

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Una vez realizada la medición de la concentración de radón al interior de las cuatro cavernas seleccionadas, se determinó que la caverna USA YAKU excede los límites de concentración recomendados por la OMS y la UE de 300 Bq/m³ en todos los puntos donde se realizaron las mediciones. En el punto P3 de monitoreo en esta caverna se midió la concentración más alta de 6379 Bq/m³, siendo la más baja la medida en el punto P1 1200 Bq/m³ por su proximidad en a la entrada. Las demás cavernas analizadas presentan la misma tendencia que USA YAKU, la concentración máxima se encontraba en los puntos de monitoreo más alejados de la entrada. Sin embargo, las concentraciones no excedían las recomendadas, siendo la más alta, de las otras tres cavernas, de 139 Bq/m³ en el punto P1 de la caverna Chikillu Elefante. Las mediciones se realizaron procurando abarcar la mañana y la tarde para obtener datos de las diferentes condiciones a lo largo del día. Se observó de manera general que, en las 4 cavernas la concentración era menor en la mañana y aumentaba al pasar las horas, este fenómeno se puede deber al aumento de la temperatura puesto que las temperaturas bajas inhiben la exhalación del radón.

Las cavernas USA YAKU y Templo de Ceremonia, a pesar de presentar similitudes en cuanto a dimensionamiento y estructura (ambas cavernas están formadas por cámaras grandes conectadas por pasadizos largos y angostos) diferían en la concentración medida ya que la segunda, cuenta con un río y una cascada al interior lo que puede disminuir la concentración del gas ya que el agua impide la exhalación del gas hacia el aire, y parte del que se libera se puede disolver en el agua. La cascada interior puede generar corrientes de aire lo que dispersa de mejor manera al gas.

Se observó que además de la concentración al interior de las cuevas, el tiempo de permanencia es un factor determinante que puede afectar significativamente la dosis efectiva. La tasa de dosis estimada en las cuevas Chikillu Elefante, Templo de Ceremonia y Templo de Ayawaska no superó el límite descrito en el Acuerdo Ministerial 283 del MEER de 1 mSv/año para trabajadores. El límite para público general es de 0.3 mSv/año, sin embargo, la estimación se realizó en base al tiempo que los guías permanecen en el lugar.

La tasa de dosis estimada más alta de estas cuevas correspondía a la caverna Chikillu Elefante con 0.4738 mSv/año comparada con la más baja, en la caverna Templo de Ayawaska con 0.00472 mSv/año. La caverna USA YAKU, por el contrario, excedía este límite debido a la larga permanencia que se determinó en el lugar (2.5 horas). El punto más crítico se identificó en el punto P3 donde la permanencia es de 45 minutos. En los puntos P1 y P2, a pesar de presentar concentraciones elevadas, el cálculo realizado demostró que la tasa de dosis en estos puntos está por debajo de 1 mSv/año.

En todas las cuevas se encontró mayormente rocas sedimentarias (calizas), y mediante investigación se encontró que las cuevas estudiadas se encuentran en la Formación Napo. Al situarse en esta formación, la cual se caracteriza por poseer cavernas originadas por disolución, se espera que posean mayormente rocas calizas formadas por sedimentación. Uno de los factores de la presencia de radón en las cavernas estudiadas puede atribuirse a que están formadas por esta roca que, según estudios geológicos realizados en Virginia y Maryland, EU, puede contener concentraciones de radón de hasta 2.3 pCi/L.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda disminuir el tiempo de permanencia de los guías a máximo una hora al interior de caverna que supera los límites establecidos de 1 mSv/año, y

a rotar el personal para minimizar los riesgos a la salud asociados con la exposición a radón.

Capacitar al personal de las cavernas sobre el riesgo de la exposición al gas radiactivo y las técnicas que deben implementar para disminuir este riesgo.

Realizar monitoreos periódicos en las cavernas para poseer datos a lo largo del año sobre la concentración de radón en estos lugares y así contar con información más exacta.

Tener una base de datos nacional con información sobre las concentraciones de radón al interior de las cuevas que sea de carácter público y al que se pueda acceder para tener referencias para estudios futuros.

Finalmente, se recomienda contar normativa específica en cuanto a tasa de dosis y concentración máxima al interior de las cuevas basada en estudios radiológicos en estos lugares y las afectaciones a la salud asociadas a elementos radiactivos.

REFERENCIAS

- Aicardi-Carrillo, G., Asmat-Inostrosa, M., & Barboza-Rangel, Y. (2015). Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 61(238), 86–98. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2015000100009>
- Alegre N. (2001). Reacción celular ante la radiación. *Radiobiología Revista Electrónica*, 1, 9–11. Recuperado el 2 de mayo de 2019 de <http://www-rayos.medicina.uma.es/rmf/radiobiologia/revista/radiobiologia.htmhttp://www-rayos.medicina.uma.es/rmf/radiobiologia/revista/numeros/RB1>
- Bølviken, B. (2002). *Natural Ionizing Radiation and Health*. Norwegian Academy of Science and Letters. Recuperado el 7 junio de 2019 de https://www.ngu.no/FileArchive/91/Natural_Ionizing.pdf
- Budnitz, R. (s.f.). *Lawrence Berkeley National Laboratory Recent Work Title RADON-222 AND ITS DAUGHTERS u A REVIEW OF INSTRUMENTATION FOR OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL MONITORING*. Recuperado el 28 de junio de 2019 de <https://escholarship.org/uc/item/8v70s89d>
- Carmelo, D., Jaraba, M., Rojas Martinez, E., & Gomez, B. A. (2014). *Petrographic study of the limestone deposit in the municipality of la Paz, department of Cesar* (Vol. 12). Recuperado el 15 de mayo de 2019 de <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a09.pdf>
- Carrillo, G. A., Inostrosa, M. A., & Rangel, Y. B. (2015). *Radon and its effects on the health of uranium mine workers*. *Med Segur Trab (Internet)* (Vol. 61). Recuperado el 6 de junio de 2019 de http://scielo.isciii.es/pdf/mesetra/v61n238/en_revision1.pdf
- Cigna, A. (2012). *Radon in caves*. *International Journal of Speleology*, 34(1/2), 1–18. <https://doi.org/10.5038/1827-806x.34.1.1>

- Consejo de Seguridad Nuclear. (2019). Radiación natural y artificial - CSN. Recuperado el 15 de junio de 2019 de <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>
- Desideri, D., Roselli, C., Feduzi, L., & Assunta Meli, M. (2006). *Monitoring the atmospheric stability by using radon concentration measurements: A study in a Central Italy site. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 270(3), 523–530. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0458-1>
- Durrige. (2014). Manual del Usuario. Detector de Radón RAD7, (978). Recuperado el 4 de mayo de 2019 de <https://durrige.com/documentation/RAD7 Manual Spanish.pdf>
- EDP-Sciences. (s.f.). *Radioactivity: Radon Properties*. Recuperado el 15 de enero de 2019 de http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Radon_Properties.htm
- Field, R. W., Steck, D. J., Lynch, C. F., Brus, C. P., Neuberger, J. S., & Kross, B. C. (1996). *Residential radon-222 exposure and lung cancer: exposure assessment methodology. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 6(2), 181–195. Recuperado el 8 de mayo de 2019 de http://digitalcommons.csbsju.edu/physics_pubs
- Finne, I. E., Kolstad, T., Larsson, M., Olsen, B., Prendergast, J., & Rudjord, A. L. (2019). *Significant reduction in indoor radon in newly built houses. Journal of Environmental Radioactivity*, 196, 259–263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.013>
- García, F. (2018). Evaluación de Radón en una Cueva de Archidona a través de Métodos Activos. Recuperado el 8 de marzo de 2019 de <Http://Dspace.Udla.Edu.Ec>.
- Gundersen, L. C. S. (1993). *The Correlation Between Bedrock Geology and Indoor Radon: Where it Works and Where it doesn't. Some Examples from the Eastern United States. The 1993 International Radon Conference*. Recuperado el 19 de junio de 2019 de

<https://pdfs.semanticscholar.org/c0b1/401e679e57991fba2f8616a2fd21e252151d.pdf>

Hurley, B. W. (2009). *Natural Radioactivity in the Geologic Environment*. Recuperado el 9 de mayo de 2019 de https://cemp.dri.edu/cemp/workshop2009/presentations/Hurley-Radioactivity_Geologic_Environ.pdf

Institute for Energy and Environmental Research. (1999). *Measuring Radiation: Terminology and Units*. Recuperado el 8 de mayo de 2019 de <Http://leer.Org>, 8(4), 1–4.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). (1995). *NTP 440: Radón en ambientes interiores*. Ministerio. Recuperado el 8 de mayo de 2019 de https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf

Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y. S., & Phaneuf, M. (2013). *Technical reports series no.474: Measurement and calculation of radon releases from norm residues*. *laea*, (474), 103. Recuperado el 23 de mayo de 2019 de https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf

Jaramillo, G. G. (2000). *Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador - P. Duque*. Recuperado el 28 junio de 2019 de <https://es.scribd.com/doc/165767108/Lexico-Estratigrafico-Ecuador>

Johnson, M. R. (s.f.). *The Geology of Radon*. *US Geological Survey*. Recuperado el 8 de mayo de 2019 de <https://pubs.usgs.gov/gip/7000018/report.pdf>

Makinde-Odusola, B. A. (2005). *Radon in Water*. In *Water Encyclopedia*. <https://doi.org/10.1002/047147844x.pc476>

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2007). *Acuerdo Ministerial 283*. Recuperado el 15 de junio de 2019 de <https://2019.vlex.com/#vid/653513301>

- National Cancer Institute. (2018). *Definition of cancer - NCI Dictionary of Cancer Terms - National Cancer Institute*.
<https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2017.43>
- Nemangwele, F. (2005). *Radon in the Congo Caves*. Recuperado el 27 de junio de mayo de 2019 de <https://core.ac.uk/download/pdf/58912552.pdf>
- Núñez, M. (2008). Efectos biológicos de las radiaciones - Dosimetría . *Escuela Universitaria de Tecnología Médica UdelaR, Montevideo, Uruguay Comité de Tecnólogos de ALASBIMN* , 11. Recuperado el 28 de junio de 2019 de <https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=temas...pdf>
- Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2007). *Naturally Occurring Radionuclides*. In *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation* (pp. 43–52). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-008044462-8/50007-7>
- Organización Mundial de La Salud. (2015). MANUAL DE LA OMS SOBRE EL RADÓN EN INTERIORES. *Una perspectiva de Salud Pública*. Recuperado el 3 de mayo de 2019 de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=A4670612B6331DC095D298D61E5764C2?sequence=1
- Organizacion Mundial de la Salud (OMS). (2016). Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. *WHO*. Recuperado el 3 de mayo de 2019 de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>
- Pascual, A., Ingeniero, B., Químico, T., & Carrera, E. G. (2001). NTP 614: *Radiaciones ionizantes: normas de protección*. Recuperado el 5 de mayo de 2019 de https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTcnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_614.pdf
- Podstawczyńska, A. (2015). *Interrelationship of indoor radon concentration and*

meteorological parameters in Łódź (Central Poland) case study - preliminary results. Recuperado el 30 de junio de 2019 de http://www.meteo.fr/icuc9/LongAbstracts/poster_16-5-2761291_a.pdf

Przylibski, T. A. (1999). *Radon concentration changes in the air of two caves in Poland.* *Journal of Environmental Radioactivity*, 45(1), 81–94. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(98\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(98)00081-2)

Ravikumar, P., & Somashekar, R. K. (2017). *Estimates of the dose of radon and its progeny inhaled inside buildings.* *EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 3(2), 88–95. <https://doi.org/10.14712/23361964.2015.10>

Stein, L. (2009). *Chemical Properties of Radon* (pp. 240–251). <https://doi.org/10.1021/bk-1987-0331.ch018>

The Radon Shop. (2014). *What is Radon? The Radon Shop*, 1–25. Recuperado el 8 de marzo de 2019 de <https://www.nj.gov/dep/rpp/radon/school/scldown/jscinv4.pdf>

US Department of Labor. (2000). *Safety and Health Topics | Cadmium | Occupational Safety and Health Administration*, 1–7. Recuperado el 5 de marzo de 2019 de https://www.osha.gov/SLTC/radiation_nonionizing/

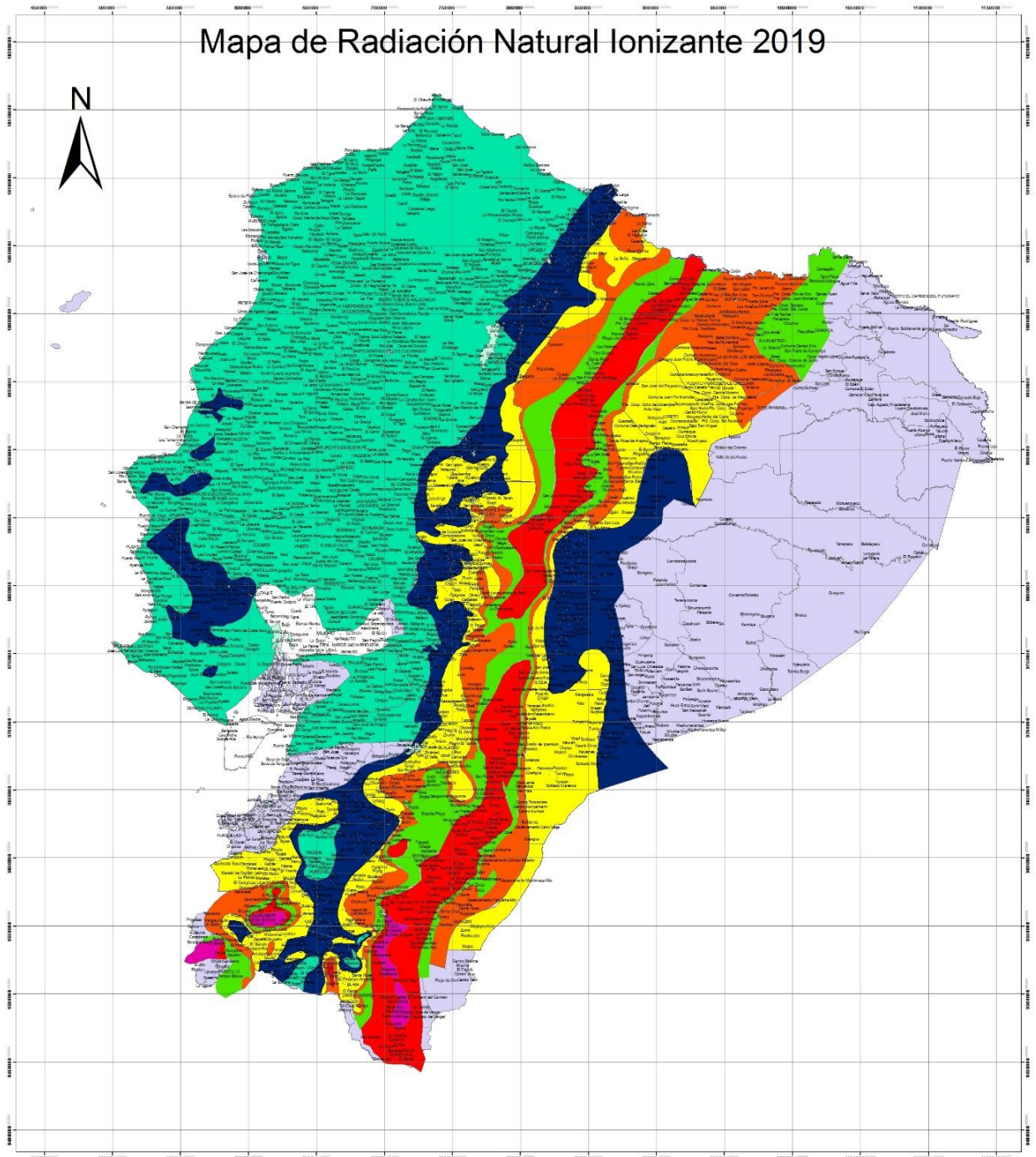
Válgoma, A. (2014). *Minerales y rocas radiactivos.* Recuperado el 15 de junio de 2019 de <https://desayunoconfotones.org/2014/02/26/minerales-y-rocas-radiactivos/>

Wang, Y., Luo, W., Zeng, G., Wang, Y., Yang, H., Wang, M., ... Wang, S. (2019). *High ²²²Rn concentrations and dynamics in Shawan Cave, southwest China.* *Journal of Environmental Radioactivity*, 199–200, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.12.029>

XPRT Environmental. (s.f.). *RAD7 - Electronic Radon Detector by DurrIDGE Company, Inc.* Recuperado el 18 de junio de 2019 de <https://www.environmental-expert.com/products>

ANEXOS

Mapa de Radiación Natural Ionizante 2019

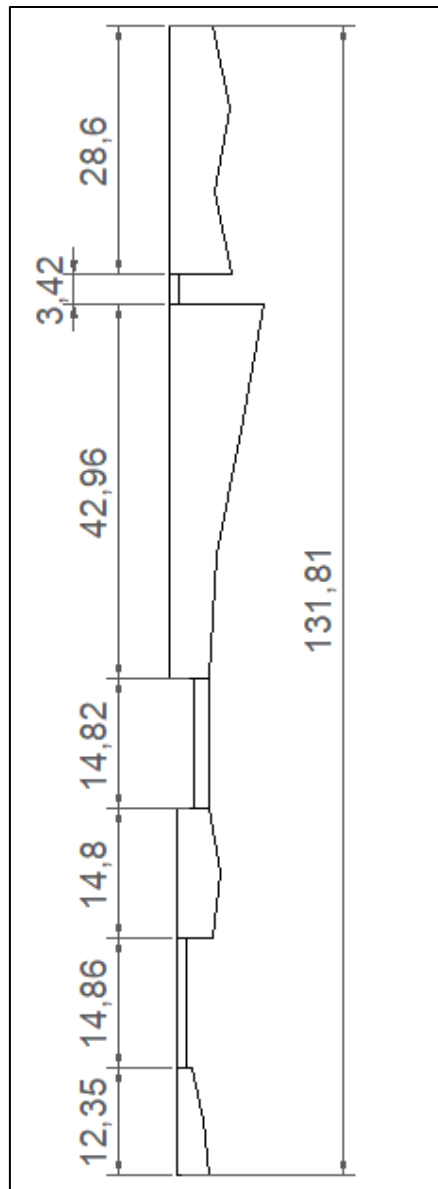


Actividad (cps), GAD 6, (INa)Ti, 1,8 litros	Tasa de dosis (mSv/año)	Área total de ambientes(Km ²)
Mayor a 800 cps	Mayor a 2,45	793,1
De 701 a 800 cps	2,15 a 2,45	14.383,6
De 601 a 700 cps	1,85 a 2,15	12.497,1
De 501 a 600 cps	1,14 a 1,85	15.743,4
De 401 a 500 cps	0,73 a 1,14	23.246,3
De 301 a 400 cps	0,35 a 0,73	24.401,3
De 201 a 300 cps	0,26 a 0,35	82.174,4
Menor a 200 cps	Menor a 0,26	53.807,6



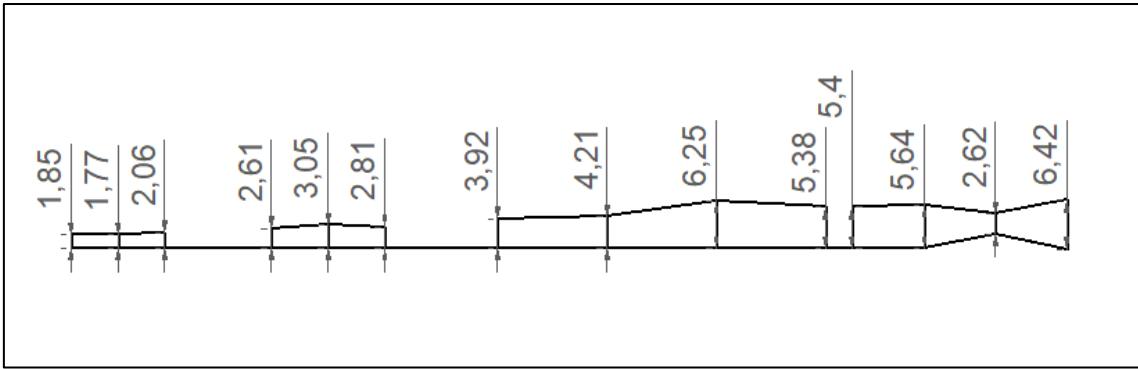
		SCAN - DAN ARAD
MAPA DE RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL DEL ECUADOR		
Esc: 1:1'000'000	Generado por: Ing. Marco Isacardo Revisado por: Ing. Claudia Saenzuela	Fecha: 15/04/2019

Anexo 1. Mapa de Radiación Natural Ionizante 2019.
 Tomado de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable



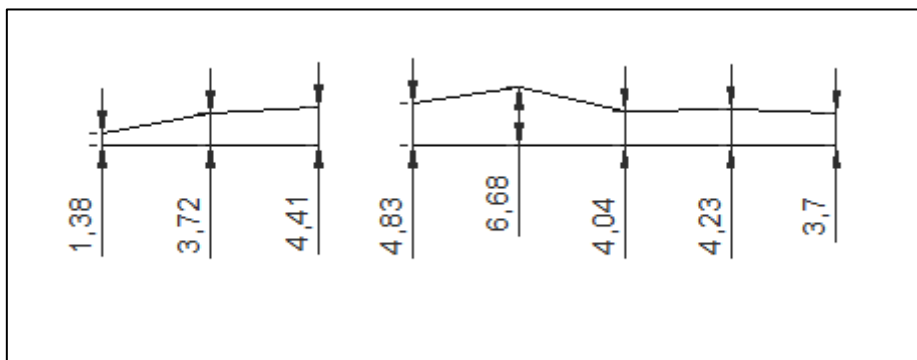
Anexo 3. Esquema de medición de la cueva USA YAKU – Vista superior

a) Representado en metros



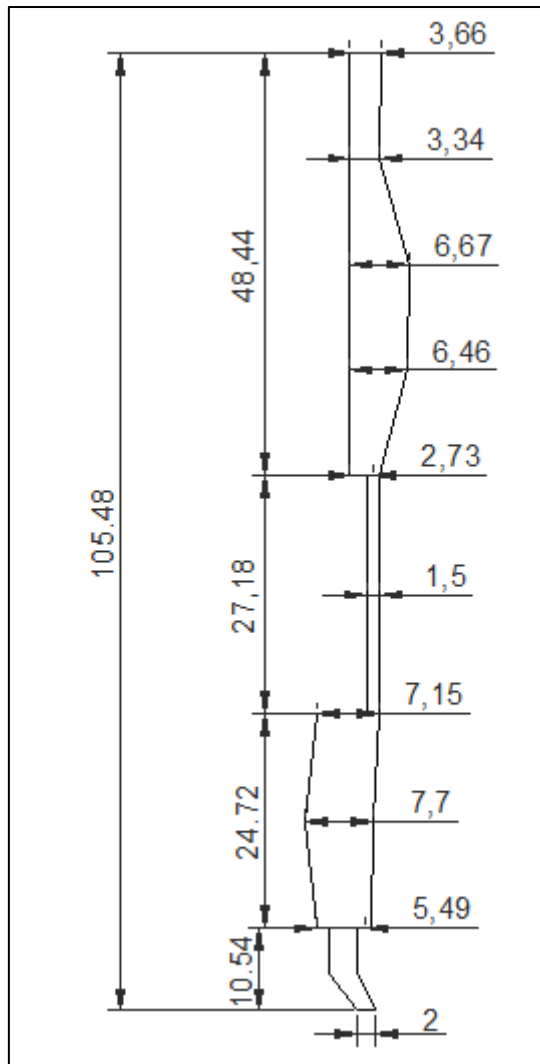
Anexo 4. Esquema de medición de la cueva USA YAKU – Vista lateral

a) Representado en metros



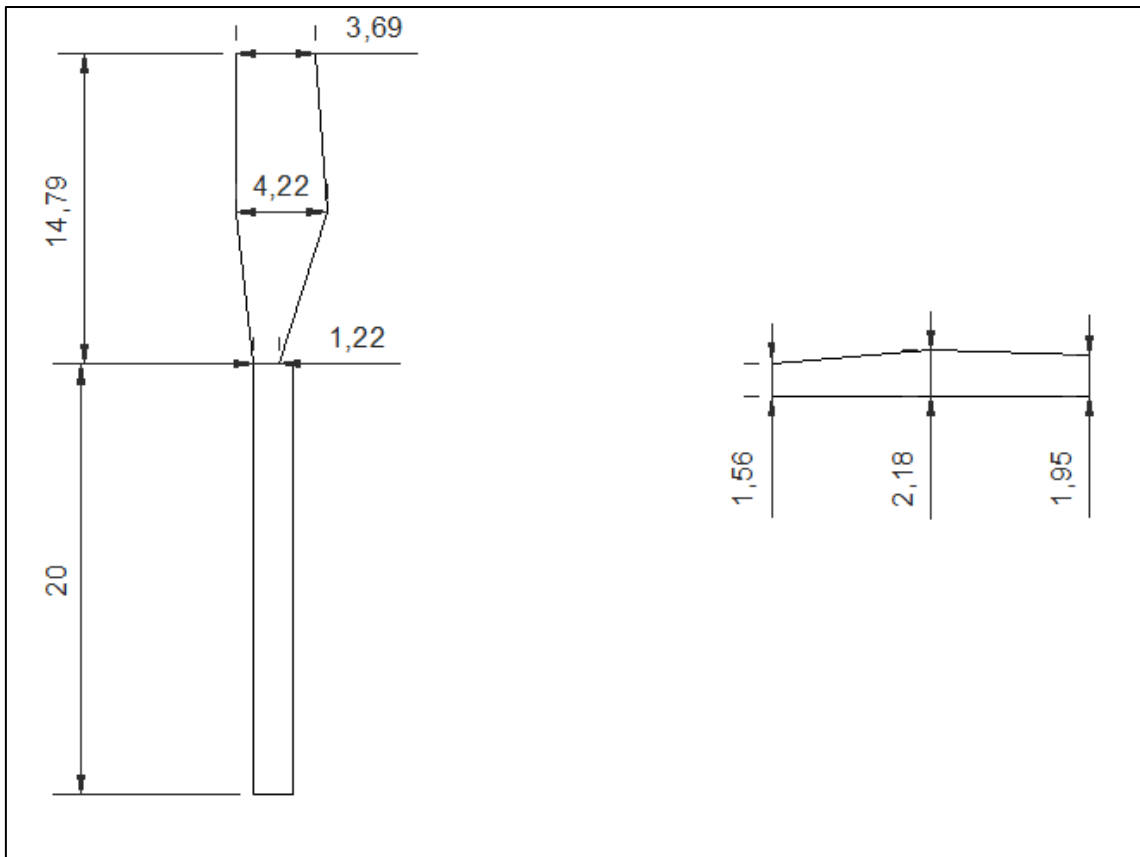
Anexo 5. Esquema de medición de la cueva Templo de Ceremonia – Vista lateral

a) Representado en metros



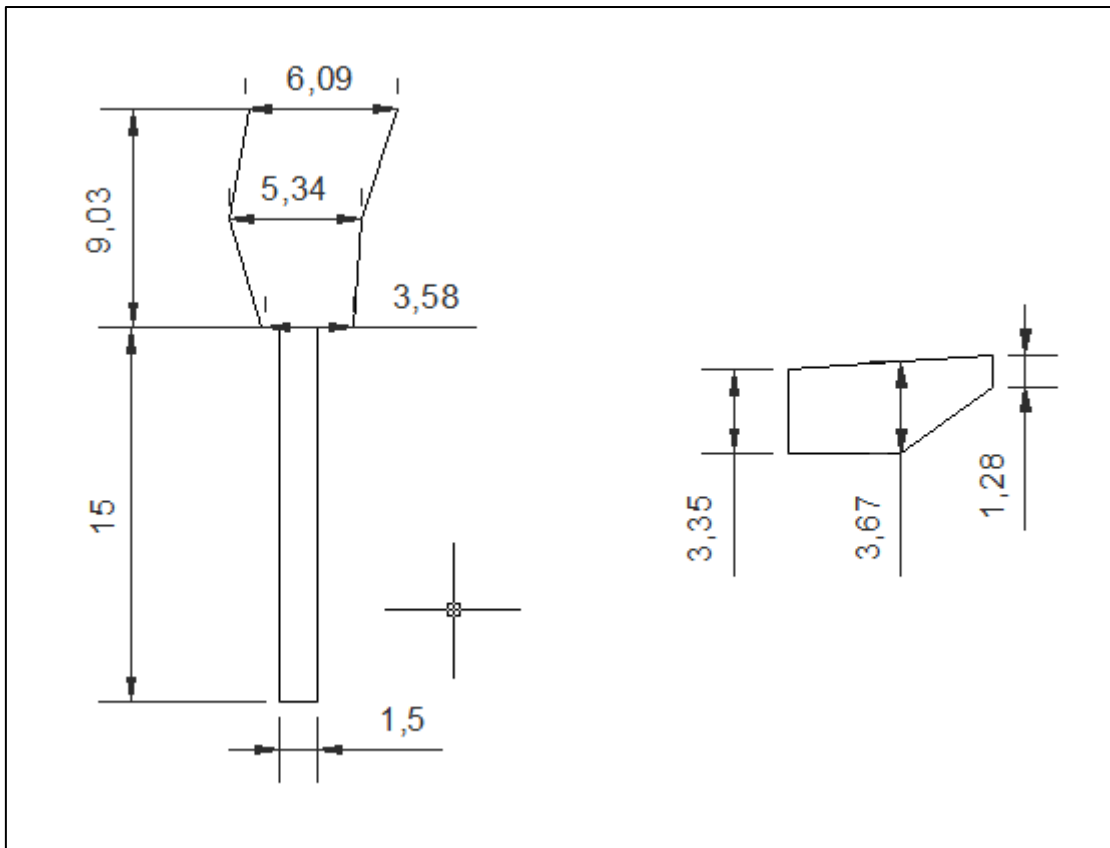
Anexo 6. Esquema de medición de la cueva Templo de Ceremonia – Vista superior

a) Representado en metros



Anexo 7. Esquema de medición de la cueva Templo de Ayawaska

- a) Representado en metros
- b) Vista superior (izquierda)
- c) Vista lateral (derecha)



Anexo 8. Esquema de medición de la cueva Chikillu Elefante

- a) Representado en metros
- b) Vista superior (izquierda)
- c) Vista lateral (derecha)



DETECTOR DE RADÓN RAD7

Manual del Usuario

Propietario _____

Serie # _____



REGISTRO DE PRESTACIONES

Fecha	Prestación

Se recomienda enviar anualmente la unidad a DURRIDGE Company, para su recalibración.

DURRIDGE Company Inc.
324 Boston Rd
Billerica, MA 01821
Tel: (978)-667-9556
Fax: (978)-667-9557
service@durrige.com
www.durrige.com

Revisión 7.2.8. © 2014 DURRIDGE Company

Anexo 9. Portada del Manual del usuario del equipo RAD7

Tomado de Durrige, 2014.



Anexo 10. Interior de caverna USA YAKU – Punto de medición 1



Anexo 11. Unidad de secado ubicada en punto de medición – Cueva USA YAKU



Anexo 12. Entrada a caverna USA YAKU



Anexo 13. Ubicación de equipo RAD7 en punto de monitoreo



Anexo 14. Pasadizo al interior de cueva Chikillu Elefante



Anexo 15. Unidad de secado en posición al interior de la cámara 2 de la cueva USA YAKU



Anexo 16. Equipo de medición utilizado para determinar la altura de las cámaras de las cuevas



Anexo 17. Interior de cueva Templo de Ceremonia – Punto de medición 2



Anexo 18. Cámara de entrada de la cueva Templo de Ceremonia



Anexo 19. Pasadizo al interior de la cueva Chikillu Elefante



Anexo 20. Río al interior de la cueva Templo de Ceremonia



Anexo 21. Cámara principal de la cueva Templo de Ceremonia

a) En esta cámara se realizan actividades religiosas



Anexo 22. Cascada al interior de la caverna Templo de Ceremonia



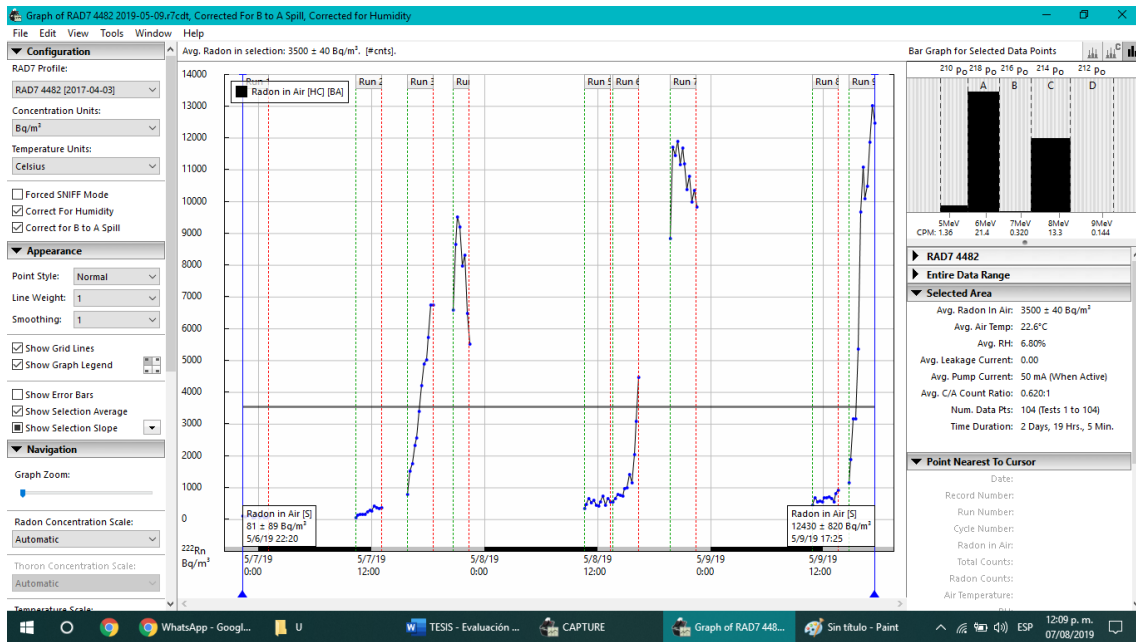
Anexo 23. Unidad de secado ubicada al interior de la cueva Templo de Ayawaska



Anexo 24. Entrada a caverna Chikillu Elefante

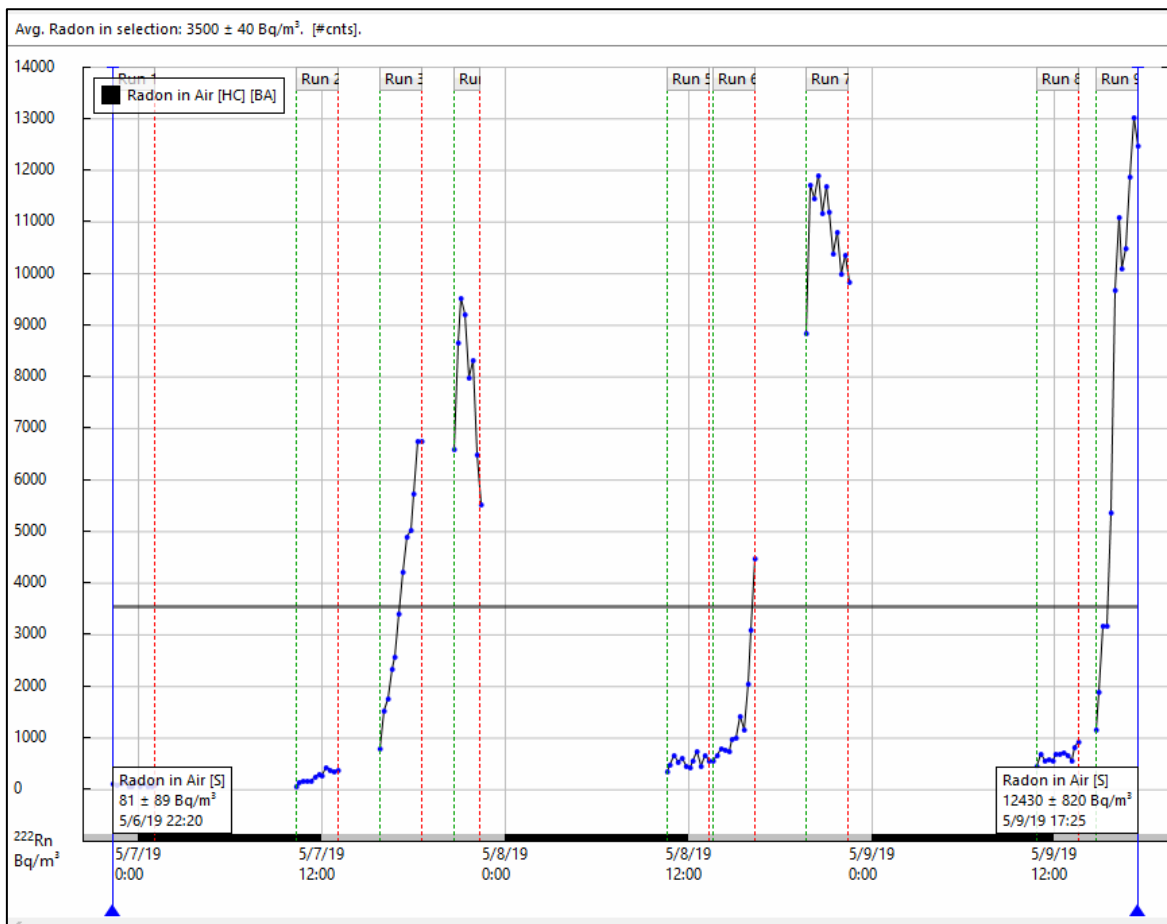


Anexo 25. Software usado para la gestión y procesamiento de datos obtenidos Tomado de DurrIDGE, 2018.

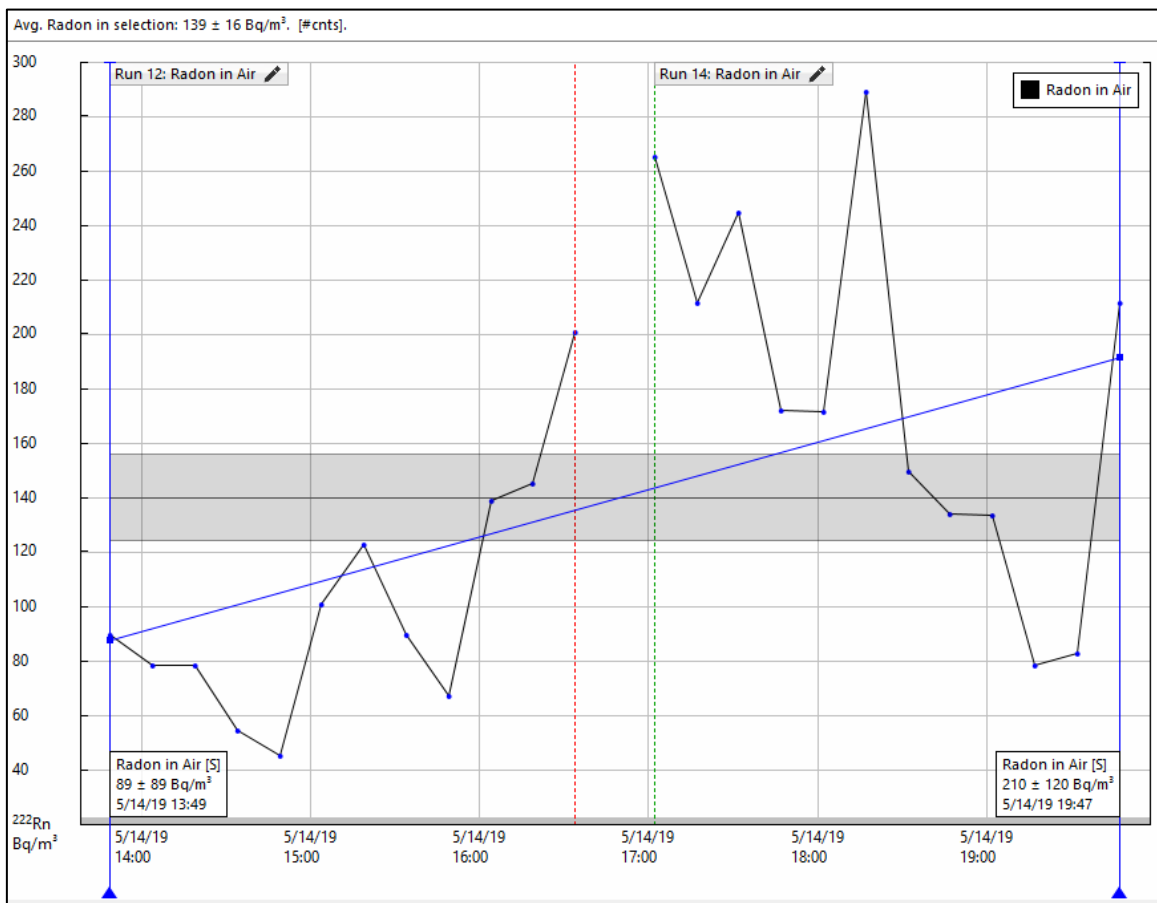


Anexo 26. Interfaz del software CAPTURE

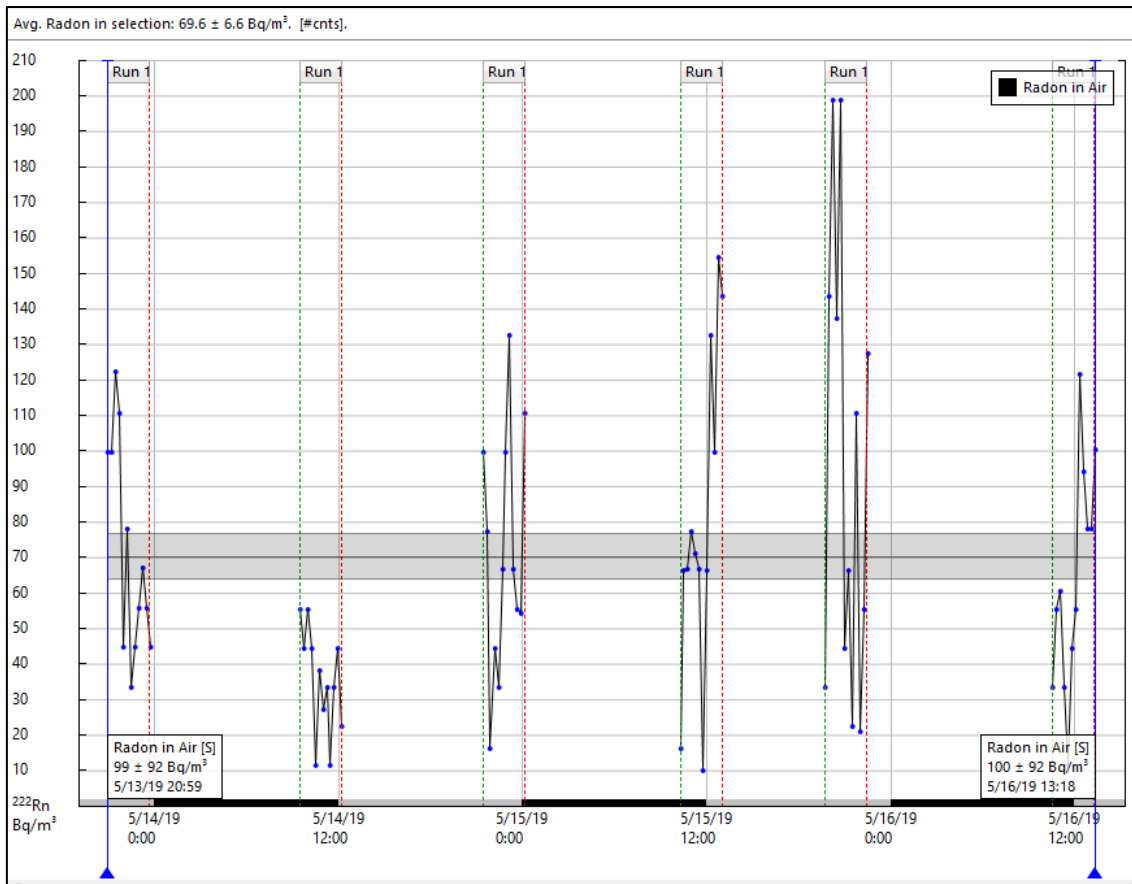
Tomado de Durrige, 2018.



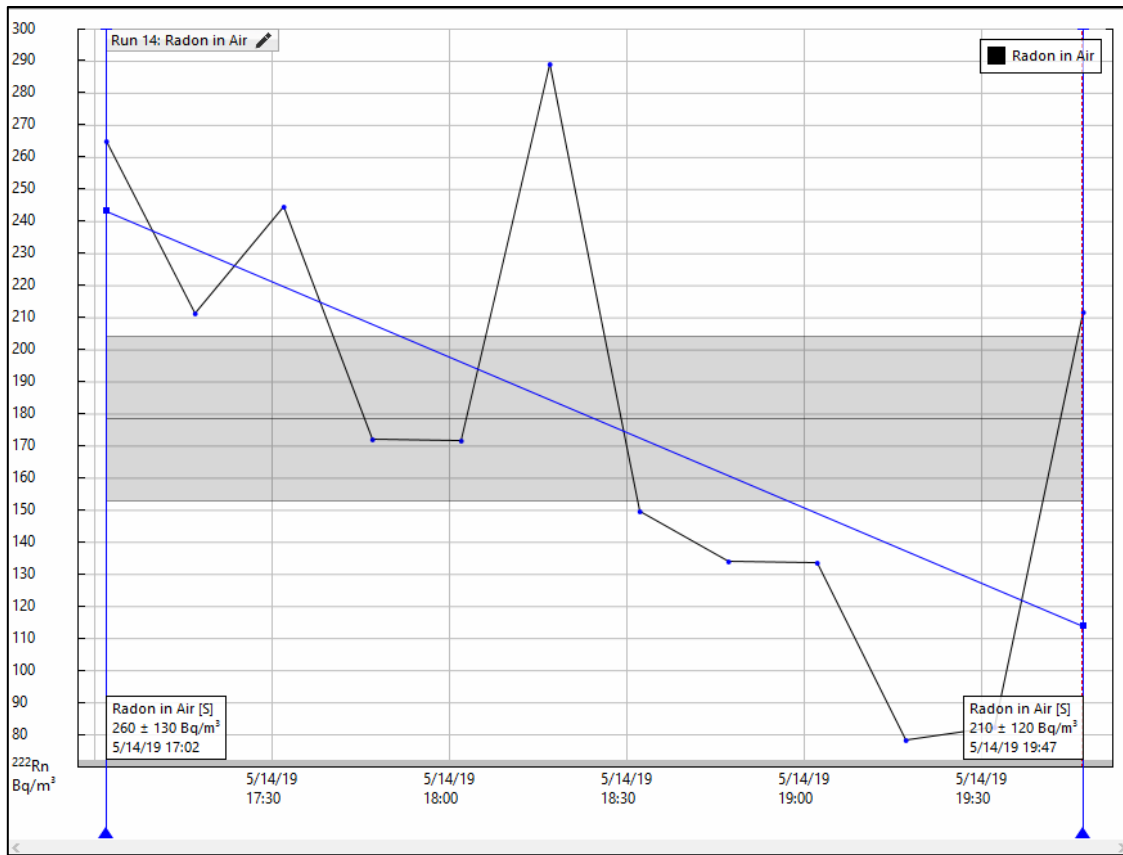
Anexo 27. Gráfica de concentraciones promedio de la caverna USA YAKU



Anexo 28. Gráfica de concentraciones promedio de la caverna Chikillu Elefante



Anexo 29. Gráfica de concentraciones promedio de la caverna Templo de Ceremonia



Anexo 30. Gráfica de concentraciones promedio de la caverna Templo de Ayawaska

