



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE DETECCIÓN DEL GAS
 ^{222}Rn EN AGUA PROVENIENTE DE LAS VERTIENTES
NATURALES DEL VOLCÁN CARIHUAIRAZO

TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: TRABAJO EXPERIMENTAL

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICA

AUTORA: CURI SISA GUAPIZACA JINDE

TUTORA: BIOF. TALIA TENE FERNANDEZ, Ph.D

RIOBAMBA-ECUADOR

2018

@2018, Curi Sisa Guapizaca Jinde

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

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA
CARRERA: BIOFÍSICA

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que el trabajo experimental: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE DETECCIÓN DEL GAS ^{222}Rn EN AGUA PROVENIENTE DE LAS VERTIENTES NATURALES DEL VOLCÁN CARIHUAIRAZO”, de responsabilidad de la Señorita Curi Sisa Guapizaca Jinde, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Biof. Talia Beatriz Tene Fernández Ph.D

.....

.....

DIRECTORA DE TESIS

Mgs. Dalinda Quingatuña

.....

.....

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Yo, Guapizaca Jinde Curi Sisa soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

CURI SISA GUAPIZACA JINDE

DEDICATORIA

Dedico éste trabajo a mi hija por su paciencia y amor, ya que existen amores que van mucho más allá de nuestro entendimiento, entrega y sacrificio. Tu afecto y cariño son mi fuente de felicidad, de mi esfuerzo y de mis ganas de buscar lo mejor para ti, aun a tu corta edad me has dado las lecciones más grandes de la vida.

Fuiste la motivación más grande para concluir con éxito éste Trabajo de Titulación

Gracias, bebé

Curi

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su apoyo e incentivo para entrar en el camino del conocimiento.

A la ESPOCH y sus maestros por todo el conocimiento brindado durante estos años.

Un Agradecimiento muy especial a la Biof. Talía Tene Ph.D por encaminarme en el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron.

Curi

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	- 1 -
 CAPITULO I	
1. MARCO REFERENCIAL	- 2 -
1.1. Antecedentes	- 2 -
1.2. Planteamiento del problema	- 3 -
1.3. Justificación.....	- 4 -
1.4. Objetivos	- 5 -
 CAPITULO II	
2. MARCO TEÓRICO	- 6 -
2.1 Distribución geológica de los generadores del radón.....	- 6 -
2.2 Propiedades químicas y físicas del ^{222}Rn	- 8 -
2.3 Mecanismo de producción y liberación del radón.....	- 12 -
2.4 Mecanismo de transporte	- 14 -
2.5 Efectos Biológicos del ^{222}Rn	- 20 -
2.6 Técnicas de detección de radón en agua	- 24 -
2.7 Volcán Carihuairazo.....	- 25 -
 CAPITULO III	
3. DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN	- 27 -
3.1 Procedimiento Experimental	- 27 -
3.2 Método de la cámara cerrada	- 31 -
3.3 Medición de la concentración de actividad en agua.....	- 32 -

3.4	Validación del Método.....	- 40 -
3.5	Coeficiente de velocidad de transferencia del ^{222}Rn en la interface agua-aire..	- 41 -
3.6	Dosis efectiva.....	- 42 -

CAPITULO IV

4.	ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	- 44 -
4.1	Tasa de fuga del cámara.....	- 44 -
4.2	Fondo de la Cámara y del Laboratorio.....	- 44 -
4.3	Concentración de Actividad de ^{222}Rn en agua	- 45 -
4.4	Cálculo del coeficiente de velocidad de transferencia	- 46 -
4.5	Cálculo de la dosis efectiva anual por inhalación e ingestión de radón	- 46 -

CONCLUSIONES..... - 47 -

RECOMENDACIONES..... - 48 -

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Lista de depósitos de uranio desde una perspectiva geológica.....	- 7 -
Tabla 2-2: Propiedades químicas del ^{222}Rn	- 8 -
Tabla 3-2: Propiedades relevantes del ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{219}Rn	- 11 -
Tabla 1-3: Características del equipo ALPHA-E.....	- 29 -
Tabla 2-3: Resultados de la validación del método.	- 41 -
Tabla 1-4: Parámetros usados para calcular la concentración inicial en agua C_w , con la ecuación (22).....	- 45 -
Tabla 2-4: Concentración de radón de las fuentes naturales del volcán Carihuairazo obtenida con el método de la cámara cerrada.	- 45 -

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Cadenas de decaimiento radiactivo natural: ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th	10 -
Figura 2-2: Esquema de decaimiento del radón.....	12 -
Figura 3-2: La emanación del radón desde los granos minerales.	13 -
Figura 4-2: Esquema de difusión unidimensional del radón entre dos regiones con diferente densidad.	15 -
Figura 5-2: Radón en la interface agua-aire en el contenedor.	17 -
Figura 6-2: Solubilidad del radón a diferentes temperaturas.	18 -
Figura 7-2: Fuentes de radón y vías de exposición de radiación.	20 -
Figura 8-2: Solubilidad de los elementos de los gases nobles en el agua mostrados en función de la masa atómica.	21 -
Figura 9-2: Diagrama del modelo PBPK para el radón ingerido.....	22 -
Figura 10-2: Expansión de los compartimentos intestinales de la figura 8.2 para mostrar los cuatro segmentos del tracto gastrointestinal.	23 -
Figura 1-3: Esquema de la cámara cerrada con sus respectivas dimensiones.	27 -
Figura 2-3: Alpha-E: Funcionamiento y elementos de control.....	28 -
Figura 3-3: Ubicación de las vertientes y tanque de captación del volcán Carihuairazo.....	30 -
Figura 4-3: Vertientes naturales del volcán Carihuairazo: 1 Santa Rosa, 2 Santa Troya.	30 -
Figura 5-3: Configuración experimental del método de la Cámara cerrada.	32 -

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1-3: Fuente 1- Muestra 1: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.	34 -
Gráfica 2-3: Fuente 1- Muestra 2: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.	34 -
Gráfica 3-3: Fuente 1- Muestra 3: Curva de acumulación de la concentración de actividad en el punto de equilibrio.	35 -
Gráfica 4-3: Fuente 2- Muestra 1: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.	35 -
Gráfica 5-3: Fuente 2- Muestra 2: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.	36 -
Gráfica 6-3: Fuente 2- Muestra 3: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.	36 -
Gráfica 7-3: Concentración de actividad de radón medida en la cámara donde se acumuló una cantidad considerable de radón (56kBq/m ³) y la disminución exponencial de la concentración de radón. La tasa de fuga se ve representada por la relación entre la pendiente teórica (azul) y la pendiente experimental.	38 -
Gráfica 8-3: Fondo natural del laboratorio de técnicas nucleares medido en un periodo de 1,2 días.	39 -
Gráfica 9-3: Fondo natural de la cámara cerrada medido en un periodo de 3 días.	40 -
Gráfica 10-4: A Concentración de actividad medida en la cámara. B Concentración de actividad medida en el laboratorio.	44 -

LISTA DE ABREVIATURAS

OMS	Organización Mundial de la Salud
IARC	International Agency for Research of Cancer
EPA	Environmental Protection Agency
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
EURATOM	Comunidad Europea de la Energía Atómica
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
ARAD	Laboratorio de Análisis de Radiactividad
SCAN	Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares
Bq/L	Bequerelio por litro
Bq/m³	Bequerelio por metro cúbico
m.s.n.m	Metros sobre niveles del mar
MeV	Megaelectronvoltio
β	Velocidad de transferencia en el interface agua-aire
α	Coefficiente de Oswald
λ_{Rn}	Constante de desintegración del radón
λ_{leak}	Tasa de fuga
λ_{eff}	Constante de decaimiento efectiva
Bg	Background, Fondo radiactivo característico
²³⁵U	Uranio 235
²³⁸U	Uranio 238
²³²Th	Torio 232
²²²Rn	Radón
²²⁰Rn	Torón
²¹⁹Rn	Actinon

226Ra	Radio 226
PBPK	Physiologically Based Pharmacokinetic
PDR	Productos de desintegración del radón
C_{eq}	Concentración en equilibrio
t_{eq}	Tiempo en equilibrio
C_a	Concentración en aire
C_w	Concentración en agua
40K	Potasio 40
°C	Grado centígrado

RESUMEN

Se ha establecido un método de detección de radón en agua proveniente de las vertientes naturales del volcán Carihuairazo para estimar la concentración de actividad de ^{222}Rn , se determinó experimentalmente la velocidad de transferencia de ^{222}Rn en la interfaz agua-aire y se calculó la tasa de dosis efectiva debido a la ingestión e inhalación de ^{222}Rn presente en el agua. El método utilizado consistió en monitorear el crecimiento de concentración de actividad de radón dentro de una cámara cerrada mediante un detector de radón en aire. La configuración experimental utilizada fue caracterizada mediante la determinación de la tasa de fuga de la cámara, el fondo de radón de la cámara y la determinación del fondo de radón del laboratorio. Además se monitoreó la temperatura, ya que la concentración y difusión de radón depende del gradiente de temperatura del agua y el aire. El agua se colocó dentro de la cámara durante aproximadamente 42 horas, tiempo necesario para que el radón escape del agua mediante difusión hacia el aire. A través de un balance de la concentración en aire y agua y la corrección de la actividad en el tiempo, se pudo determinar la concentración de actividad de ^{222}Rn del agua al tiempo inicial, es decir cuando las muestras fueron tomadas de los manantiales. La velocidad de transferencia encontrada fue de $(1,07 \pm 0,003) \times 10^{-6}$ m/s. Los manantiales presentan una concentración de actividad de ^{222}Rn entre 570 y 1500 Bq/m³ ($\pm 20\%$), lo cual no sobrepasa los límites recomendados por las organizaciones internacionales de regulación en el área de radioprotección. La metodología utilizada es confiable para estimar la concentración de radón en el agua. Se recomienda continuar con los análisis de ^{222}Rn en agua proveniente de otros lugares donde la población consuma agua sin ningún tipo de tratamiento.

PALABRAS CLAVE: <BIOFÍSICA>, <RADIOACTIVIDAD>, <RADÓN (Rn)>, <DIFUSIÓN>. <DETECTOR >, <VELOCIDAD DE DIFUSIÓN>, <DOSIS EFECTIVA>, <VOLCAN CARIHUAIRAZO>.

ABSTRACT

A radon detection method has been established in water from the natural slopes of the Carihuairazo volcano, in order to estimate the concentration of radon activity (^{222}Rn). The transfer rate of ^{222}Rn at the water air interface was experimentally determined and the effective dose of life rate at ingestion and inhalation of ^{222}Rn present in the water is calculated. The method used consisted monitoring the growth of activity concentration of the radon inside the closed chamber, by means of a radon detector in air. The experimental configuration used was characterized by determining the leak rate of the chamber, the bottom of the chamber and the determination of the radon bottom of the laboratory, as well as the temperature monitoring, since the concentration and diffusion of radon depends on the temperature gradient of water and air. The water is placed inside the chambers for about 42 hours, a time necessary for the radon to escape from de water by diffusing it into the air. Through a balance of the concentration in water and air and the concentration of the activity in time, it was possible to determine the concentration of the activity of ^{222}Rn of the water at the initial time, that is, when the samples were taken from the springs. The transfer speed found was $(1,07 \pm 0,003) \times 10^{-6}$ m/s. The springs present a concentration of activity of ^{222}Rn between 570 and 1500 Bq/m³ ($\pm 20\%$), which does not exceed the limits recommended by international regulatory organizations in the area of radioprotection. The methodology used is reliable to estimate the concentration of radon in water. It is recommended to continue with the analyzes of ^{222}Rn in water coming from other places, where the population consumes water without any type of treatment.

KEY WORDS: <BIOPHYSICS>, <RADIOACTIVITY>, <RADON (Rn)>, <DIFFUSION>, <DETECTOR>, <DIFFUSION SPEED>, <EFFECTIVE DOSE>, <CARIHUAIRAZO VOLCANO>.

INTRODUCCIÓN

El radón es considerado como la mayor fuente natural de exposición a la radiación ionizante para la población. Durante las últimas décadas el avance del conocimiento sobre el efecto de la exposición al radón y sus progenies, ha permitido la implementación y mejora de normas y límites apropiados para reducir el riesgo a la población en países de Europa y Norte América. Sin embargo, América del Sur se encuentra en el comienzo de la investigación sobre radiactividad ambiental. El presente trabajo está dedicado a las mediciones de concentración de radón en agua subterránea y, en particular, la implementación de un método alternativo a los convencionales, utilizando una cámara cerrada.

La cámara cerrada, construida con vidrio crudo, ha sido preparada en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ésta cámara se utilizará principalmente para evaluar la concentración de actividad de ^{222}Rn en agua proviene de las vertientes naturales del volcán Carihuairazo, ésta agua es utilizada para consumo humano en varias comunidades de la parroquia de Santa Rosa del cantón Ambato en la provincia de Tungurahua.

En el Capítulo I de éste trabajo se realiza un planteamiento formal del problema, se establecen los antecedentes que existen en esta línea de investigación, se justifica la necesidad de conocer e implementar normativas que establezcan límites máximos permisibles de concentración de ^{222}Rn en agua de consumo humano y se plantean los objetivos necesarios para el desarrollo del estudio.

El Capítulo II expone el fundamento básico necesario para realizar ésta investigación, incluyendo el origen y propiedades físicas y químicas, mecanismos de transporte y liberación del radón, los esquemas completos de las series de desintegración natural, efectos biológicos generados por la inhalación y exhalación del gas radón y la ubicación geográfica de las vertientes emanadas del volcán Carihuairazo, las cuales son objeto de estudio.

El Capítulo III detalla la parte experimental involucrada en el análisis del agua, información técnica del equipamiento empleado, los procedimientos, las mediciones realizadas para obtener la concentración de actividad de cada una de las muestras.

Finalmente, se demuestran los resultados obtenidos en la parte experimental y se manifiestan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

La presente investigación se basa en tres trabajos teóricos y experimentales realizados alrededor del mundo desde el 2002, los cuales utilizan cámaras herméticas para el cálculo de la concentración de ^{222}Rn en agua y la velocidad de transferencia de radón desde el agua al aire. Estos trabajos utilizan diferentes concentraciones de radón en agua, concentración de radón inducida mediante una fuente de ^{226}Ra en el agua y agua subterránea. Estos se detallan de la siguiente manera:

En 2002 Calugaru y Crolet realizaron una investigación teórica denominada “Identificación del coeficiente de velocidad de transferencia de radón entre las fases líquida y gaseosa”, la cual consiste en medir el tiempo en el que el flujo de radón pasa a través de la interfaz común (agua-aire), utilizando un sistema cerrado, en equilibrio gravitacional e isotérmico y sin ningún fenómeno convectivo. Los resultados experimentales obtenidos en este estudio son la base para proponer un método numérico que permite evaluar la velocidad de transferencia de radón entre las dos fases utilizando la concentración inicial, la curva de acumulación y herramientas numéricas para estimar el coeficiente de transferencia que gobierna los intercambios de radón (Calugaru et al., 2002: pp. 377-382).

Otro trabajo realizado en el 2010, es una Tesis de Maestría denominada “Escape de radón del agua” donde se reporta la medida experimental del coeficiente de velocidad de transferencia del gas radón que se difunde desde la muestra de agua al aire, mediante el desarrollo de un modelo matemático escrito en términos de ecuaciones diferenciales finitas y la utilización de un detector de radón en aire RAD 7. Este trabajo concluye que el valor del coeficiente de velocidad de transferencia del radón es $(1,9 \pm 0,5) \times 10^{-6}$ m/s (Mvelase, 2010: pp. 4-19), que es comparable al valor teórico encontrado por Calugaru y Crolet (2002).

Y recientemente en el 2015 un estudio denominado “Velocidad de transferencia de radón en la interface agua-aire” que tuvo como objetivo principal investigar el transporte de radón en la interface agua-aire, mediante la utilización de un modelo matemático y una cámara de acero inoxidable hermética, encontró que el coeficiente de velocidad de transferencia de radón de la

interface agua-aire es $(1,4 \pm 0,2) \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Esta velocidad de transferencia de radón indica que el escape es un proceso relativamente lento, lo que justifica el uso de radón como trazador de aguas subterráneas (Ongori et al., 2015: pp. 144-149).

En lo que se refiere a estudios de la concentración de radón en agua en el Ecuador, no se ha reportado ningún trabajo. Sin embargo, existe un estudio realizado en la provincia de Chimborazo el cual estudia la presencia de radioisótopos en agua de consumo. Este estudio realizado en el 2015, es la tesis de pregrado titulada “Riesgos a la salud por la contaminación radioactiva del agua potable de la ciudad de Riobamba” la cual caracteriza radiológicamente el agua de consumo humano en la provincia de Chimborazo utilizando dos técnicas: la primera alfa y beta total por el método de evaporación, obteniendo una actividad alfa total de 0.5 Becquerelio por litro (BqL^{-1}) y 1 Becquerelio por litro (BqL^{-1}) para la actividad beta total (Guevara, 2015: pp. 1-42).

1.2. Planteamiento del problema

El radón es un gas radiactivo en todos sus isótopos, es inodoro, insípido, invisible e imperceptible al tacto (Aylett, 1985: pp. 893-895). Es un gas noble, es decir químicamente inerte, pero altamente soluble en agua (sobre todo a bajas temperaturas y alta salinidad) (Wu et al., 2014: pp. 11122-11123), es así que el radón es transportado no solamente mediante procesos difusión y gradiente de presión en el aire sino que también viaja disuelto en aguas confinadas (acuíferos).

El radón constituye un riesgo radiológico (a través de la respiración o la ingestión el radón y sus descendientes, son introducidos al cuerpo humano, continuando su cadena de desintegración sobre las superficies internas del sistema respiratorio o sistema digestivo, dañando con la radiación emitida las células presentes, cuando se acumula en lugares cerrados, como por ejemplo hogares, escuelas, lugares públicos, etc. Las fuentes desde donde proviene el radón hacia interiores son el suelo, materiales de construcción, abastecimiento de agua (principalmente si el agua no ha recibido un tratamiento previo o proviene de acuíferos).

En nuestro planeta existen 3 cadenas radiactivas naturales, ^{238}U , ^{232}Th , y el ^{234}U . De las cuales el elemento más abundante es el ^{238}U (99.2739 - 99.2752) %, el cual es el predecesor del principal isótopo del radón: el ^{222}Rn . Usualmente los elementos descendientes de la cadena de decaimiento del ^{238}U son producidos en el mismo lugar donde se encuentra su predecesor, sin embargo, estudios recientes sugieren que los efectos climáticos (humedad, temperatura) y condiciones geológicas (permeabilidad del suelo, acuíferos) hacen que el ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra y ^{222}Rn sean separados unos de otros y de su padre el ^{238}U . Estos

radionúclidos tienen una vida media lo suficientemente larga para ser separados mediante procesos físicos o químicos. Como resultado de estos procesos el ^{226}Ra puede ser disuelto, transportado o re-depositado lejos de los depósitos de ^{238}U , de esta manera el ^{222}Rn es generado en lugares donde no se ha detectado la presencia de sus predecesores (Levinson et al., 1978: pp. 19-27), por ejemplo lugares residenciales, recreativos, etc.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC), incluyeron al ^{222}Rn en la clase 1, de la lista que enumera las 87 sustancias consideradas "definitivamente cancerígenas". En particular según la OMS y numerosos estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el radón es la primera causa de cáncer de pulmón para los no fumadores y la segunda para los fumadores. Además, el radón presente en el agua puede contribuir a incrementar el riesgo de cáncer de estómago.

1.3. Justificación

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), la Organización mundial de la Salud (OMS) y en particular la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) son encargadas de la valoración de la calidad del agua de consumo humano. Estas instituciones intergubernamentales reconocidas a nivel mundial, han publicado normas que dictaminan los límites máximos permisibles de concentración de ^{222}Rn en agua de consumo (110 Bq/l y 100Bq/l según la EPA y EURATOM respectivamente)(Risica et al., 2000: pp. 42-43). A nivel mundial los estudios sobre la concentración de radón en agua muestran que la media mundial es (20 Bq/l) para agua de consumo y (80Bq/l) para aguas subterráneas (Somlai et al., 2007: pp. 491-495). El Ecuador ha reportado datos escasos sobre la concentración de radón en aire, pero, no ha reportado ningún dato sobre concentración de este gas radiactivo en ningún tipo de agua, por ello la presente investigación plantea implementar un método que no solamente permitirá la identificación de radón en agua si no que será confiable y a bajo costo.

Para el buen desarrollo de ésta investigación y el posterior cumplimiento de los objetivos se aplicará el Método de la Cámara Cerrada, que es una de las técnicas alternativas utilizadas en los últimos quince años. Además, se cuenta con un monitor de ^{222}Rn el cual usa como detector de radón a un semiconductor de silicio unido a una cámara de difusión. Este detector de radón se usa convencionalmente para detectar radón en aire y en el presente trabajo se adapta este

detector con la cámara cerrada para construir el arreglo experimental que permitirá llevar a cabo la medición de la concentración de radón en agua.

La presente investigación es de relevancia social ya que contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas que consumen el agua de las vertientes del Volcán Carihuairazo, satisfaciendo uno de los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir “DERECHOS DEL BUEN VIVIR”, art. 12. *El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.* Para la realización de esta investigación se cuenta con el permiso de las comunidades que utilizan el agua en estudio, asimismo se cuenta con el permiso para construir el aparataje experimental en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela de Física y Matemática y con la disponibilidad del Laboratorio de Análisis de Radioactividad (ARAD) de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), para realizar las pruebas de control y validación del método.

1.4. Objetivos

- ***Objetivo general***

Implementar un método de detección del gas ^{222}Rn en agua proveniente de las vertientes naturales del volcán Carihuairazo.

- ***Objetivos específicos***

1. Construir la Cámara Cerrada para el análisis de ^{222}Rn .
2. Validar el nuevo método propuesto.
3. Elaborar el protocolo de muestreo de agua para el análisis de ^{222}Rn .
4. Calcular la dosis efectiva debida a la ingestión e inhalación de ^{222}Rn .
5. Calcular la velocidad de transferencia del ^{222}Rn en la interface agua-aire.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Distribución geológica de los generadores del radón

El radón se genera, en gran parte, donde el uranio está presente: en las rocas, el suelo o las aguas subterráneas (Felmlee & Cadigan, 1979, pp. 112-116). Así que, para entender la generación de radón, es necesario conocer la geología de su uranio y radio antecesor.

El uranio está presente en todas las rocas en diferentes porcentajes (UNSCEAR, 2016: pp. 365), puede permanecer como un sólido unido a recubrimientos minerales sobre arena y limo. El agua puede transportar uranio largas distancias durante millones de años antes de que se concentre, por lo general en zonas pobres en oxígeno, dentro de otras rocas. Con el tiempo, si se acumula suficiente uranio, puede formar un mineral económicamente valioso, que puede ser extraído (en solución o como un sólido).

Existen 15 grandes categorías de tipos de depósitos de uranio en función de su situación geológica alrededor del mundo (ver, Tabla1-2). Ésta clasificación geológica reportada por el Organismo Internacional de Energía Atómica exhibe el tipo de depósito, rocas asociadas y los países en los que se encuentran (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2009: pp. 1-296).

Existen varios mecanismos que permiten la distribución de uranio en el ambiente. Las rocas típicas enriquecidas con uranio incluyen rocas ígneas o volcánicas de color claro, ricas en sílice, como granitos o cenizas volcánicas, areniscas que contienen material orgánico o cemento de sílice, lutitas negras con altos contenidos orgánicos y carbón. En el océano, las aguas marinas profundas y anóxicas están saturadas de fosfato, que naturalmente se combina y concentra con uranio.

Tabla 1-2: Lista de depósitos de uranio desde una perspectiva geológica.

	Depósito	Rocas asociadas	Países de abundancia
1	Depósito Intrusivo	alaskita, granito, pegmatita y monzonitas	Namibia, Groenlandia, Canadá y Sudafrica
2	Depósitos relacionados con granito	Uranita	República Checa, Europa, Canadá y Australia.
3	Depósitos de complejo de brechas polimetálicas de óxido de hierro	granito rico en hematites	Australia
4	Depósitos volcánicos	rocas volcánicas ácidas a intermedias, y están relacionados con fallas y zonas de cizallamiento	China, Kazajstan, Perú, México y Australia
5	Depósitos de metaseatita	rocas estructuralmente deformadas que fueron afectadas por metasomatismo de sodio y / o potasio	Rusia, Brasil, Ucrania, Australia, Canadá y China
6	Depósitos de metamorfita	meta sedimentos y / o meta volcánicos no relacionados con el granito	Austria, República Democrática del Congo, República Checa, India, Kazajstán y Canadá Australia y Brasil
7	Depósitos de disconformidad proterozoica	rocas metasedimentarias falladas y brecciadas	Canadá y Australia
8	Depósito de tubería de brecha	Uraninita	Gran Cañón (EE.UU.), especialmente en la Franja de Arizona
9	Depósitos de arenisca	areniscas de grano medio a grueso	Kazajstán, Uzbekistán, Estados Unidos y Níger
10	Depósitos conglomerados de Paleo-cuarzo-guijarro	conglomerados de cuarzo-pétalo arcaico-paleoproterozóico primitivo	Canadá
11	Depósitos de esquisto negro	esquisto (lutitas ricas en arcilla marina o pizarra piramidal rica en carbón)	Suecia, Uzbekistán, Estados Unidos, China y Alemania.

Fuente: IAEA, 2009. (World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification)

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

Sin importar donde se encuentre el uranio, su decaimiento lleva a la formación del radio, padre del radón. El radio se puede localizar en suelos derivados de rocas carbonatadas, como la piedra caliza, que normalmente no se enriquece con uranio (Tanner, 1986: pp. 1-6). Durante el proceso de formación del suelo, el carbonato en la piedra caliza se lixivia dejando arcilla detrás que se enriquece con los materiales residuales, que incluyen el uranio. Además, a diferencia del uranio, el radio es soluble en agua ácida o rica en cloruros (Felmlee, 1978: pp. 1-28).

El agua subterránea está contenida en fracturas de roca y suelos que tienen contenido de uranio y radio. La fuente de radón en el agua subterránea puede estar en el agua misma o en la formación rocosa en contacto con el agua subterránea o en ambos. El contenido de minerales disueltos en el agua subterránea aumenta con el tiempo que el agua pasa en contacto con esos minerales (Nain et al., 2008: pp. 515-519).

La precipitación infiltrante lava los productos químicos en el suelo por ejemplo sales y las deposita en el agua subterránea. La afluencia de estas sustancias químicas mejora la disolución del radio y también de radón (Gainon et al., 2007: pp. 251-262) en las aguas subterráneas, incrementando la concentración de estos en las aguas subterráneas. Además, el radón permanece confinado con menor probabilidad de escape en acuíferos profundos. Es por esto que las aguas subterráneas tienen concentraciones más altas de radón que las aguas superficiales.

2.2 Propiedades químicas y físicas del ^{222}Rn

2.2.1 Propiedades Químicas

El radón es el único elemento gaseoso que es radiactivo en todos sus isótopos. Es químicamente inerte, es decir, no reacciona con ningún elemento y tiene un número atómico 86 por lo que se conoce como un gas noble. Por estas propiedades (ver Tabla 2-2) y en condiciones ambientales el radón escapa de su fuente y no forma compuestos.

Tabla 2-2: Propiedades químicas del ^{222}Rn .

Símbolo	Punto de ebullición (°C)	Punto de fusión (°C)	Número atómico	Configuración electrónica	Estado	Aspecto	Masa atómica (u.m.a.)
Rn	-61.8	-71	86	[Xe]4f145d106s26p	gaseoso	incoloro	222

Fuente: García, 2017 (Propiedades Químicas del radón)

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

2.2.2 *Propiedades Físicas*

Los isótopos del radón en la corteza de la Tierra se originan del uranio, el torio y el actinio distribuidos en diversas cantidades en el suelo (ver Figura 1-2). Cada uno inicia con un nucleído perteneciente al grupo de los actínidos de la tabla periódica (^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th), que tienen una vida media muy larga, además, terminan en un isótopo estable de plomo (^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb respectivamente).

En cada cadena de decaimiento se presentan una serie de núcleos intermedios con semividas que van desde microsegundos hasta miles de años. En éste proceso las series experimentan un desequilibrio, que se refiere al fraccionamiento de los elementos presentes en la cadena de desintegración generando un estado no estacionario es decir, en equilibrio secular (Bourdon et al., 2003: pp. 455-460).

A partir de estas series de desintegración se genera en la naturaleza tres isótopos del radón, el ^{222}Rn o *radón*, el ^{220}Rn o *torón* y el ^{219}Rn o *actinon* (ver Tabla 3-2). El isótopo ^{222}Rn tiene un periodo de semi-desintegración de 3.825 días y es originado por la desintegración del ^{238}U . El isótopo ^{220}Rn tiene una semi-vida de 55 segundos y proviene de la desintegración del ^{232}Th . A su vez, la cadena de desintegración del ^{235}U genera el isótopo ^{219}Rn que tiene un tiempo de vida media de tan solo 4 segundos. Se pueden producir otras dos docenas de isótopos de radón, pero ninguno de ellos proviene de los procesos naturales.

En la Figura 1-2 vemos representados la emisión de partículas beta en los procesos diagonales y los procesos verticales son la emisión de núcleos de helio (decaimiento alfa). En cada cadena de decaimiento los isótopos de radón resultan de una emisión alfa por radio; por lo tanto, la producción de radón es proporcional al radio presente en la tierra.

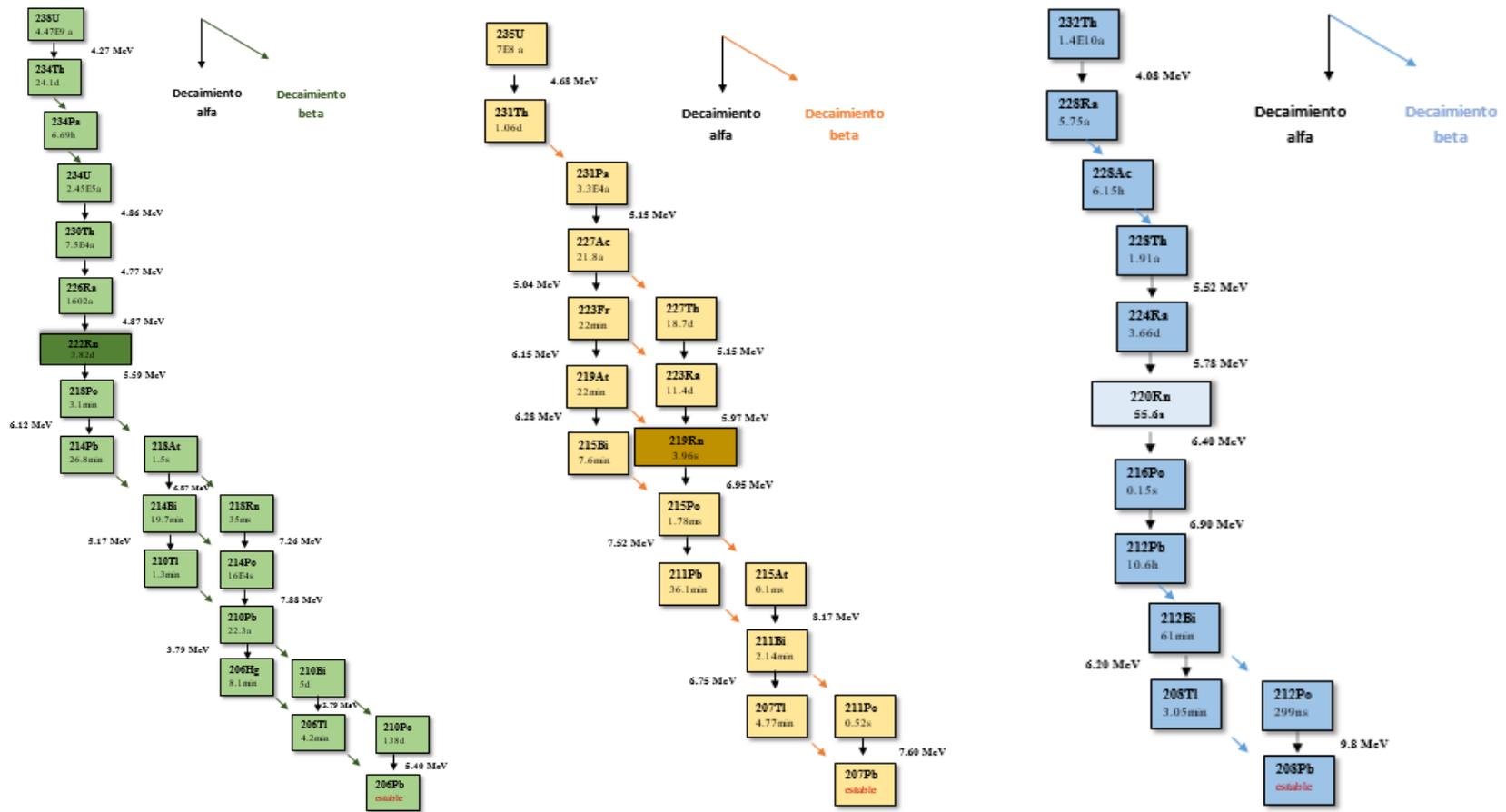


Figura 1-2: Cadenas de decaimiento radiactivo natural: 238U, 235U y 232Th

Fuente: (Vertes, et al., 2011, pp. 300-302), Handbook of Nuclear chemistry.

Las principales características físicas de los isótopos naturales del Radón se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Propiedades relevantes del ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{219}Rn

Parámetros		^{222}Rn	^{220}Rn	^{219}Rn
Denominación		Radón	Torón	Actinon
Vida media	$T_{1/2}$	3.8232 (8)d	55.8 (3)s	3.98 (3)s
Constante de decaimiento	λ	$2.098\text{E}-6 \text{ s}^{-1}$	$1.242\text{E}-2 \text{ s}^{-1}$	$1.742\text{E}-1 \text{ s}^{-1}$
Promedio de energía de retroceso	E_r	86keV	103keV	104keV
Actividad específica	A_m	$5.69\text{E}15\text{Bq/g}$	$34.00\text{E}18\text{Bq/g}$	$478.9\text{E}18\text{Bq/g}$
Coefficiente de difusión en aire	D_a	$1\text{E}-5 \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficiente de difusión en agua	D_w	$1\text{E}-9 \text{ m}^2/\text{s}$		
Energía alfa	Q^α	5590.3 keV	6404.7keV	6946.1keV

Fuente: (Tene, 2017: pp. 6), Environmental Radon Measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program for Ecuador.

Realizado por: Curi Guapizaca 2018

Desde el punto de vista de la Protección Radiológica, la importancia de los isótopos del Radón recae sobre su tiempo de vida media y su abundancia relativa. Analizando el tiempo de vida media del torón y actinon resulta que, en un minuto, el ^{219}Rn habrá desaparecido y una hora después, lo hará el ^{220}Rn . Por lo tanto, en una hora sólo se hallaría presente el ^{222}Rn . Además, el isótopo ^{219}Rn , en teoría, se produce en cantidades mucho más pequeñas que el isótopo ^{222}Rn , ya que la relación de sus progenitores $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ es 0,00719. Es así que, el isótopo ^{219}Rn puede ser considerado como un riesgo demasiado pequeño, por tanto, no significativo.

Otra consecuencia del corto tiempo de vida media del ^{220}Rn en comparación con el tiempo de vida media del ^{222}Rn es la distancia que logra alcanzar cada isótopo en diferentes medios. Por ejemplo: en aire, la distancia que alcanza el ^{222}Rn durante una vida media es 2,2 m, mientras que el ^{220}Rn solamente realiza un recorrido de 0.029 m (Tuccimei et al., 2006: pp. 254-256). Es por ello que la mayoría de estudios se concentran en el análisis del ^{222}Rn , ya que el ^{220}Rn se considera solo un fondo para los detectores. El presente trabajo se dedica específicamente al estudio del isótopo ^{222}Rn , de ahora en adelante denominado radón.

2.2.3 Isótopo ^{222}Rn

El ^{222}Rn es producido por una desintegración alfa del ^{226}Ra 100% emisor alfa, con energía de 5,6 MeV (ver Figura 2.2). Los productos de la desintegración radiactiva del radón no son químicamente inertes y en el aire se unen al polvo o partículas de agua en el aire. Así forma un

aerosol radiactivo que, de ser inhalados o ingeridos, podrían depositarse en tejidos internos durante su decaimiento. El ^{222}Rn está en equilibrio secular radioactivo con sus cuatro hijos de vida corta, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po después de aproximadamente 3,5 horas (Tene, 2017: pp. 6-7).

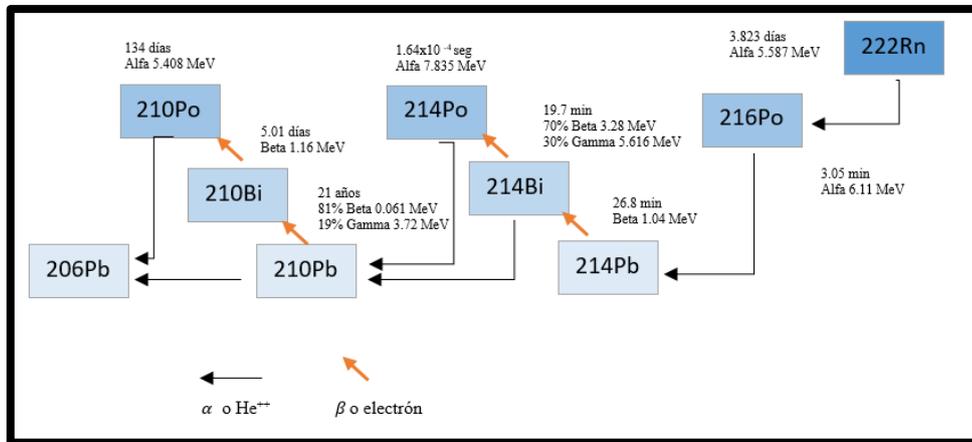


Figura 2-2: Esquema de decaimiento del radón.

Fuente: (Treviño, 1993: pp. 54-62), Determinación de la actividad alfa debida al radon-222 y a sus descendientes existente en el agua potable de la ciudad de Monterrey, Nuevo León y su área metropolitana.

2.3 Mecanismo de producción y liberación del radón

La existencia de radón en un determinado lugar no solamente depende de la cantidad de ^{226}Ra presente en el mismo si no de parámetros geológicos y climatológicos. Solo una fracción de radón originada del decaimiento de ^{226}Ra contenido en la corteza terrestre es libre para moverse a través de los espacios intersticiales del suelo (Treviño, 1993: pp. 17-18).

La eyección de la partícula alfa desde el núcleo de ^{226}Ra , origina el efecto de retroceso sobre el átomo resultante de ^{222}Rn , éste efecto de retroceso produce el movimiento del núcleo de radón desde el atice del grano donde fue creado, la distancia que puede moverse el núcleo de radón depende del medio en el que es liberado (Kigoshi, 1971: pp. 47-48). En la Figura 3-2 se presentan los mecanismos del radón al escapar del grano, esta gráfica muestra los núcleos de radio ubicados en un gránulo con una densidad normal y rodeado de gránulos adyacentes, poros (espacios intersticiales) llenos de aire y agua. Por lo tanto, el radón producido a partir del decaimiento del radio tiene cuatro destinos:

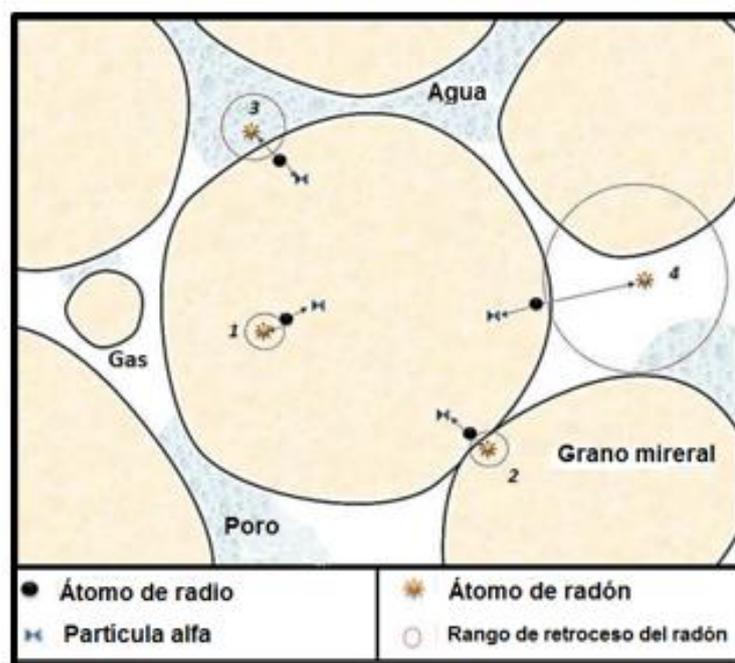


Figura 3-2: La emanación del radón desde los granos minerales.

Fuente: (Shane, 2007, p. 2). The Geology of Radon in Kansas.

1. Ser desplazado a través del gránulo originario;
2. Ser incrustado en un gránulo adyacente o en otro grano en su trayectoria;
3. Detenerse en poro que contenga agua;
4. Detenerse en un poro que contenga gas.

La distancia a la que pueden desplazarse los átomos de radón son: (0,02 - 0,07) μm en minerales comunes, (0,1) μm en aire y (63) μm en agua (Nazaroff, 1992: pp. 141), como consecuencia sólo átomos producidos en el borde del grano (menos de 70nm) puede alcanzar un poro. Cálculos desarrolladas alrededor del mundo (Sasaki et al., 2004: pp. 996), demuestran que la mayor cantidad de radón producido nunca escapa del lugar de nacimiento.

La pequeña fracción de radón que está disponible para ser transportada a una escala mayor que el diámetro de poro se define como el *radón emanado*. Además del contenido de radio, la emanación del radón depende de las características del material, tales como la composición y tamaño de los gránulos del material, la distribución de los gránulos en el interior del material, la porosidad y los parámetros ambientales. El parámetro ambiental como la temperatura y la presión tienen una influencia baja en la emanación del radón, aunque un alto aumento de la temperatura puede reducir la adsorción física del radón en los suelos (Lastra, 2016: pp. 6-14).

Mientras tanto, se ha demostrado que el contenido de humedad tiene un gran efecto sobre la emanación de radón a partir del suelo. Muchos estudios han demostrado que la emanación es mucho menor cuando el material fuente está seco en lugar de húmedo (Morawska & Phillips, 1991, pp. 254-256).

2.4 Mecanismo de transporte

El radón generado por la desintegración radiactiva del radio puede migrar durante su breve vida útil desde el suelo o agua a la atmósfera mediante dos procesos fundamentales, por convección y difusión. La convección depende del gradiente de presión. Los mecanismos responsables de la creación de este gradiente de presión son: la interacción del viento con el suelo y la calefacción (Robinson, 1996: pp. 39-42). Como sabemos el radón es un fluido, por tanto sigue la ley de Fick (Brogioli et al., 2001: pp. 2-3). Esta ley postula que el flujo j , va de regiones de alta concentración a regiones de baja concentración ver Figura 4-2, con una magnitud que es proporcional al gradiente de concentración de radón. El flujo fluctuante u' en una dirección es compensado por otro flujo u' de la misma magnitud en la dirección opuesta. Es así que, una ecuación de flujo de difusión dimensional es:

$$j = c_1 u' - c_2 u' = -u' \Delta c \quad [1]$$

j = cantidad de radón por unidad de área por unidad de tiempo

c = concentración de radón

u' = flujo fluctuante

La difusión de radón se puede describir con el coeficiente de difusión D que depende de la temperatura, la viscosidad del fluido y el tamaño de las partículas.

$$j = -D \frac{\delta c(x)}{\delta x} \quad [2]$$

$c(x)$ = concentración de actividad del radón.

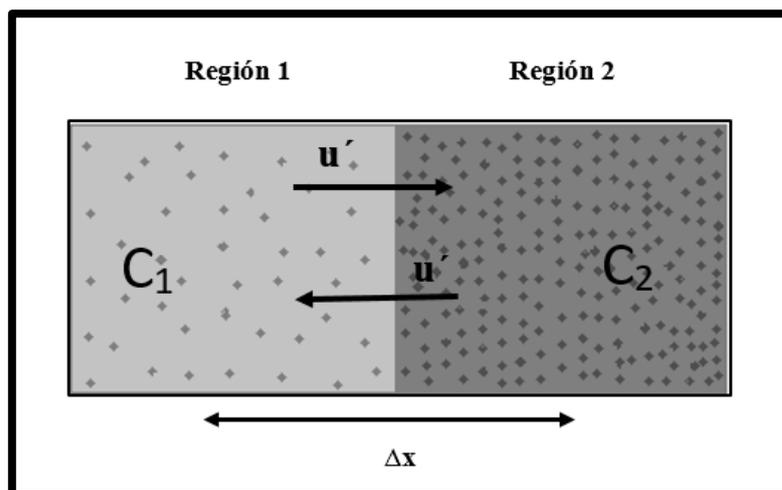


Figura 4-2: Esquema de difusión unidimensional del radón entre dos regiones con diferente densidad.

Fuente: (Brogioli & Vailati, 2000, pp. 2-3). Diffusive mass transfer by nonequilibrium fluctuations: Fick's law revisited.

2.4.1 Difusión

La principal fuerza impulsora del flujo de gas radón es el gradiente de concentración. Cuando se coloca una fuente de agua rica en radón en un recipiente lo suficientemente grande, existe la expectativa de que el radón se difunda de una concentración más alta a más baja. De esta forma, los átomos de radón salen espontáneamente de la fase líquida y se acumulan en la fase gaseosa y, al mismo tiempo, se descomponen. Como el agua es la fuente de radón, inicialmente se supone que el espacio de aire tiene una concentración de radón insignificante o nula. La teoría de la difusión está descrita por la Ley de difusión de Fick, y establece que el flujo de concentración es proporcional al gradiente de concentración en esa dirección como se formula en la siguiente ecuación:

$$J = -D\nabla C \quad [3]$$

donde J es la densidad de flujo efectiva de la actividad del radón ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), D es el coeficiente de difusión ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y C es la concentración de actividad del radón ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Para un proceso de difusión normal, las partículas no pueden ser creadas o destruidas. Esto significa que el flujo de partículas en una región debe ser la suma del flujo de partículas que fluye desde las regiones circundantes. Matemáticamente descrita por la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad [4]$$

donde el primer término representa el cambio de concentración con el tiempo, mientras que el segundo término representa el gradiente de flujo J. Al sustituir la ecuación (3) en la ecuación (4) se obtiene la ecuación de difusión siguiente

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D\nabla C) \quad [5]$$

Si D no varía con la posición, que normalmente es el caso, la ecuación (5) se convierte en la *segunda ley de Fick*:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C \quad [6]$$

Expandiendo y escribiendo la ecuación (6) en coordenadas espaciales se obtiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right) \quad [7]$$

En el presente estudio, nos aproximamos a un problema unidimensional. Los ejes x e y se ignoran porque se supone que el radón se está difundiendo a lo largo del eje z vertical. El eje z se elige para la columna vertical de agua en el contenedor, por lo que la ecuación (7) se reduce a la forma siguiente (Thakre et al., 2008: pp. 135-139).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) \quad [8]$$

Como la ecuación (8), no caracteriza la difusión del radón por completo; se requiere el término que describe el decaimiento del radón. La inclusión de este término conduce a la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) - \lambda C \quad [9]$$

donde λ_{Rn} es la constante de desintegración del radón. En nuestro caso, observamos una partícula de radón en una interfaz de agua cuando la partícula se difunde de agua a aire como se muestra en la Figura 5-2.

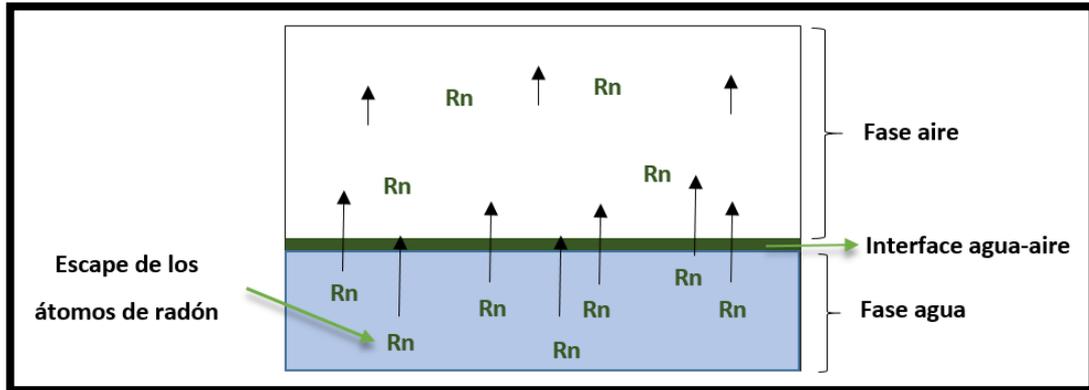


Figura 5-2: Radón en la interfaz agua-aire en el contenedor.

Fuente: Curi Guapizaca. 2018

$$F(t, T) = \beta(C_w(t, T) - \alpha(T)C_a(t, T)) \quad [10]$$

donde $F(t, T)$ es el flujo de radón del agua al aire, α es el coeficiente de Ostwald y β ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) es el coeficiente de velocidad de transferencia. El coeficiente de solubilidad de Ostwald, que depende de la temperatura se obtiene utilizando la ecuación de Fritz Weigel de la siguiente manera:

$$\alpha(T) = 0.105 + 0.405e^{-0.0502T} \quad [11]$$

Donde, T es la temperatura en grados Celsius.

En el equilibrio en el tiempo t y temperatura T la relación entre las concentraciones de radón, $C_w(t, T)$ en el agua y, $C_a(t, T)$ en el aire están dadas por

$$C_w(t, T) = C_a(t, T) \times \alpha(T) \quad [12]$$

Así, la ecuación (12) se utiliza para determinar la concentración de radón en el agua dada la concentración de radón en el punto de equilibrio en el aire. El coeficiente de Ostwald disminuye con un aumento de la temperatura. Esto significa que a temperaturas más altas la solubilidad del gas radón disminuye Figura 6-2.

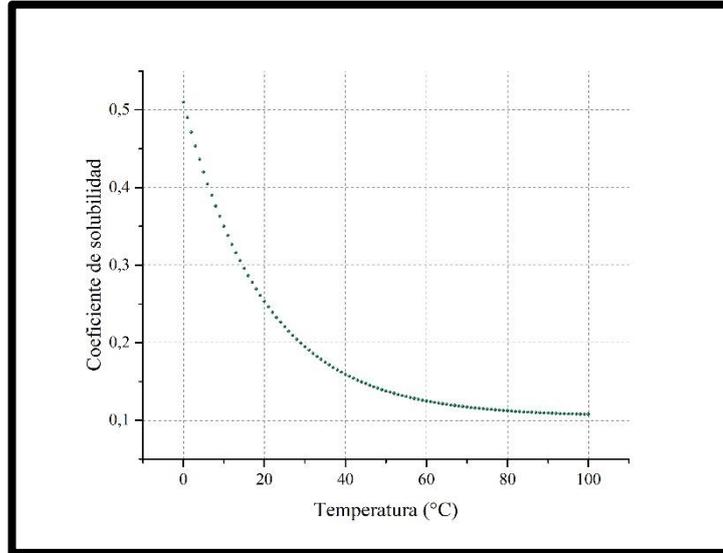


Figura 6-2: Solubilidad del radón a diferentes temperaturas.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

Los siguientes modelos de difusión se proponen para modelar el gas radón a medida que escapa de la fase acuosa a la fase aérea. Los términos dentro de los corchetes de la ecuación (10) se definen de la siguiente manera:

$$C_a(t, T) = \frac{N_a(t, T)}{V_a} \quad [13]$$

$$C_w(t, T) = \frac{N_w(t, T)}{V_w} \quad [14]$$

donde T y t representan la temperatura y el tiempo, respectivamente. La ecuación (13) y (14) representan las concentraciones de actividad del radón en el aire y el agua, respectivamente. En ambas ecuaciones, V_w y V_a representan respectivamente los volúmenes de agua y aire y N_w y N_a representan los átomos de radón en el agua y en el aire respectivamente. Teniendo en cuenta que el radón se descompone mientras escapa de una fase a otra, la ecuación (10) puede expresarse en términos de concentración para dar la siguiente ecuación para la concentración de actividad de radón acumulada en el aire en analogía con la ecuación (9).

$$\Delta C_a(t, T) = \frac{AF(t, T)\Delta t}{V_a} - \lambda C_a(t, T)\Delta t \quad [15]$$

Donde V es el volumen de aire, A es el área de la interface agua-aire medida en m^2 . Después de sustituir la ecuación (10) en ecuación (15), las ecuaciones resultantes se pueden escribir de la siguiente manera.

$$\Delta C_a(t, T) = \frac{A\beta(C_w(t, T) - \alpha C_a(t, T))\Delta t}{V_a} - \lambda C_a(t, T)\Delta t \quad [16]$$

Mientras que el modelo para los átomos de radón que se difunden y se descomponen a partir de la fase acuosa está dado por esta ecuación:

$$\Delta C_w(t, T) = \frac{A\beta(C_w(t, T) - \alpha C_a(t, T))\Delta t}{V_w} - \lambda C_w(t, T)\Delta t \quad [17]$$

La ecuación (16) rige la concentración de radón en el aire y la ecuación (17) rige el cambio de la concentración de radón en el agua. Dado que la difusión es desde la región de concentración más alta a la inferior, la inclusión de un signo negativo en la ecuación (17) es para indicar que los átomos de radón se están difundiendo desde el agua. La ecuación (16) y (17) pueden expandirse y escribirse como ecuaciones de diferencias finitas. Las ecuaciones (15) y (16) describen el comportamiento del radón en el sistema acuoso-gaseoso.

15 y 16 se escriben como ecuaciones de diferencias finitas:

$$C_a(t_i) = C_a(t_{i-1}, T) + \frac{A\beta(C_w(t, T) - \alpha C_a(t, T))}{V_a} (t_i - t_{i-1}) - \lambda C_a(t_i - t_{i-1}) \quad [18]$$

Del mismo modo, el cambio en la concentración de radón en el agua viene dado por:

$$C_w(t_i) = C_w(t_{i-1}, T) - \frac{A\beta(C_w(t, T) - \alpha C_a(t, T))}{V_w} (t_i - t_{i-1}) - \lambda C_w(t_i - t_{i-1}) \quad [19]$$

donde $C_a(t_{i-1}, T)$ y $C_w(t_{i-1}, T)$ son la concentración inicial de radón en el aire y el agua en el momento inicial t_{i-1} , respectivamente. El $C_a(t_i, T)$ y $C_w(t_i, T)$ son la concentración de radón iterada en el aire y el agua en el tiempo de paso t_i , respectivamente.

2.5 Efectos Biológicos del ^{222}Rn

Cantidades importantes de radón también son frecuentes en las aguas subterráneas (Chang et al., 2008: pp. 455-460). El radón representa un riesgo biológico porque al ser radiactivo se descompone en otros elementos liberando energía. Éstos elementos conocidos como “hijos del radón” son altamente radiactivos capaces de irradiar células basales sensibles, incrementando la probabilidad de generar un cáncer. Las progenies metálicas del radón (polonio, bismuto, plomo, mercurio, radio y talio) también se adhieren al aire y se inhalan, sedimentándose dentro de los pulmones (Barros-Dios et al., 2002: pp. 552-553).

Los efectos biológicos que genera el radón se inician con el paso de partículas alfa individuales con una transferencia lineal de energía (LET) muy alta. Las partículas alfa ionizan múltiples sitios de ADN, de tal manera que se producen remociones y reordenamientos de regiones cromosómicas lo que conduce a inestabilidades genéticas implicadas en la creación y progresión de tumores (National Research Council, 1999: pp. 12-14).

El radón ingresa al cuerpo humano por dos vías; ingestión e inhalación. A continuación, se detallan las fuentes y vías de exposición a la radiación generada por los productos de desintegración del radón (PDR), ver Figura 7-2.

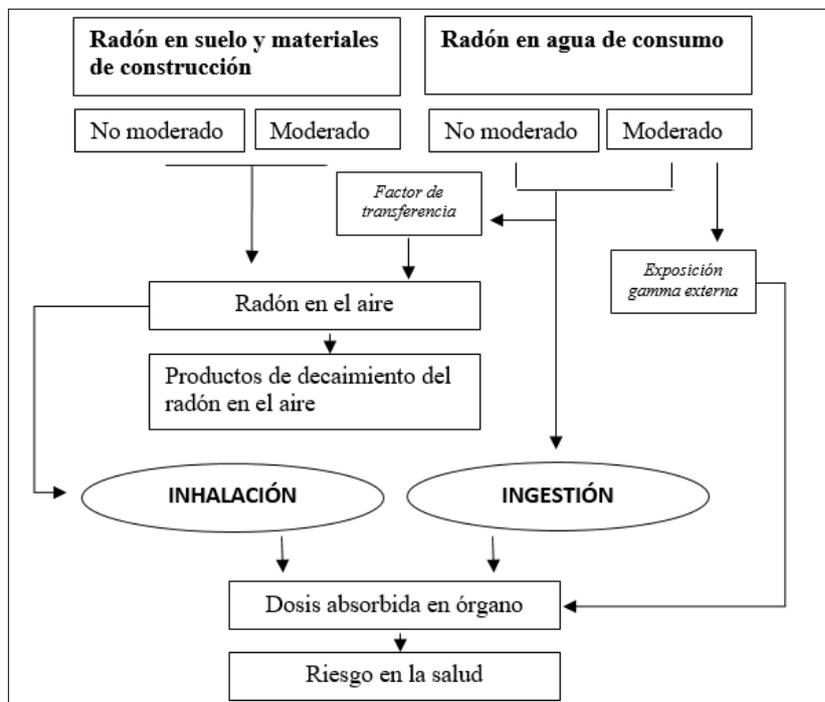


Figura 7-2: Fuentes de radón y vías de exposición de radiación.

Fuente: (National Research Council, 1999: pp. 59). Risk Assessment of Radon in Drinking Water

Ingestión

Al beber agua que contiene radón, una dosis de radiación se entrega a los órganos internos, sin embargo, el radón ingerido puede ser rápidamente retirado del cuerpo por exhalación. Éste proceso de eliminación biológica es aplicable a los productos de decaimiento formados dentro del cuerpo, pero la corta vida media de algunos de estos productos limita la importancia de estos procesos de eliminación.

Los productos de decaimiento formados dentro del cuerpo pueden entrar en sus propias vías metabólicas y vías de excreción del cuerpo, mientras que los productos de desintegración de vida más larga se eliminan por excreción urinaria y fecal.

A medida en que el radón se absorbe desde el tracto gastrointestinal y se retiene en el cuerpo se determina, en parte, por su solubilidad en la sangre y en los tejidos. La solubilidad de los distintos gases nobles en el agua a temperatura corporal se muestra como una función de la masa atómica en la Figura 8-2. El radón es considerado más soluble en agua que los gases nobles más ligeros, aproximadamente 15 veces más soluble que el helio y el neón. Los datos sobre las solubilidades de los gases nobles en los tejidos corporales presentan una relación similar, aunque los datos son más variables (National Research Council, 1999: pp. 60-65).

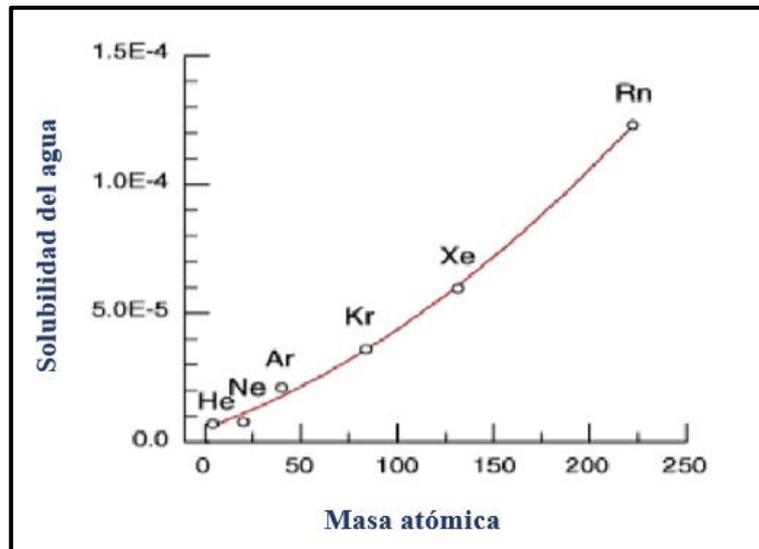


Figura 8-2: Solubilidad de los elementos de los gases nobles en el agua mostrados en función de la masa atómica.

Fuente: (National Research Council, 1999: pp. 62). Risk Assessment of Radon in Drinking Water.

Existen varias investigaciones que describen las estimaciones de la distribución de radón entre los tejidos, las cuales utilizan diferentes modelos (Correia, et al., 1987, pp. 20-80). El modelo farmacocinético basado en fisiología (PBPK, por sus siglas en inglés physiologically based pharmacokinetic), que se formula junto con el de flujo sanguíneo de Legget et al., (1995: pp. 187-198), obteniendo el modelo que se describe en la Figura 9-2.

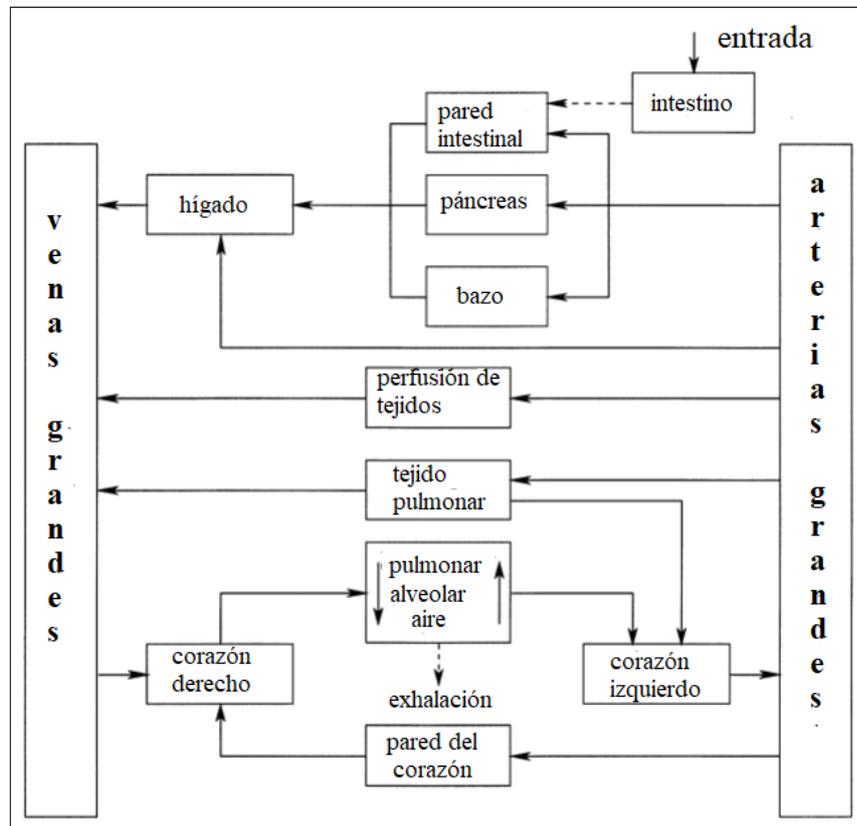


Figura 9-2: Diagrama del modelo PBPK para el radón ingerido.

Fuente: (National Research Council, 1999: pp. 67), Dosimetry of Ingested Radon and its.

Éste modelo explica que, el radón se distribuye por el flujo sanguíneo a los órganos, donde su transferencia depende de su solubilidad en el tejido con respecto a la sangre denominada el coeficiente de partición. El volumen de sangre del cuerpo se distribuye entre varios compartimentos, que representan varios pozos de sangre.

El compartimento "Venas grandes" representa el retorno sanguíneo venoso de los tejidos sistémicos, "Corazón derecho" y "Corazón izquierdo". El contenido de las cámaras del corazón; "Pulmonar" los gases que intercambian sangre en el pulmón y "arterias grandes" representa el flujo sanguíneo arterial a los tejidos sistémicos.

El compartimento etiquetado "entrada" en la Figura 9-2 se expande en la Figura 10-2, donde el tracto gastrointestinal se divide en cuatro segmentos, el compartimento "contenido ES", que

representa el contenido del estómago, "contenido ID" del intestino delgado, "Contenido de IGS" del intestino grueso superior y "Contenido de IGI" del intestino grueso inferior. "pared Es", "pared ID", "pared IGS" y "pared IGI" representan las paredes de esos segmentos.

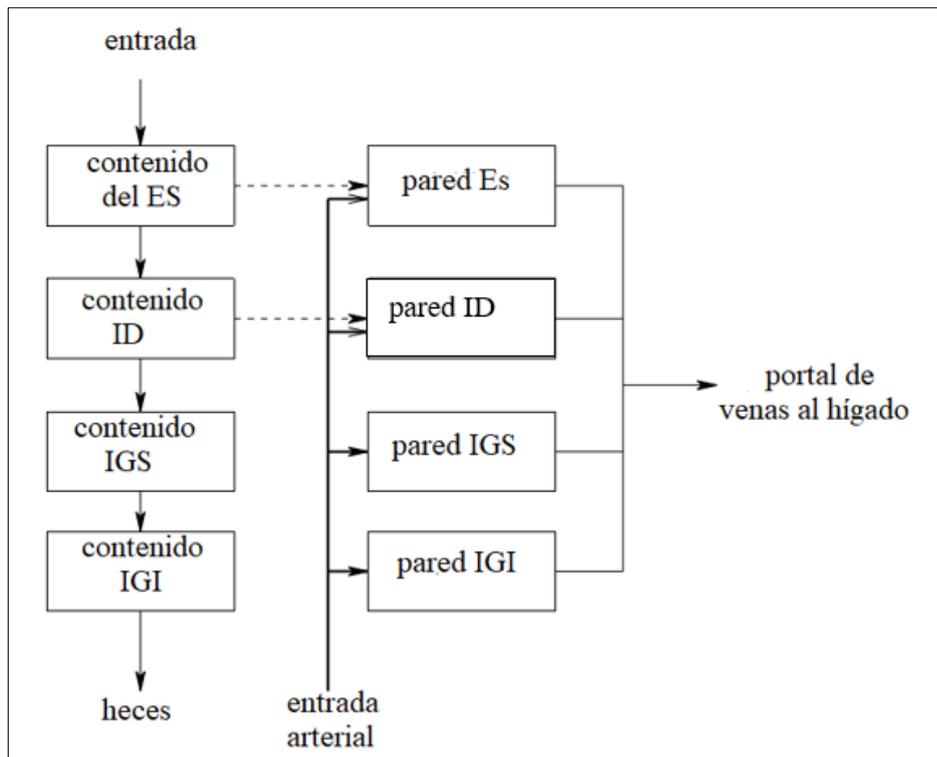


Figura 10-2: Expansión de los compartimentos intestinales de la figura 8.2 para mostrar los cuatro segmentos del tracto gastrointestinal.

Fuente:(National Research Council, 1999: pp. 68), Dosimetry of Ingested Radon and its.

El radón ingerido entra al estómago y se absorbe del intestino como se indica en la esquina superior derecha de la Figura 10-2. En las Figuras 9-2 y 10-2, las flechas punteadas indican la transferencia de radón como un gas, y las flechas sólidas corresponden al flujo de radón disuelto en arterias (flechas más gruesas) y sangre venosa.

En la Figura 10-2 se muestra que el intestino es perfundido por la sangre arterial, que, con la sangre que fluye desde el bazo y el páncreas, entra en la circulación al hígado como se muestra en la Figura 9-2. La sangre venosa se bombea por el lado derecho del corazón a la región pulmonar del pulmón, el compartimiento "Pulmonar" de la Figura 9-2, donde el radón se disuelve en los intercambios de sangre con el aire alveolar y se exhala. El ^{222}Rn ingerido se absorbe fácilmente y aparece rápidamente en el aire exhalado.

Inhalación

Cuando el gas radón es inhalado, los productos del radón se unen al tejido pulmonar y administran una dosis de radiación al tejido circundante. Los riesgos biológicos por la exposición al radón surgen de la inhalación de los productos de desintegración del radón (PDR). Las partículas generadas por los PDR se unen al aerosol, recorren las vías respiratorias y se asientan en las células blancas del epitelio bronquial por lo que el cáncer de pulmón asociado a la exposición al radón y sus productos de descomposición es broncogénico (UNSCEAR, 2006: pp. 12-13).

2.6 Técnicas de detección de radón en agua

2.6.1 *Espectrometría gamma*

La espectrometría gamma establece una de las técnicas más precisas para el estudio de la dispersión de radionúclidos gamma en el medio ambiente. Generalmente a nivel europeo, se tiene un equipo de espectroscopia gamma por región en cada país, ya que el costo del equipo oscila por los \$ 180 000 y el mantenimiento anual asciende \$10 000. El costo del análisis de una muestra de agua con ésta técnica oscila entre los 90 y 200 dólares en Ecuador.

Las energías e intensidades de los emisores gamma se detectan y analizan con un sistema de espectroscopia de emisión de rayos gamma producido por las fuentes radiactivas presentes en muestras sólidas o líquidas. Además, permiten determinar la identidad y la cantidad de emisores gamma presentes.

La espectroscopia gamma utiliza un detector que es un material pasivo que espera a una interacción gamma que se producen en el volumen del detector. Los mecanismos de interacción más importantes son el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares (Knoll et al., 2000: pp. 414-417). Usualmente los detectores están fundamentados en materiales como: yoduro de sodio (NaI), contadores de centelleo y germanio de alta pureza, en éste último cuando la radiación penetra en el detector crea un par electrón-hueco, los electrones fluyen en una dirección y las vacantes en la otra. El número final de electrones recogidos pueden crear un pulso electrónico cuya amplitud es proporcional a la energía de la radiación. Además, un equipo de espectroscopia gamma incluye la electrónica para procesar señales producidas por el detector, amplificadores asociados y dispositivos para la lectura visualización y almacenamiento del espectro (Barrera et al., 2008: pp. 6-9).

2.6.2 Emanometría

Es un método prospectivo utilizado en la búsqueda de elementos y minerales radioactivos, el objetivo es contar las típicas ionizaciones, es decir, los iones producidos por las partículas alfa emitidas por uno o más gases radiactivos contenidos en una muestra, por lo tanto, dicho método permitirá en éste caso la determinación de la concentración de ^{222}Rn en una muestra de agua, lo que permite la transferencia de radón del agua al flujo de aire (burbujeo). El radón transferido es detectado por un detector de radiación en aire. Para mayor detalle revisar la norma ISO13164 (2013: pp. 1-23)

2.6.3 Método de la Cámara Cerrada

Éste método utiliza una cámara hermética donde se puede medir el radón exhalado de forma pasiva desde una muestra de agua al aire. Una muestra se coloca dentro de la cámara, que se cierra herméticamente. Este sistema está conectado a un detector de radón en aire. Se utiliza la determinación del radón en el punto de equilibrio para calcular el radón inicial en el agua usando el coeficiente de solubilidad de Ostwald, α , que es dependiente de la temperatura (Ongori et al., 2015: pp. 4). El presente trabajo utilizará ésta técnica para el análisis de ^{222}Rn en muestras de agua.

2.7 Volcán Carihuairazo

El volcán Carihuairazo está ubicado en la Cordillera Occidental de los Andes, su nombre proviene de las palabras Quichua *cari* "hombre", *huaira* "viento" y *razu* "nieve". Es una montaña de acceso fácil, se caracteriza por poseer dos picos; "Josefina" y "Mocha", éste último ubicado 5020 msnm.

Su ubicación aproximada es 40 km al NO de la ciudad de Riobamba y a 22km al SO de la ciudad de Ambato, tiene una altura de 5.020 msnm. Inicialmente el Carihuairazo tenía dimensiones similares a las del Chimborazo, hoy la caldera es el sobrante después de las explosiones durante su último período de actividad remanente. No hay evidencia histórica de la actividad, actualmente el Carihuairazo se considera inactivo.

En dicho volcán predominan las andesitas piroxénicas y a juzgar por su caldera podría decirse que sus erupciones terminales estuvieron dominadas por materiales dacíticos (Cadena & Nicolas, 2009, pp. 2-6). De las faldas de dicho volcán nacen varias vertientes naturales que proporcionan líquido vital para las comunidades aledañas, es de especial interés las vertientes denominadas

Santa Rosa y Santa Troya quienes están ubicadas a 20 km al SO de la ciudad de Ambato de donde se abastecen 5 comunidades de aproximadamente 2000 habitantes, los cuales consumen unos 50 litros de agua al día por persona, las cuales serán objeto de estudio en el presente trabajo.

CAPITULO III

3. DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 Procedimiento Experimental

3.1.1 Construcción de la Cámara

Con el objetivo de obtener la máxima hermeticidad en la cámara se utilizó seis láminas de vidrio crudo de $50 \times 50 \text{ cm}^2$, con un grosor de 0.5 mm. Para unirlos se utilizó silicona. El volumen total de la cámara es de 125 L. La lámina superior es movable para insertar la muestra, a su vez la cámara posee tres agujeros temporales; dos agujeros de 1 cm de diámetro que permiten conectar dispositivos externos y un agujero de 2.5 cm de diámetro por donde se ingresa la muestra de agua.

Se usa este sistema cerrado, en equilibrio gravitatorio e isotérmico, y sin ningún fenómeno conectivo con la finalidad de que el transporte de radón sea por difusión y descomposición radiactiva.

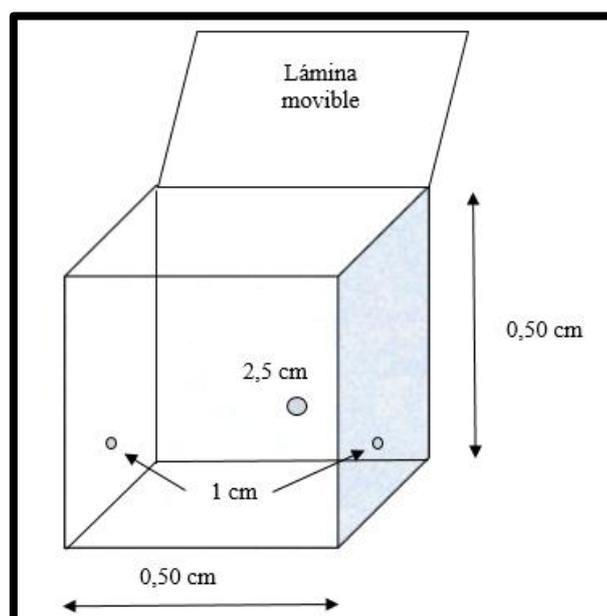


Figura 1-3: Esquema de la cámara cerrada con sus respectivas dimensiones.

Fuente: Curi S. Guapizaca. J. 2018

3.1.2 Equipo para monitoreo

Como equipo para monitoreo se utilizó el Alpha-E, que es un dispositivo de medición pasivo para detectar y registrar la concentración, exposición y dosis de radón (ver Figura 2-3), sus características principales se expresan en la Tabla 1-3. Basado en el principio de difusión con un detector de silicio, el gas radón se difunde a través de los orificios de entrada de la carcasa hacia el interior de la cámara de difusión. Los agujeros están completamente cubiertos por una membrana Gore-Tex. Solo el gas radón puede ingresar a la cámara mientras los productos de decaimiento del radón (polonio, plomo, bismuto), son retenidos por la membrana.

Por lo tanto, la medición se realiza independientemente de los parámetros externos fluctuantes como la concentración de aerosoles. Vale la pena mencionar que estos factores tienen un gran impacto en la medición de las progenies de radón, pero no tienen influencia en el gas radón.

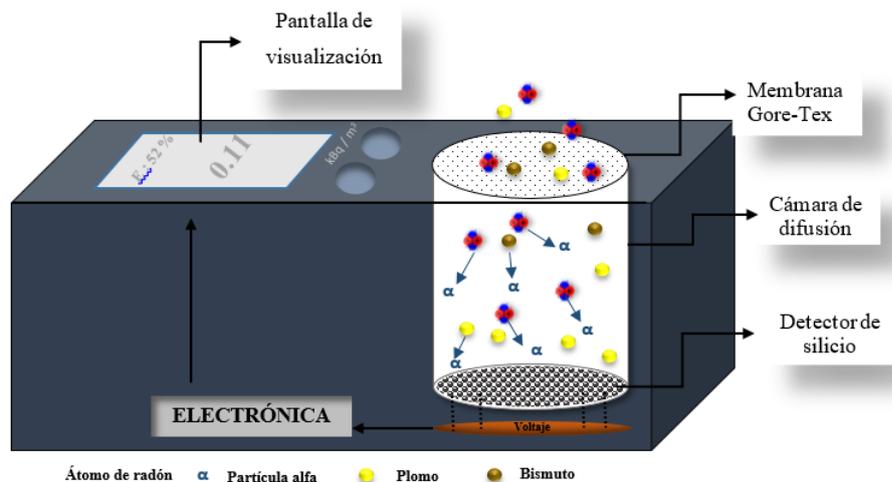


Figura 2-3: Alpha-E: Funcionamiento y elementos de control.

Fuente: SAPHYMOGmbH, 2016. (Manual ALPHA-E)

La radiación alfa emitida durante la desintegración de ^{222}Rn es registrada por el detector de silicio. Sin embargo, junto con la descomposición de ^{222}Rn también sus progenies alfa emisoras se desarrollan en el interior de la cámara y se separan en sus paredes. La radiación alfa causada por las progenies de radón cuando se descompone es proporcional a la concentración ^{222}Rn dentro de la cámara. Su contribución a la radiación representa la mayor parte de la señal y, en consecuencia, se considera mediante el algoritmo de evaluación y el factor de calibración.

Los pulsos de voltaje generados por el detector de silicio se amplifican subsecuentemente, se cuentan, se convierten a las unidades requeridas y se almacenan por el controlador de acuerdo con el ciclo de medición predefinido.

Además del valor de las mediciones discretas derivadas de los conteos acumulados en el transcurso del ciclo de medición respectivo como se describió anteriormente, se presenta una media flotante es una media calculada de forma permanente, almacenado y mostrado siempre en la pantalla del dispositivo. Este modo suprime las fluctuaciones estadísticas y permite a ALPHAE, incluso a bajos niveles de concentración de radón, proporcionar siempre en su pantalla un valor confiable que se ajusta para valores atípicos estadísticos.

El equipo además posee un sensor de inmersión para medir la temperatura del aire, la humedad y la presión, así como para registrar los eventos de choque y reubicación (manipulación) proporcionan datos auxiliares. Estos valores también se almacenan junto con los datos radiológicos y sirven para un análisis exhaustivo, especialmente de la dosis.

Tabla 1-3: Características del equipo ALPHA-E.

Principio de detección	Cámara de difusión con diodo de silicio
Unidad de medida	SI(Bq/m ³) o US (pCi/l)
Rango de medidas	20 Bq/m ³ ... 10M Bq/m ³ (0,54 pCi/l ... 270 000 pCi/l)
Eficiencia del detector Sensibilidad	3cph a 100 Bq/m ³ (2,7 pCi/l)
Rango de dosis	0 ... 1 Sv (0 ... 10 rem)
Límite inferior de detección	100 Bq/m ³ (2,7 pCi/l) en 12 hrs
Ciclo de medición	1-12 hrs (ajustable)
Constante de tiempo de difusión	1 ... 2 hrs (para llegar al 90% del valor final)
Rango de temperatura a la que opera	-20 ... 50 °C (-4 ... 122 °F)

Fuente: SAPHYMOGmbH, 2016. (Manual ALPHA-E)

Realizado por: Curi Guapizaca. 2018

3.1.3 Muestreo

La recolección de muestras se realiza en las vertientes naturales que surgen del volcán Carihuairazo, las fuentes se encuentran ubicadas a una altura de 4339msnm, con una latitud de

1°22'14.83" S y Longitud de 78°44'18.87" O. Además, a 10.59 km de las vertientes se encuentra un tanque de captación del cual se distribuye el agua a las 5 comunidades (ver Figura 12-3).



Figura 3-3: Ubicación de las vertientes y tanque de captación del volcán Carihuairazo.

Fuente: GoogleEarthPro, 2018

Las muestras fueron extraídas directamente de las vertientes denominadas Santa Rosa y Santa Troya (ver Figura 4-3) y transportadas en contenedores de plástico para ser analizadas en el laboratorio, siguiendo el protocolo expuesto en el ANEXO A. Los contenedores con un volumen de 3.15 L fueron llenados en su totalidad y para minimizar la pérdida de radón, los contenedores se cerraron bajo el agua. Se utilizó fichas técnicas para tomar datos en el momento del muestreo y en el proceso de experimentación.



Figura 4-3: Vertientes naturales del volcán Carihuairazo: Santa Rosa, Santa Troya.

Fuente: Curi Guapizaca, 2018

3.2 Método de la cámara cerrada

El radón escapa del agua al aire por un proceso llamado difusión que se puede definir como la transferencia de masas de moléculas individuales de una sustancia provocada por un movimiento molecular aleatorio bajo la influencia de una fuerza motriz que puede ser la presión, la temperatura o el gradiente de concentración. La difusión del radón es causada por un movimiento molecular aleatorio (Masaro et al., 1999: pp. 733). La velocidad de difusión en los gases es de aproximadamente 5 cm/min, 0.05 cm/min en líquidos y solo aproximadamente 0.00001 cm/min en sólidos (Othman et al., 2010: pp. 7-8).

La difusión del radón en la cámara cerrada se encuentra en un entorno inactivo porque la cámara cerrada es tal que el experimento no se ve afectado por ningún factor externo. El experimento realizado en la cámara imita el escape de radón de la muestra de agua expuesta al aire, en ríos o lagos, vertientes naturales y tanques, el radón se pierde fácilmente del agua cuando el agua fluye sobre las rocas o es movida por el viento. Una transferencia neta de ^{222}Rn ocurre desde el agua a la atmósfera a través de la interfaz aire-agua a través del proceso de difusión molecular (Wu et al., 2014: pp. 11122).

En éste estudio, la muestra de agua se coloca en el recipiente en una cámara cerrada, la misma que se cierra herméticamente antes de la pérdida de radón al aire.

Los parámetros que consideran la difusión del radón del agua son variables independientes porque sus valores también se proporcionan al estudiar el modelo. En este estudio, el volumen de la muestra de radón, el volumen de aire y el coeficiente de Ostwald son los parámetros de entrada. El modelo produce las variables dependientes, éstos son los puntos de salida del modelo numérico. Los valores de la concentración de la actividad del radón en el aire y el agua en función del tiempo son variables dependientes. Los modelos numéricos generalmente se estudian para observar el comportamiento de las variables de salida con respecto a los valores de entrada cambiantes.

Los experimentos en esta tesis se llevaron a cabo colocando una muestra dentro de la cámara cerrada y midiendo el radón en el aire para encontrar la tasa de escape de radón del agua. Las muestras se conservan durante aproximadamente tres días para obtener datos expresados en concentraciones de actividad de radón. El radón concentrado en agua pasa a través de un proceso de difusión a la fase en aire donde es detectado, medido y almacenado por el ALPHAE.

La solubilidad del radón a temperaturas típicas es de aproximadamente 0,22. Las temperaturas en la cámara cerrada se encontraron en el rango de 23-27 ° C. La configuración de la cámara cerrada se muestra en la Figura 5-3.



Figura 5-3: Configuración experimental del método de la Cámara cerrada.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

3.3 Medición de la concentración de actividad en agua

La medición del radón en la cámara cerrada depende del volumen y la temperatura. La configuración del equipo utilizado se muestra en la Figura 2-3. El radón en la interfaz agua-aire se muestra esquemáticamente en la Figura 5-2.

La muestra de agua que se inserta dentro de la caja manteniendo la turbulencia del agua lo más baja posible, el radón se transporta naturalmente del agua al aire a través de la superficie de contacto. El problema físico del transporte de radón del agua al aire se reduce a una diferencia unidimensional como explica la ecuación (9). Es así que, la actividad total de radón A_t dentro de la cámara es la suma de la actividad del radón en el aire más la actividad del radón en el agua así,

$$A_t = (C_a^{eq}V_a + C_w^{eq}V_w)e^{t_{eq}\lambda_{eff}} = (C_a^{eq}V_a + \alpha C_w^{eq}V_w)e^{t_{eq}\lambda_{eff}} \quad [20]$$

Donde, V_a y V_w son el volumen de agua y aire respectivamente. λ_{eff} tiene en cuenta la descomposición espontánea del radón y la fuga de la cámara (ver ec.21).

$$\lambda_{eff} = \lambda_{Rn} + \lambda_{fuga} \quad [21]$$

De la ecuación 20, la concentración de radón en el agua antes de la transferencia (Ongori et al., 2015: pp. 5) puede determinarse por la siguiente ecuación

$$C_w = \left[C_{eq}^* \frac{V_N}{V_{agua}} - \alpha C_{eq}^* \right] e^{-\lambda_{eff}t} \quad [22]$$

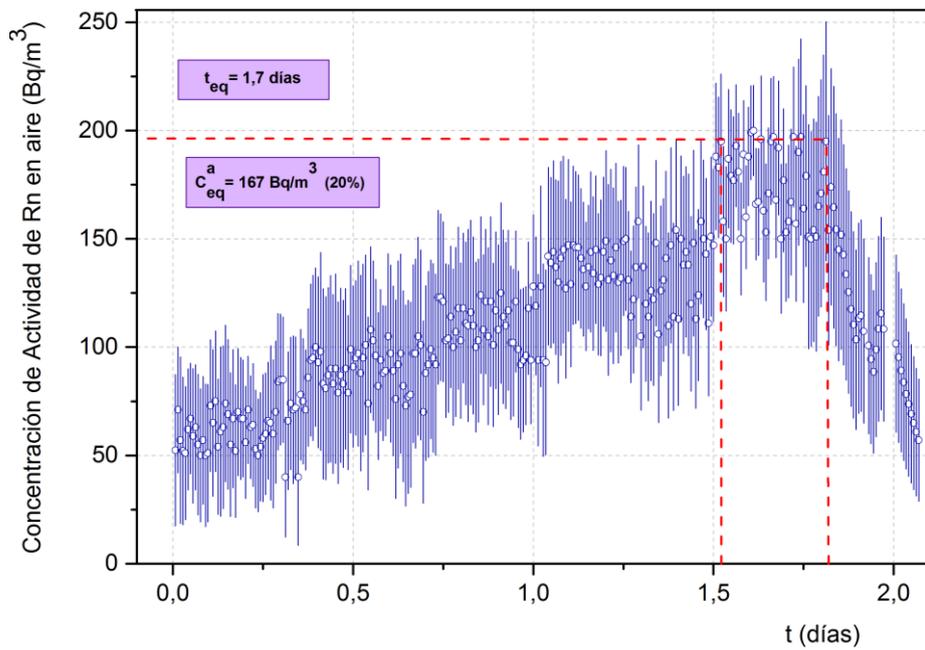
Donde C_{eq}^* es el valor experimental de la concentración de radón en el aire en el estado de equilibrio corregido, y se obtiene restando el fondo de concentración de radón de la cámara C_{Bg} (ver ec.23).

$$C_{eq}^* = C_{eq} - C_{Bg} \quad [23]$$

En ecuación (22), C_w es el valor de la concentración de radón en agua en el momento inicial, cuando la muestra de agua se insertó en la cámara. Para obtener la concentración de radón del agua en el momento del muestreo, se debe aplicar la corrección del tiempo.

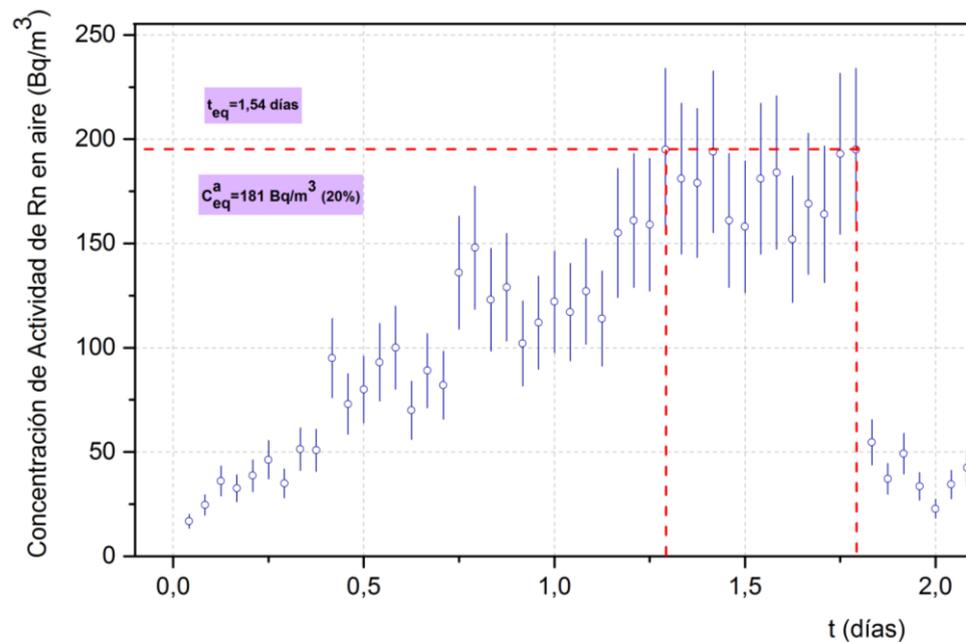
La concentración en equilibrio C_{eq} y el tiempo en equilibrio t_{eq} ocurren cuando el radón a emigrado completamente desde el agua hacia el aire, es decir, la concentración en agua es 0 y la concentración es la máxima. Se identificó estos puntos con la ayuda de la gráfica de la concentración de actividad vs el tiempo.

FUENTE: SANTA ROSA



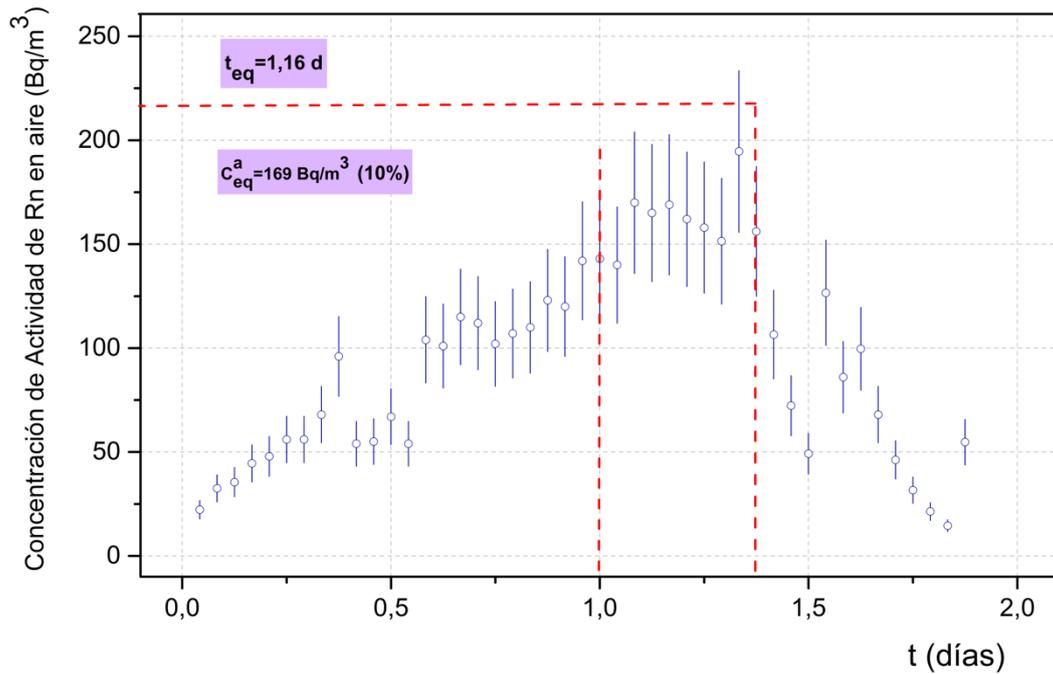
Gráfica 1-3: Fuente 1- Muestra 1: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018



Gráfica 2-3: Fuente 1- Muestra 2: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.

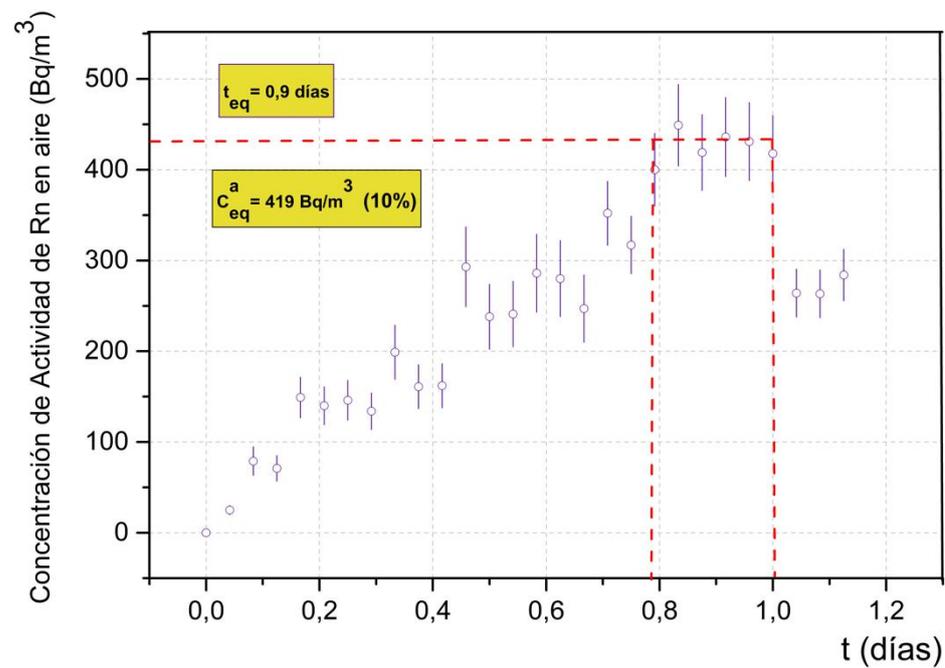
Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018



Gráfica 3-3: Fuente 1- Muestra 3: Curva de acumulación de la concentración de actividad en el punto de equilibrio.

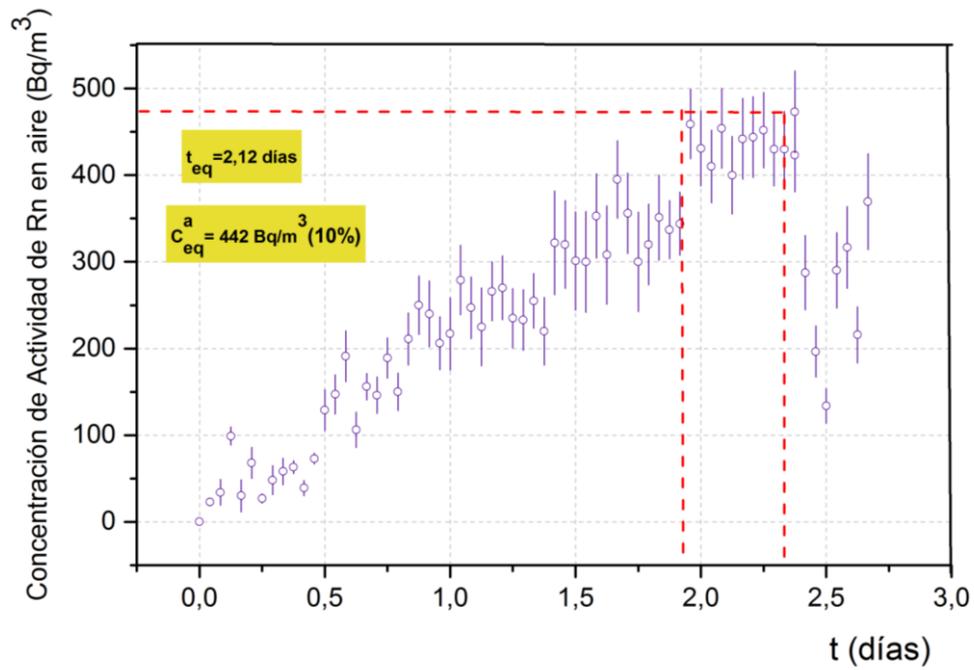
Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

FUENTE: SANTA TROYA



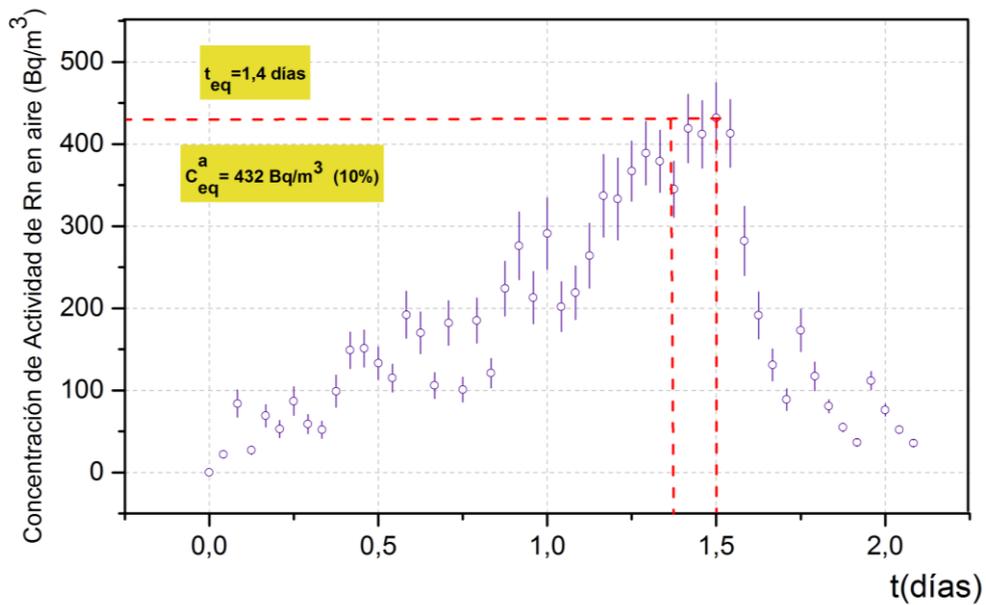
Gráfica 4-3: Fuente 2- Muestra 1: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018



Gráfica 5-3: Fuente 2- Muestra 2: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018



Gráfica 6-3: Fuente 2- Muestra 3: Curva de concentración de actividad en el punto de equilibrio.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

3.3.1 Tasa de fuga de cámara

En la caja se podría producir un flujo de aire de salida y ser impulsado a través de las uniones de la tapa. La tasa de fuga es claramente un parámetro importante para caracterizar el rendimiento de la cámara y para estimar la velocidad de escape de radón de agua con un método de cámara cerrada. La disminución teórica de la concentración es

$$C_{th} = C_0 e^{-\lambda_{Rn} t} \quad [24]$$

En la cámara cerrada la concentración de radón es C_0 . Si el diferencial se aplica en el límite cuando $t \rightarrow 0$, la pendiente inicial de la curva de disminución teórica es

$$\frac{C_{th}}{dt_{t \rightarrow 0}} = M_{th} = -\lambda_{Rn} C_0 \quad [25]$$

Si hay una fuga en la cámara, la velocidad de disminución es más rápida que λ_{Rn} , debido a la contribución de la tasa de fuga de la cámara λ_{leak} . En ausencia de la muestra no existe la contribución diferida, entonces la tasa efectiva es como se describe en la ecuación (21). La disminución de la concentración experimental de radón C_{ex} es:

$$C_{ex} = C_0 e^{-\lambda_{eff} t} + \frac{\lambda_{leak}}{\lambda_{eff}} C_{Bg} + \frac{\lambda_{leak}}{\lambda_{eff}} C_{Bg} e^{-\lambda_{eff} t} \quad [26]$$

Donde C_0 es la concentración inicial de radón. Aplicando el diferencial en el límite cuando $t \rightarrow 0$, la pendiente inicial de la curva de decaimiento experimental produce:

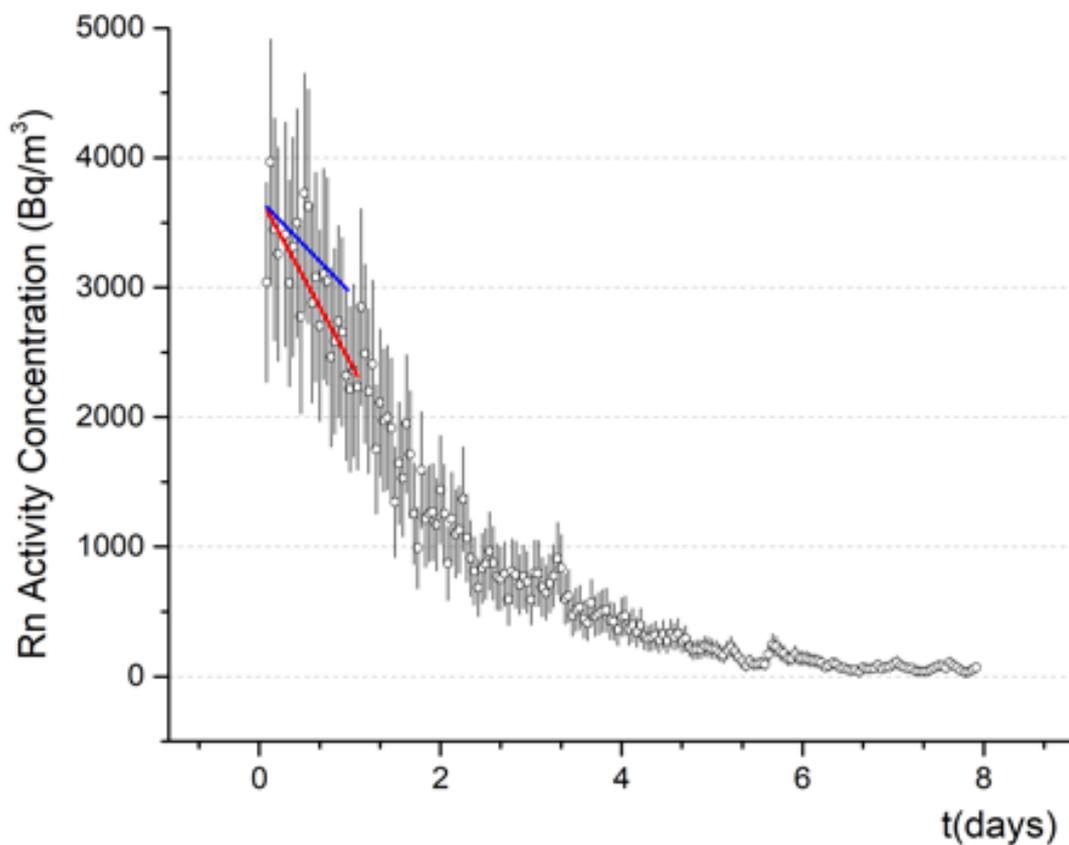
$$\frac{dC_{ex}}{dt_{t \rightarrow 0}} = M_{ex} = -\lambda_{eff} C_0 + \lambda_{leak} C_{Bg} \quad [27]$$

Un método para determinar la tasa de fuga de la cámara es comparar las pendientes iniciales de la curva de desintegración del radón teórica y experimental M_{th} y M_{ex} respectivamente. La diferencia entre los puntos teóricos y experimentales indica que el radón de la cámara perdió la velocidad λ_{leak} debido a la fuga.

$$M_{th} - M_{ex} = \lambda_{leak} (C_0 - C_{Bg}) \quad [28]$$

$$\lambda_{leak} = \frac{M_{th} - M_{ex}}{(C_0 - C_{Bg})} \quad [29]$$

En la experimentación se colocó un mineral radiactivo (Uranio) dentro de la caja, la misma que permitió la acumulación de ^{222}Rn en el volumen de aire de la cámara. Una vez transcurrido 48 horas se procede a sacar el mineral radiactivo de la caja para medir la concentración de actividad de radón y observar el decaimiento propio del radón. Mediante una relación entre las pendientes iniciales (teórica y experimental) podemos conocer la tasa de fuga de radón de la cámara (ver Gráfica 7-3)



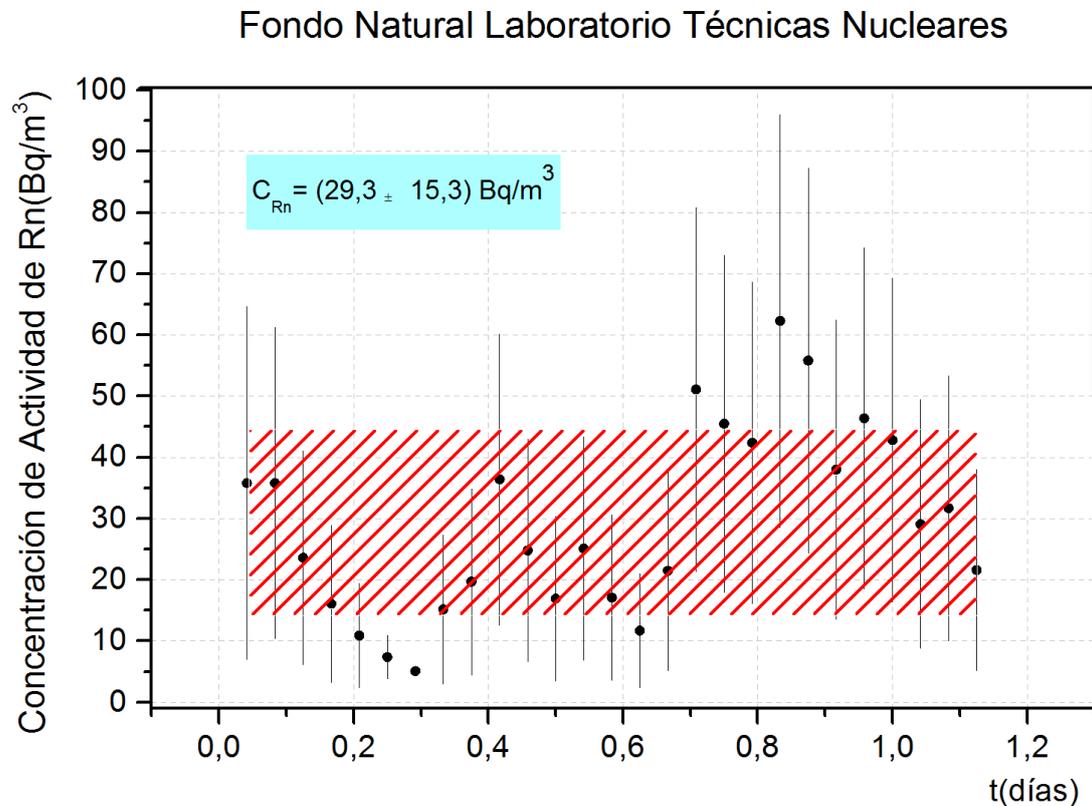
Gráfica 7-3: Concentración de actividad de radón medida en la cámara donde se acumuló una cantidad considerable de radón (56k Bq/m³) y la disminución exponencial de la concentración de radón. La tasa de fuga se ve representada por la relación entre la pendiente teórica (azul) y la pendiente experimental.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

3.3.2 Fondo

La evaluación del fondo de cámara C_{Bg} es necesaria para obtener C_{eq}^* . Es así que, Chao et al., (Chao et al., 1997: pp. 355-362) usaron la concentración medida en el laboratorio donde está instalada la cámara. Este procedimiento no tiene en cuenta la amplia variación entre las estaciones y una gran fluctuación día/noche de la concentración medida. Además, dependiendo de la temperatura, la concentración del laboratorio puede variar entre un 20-30%.

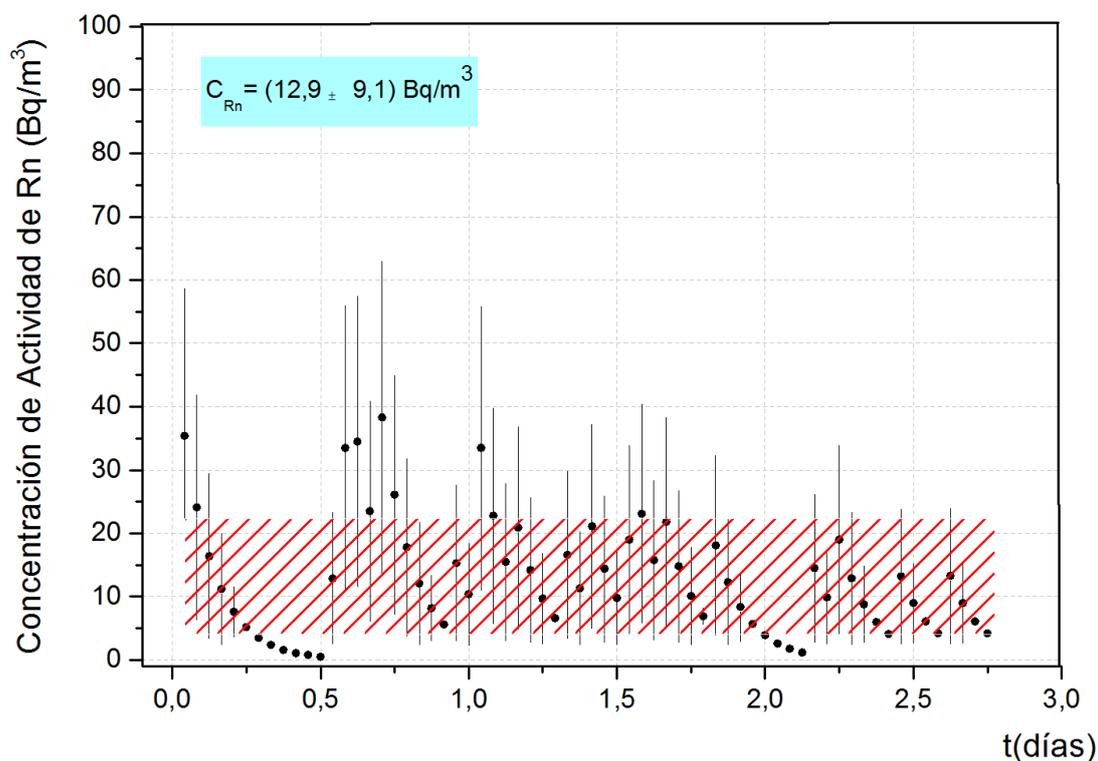
Las Gráfica (8-3) y (9-3) muestran dos mediciones independientes realizadas en el laboratorio y dentro de la cámara cerrada vacía durante al menos 3 días.



Gráfica 8-3: Fondo natural del laboratorio de técnicas nucleares medido en un periodo de 1,2 días.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

Fondo Natural Cámara Cerrada



Gráfica 9-3: Fondo natural de la cámara cerrada medido en un periodo de 3 días.

Fuente: Curi S. Guapizaca J. 2018

Se ha repetido una medición de fondo de la cámara antes cada medida para verificar la estabilidad de la cámara ya que algún residuo de la muestra anterior puede modificar el fondo de la cámara o del laboratorio. Por esta razón, se utiliza el valor medio de concentración de radón obtenido en la cámara cerrada para estimar el fondo de la medición de exhalación para reducir significativamente las incertidumbres totales debidas a éste parámetro.

3.4 Validación del Método

La exactitud del método ha sido ampliamente comprobada por varios autores. La verificación de nuestro método es exacto se realizó, utilizando como valor referencial los resultados obtenidos con espectrometría gama. Se analizó una muestra proveniente de las aguas termales ubicadas en El Salado de la ciudad de Baños de Agua Santa (ver ANEXO B). El análisis se realizó siguiendo la norma ISO 10703-2016 donde se indica los protocolos y metodología a seguir. Se estudió la muestra obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2-3: Resultados de la validación del método.

Muestra	Espectrometría gamma	Método de la cámara cerrada
El Salado Baños-Tungurahua	16,7 Bq/L (2%)	15,5 (10%)

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

3.5 Coeficiente de velocidad de transferencia del ^{222}Rn en la interface agua-aire.

El coeficiente de velocidad de transferencia se obtiene a partir de la integración de la ecuación (15), evaluado en un tiempo inicial t_0 y un tiempo t .

$$\int_{t_0}^t \frac{dC_a(t)}{dt} = \int_{t_0}^t \frac{AF(t)}{V_a} - \int_{t_0}^t \lambda C_a(t) \quad [30]$$

$$C_a(t) = \frac{A}{V_a} [F(t_0) - F(t)] - \lambda [C_a(t_0) - C_a(t)] \quad [31]$$

Reemplazando la ecuación (10) en (31) obtenemos

$$C_a(t) = \frac{A}{V_a} [\beta(C_w(t_0) - C_a(t_0)) - (\beta(C_w(t) - C_a(t)))] - \lambda [C_a(t_0) - C_a(t)] \quad [32]$$

$$C_a(t) = \frac{A\beta}{V_a} [C_w(t_0) - \alpha C_a(t_0) - (C_w(t) + \alpha C_a(t))] - \lambda C_a(t_0) + \lambda C_a(t) \quad [33]$$

$C_w(t_0)$ = concentración inicial en agua C_w .

$C_a(t)$ = Concentración en equilibrio C_{eq}^* al tiempo t_{eq}

$C_a(t_0)$ = Concentración de fondo de la cámara (Background) C_{Bg} .

λ = Lamda efectivo λ_{eff} .

A = área de la interface agua-aire.

V_a = Volumen neto (volumen en aire).

α = coeficiente de Oswald.

β = Coeficiente de velocidad de transferencia en la interface agua-aire.

Si reemplazamos los parámetros antes mencionados, tenemos la siguiente expresión:

$$C_{eq}^* = \frac{A\beta}{V_a} [C_w - \alpha C_{Bg} + \alpha C_{eq}^*] - \lambda C_{Bg} + \lambda C_{eq}^*(t) \quad [34]$$

La concentración de radón en agua en un tiempo t final $C_w(t) = 0$ se considera 0 ya que todo el radón que inicialmente se encontraba en agua ha pasado a la fase en aire.

Finalmente, de la ecuación (34) se obtiene el coeficiente de transferencia de radón.

$$\beta = \frac{V_a [C_{eq}^* + \lambda C_{Bg} - \lambda C_{eq}^*]}{A [C_w - \alpha C_{Bg} + \alpha C_{eq}^*(t)]} \quad [35]$$

3.6 Dosis efectiva

La dosis efectiva se define como la media ponderada de la dosis equivalente cuando la radiación es depositada en un órgano o tejido. El daño biológico que la radiación producirá en un órgano o tejido, depende de la sensibilidad para absorción de la sustancia radioactiva por parte del órgano del cuerpo.

La UNSCEAR en su reporte del 2006 expresa que la dosis efectiva anual por inhalación debe ser de 1.1 mSv/año, mientras que la dosis efectiva anual por ingestión no debe sobrepasar los 0,002 mSv/año (UNSCEAR, 1988: pp. 79).

3.6.1 Dosis efectiva anual por inhalación.

El radón inhalado, al ser un gas noble, está constantemente presente en el volumen de aire de los pulmones a la concentración en el aire y se disuelve parcialmente en los tejidos blandos.

La dosis efectiva evaluada por año debido a la inhalación de agua de consumo (UNSCEAR, 1988: pp. 77) es:

$$E = DFC * C * F * TF * \tau \quad [36]$$

Donde:

E : Dosis anual efectiva anual

DFC : Parámetro de conversión

C : Concentración de radón

F : Factor de equilibrio

τ : Tiempo medio que la persona que inhala el ^{222}Rn del agua durante un año.

3.6.2 Dosis efectiva anual por ingestión.

La ingestión de agua que contiene radón disuelto da como resultado dosis en los tejidos corporales tanto por el radón como por sus descendientes. El único consumo significativo de radón proviene de la ingestión de agua. La parte principal del radón ingerido se elimina del cuerpo muy rápidamente a través de los pulmones. (UNSCEAR, 1988: pp. 78). La dosis efectiva anual por ingestión de radón se puede obtener mediante la siguiente ecuación

$$E = DFC * C * V \quad [37]$$

Donde:

E : Dosis anual efectiva anual por ingestión de radón

DFC : Parámetro de conversión

C : Concentración de radón

V : Volumen ingerido por una persona anualmente

.

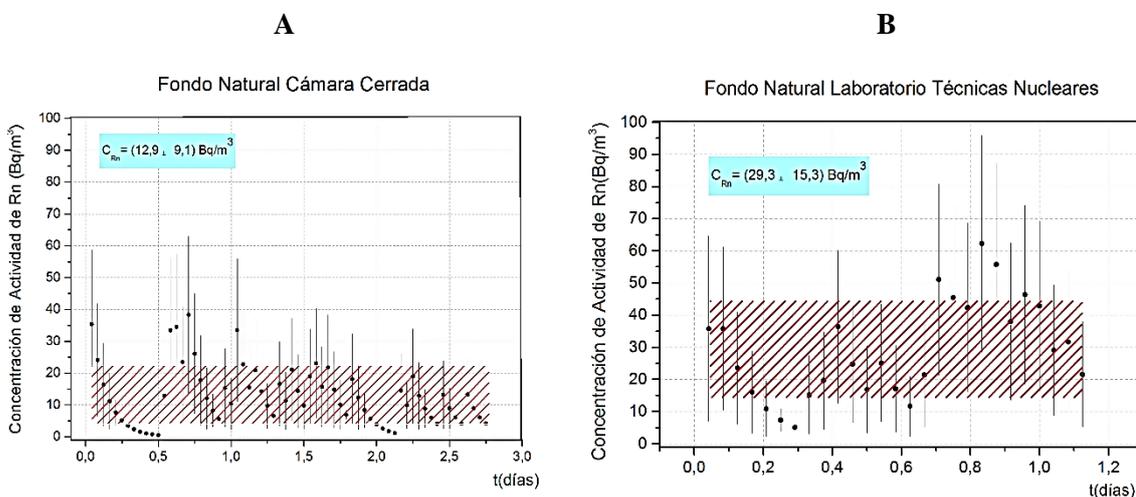
CAPITULO IV

4. ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Tasa de fuga del cámara

Se realizó una prueba de fuga mostrada en la Gráfica 7-3 donde se presenta el decaimiento de la concentración de actividad de radón en función del tiempo medido dentro de la cámara, la concentración inicial acumulada fue 56kBq/m³. Tal como se esperaba los datos tomados muestran un decaimiento del tipo exponencial, sin embargo la constante de decaimiento no coincide con la constante de decaimiento del ²²²Rn ($\lambda_{Rn} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), una de las causa es que la cámara tenga una fuga y por ello el decrecimiento de la curva es más rápida. Aplicando un ajuste lineal sobre los primeros datos (12 horas), como se describió en la sección 3.3.1, la tasa de fuga obtenida es $\lambda_{leak} = 0,059 \text{ (L/d)} (23\%)$.

4.2 Fondo de la Cámara y del Laboratorio



Gráfica 10-4: A Concentración de actividad medida en la cámara. B Concentración de actividad medida en el laboratorio.

Fuente: Curi Guapizaca, 2018

Se realizaron monitoreos para determinar el fondo de ²²²Rn en la cámara cerrada y en el laboratorio. La Gráfica 10-4 se muestra la concentración en función del tiempo medidos en el laboratorio (B) y dentro de la cámara (A), en estas gráficas es evidente la mayor fluctuación de

los datos obtenidos en el laboratorio en comparación con los de la cámara. El valor medio del fondo del laboratorio es $29,3 \pm 15,3 \text{ Bq/m}^3$ y el fondo de la cámara presenta $12,9 \pm 9,1 \text{ Bq/m}^3$.

4.3 Concentración de Actividad de ^{222}Rn en agua

Para la determinación de la concentración de actividad de radón extraída del agua, se necesitan ciertos parámetros que se exponen en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Parámetros usados para calcular la concentración inicial en agua C_w , con la ecuación (22).

Parámetro	UNIDAD ES	FUENTE 1	FUENTE 2	TANQUE DE CAPTACIÓN
Volumen de agua (V_a)	m^3	$0,0375 \pm 0,001$	$0,0375 \pm 0,001$	$0,0375 \pm 0,001$
Volumen de aire (V_w)	m^3	$0.09 \pm 0,000375$	$0.09 \pm 0,000375$	$0.09 \pm 0,000375$
Área de la interface agua-aire (A)	m^2	0,5	0,5	0,5
Coefficiente de Oswald (α)		0,34	0,34	0,33
Concentración en equilibrio (C_{eq}^*)	Bq/m^3	$172 \pm 34,58$	431 ± 85.2	107 ± 21.4
Fondo	Bq/m^3	$12,18 \pm 9,17$	$12,18 \pm 9,17$	$12,18 \pm 9,17$

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

Utilizando la ecuación 22, se encontraron los siguientes resultados (Tabla 2-4.)

Tabla 2-4: Concentración de radón de las fuentes naturales del volcán Carihuairazo obtenida con el método de la cámara cerrada.

	Concentración de actividad (Bq/L)	Error de la concentración de actividad (Bq/L)
FUENTE 1	0,57	0,06
FUENTE 2	1,50	0,19
TANQUE DE RECOLECCIÓN	0,34	0,03

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

4.4 Cálculo del coeficiente de velocidad de transferencia

Por otra parte se calcula el coeficiente de velocidad de transferencia de radón en la interface agua-aire utilizando la ecuación descrita en la sección 3-5. Obteniendo un $(1,07 \pm 0,003) \times 10^{-6}$ m/s.

4.5 Cálculo de la dosis efectiva anual por inhalación e ingestión de radón

De igual forma, el cálculo de la dosis efectiva por inhalación e ingestión que reciben las personas que consumen el agua en estudio se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 3-4: Dosis efectiva por inhalación e ingestión anual de ^{222}Rn

Fuente	Concentración de actividad de radón \pm Error (Bq/L)	Dosis efectiva por inhalación \pm Error (mSv/año)	Dosis efectiva por ingestión \pm Error (mSv/año)
SANTA ROSA	$0,57 \pm 0,06$	$0.0014 \pm 0,0002$	0.0001197 ± 0.0000126
SANTA TROYA	$1,5 \pm 0.19$	0.0037 ± 0.0004	0.000315 ± 0.0000399
TANQUE DE CAPTACIÓN	$0,34 \pm 0,03$	0.0009 ± 0.0008	0.000714 ± 0.0000063
UNSCEAR 2006		1,1	0,002

Realizado por: Curi Guapizaca, 2018

La dosis efectiva anual tanto por inhalación como por ingestión no sobrepasan los límites reportados por la UNSCEAR 2006.

CONCLUSIONES

1. Se llevó a cabo la construcción de la cámara cerrada para el análisis de ^{222}Rn , utilizando láminas de vidrio, las mismas que sirvieron como aislantes térmicos ya que la temperatura externa no afectó a las medidas termo dependientes realizadas en la cámara cerrada. La cámara fue caracterizada en términos de tasa de fuga y fondo radiactivo debido al ^{222}Rn . La cámara fue usada en la detección de radón en agua de muestras provenientes de los manantiales de las estribaciones del volcán Carihuairazo. Los manantiales presentan una concentración de actividad de ^{222}Rn entre 570 y 1500 Bq/m^3 ($\pm 20\%$), lo cual no sobrepasa los límites recomendados por las organizaciones internacionales de regulación en el área de Radioprotección.
2. Se realizó la validación del método propuesto mediante valores referenciales obtenidos utilizando la técnica de espectrometría gama (VER ANEXO B). Las muestra provenientes de las aguas termales del volcán Tungurahua analizados bajo los dos métodos, muestran valores compatibles dentro de 1sigma. Por ende podemos afirmar que el método utilizado en este trabajo es confiable.
3. Se elaboró el protocolo de muestreo de agua para el análisis de ^{222}Rn (ver ANEXO A), tomando en cuenta los procedimientos reportados en literatura y la experiencia adquirida por la experimentadora durante este trabajo. Este protocolo fue útil para disminuir la incertidumbre producida por el escape del radón durante la fase de muestreo.
4. Se calculó la tasa de dosis efectiva anual debido al ^{222}Rn proveniente del agua de las faldas del volcán Carihuirazo. Si bien la tasa de dosis efectiva por inhalación e ingestión de ^{222}Rn proveniente de los manantiales del volcán Carihuirazo no sobrepasa el límite anual de dosis efectiva propuesta por la UNSCEAR 2006 para inhalación 1,1 mSv/año y para ingestión 0,002 mSv/año , si representa un incremento que debe ser tomado en cuenta cuando se calcule la dosis efectiva total que recibe la población debido al ^{222}Rn , ya que el agua no es la única fuente de radón, sino que se debe tomar en cuenta el suelo y los materiales de construcción.
5. Se determinó la velocidad de transferencia del ^{222}Rn desde el agua hasta el aire. La velocidad de transferencia encontrada experimentalmente coincide con el valor encontrado por otros autores de manera teórica. Este valor es útil para determinar cuánto tiempo el radón permanece dentro de una muestra de agua o para saber cuánto tiempo tarda el radón

contenido en un tanque de agua ubicado dentro de un lugar cerrado en tomar contacto con una persona (inhalado) que habita en dicho lugar.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso de este método para estimar la concentración de radón en el agua, especialmente en lugares donde no exista un método directo y más preciso como la emanometría o el centelleo líquido. Además se recomienda continuar con los análisis de ^{222}Rn en agua proveniente de otros manantiales de la zona donde la población consume agua sin ningún tipo de tratamiento, ya que los puntos de recolección de muestras fueron solamente 3 y con ello no se puede asegurar que la zona esté libre de riesgo debido al ^{222}Rn .
2. Se recomienda aplicar un método más preciso para la determinación de tasa de fuga de la cámara ya que es el principal aporte a la incertidumbre total de la concentración de ^{222}Rn .
3. Se recomienda reemplazar el material del cual está hecho la cámara. En lugar del vidrio se recomienda usar el plexiglass que teóricamente presenta mejores características físicas para análisis de elementos radiactivos.
4. Se recomienda aplicar el factor correctivo de la humedad ya que, al ser muestras de agua, la humedad del aire aumenta a casi un 90%, es por ello que la cámara de difusión y el semiconductor pueden producir datos fluctuantes que deben ser corregidos con el mencionado factor.

BIBLIOGRAFÍA

- AYLETT, B.** *Chemistry of the elements* [en línea]. 2. Amsterdam:ELSEVIER, 1985. [Consulta: 24 de Noviembre del 2017]. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277538700841807>.
- BARRERA, M. et al.,** "Puesta a punto de un sistema de espectrometría gamma para la determinación de Cs-137 en suelos españoles". *Calibration of a gamma spectrometry system used for the determination of Cs-137 in spanish soils*, nº 1147, (2008), (España), pp. 0-43.
- BARROS-DIOS, J.M. et al.,** "Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: A population-based: Case-control study". *American Journal of Epidemiology*, vol. 156, nº 6, (2002),(España), pp. 548-555.
- BOURDON, B. et al.,** "Introduction to U-series Geochemistry". *Journal Article*, vol. 7579, (2003), (Francia), pp. 1-21.
- BROGIOLI, D. et al.,** "Diffusive mass transfer by nonequilibrium fluctuations: Fick's law revisited". *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 63, nº 1 I, (2001), (Italia), pp. 0121051-0121054.
- CALUGARU, D.G. et al.,** "Identification of radon transfer velocity coefficient between liquid and gaseous phases". *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 330, nº 5, (2002), (Francia), pp. 377-382.
- CHANG, B.U. et al.,** "Nationwide survey on the natural radionuclides in industrial raw minerals in South Korea". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 99, nº 3, (2008), (South Korea), pp. 455-460.
- CHAO, C. et al.,** "Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests". *Building and Environment*, vol. 32, nº 4, (1997), (Hong kong), pp. 355-362.
- FELMLEE, K.,** "Determination of uranium in source rocks by using radium in Crystal Springs, Great Salt Lake area, Utah". *United States Department of the Interior Geological Survey*, (1978), (Colorado, US), pp. 1-28.

- FREYER, K. et al.**, "Sampling and measurement of radon-222 in water". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 37, n° 3, (1997), (Germany), pp. 327-337.
- GAINON, F. et al.**, "Conceptual model for the origin of high radon levels in spring waters - The example of the St. Placidus spring, Grisons, Swiss Alps". *Swiss Journal of Geosciences*, vol. 100, n° 2, (2007), (Basel), pp. 251-262.
- GUEVARA, S.**, Riesgos a la salud por la contaminación radioactiva del agua potable de la ciudad de Riobamba (tesis).(Pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimbotrazo. Riobamba-Ecuador. 2015. pp.1-49.
- HOWARD, P.**, "The transfer of radon from domestic water to indoor". *Journal - American Water Works Association* [en línea], vol. 79, n° 4, (1948), pp. 159-161. [Consulta: 5 enero 2018]. Disponible en: <https://www.awwa.org/publications/journalwwa/abstract/articleid>.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)**, "World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification". *IAEA-TECDOC-1629, Division of Nuclear Fuel Cycle* [en línea], (2009), pp. 58-61. [Consulta: 27 noviembre 2017]. Disponible en: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:World+Distribution+of+Uranium+Deposits+\(UDEPO\)+with+Uranium+Deposit+Classification+2009#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:World+Distribution+of+Uranium+Deposits+(UDEPO)+with+Uranium+Deposit+Classification+2009#0).
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO)**, " Water quality Radon-222 Part 1: General principles". *ISO 13164 Examination of physical properties of water* [en línea]. (2013), pp 66-76. [Consulta: 29 noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/53405.html>.
- KIGOSHI, K.**, "Alpha-Recoil Thorium-234: Dissolution into Water and the Uranium-234/ Uranium-238 Disequilibrium in Nature". *Science*, vol. 173, n° 5, (1971), (Tokyo), pp. 47-48.
- KNOLL, G.E. et al.**, *Radiation Detection and Measurement*. 3^a ed. Michigan-US. Jhon Wiley & Sons. 2000. pp 129-148.
- LASTRA, M.F., 2016**. Research about different measurement techniques of radon exhalation in soils (tesis). (Maestría) Universidad de Cantabria. Santander, España. 2016. pp 1-41.

- LEGGET, R.W. et al.**, "A proposed blood circulation model for reference man". *Health Physics*, vol. 69, (1995), (South Bend), pp. 187-201.
- LEVINSON, A.A. et al.**, "Implications of disequilibrium in exploration for uranium ores in the surficial environment using radiometric techniques". *Minerals Science and Engineering* [en línea], vol. 10, n° 1, (1978), pp. 19-27. [Consulta: 25 noviembre 2017]. Disponible en: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:9386046.
- MASARO, L. et al.**, " Physical models of diffusion for polymer solutions, gels and solids". *Progress in Polymer Science (Oxford)*. Vol 24, n° 5 (1999), (Canadá) pp 731-755.
- MVELASE, M.J.**, "Radon escape from water" (tesis). (Magister) University of the Western Cape. Vellville, Texas. 2010. pp. 1-84.
- NAIN, M. et al.**, "Alpha radioactivity in tobacco leaves: Effect of fertilizers". *Radiation Measurements*, vol. 43, n° SUPPL.1, (2008), (India) pp. 515-519.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL**, *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. Washington, D.C.: Copyright National Academy of Sciences. 1999 pp. 1-296.
- NAZAROFF, W.W.**, "Radon transport from soil to air". *Reviews of Geophysics*, vol. 30, n° 92, (1992), (California), pp. 137-160.
- ONGORI, J.N. et al.**, "Radon transfer velocity at the water–air interface". *Applied Radiation and Isotopes* [en línea], vol. 105, (2015), pp. 144-149. [consulta: 28 noviembre 2017]. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969804315301391>.
- OTHMAN, M. et al.**, "Gas adsorption and Surface Diffusion on 5 Å Microporous Adsorbent in Transition and Turbulent Flow Region". *Engineering Journal*. vol 7, n° 1, (2006), (Malaysia). pp. 1-12.
- RISICA, SERENA., & GRANDE, SVEVA.**, *Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption: calculation of derived activity concentrations* *Rapporti ISTISAN* (tesis). (Magister) Istituto Superiore di Sanità. Roma RM, Italia. (2000), pp. 1-49.

- ROBINSON, ALLEN LATHAM.**, *Radon Entry into Buildings: Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations and Building Structural Factors* (tesis). (Magister) University of California at Berkeley, Berkeley. 1996. pp. 1-259.
- SASAKI, T. et al.**, "Radon emanation dependence on grain configuration". *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 41, n° 10, (2004), (Ibaraki), pp. 993-1002.
- SOMLAI, K. et al.**, "²²²Rn concentrations of water in the Balaton Highland and in the southern part of Hungary, and the assessment of the resulting dose". *Radiation Measurements*, vol. 42, n° 3, (2007), (Japan), pp. 491-495.
- TANNER, A.B.**, "Indoor radon and its sources in the ground". *United States Department of the Interior Geological Survey*, (1986), (United States), pp. 1-6.
- TENE FERNANDEZ, Talía Beatriz., 2017.** *Environmental Radon Measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program for Ecuador* (tesis). (Doctoral) Universidad della Calabria, Italia. 2017. pp 1-85.
- THAKRE, S. et al.**, "Mathematical Models for Overall Gas Transfer Coefficient Using Different Theories and Evaluating Their Measurement Accuracy". , vol. 2, n° 1, (2008), (India), pp. 202-206.
- TREVÍÑO DIAS, Josue.** *Determinación de la actividad alfa al Rn-222 y a sus descendientes, existente en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, y su área Metropolitana* (tesis). (Maestría) Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo león, Mexico. 1993. pp. 1-99.
- TUCCIMEI, P. et al.**, "Simultaneous determination of ²²²Rn and ²²⁰Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration". *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 64, n° 2, (2006), (Italia), pp. 254-263.
- UNITED NATIONS SCIENTIFICS COMMITTEEON THE EFACTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR).** Sources, effects and risks of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the Effects. Washington, United States. UNSCEAR , 1988, pp. 142-149.

UNITED NATIONS SCIENTIFICS COMMITTEEON THE EFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). Effects of ionizing radiation. Washington, United States. UNSCEAR , 2006, pp. 1-48.

UNITED NATIONS SCIENTIFICS COMMITTEEON THE EFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). Effects and Risks of ionizing Radiation. Washington, United States. UNSCEAR , 2016, pp. 50-90.

WU, Y.Y. et al., "Radon concentrations in drinking water in Beijing city, China and contribution to radiation dose". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 11, n° 11, (2014), (China). pp. 11121-11131.

ANEXOS

ANEXO A. *Protocolo de muestreo de agua*

Las mediciones de agua con radón se enfocan en muestras de agua potable proveniente de vertientes naturales. Las mediciones de radón en agua con la técnica de cámara cerrada implican dos pasos: la recolección de la muestra y el análisis del agua con el método propuesto (conteo de ^{222}Rn).

El radón tiende a dejar el agua cuando está en contacto con el aire, especialmente si el agua presenta una baja salinidad o si se calienta o agita (Howard, 1948: pp. 159-161). Durante el muestreo, todas estas condiciones pueden ocurrir, entonces, la técnica de muestreo es generalmente la principal fuente de error en la medición del contenido de radón en el agua, aumentando la incertidumbre total hasta un 8% (Freyer et al., 1997: pp. 327-337). La guía seguida para recopilar una muestra adoptada en este trabajo se describe a continuación.

En cuanto a la fuente, las investigaciones previas sobre la técnica de concentración, la edad de la fuente, el pre tratamiento con agua, etc. pueden ayudar a calificar la fuente. Si la fuente se manipula aguas arriba, la medición puede no ser útil para calificar la concentración de radón en el muelle, sino solo para citar la concentración en la salida.

Durante la recolección de agua, para evitar la desgasificación, la botella debe estar lo más cerca posible del grifo de la fuente. La inclinación de la botella reduce el burbujeo durante el muestreo. Antes del muestreo, deben registrarse la velocidad del flujo, la temperatura del agua y del aire y las condiciones meteorológicas en particular, la humedad y la lluvia.

En cuanto a las botellas y los grifos, para evitar la presencia de burbujas en el agua de la muestra, las botellas deben estar hechas de vidrio o plástico rígido para evitar la deformación durante la manipulación, la tapa de la botella podría incluir un disco interno de teflón. Las tapas de las botellas deben ajustarse con precisión al contenedor para evitar derrames de agua. El contenedor necesita ser previamente limpiado y seco.

Es sumamente importante tener una etiqueta de muestra con un número de muestra único para identificar los contenedores. Registre claramente el número de muestra, la ubicación (dirección / nombre de la fuente), la fecha, la hora y la muestra (ver FICHA TÉCNICA).

Se deben recolectar al menos tres muestras por hora. Y la medición debe repetirse una vez por temporada, antes de citar una actividad de concentración de radón promedio en agua de manantial.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO 	
FICHA TÉCNICA	
N° 001	
Lugar de muestreo	FUENTE 1
Experimentador	Curi Guapizaca
Fecha de muestreo	29/10/2017
Hora de muestreo	11:00
Nombre de la muestra	F1M1
Objetivo de la muestra	Análisis de concentración de radón
Temperatura del agua	2 °C
Temperatura Ambiental	11 °C
Clima	Húmedo
Humedad relativa	Alta
Temperatura a la hora del análisis	10
Fecha de análisis	30/10/2017
Hora de análisis	12:00
Observación de la muestra	-----

ANEXO B. Análisis de agua con la técnica de espectrometría gamma.

 Ministerio de Electricidad y Energía Renovable INFORME DE ANÁLISIS N°: ARAD - 2017-463	INFORME DE ANÁLISIS DE CONTENIDO RADIATIVO MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE SUBSECRETARÍA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES LABORATORIO DE ANÁLISIS DE RADIATIVIDAD
	SOLICITANTE: Curi Sisa Guapizaca Jinde Muestras de (matriz): Agua Termal Muestreado por: Curi Sisa Guapizaca Jinde Número de muestras: 1 muestra de agua Fecha de ingreso al laboratorio: 05/07/2017 Fecha de Análisis Instrumental: 14/07/2017 Fecha de emisión del informe: 19/07/2017

CÓDIGO LABORATORIO	CÓDIGO CLIENTE	Bi-214 Bq/L	Pb-214 Bq/L	K-40 Bq/L	Pb-212 Bq/L
ARAD-2017-463.01	Agua Termal	16,7	12,6	6,2	1,12

Técnicas:	Conteo en detector de Sulfuro de Zinc: Tratamiento de la muestra de evaporación directa, curvas de autoabsorción de Am241 y Sr-90 Determinación Alfa y Beta total en muestras de aguas ambientales, Método interno: METODO P-LMEER-ARAD-010 Conteo por Centelleo Líquido con cóctel centelleador: curvas de Quenching: METODO P-LMEER-ARAD-005 Determinación Beta en muestras: Método interno: P-LMEER-ARAD-006 Espectrometría Gamma de Germanio Hiperpuro P-LMEER-ARAD-001
Equipos:	Contador de Sulfuro de Zinc alfa beta LUDLUM Alfa Total, beta total Contador de centelleo líquido Packard 1600 TR Detector Germanio Hiperpuro modelo GCD-40180X SN2169-15 (Resolución FWHM: 1.87 y una eficiencia 40%)

Notas:	1 El resultado de este informe es exclusivo para las muestras de: Curi Sisa Guapizaca Jinde Ingresadas el: 05/07/2017 2 Documento confidencial para el uso de: Curi Sisa Guapizaca Jinde No puede reproducirse total ni parcialmente sin autorización del laboratorio. 3 Las muestras a la que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 30 días luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán. 4 El laboratorio no se responsabiliza de la interpretación dada a este resultado. 5 Los datos asociados con este estudio (análisis alfa y beta grueso, espectros gamma, lecturas de centelleo líquido, etc.) se mantendrán en custodia por un plazo de seis meses después de emitido el reporte.
---------------	--


 Responsable del Laboratorio ARAD: 
 Ing. César de la Haza

LSRM SpectraLine



**ЛАБОРАТОРИЯ
СПЕКТРОМЕТРИИ
И РАДИОМЕТРИИ**
 ООО «Лаборатория спектрометрии и радиометрии»

Gamma-spectrum processing report from 17-07-2017

Spectrum: C:\Lsrmi\Work\GCD-40180X SN 2169-15\Spe\Quito\VARAD 2017 463 01 CURY-
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 14-07-2017 16:17:59
Live time: 21599.03 s.
Real time: 21603.00 s.
Comment:

Processing result on 14-07-2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq	Relative error, %
Bi-214	220	30	16.7	16
Pb-214	210	40	12.6	18
K-40	121	23	6.2	20
Pb-212	210	50	1.12	23
Unidentified	230	40		

Operator: DR. MARCO SOLANO

