



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio y Caracterización de la  
Concentración de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Agua  
Potable

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**Licenciada en Física**

PRESENTA:  
**Brenda Ixcuiname Saavedra Reyes**

DIRECTOR DE TESIS:  
**Dr. Guillermo Cirano Espinosa García**



Ciudad Universitaria, Ciudad de México  
2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de datos del jurado

### 1. Datos del alumno

Saavedra  
Reyes  
Brenda Ixcuiname  
55 6803-7568  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
310262435

### 2. Datos del tutor

Dr.  
Guillermo Cirano  
Espinosa  
García

### 3. Datos del sinodal 1

M. en C.  
Manuel René de Jesús  
Garduño  
López

### 4. Datos del sinodal 2

Dr.  
Víctor Hugo  
Espíndola  
Castro

### 5. Datos del sinodal 3

Fís.  
Andrés Valentín  
Porta  
Contreras

### 6. Datos del sinodal 4

Dr.  
Fermín  
Castillo  
Mejía

### 7. Datos del trabajo

Estudio y Caracterización de la Concentración de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Agua Potable  
71 pp.  
2017

# Agradecimientos

A todas las personas que directa o indirectamente me ayudaron a desarrollar y concluir este trabajo de tesis. A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi *alma mater*. A la Facultad de Ciencias por las enseñanzas y experiencias adquiridas en sus aulas.

A mi tutor y director de tesis Guillermo Cirano Espinosa García por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como por haberme apoyado con sus consejos, indicaciones y correcciones en el texto.

A mis sinodales por haber aceptado la revisión de este trabajo de tesis, por su tiempo, por su dedicación y por sus aportaciones para mejorar este trabajo. A José Ignacio Golzarri por haberme brindado su apoyo, atención y palabras de aliento.

Este estudio se realizó en el laboratorio del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM), con el apoyo de los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT y IN103316 titulados: Estudio de contaminantes radiológicos ambientales en agua, suelo, alimentos y aire (parte IV).

A mi familia ♡

# Índice General

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo I: Aspectos Fundamentales</b>	<b>5</b>
1.1. Origen del Radón . . . . .	5
1.2. Series Radiativas . . . . .	6
1.2.1. Cadena de Decaimiento Radiactivo . . . . .	6
1.2.2. Vida Media $T_{\frac{1}{2}}$ . . . . .	11
1.2.3. Desintegraciones Radiactivas . . . . .	11
1.3. Distribución de radón en el mundo . . . . .	13
1.4. Interacción de las Partículas alfa en los Materiales . . . . .	14
1.5. Recomendaciones Internacionales . . . . .	16
<b>Capítulo II: Metodología</b>	<b>19</b>
2.1. Antecedentes del estudio . . . . .	19
2.2. Métodos para medir los niveles de concentración de radón en agua . . . . .	20
2.2.1. Métodos pasivos . . . . .	20
2.2.2. Métodos dinámicos . . . . .	20
2.3. Sistema de detección AlphaGUARD . . . . .	21
2.3.1. AlphaGUARD . . . . .	21

2.3.2. AquaKIT . . . . .	22
2.4. Selección de lugares y características . . . . .	22
2.5. Toma de muestra . . . . .	24
2.6. Preparación de muestra . . . . .	24
2.7. Protocolo de medición de la concentración de radón en agua, uti- lizando el sistema AlphaGUARD y el sistema periférico AquaKIT	25
<b>Capítulo III: Instrumentación</b>	<b>31</b>
3.1. Funcionamiento del sistema AlphaGUARD . . . . .	31
3.2. Rangos de operación y características del sistema AlphaGUARD	32
<b>Capítulo IV: Resultados</b>	<b>35</b>
4.1. Tratamiento de datos . . . . .	35
4.2. Estadística utilizada . . . . .	36
4.3. Agua destilada por ionización . . . . .	37
4.4. Tabla de Resultados . . . . .	38
4.5. Comparación con otros datos reportados . . . . .	51
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>53</b>
<b>Anexos</b>	<b>55</b>
a) Definiciones . . . . .	55
b) Unidades . . . . .	60
d) Programas de computación . . . . .	63



# Introducción

Dentro de las áreas del conocimiento actual, el estudio de la Ocurrencia Natural de Materiales Radioactivos, ONMR (o NORM por sus siglas en inglés Naturally-Occurring Radioactive Materials) y su distribución en el planeta Tierra, es un tema prioritario en física de radiaciones. El estudio y la caracterización de concentraciones radiactivas naturales y artificiales en agua, aire, suelos y alimentos, es un tema como se mencionó, de física con impacto en salud pública.

La ONMR y la radiactividad ambiental, son temas de actualidad en la ciencia, debido al desarrollo tecnológico de la instrumentación, entre otras muchas razones, en la actualidad se pueden medir en fracciones de desintegraciones por unidad de tiempo.

Como se sabe, el agua potable puede tener naturalmente contaminantes biológicos, químicos y radiactivos entre otros. El objetivo de este trabajo es el de estudiar, conocer y medir la concentración de gas radón radiactivo, en el agua para consumo humano.

Haciendo énfasis en los protocolos de caracterización y medición por medio de métodos dinámicos, siguiendo las recomendaciones internacionales sobre posibles riesgos radiológicos en salud para la población y complementando este trabajo con el análisis de muestras de agua potable de los pozos de Ciudad Universitaria (CU) y el área del Pedregal de San Ángel.

Este trabajo de tesis está estructurado en cuatro capítulos, conclusión y

cuatro anexos. En el capítulo I; se tratan los aspectos fundamentales de Física de radiaciones, series radiactivas, distribución de radón en el mundo, la interacción de las partículas alfa con los materiales y los niveles de acción recomendados por distintas organizaciones internacionales.

En el capítulo II: Metodología; se describe la metodología para la medición de concentración de radón en agua con el sistema AlphaGUARD y AquaKIT, así como el procedimiento para la selección de los lugares de estudio y toma de muestra.

En el capítulo III: Instrumentación; se da la información sobre la instrumentación usada para este trabajo, su funcionamiento, intervalo de operación y adquisición de datos.

En el capítulo IV: Resultados; se describe el manejo de los datos obtenidos para el sistema AlphaGUARD y el manejo estadístico de éstos. Dando los resultados de concentración de radón en agua de los distintos lugares estudiados así como la comparación con otras mediciones de radón en agua potable, en otros países.

Finalmente se dan las Conclusiones y Recomendaciones sobre el contenido de radón en agua potable y el riesgo en salud de la población. También se dan cuatro anexos que contienen: definiciones, una tabla de unidades empleadas, los programas de computación utilizados y por supuesto la bibliografía pertinente.

# Capítulo I

## Aspectos Fundamentales

### 1.1. Origen del Radón

El radón es un gas noble, incoloro, inodoro, insípido, radioactivo y producto natural de la cadena del decaimiento del (uranio-238)  $^{238}\text{U}$ , del (uranio-235)  $^{235}\text{U}$  y del (torio-232)  $^{232}\text{Th}$ , elementos que existen distribuidos heterogéneamente en el planeta Tierra, desde su origen. Por su naturaleza gaseosa, y pertenencia al grupo de los gases nobles, el radón posee una gran movilidad y emigra de los lugares de origen por medio de fallas y grietas, hacia la superficie.

La distribución de radón en las aguas superficiales de océanos, ríos y lagos, presenta generalmente concentraciones bajas. Por otro lado, en aguas subterráneas, en su recorrido a través de diversas formaciones geológicas, y/o acumulaciones en acuíferos, y por su característica solubilidad en agua, puede presentar valores considerablemente elevados.

Se conocen dos maneras para que el radón llegué al agua potable; una de ellas es por evaporación, es decir, en el subsuelo el radón se gasifica y por su propiedad de solubilidad se integra al agua y queda atrapado en relación inver-

samente proporcional a la temperatura (i.e. muestras de agua glaciara mostraron mayor concentración de radón en comparación con las muestras de aguas más calientes); la segunda es que, en los mantos acuíferos del subsuelo existen rupturas por las cuales concentraciones de uranio pueden acarrear por el paso del agua y ser medio de transporte para sus productos de decaimiento. [6]

## 1.2. Series Radiativas

La naturaleza está formada por una gran serie de isótopos que pertenecen a las cadenas radiactivas naturales. Se componen de núcleos padres, radiactivos, y con vidas medias diversas, que van desde minutos hasta de miles de millones de años. Estos se van desintegrando en otros nucleídos hasta decaer en un núcleo estable. Véase **Tabla 1.1**. Estas series se llaman series de torio, uranio, actinio y neptunio, este último tiene una vida media menor a la edad del universo y por tanto ya no existe.

**Tabla 1.1:** Series de Decaimiento Radiactivo [8]

Número Másico	Serie	Padre	Vida Media [años]	Núcleo Estable Final
4n	Torio	$^{232}_{90}\text{Th}$	1.39x10	$^{208}_{82}\text{Pb}$
4n+1	Neptunio	$^{237}_{93}\text{Np}$	2.25x6	$^{209}_{83}\text{Bi}$
4n+2	Uranio	$^{238}_{92}\text{U}$	4.47x9	$^{206}_{82}\text{Pb}$
4n+3	Actinio	$^{235}_{92}\text{U}$	7.07x8	$^{207}_{82}\text{Pb}$

### 1.2.1. Cadena de Decaimiento Radiactivo

En el ambiente se encuentran presentes 3 isótopos del radón; el (radón-222)  $^{222}\text{Rn}$ , el (radón-220), también llamado torón  $^{220}\text{Rn}$  y el (radón-219), también conocido como actinon  $^{219}\text{Rn}$ , productos de las cadenas de decaimiento del (uranio-238)  $^{238}\text{U}$ , (torio-232)  $^{232}\text{Th}$  y del (uranio-235)  $^{235}\text{U}$  respectivamente.

La cadena de decaimiento natural del isótopo (uranio-238)  $^{238}\text{U}$  comienza al decaer a (torio-234)  $^{234}\text{Th}$  por emisión de partículas alfa, y éste a su vez decae en (protactinio-234)  $^{234}\text{Pa}$ , seguido de (uranio-234)  $^{234}\text{U}$ , estos 2 por decaimiento  $\beta^-$ , después por emisión de partículas alfa, se llega a (torio-230)  $^{230}\text{Th}$  para llegar al (radio-226)  $^{226}\text{Ra}$ , una característica fundamental es que todos estos elementos son sólidos y permanecen dentro de una molécula que lo contiene como sólido. Sin embargo al pasar a (radón-222)  $^{222}\text{Rn}$  por la emisión de partículas alfa de 5.5MeV, los átomos cambian de estado, de sólido a gaseoso, agregándose al ambiente y permaneciendo en el aire que respiramos hasta su siguiente transformación en la cadena de decaimiento. En 3.8 días, se convierte en (polonio-218)  $^{218}\text{Po}$  sólido que tiene una vida media de 3.1 minutos y posteriormente decae por emisión beta en (plomo-218)  $^{218}\text{Pb}$  con vida media de 26.8 minutos. Este a su vez decae emitiendo otra partícula alfa, en (bismuto-214)  $^{214}\text{Bi}$  con vida media de 19.7 minutos, emitiendo otra partícula- $\alpha$  se convierte en (plomo-210)  $^{210}\text{Pb}$ , después decae en (bismuto-210)  $^{210}\text{Bi}$ , seguido de (polonio-210)  $^{210}\text{Po}$ , luego (talio-206)  $^{206}\text{Tl}$ , para terminar en (plomo-206)  $^{206}\text{Pb}$  que es un elemento estable. Véase **Figura 1.1**.

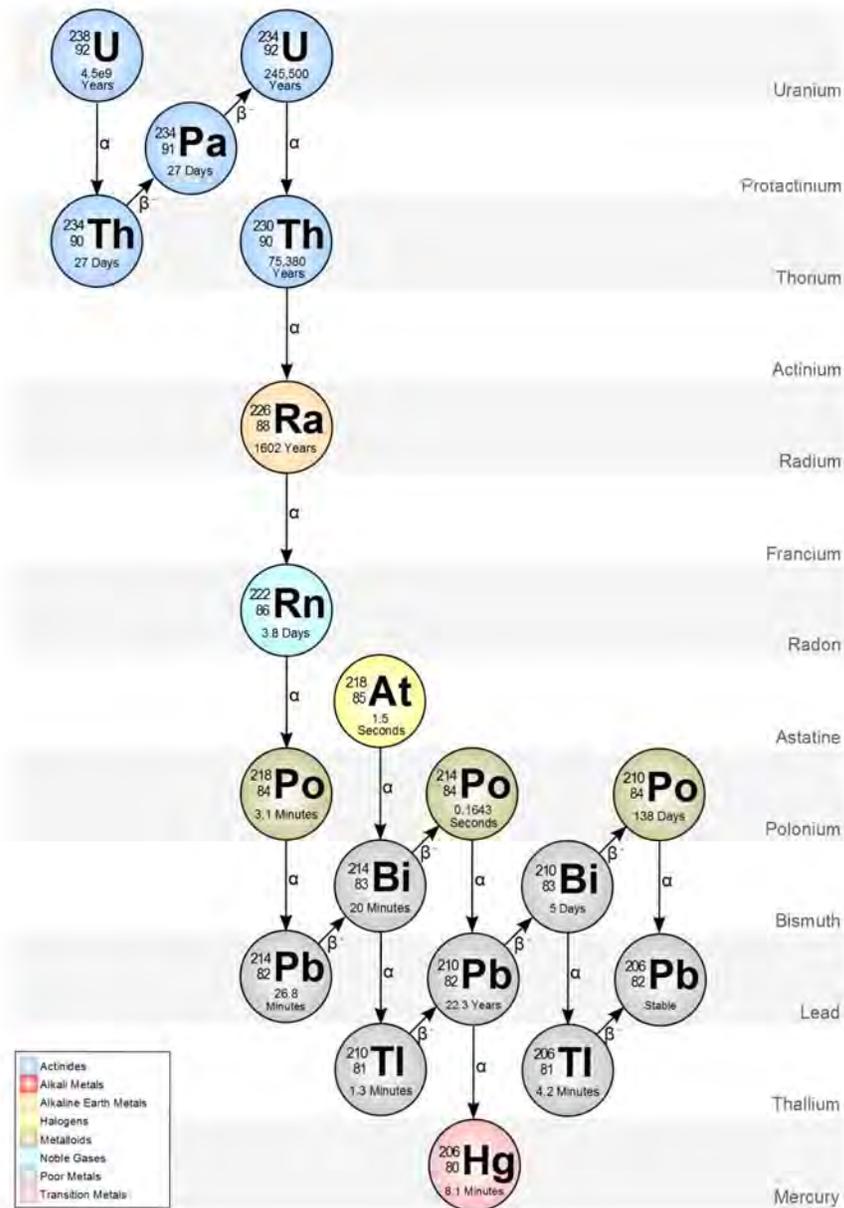
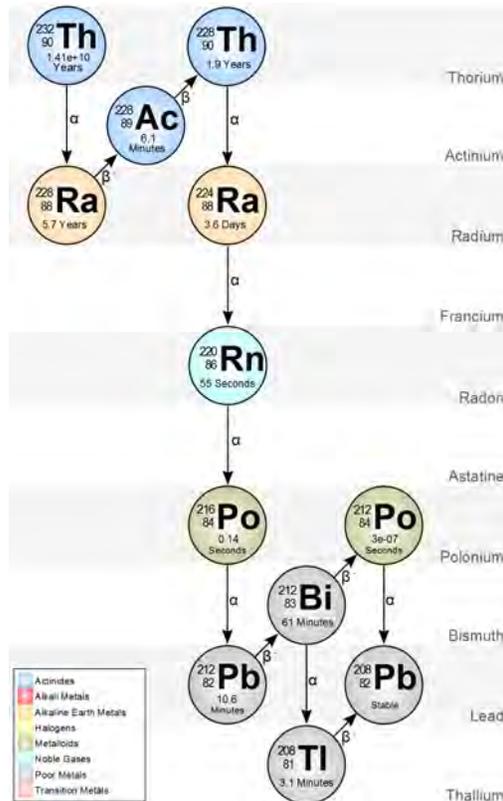


Figura 1.1: Cadena de decaimiento natural del (uranio-238)  $^{238}\text{U}$ . [63]

Por otro lado la cadena de decaimiento natural del (torio-232)  $^{232}\text{Th}$  comienza al decaer a (radio-228)  $^{228}\text{Ra}$  por emisión de partículas alfa, y éste a su vez decae en (radio-228)  $^{228}\text{Ra}$ , después pasa por (actinio-228)  $^{228}\text{Ac}$  y luego a (torio-228)  $^{228}\text{Th}$  por decaimiento  $\beta^-$ , después por emisión de partículas alfa, se llega a (radio-224)  $^{224}\text{Ra}$  que decae a (radón-220)  $^{220}\text{Rn}$ , (polonio-216)  $^{216}\text{Po}$ , (plomo-212)  $^{212}\text{Pb}$ , (bismuto-212)  $^{212}\text{Bi}$  y (polonio-212)  $^{212}\text{Po}$  para terminar en (plomo-208)  $^{208}\text{Pb}$  que es un elemento estable.

La cadena de decaimiento natural del (uranio-235)  $^{235}\text{U}$  se desarrolla de manera análoga y se muestra en la **Figura 1.3**.



**Figura 1.2:** Cadena de decaimiento natural del (torio-232)  $^{232}\text{Th}$  [65].

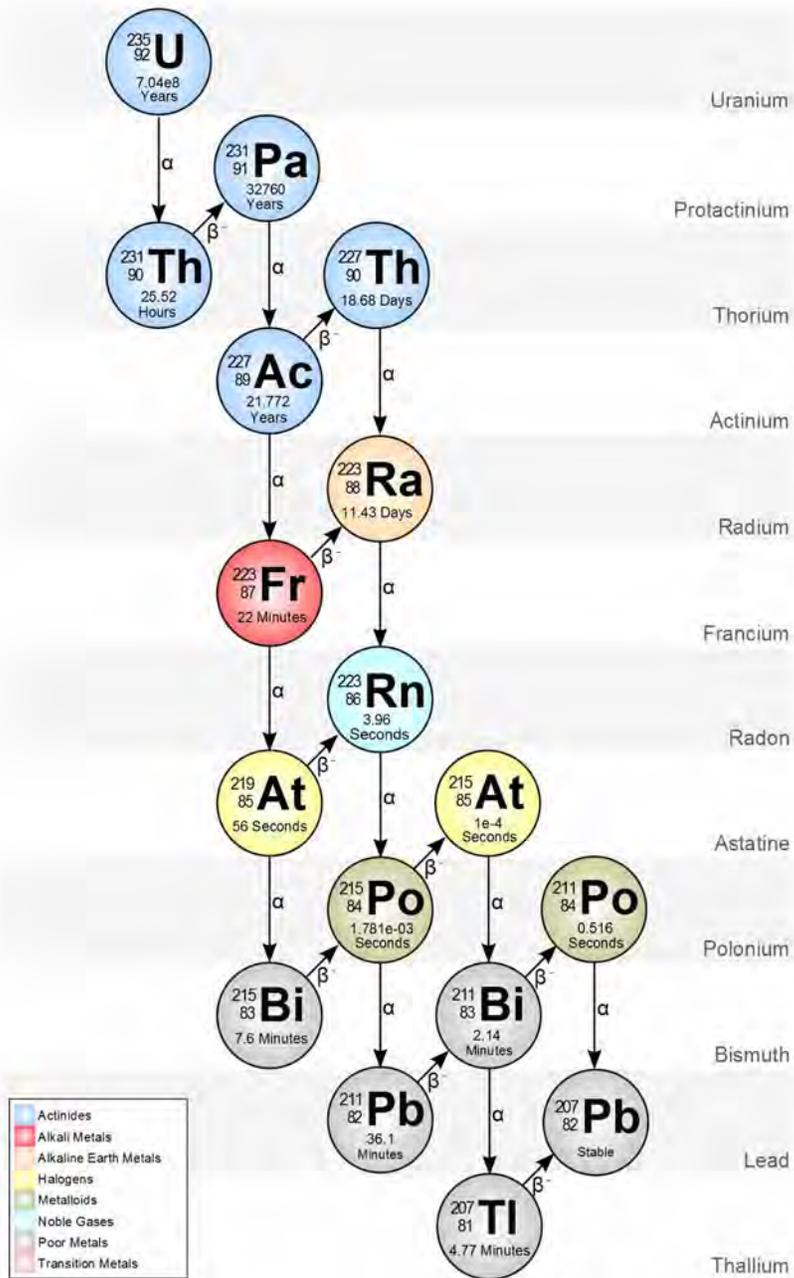


Figura 1.3: Cadena de decaimiento natural del (uranio-235)  $^{235}\text{U}$ . [64], [65].

### 1.2.2. Vida Media $T_{\frac{1}{2}}$

Se entiende por vida media  $T_{\frac{1}{2}}$  al tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo radiactivo

$$\Rightarrow N = \frac{N_0}{2} \quad (1.1)$$

sin embargo, recordando la ley de decaimiento, sabemos que  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

$$\Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \quad (1.2)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

$$\therefore T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (1.4)$$

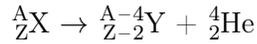
En este sentido el (radón-222)  $^{222}\text{Rn}$  tiene una vida media de 3.8 días, el (radón-220)  $^{220}\text{Rn}$  tiene una vida media de 3.96 segundos y el (radón-219)  $^{219}\text{Rn}$  una de 55 segundos. Por consiguiente, el (radón-222)  $^{222}\text{Rn}$  es el elemento de estudio de esta tesis, ya que posee la vida media más larga en comparación con los otros isótopos del radón.

Los productos de decaimiento del (radón-222)  $^{222}\text{Rn}$  son los isótopos: (polonio-218)  $^{218}\text{Po}$  con energía de 6.0 MeV, (plomo-214)  $^{214}\text{Pb}$  con energía de 1.02 MeV, (bismuto-214)  $^{214}\text{Bi}$  con energía de 3.27 MeV y (polonio-214)  $^{214}\text{Po}$  con energía de 7.68 MeV. [1]

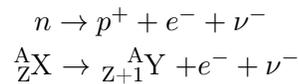
### 1.2.3. Desintegraciones Radiactivas

- **Desintegración  $\alpha$ :** Rutherford y Royds mostraron que la radiación alfa consistía en núcleos de helio que consisten en dos protones y dos neutrones. Estas cuatro partículas están unidas tan firmemente que la partícula

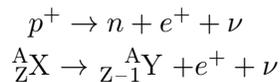
alfa se comporta en muchas situaciones como si fuera una partícula fundamental. Una partícula alfa tiene una masa de  $4u$  y lleva dos unidades de carga positiva.



- **Desintegración  $\beta^-$** : También conocido como emisión de un electrón, la radiación beta consiste en electrones de alta velocidad que se originan en el núcleo. Estos 'electrones nucleares' tienen propiedades idénticas a los electrones atómicos, es decir, tienen una masa de  $1/1840u$  y llevan una unidad de carga negativa, la emisión de un electrón o partícula  $\beta^-$  se debe a que el neutrón se convierte en protón liberándose una partícula beta y un antineutrino del electrón.

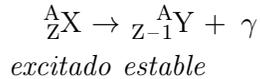


- **Desintegración  $\beta^+$** : Otro tipo de radiación beta fue descubierto por C. D. Anderson en 1932. Este consiste en partículas de la misma masa que el electrón, pero con una unidad de carga positiva, y se conoce como radiación de positrones. Aunque es menos importante desde el punto de vista de la protección contra la radiación que las partículas negativas, el conocimiento de los positrones es necesario para comprender ciertos mecanismos de desintegración radiactiva. Esta desintegración implica la conversión de un protón dentro de un núcleo a un neutrón, un positrón y un neutrino.



- **Desintegración  $\gamma$** : La radiación gamma pertenece a radiación electromagnética. Este tipo de radiación emite fotones en lugar de partículas

alfa. Sin embargo, los fotones no tienen masa, sino que consisten en paquetes de energía transmitidos en forma de ondas. Otros miembros bien conocidos de esta clase de radiación son las ondas de radio y la luz visible. La cantidad de energía en cada paquete está relacionada con la longitud de onda de la radiación. La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda.



### 1.3. Distribución de radón en el mundo

El radón está presente en el planeta Tierra desde su origen; a través de los años se ha intentado mapear su distribución y se ha encontrado que es heterogénea, sin embargo se han encontrado mayores concentraciones en tipos específicos de suelo (i.e. granítico). Aunque dichas concentraciones dependen de las características geológicas e hidrológicas de cada región.

El suelo es el medio de liberación de radón más importante hacia la atmósfera. Se han medido tasas de emanación promedio de 59.2 Bq/m<sup>3</sup> por año. Considerando el área aproximada del planeta Tierra, la emanación total es de  $8.88 \times 10^{19}$  Bq de radón por año, mientras que la liberación desde la superficie marina se estima en 0.22 Bq/cm<sup>2</sup> por año. [24]. Considerando la liberación total de radón en un año, se estima que en todo momento existen  $1.3 \times 10^{18}$  Bq de radón en la atmósfera terrestre. [25]

De las mediciones realizadas, se infieren perfiles de concentración de radón extremadamente variables, presentan un comportamiento exponencial decreciente en función de la altura y en una capa de  $\approx 700$  m, se encuentra la mitad

del total. Con lo anterior se estima que la concentración promedio superficial es de  $2.59 \text{ Bq/m}^3$ . El promedio de concentraciones de radón medidas en superficie continental varía de  $3.7 - 7.4 \text{ Bq/m}^3$  y las medidas en superficie marina son 5 veces menores. [25]

La necesidad del estudio de radón en agua potable, yace su importancia en la salud pública, al ser ésta un factor fundamental para la subsistencia del ser humano. Conocer la concentración de radón en el agua potable ayuda a crear herramientas y programas enfocados a la prevención de enfermedades que pueden afectar a grandes sectores de la población, o generar epidemias.

De igual forma, conocer la concentración de radón en agua potable permite evaluar los riesgos a la salud a los que estamos expuestos, y alerta a las autoridades para trabajar en métodos de mitigación garantizando así la calidad del agua que bebemos, con la que nos bañamos, preparamos alimentos, dedicamos a la agricultura, ganadería y producción de alimentos.

## **1.4. Interacción de las Partículas alfa en los Materiales**

Las partículas alfa se constituyen por 2 protones y 2 neutrones, dichas partículas tienen una masa aproximadamente  $6 \times 10^3$  veces la masa del electrón, con esto, su capacidad de penetración en la materia resulta ser del orden de milímetros, en consecuencia pierde una elevada cantidad de energía por distancia recorrida por su carga y masa. Una hoja de papel e incluso algunos centímetros de aire bastan para absorber las partículas alfa producidas en reacciones nucleares.

Su interacción con la materia produce principalmente ionización y excitación en los átomos del absorbente y prácticamente no existe radiación de

frenado. Estas partículas, emitidas por los núcleos atómicos con energías de entre 3 – 9 MeV son partículas no relativistas, dado que sus velocidades están comprendidas entre  $1.1 - 2.2 \times 10^9$  cm/s, que se absorben fácilmente en la materia.

No obstante, posee una doble carga positiva que con lo anterior le otorga una elevada probabilidad de interacción.

La transferencia lineal de energía (Linear Energy Transfer, LET) es la cantidad de energía que una partícula ionizada transfiere al material atravesado por unidad de distancia, es usualmente medido en KeV/ $\mu$ m.

Los protones, las partículas alfa y los núcleos más pesados encontrados en los rayos cósmicos o producidos por aceleradores de partículas, causan ionizaciones directas frecuentes dentro de un estrecho diámetro alrededor de una trayectoria relativamente recta, aproximándose así a la desaceleración continua. A medida que se hacen más lentas, la sección transversal de las partículas cambia su LET, aumentándola generalmente a un pico de Bragg justo antes de alcanzar el equilibrio térmico, es decir, antes del final del intervalo.

En el equilibrio, la partícula incidente esencialmente viene a descansar o es absorbida, en cuyo punto LET es indefinida. La ionización de las partículas alfa es alta y puede variar entre los 5000 – 80000 pares iónicos por centímetro recorrido. En el aire, a medida que su velocidad disminuye, aumenta su ionización específica hasta alcanzar su máximo valor. Véase **Figura 1.4**.

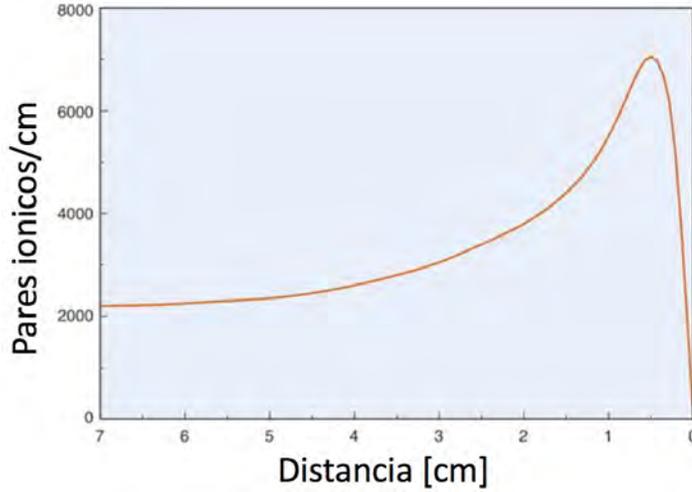


Figura 1.4: Ionización por centímetro de partículas alfa. [20]

## 1.5. Recomendaciones Internacionales

Por su naturaleza, el radón en aire y/o en agua, se considera un promotor de varios tipos de cáncer y algunas otras enfermedades. Su existencia en el medio ha llevado a diversos organismos internacionales a proponer parámetros de referencia denominados 'Niveles de Acción'. [7]

En ciertos países, incluido México, no existen normas reguladoras nacionales para la concentración de radón intramuros y/o en agua. Hablando del radón intramuros, la filosofía de protección radiológica trabaja bajo el concepto ALARA por sus siglas en inglés 'As Low As Reasonably Achievable', es decir, tan bajo como sea razonablemente alcanzable', véase **Tabla1.2**.

**Tabla 1.2:** Parámetros de referencia, denominados 'Niveles de Acción' intramuros. [12] [13] [14] [15]

Institución	Descripción	Concentración [Bq/m <sup>3</sup> ]	Referencia
ICRP (International Commission on Radiological Protection)	Nivel de acción (Residencias)	200-600	ICRP 1994
	Nivel de acción (Lugares de trabajo)	500-1500	
WHO (World Health Organization)	Nivel de acción promedio por año (Residencias)	100-300	WHO 2000
USEPA (United States Environmental Protection Agency)	Nivel de acción (Residencias)	148	EPA 2004
	Nivel de acción (Lugares de trabajo)	400	
UK-HSE (United Kingdom-Health and Safety Executive)	Nivel de acción (Residencias)	200	HSE 2004
	Nivel de acción (Lugares de trabajo)	400	

**Tabla 1.3:** Parámetros de referencia, denominados 'Niveles de Acción' en agua. [16].

Institución	Descripción	Concentración [Bq/l]	Referencia
USEPA (United States Environmental Protection Agency)	Nivel de Acción	11.1	EPA 2012

Sin embargo hay que considerar el concepto ALARA y su interpretación

para cuando estamos evaluando materiales y concentraciones de material radioactivo de ocurrencia natural. NORM es el acrónimo de ocurrencia natural de material radioactivo, que potencialmente incluye todos los elementos radiactivos que se encuentran en el medio ambiente. Sin embargo, el término se utiliza más específicamente para todos los materiales radiactivos naturales en los que las actividades humanas han aumentado el potencial de exposición en comparación con la situación inalterada. [22]

En México, las residencias presentan una concentración de radón intramuros de  $51 - 130 \text{ Bq/m}^3$  [9] y en lugares de trabajo de  $13 - 197 \text{ Bq/m}^3$  [10]. En la Ciudad de México la concentración de radón en agua potable es menor a  $3.8 \text{ Bq/l}$  [11]. Comparando estos datos con los expuestos en las tablas 1.3, 1.2, los niveles en México están generalmente muy por debajo de los niveles de acción internacionales, no obstante, el resultado no refleja la inexistencia de lugares en donde la concentración de radón sea elevada, por tanto, se debe diseñar un programa de medición y de mitigación.

# Capítulo II

## Metodología

### 2.1. Antecedentes del estudio

Basados en los artículos 35 y 36 del tratado de la Comunidad Europea de Energía Atómica, es una obligación para los estados miembros de la Unión Europea monitorear y reportar la radioactividad ambiental. Para comprobar la calidad de los resultados de medición, la Dirección General de Energía de la Comisión Europea solicita al Centro Común de Investigación del Instituto de Materiales y Medidas de Referencia de Geel, Bélgica, que organice comparaciones entre laboratorios de los países miembros de la Unión Europea. Un tema importante en estas comparaciones es la medida de la actividad de radón en muestras de agua potable [34].

Las aguas superficiales y subterráneas contienen radionúclidos como componentes naturales en diversas concentraciones dependiendo de su origen. El radón se libera en las aguas como resultado de procesos naturales como la desintegración de su nuclídeo padre ( $^{226}\text{Ra}$ ) y la disolución del entorno geológico circundante (rocas y suelos) [39]. El radón en el agua también puede originarse a partir del radón ambiental y de emanaciones del subsuelo, en específico cuando las capas tectónicas presentan movimientos.

La solubilidad del radón en agua es relativamente baja  $0.01 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ bar}^{-1}$  a 293K [40]. La solubilidad se expresa comúnmente por el coeficiente de reparto ( $L$ ) del radón entre el disolvente puro y el aire [41]. El coeficiente de reparto del radón en agua es aproximadamente  $0.23 - 0.25$  a 293K. [42]. Estos factores, se tienen que considerar cuando se estudia la concentración de gas radón en agua.

## **2.2. Métodos para medir los de niveles de concentración de radón en agua**

### **2.2.1. Métodos pasivos**

Los métodos pasivos se basan en la interacción de los radionúclidos emitidos por el radón y su progenie en los materiales y la integración de estos efectos. Los métodos pasivos se usan para realizar mediciones a largo plazo y mediciones de radón a gran escala, proporcionando una concentración que refleja el promedio de mediciones acumuladas durante el periodo de exposición. Se caracterizan por su bajo costo, disponibilidad, facilidad de operación, distribución controlada, no requiere energía eléctrica y no es necesaria la presencia de un técnico o profesional especializado para su colocación o manejo.

Existen diversos detectores pasivos, se destacan: Electret [30], Carbón Activado [29] y Trazas Nucleares en Sólidos [31], siendo este último el más utilizado para medir la concentración de radón en agua.

### **2.2.2. Métodos dinámicos**

Los métodos dinámicos se caracterizan por ser de lectura directa, es decir, se realizan medidas puntuales tanto en el tiempo, como en el espacio. Se caracterizan por mostrar resultados al momento y se basan en la colección de una muestra en un tiempo corto, seguido por la medición de la concentración de radón a través de la actividad de las partículas alfa. La principal ventaja de es-

te método es la rapidez de medición y respuesta comparado con otras técnicas que implican manipulaciones químicas extensivas. [34]. Siendo indispensable la supervisión de un técnico o profesional especializado durante el proceso de medición.

En los métodos dinámicos se puede hacer uso de diferentes tipos de detectores tales como; el Centelleo [48], detector de Estado Sólido [47] (semiconductores) y detectores por ionización de gas (Cámara de Ionización) [46].

Existen diversos sistemas dinámicos para la medición de concentración de radón en agua por ejemplo, el sistema AlphaGUARD [17], el cuál usa una cámara de ionización para la detección de las partículas alfa del radón. Este sistema de medición de radón se seleccionó para la realización de este trabajo. En la **tabla 2.1** se muestran características del sistema AlphaGUARD.

**Tabla 2.1:** Detectores dinámicos de medición de radón en agua. Sistema AlphaGUARD.

Marca	Modelo	Fabricante	Rango [Bq/l]	Detector
AlphaGUARD	PQ2000 PRO	Saphimo	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^3$	Cámara de Ionización

## 2.3. Sistema de detección AlphaGUARD

### 2.3.1. AlphaGUARD

El sistema AlphaGUARD es un monitor de radón portable con gran capacidad de almacenamiento, se compone de una cámara de ionización de 0.56 l de volumen activo, con voltaje de operación de 750 V que se basa en el conteo de impulsos de voltaje. El sistema AlphaGUARD puede medir simultáneamente: presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa. Tiene aplicaciones en medición de actividad en agua, emanación de radón en superficies, emanación de radón en el subsuelo y adicionalmente opera en ambientes húme-

dos. Presenta lecturas de concentración de radón en un intervalo de  $2 \times 10^{-3}$  a 2000 Bq/l [45], que se pueden almacenar en la memoria del propio instrumento y además pueden descargarse a una computadora. El detector es comúnmente utilizado en Estados Unidos de América, tanto en laboratorios principales de medicina, como de instrumentación por sus características de operación y calibración.

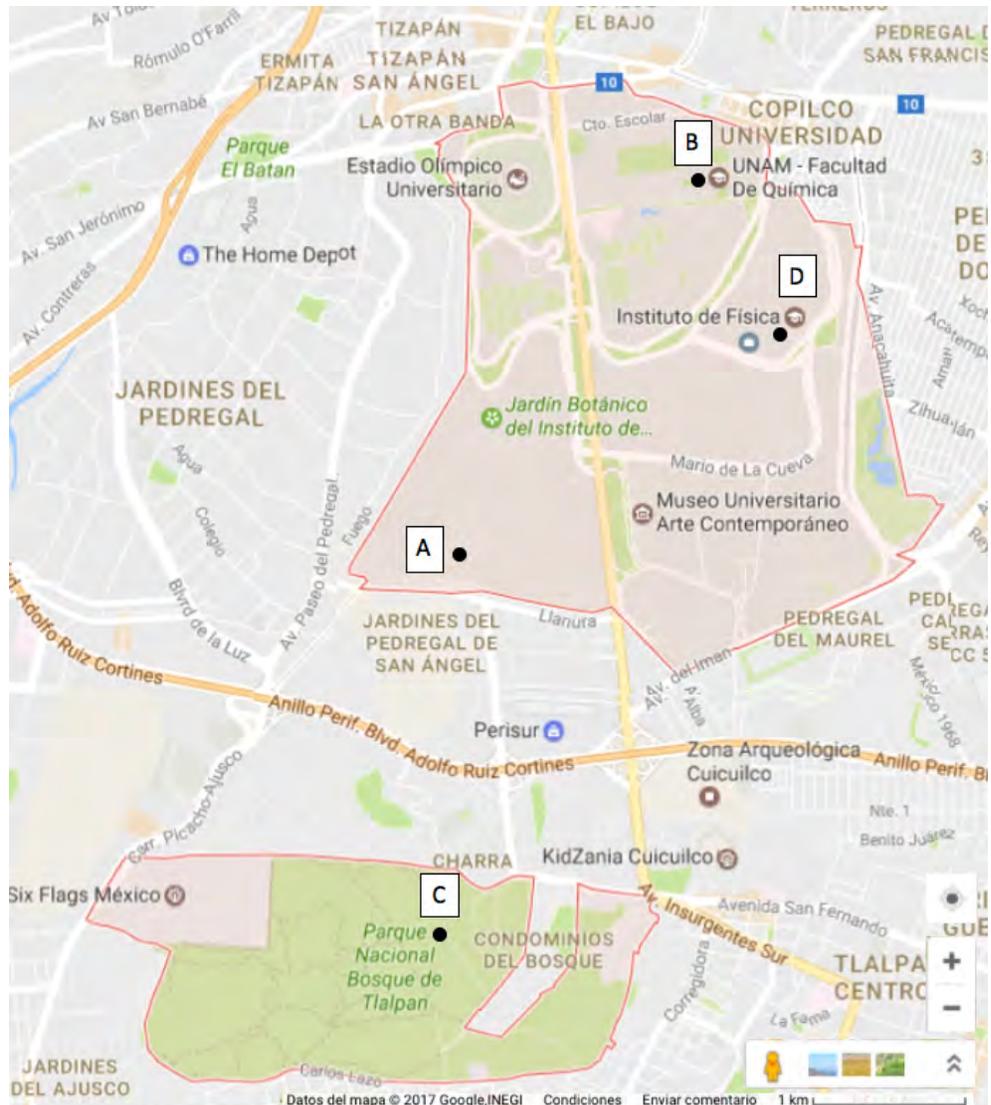
### 2.3.2. AquaKIT

El sistema periférico AquaKIT es un conjunto de accesorios con los que se mide directamente el gas radón contenido en muestras líquidas. Consiste en un circuito formado por diferentes elementos: un sistema de bombeo de aire llamado comercialmente *AlphaPUMP*, dos tubos de análisis de vidrio, uno donde se hace burbujear la muestra de agua y otro de seguridad para evitar el paso de líquidos a la cámara de detección, un filtro de papel desecante y un sistema cerrado con tubos de plástico.

## 2.4. Selección de lugares y características

La Ciudad de México, antes Distrito Federal, se encuentra a una altitud media de 2240 msnm, con una superficie de 1485 km<sup>2</sup> representa el 0.08 % de la superficie del país. De acuerdo con el INEGI, en la Ciudad de México viven aproximadamente 9,000,000 habitantes, ocupando así el segundo lugar a nivel nacional en número de habitantes por entidad federativa y la densidad poblacional es aproximadamente 5900 personas por kilómetro cuadrado. La temperatura media anual es de 16°C, la mayor parte de su territorio presenta clima templado subhúmedo (87%), en el resto seco y semiseco (7%) además de templado húmedo (6%) [36]. Ciudad Universitaria (CU), está situada al sur de la Ciudad de México abarcando las delegaciones de Coyoacán y Tlalpan, en una zona volcánica denominada Pedregal de San Ángel. CU tiene una población entre estudiantes, administrativos, profesores e investigadores de más de 300000

personas dentro el campus.



**Figura 2.1:** Ubicación de los lugares de muestreo: A.-Vivero Alto; B.-Facultad de Química; C.-Parque Nacional Bosque del Pedregal; y D.-Instituto de Física. [66]

Para este estudio piloto, se seleccionaron muestras de tres pozos y una toma de agua, como se muestra en la **Figura 2.1**: (A) Vivero Alto (PVA), (B) Facultad de Química (PFQ), (C) Parque Nacional Bosque del Pedregal (PPNBP) y (D) toma de agua del Instituto de Física (TIF), véase **Tabla 2.2**. De los tres pozos de la UNAM: Vivero Alto, Multifamiliar y Facultad de Química, se extrae un promedio de entre 100 y 170 l/s [43].

**Tabla 2.2:** Lugares seleccionados.

Posición	Nombre	Código	Coordenadas Geográficas
A	Vivero Alto	PVA	19.317794, -99.193390
B	Facultad de Química	PFQ	19.331926, -99.181496
C	Parque Nacional Bosque del Pedregal	PPNBP	19.293218, -99.196279
D	Instituto de Física	TIF	19.324794, -99.176625

## 2.5. Toma de muestra

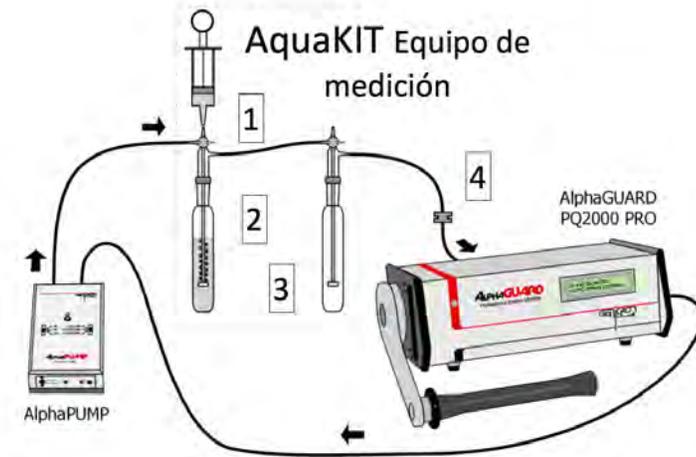
Para la toma de muestra, es recomendable que los recipientes cuenten con tapa de seguridad y que sean de polietileno. Los recipientes deben estar limpios, secos y es recomendable enjuagarlos con agua destilada. Se recomienda hacer una toma de muestra en el recipiente a usar (5l), enjuagarla y luego tirarla. Se debe medir la temperatura de la muestra final, dependiendo de la zona del muestreo. Los recipientes deben contener datos de: lugar, fecha y hora de muestreo. Las primeras mediciones al llegar las muestras al laboratorio serán las de pH y conductividad eléctrica, si es factible.

## 2.6. Preparación de muestra

Las muestras se deben preservar una vez recolectadas agregándoles 15 ml de solución 1N de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  y llevándolas a un pH de 2 para que este dato no interfiera en la medición [35]. Así mismo se recomienda: conservar la muestra

en un recipiente limpio y seco, no agitar el recipiente, no exponerlo a altas temperaturas y conservarlo en un lugar fresco. Se sugiere realizar mediciones siempre con el mismo lapso de tiempo transcurrido entre toma de muestra y medición para todas las muestras, evitando así tener que hacer el ajuste de cada uno por vida media y conseguir datos con mayor actividad y menor error estadístico.

## 2.7. Protocolo de medición de la concentración de radón en agua, utilizando el sistema AlphaGUARD y el sistema periférico AquaKIT



**Figura 2.2:** Diagrama de montaje del sistema AlphaGUARD y el sistema periférico AquaKIT. 1.-Muestra de 100 ml, 2.-Tubo de burbujeo, 3.-Tubo de seguridad, 4.-Filtro de papel desecante, comercialmente conocido como *AquaS-top* [17]

El arreglo del sistema trabaja de la siguiente manera, véase **Figura 2.2**. El AlphaPUMP, es decir el burbujeador, se configura para trabajar a una velocidad de 0.3 l/min, inyectando aire al recipiente con la muestra, para poder burbujear el agua y así sacar el gas radón de la muestra. El radón gaseoso pasa a un segundo tubo de vidrio, que evita el posible paso de líquido hacia el medidor AlphaGUARD, denominado *recipiente de seguridad*. De este tubo sale el gas radón hacia la cámara de detección del instrumento, pasando por el filtro AquaStop que absorbe la humedad. Una vez en la cámara del AlphaGUARD, las partículas alfa del gas radón se detectan y se miden. Posteriormente el gas remanente del volumen activo del detector se expulsa y llega al recipiente con la muestra de agua, lo que permite nuevamente burbujearla, teniendo un ciclo de 20 minutos.

La ecuación que se utiliza para el cálculo de la concentración de radón en agua es:

$$C_{ag} = \frac{(C_{ai}) \left( \frac{V_s - V_m}{V_m} + k \right) - C_0}{1000} \quad (2.1)$$

en donde:

$C_{ag}$  = Concentración de radón en agua. [Bq/l].

$C_{ai}$  = Concentración de radón en aire después de expulsar el radón. [Bq/m<sup>3</sup>].

$C_0$  = Concentración de radón en aire antes de cerrar el ciclo. [Bq/m<sup>3</sup>].

$V_s$  = Volumen interior del sistema. [ml].

$V_m$  = Volumen de la muestra. [ml].

$k$  = Coeficiente de distribución de radón. [ ]

El coeficiente de distribución de radón  $k$ , describe la cantidad de muestra que permanece químicamente disuelta, depende de la temperatura y es de 0.26. La concentración de radón en aire antes de cerrar el ciclo ( $C_0$ ) es de 0 Bq/m<sup>3</sup>, el

volumen interior del sistema ( $V_s$ ) es de 1102 ml, el volumen de la muestra ( $V_m$ ) es de 100 ml y el denominador de **la ecuación 2.1** tiene unidades de  $[l/m^3]$ . Sustituyendo estos valores en **la ecuación 2.1** se obtiene:

$$C_{ag} = \frac{(C_{ai}) \left( \frac{1102-100}{100} + 0.26 \right) - 0}{1000} = C_{ai}(0.01028) \quad (2.2)$$

Para la medición de la concentración de radón en agua, utilizando el sistema periférico AquaKIT, se realiza el montaje descrito en la **Figura 2.2** y se conecta el sistema AlphaGUARD con un cable de 9 polos SUB-D BD-9 puerto RS-232 para conexión a PC [18], a una computadora que tenga instalado el programa *Experto en Datos*. Se enciende el sistema AlfaGUARD con el botón de *Encendido* y con el botón de *Menú*, se selecciona la opción *Flujo de 1 minuto*.

Se abre el programa *Experto en Datos* desde la computadora, en la barra de menú, ubicada en la parte superior de la ventana, se ingresa a la opción de *Datos*, aparecerá una nueva ventana y se ingresa a la opción *Conectar al instrumento*, se selecciona la opción *AlphaGUARD* y después se presiona *Ok*. Se despliega una nueva ventana que dice; *Conectar* y se seleccionan las opciones: *Común*, *Automático* y posteriormente *Aceptar*. Se abre una nueva ventana que dice; *Conectar a AlphaGUARD EF-1808*, se ingresa a la opción de *Mediciones* y se selecciona la última medición, en seguida se hace doble clic en esta opción. Se abre un cuadro con la siguiente pregunta; *¿Desea utilizar el ajuste actual de canales y contadores externos para este instrumento?* y se selecciona; *Sí, utilice el actual y continúe*.

Realizando lo anterior, se puede comenzar a medir la concentración de radón en agua con el sistema AlphaGUARD, siendo los datos almacenados en una PC o una laptop con memoria RAM de cuando menos 1 GB.

Primero se debe calibrar el sistema, se realiza una purga del mismo. Se enciende la bomba de aire llamada comercialmente *AlphaPUMP* durante 10 minutos y se apaga. A continuación se mide la concentración de radón en una muestra de agua destilada por ionización durante 20 min, es decir, se colocan 100 ml de agua destilada por ionización en el tubo de burbujeo utilizando la línea marcada sobre dicho tubo de vidrio para medir la cantidad necesaria de agua, se enciende la bomba de aire y se apaga pasados 20 minutos. Después se retira el agua destilada por ionización del tubo de burbujeo y se seca el interior utilizando toallas de papel, posteriormente se vierten 100 ml de la muestra de estudio en dicho recipiente, cuidando en todo momento no agitar el líquido y no generar burbujas en él.

Se recomienda inclinar el tubo de burbujeo y el tubo que contiene la muestra para verterlo de forma que el líquido se deslice lentamente por las paredes del recipiente. Se enciende la bomba de aire y se apaga pasados 20 minutos. En seguida se realiza una purga de 10 minutos, como se describió previamente. Una vez concluidas las mediciones, se selecciona la ventana que dice; *Conectar a AlphaGUARD EF-1808*, se ingresa a la opción de *Mediciones*, se selecciona la última medición y después se hace doble clic sobre esta última. Se abre un cuadro con la siguiente pregunta; *¿Desea utilizar el ajuste actual de canales y contadores externos para este instrumento?*, se selecciona la opción; *Sí, utilice el actual y continúe* y se abre una gráfica con los valores obtenidos del sistema AlphaGUARD. Se extraen los datos del programa y se colocan en una hoja de cálculo para su posterior análisis en *Julia*.

*Julia* es un lenguaje de programación dinámico de alto nivel y alto rendimiento para la computación numérica. Proporciona un compilador sofisticado de compilación en tiempo de ejecución (justo a tiempo, JIT por sus siglas en inglés), ejecución paralela, precisión numérica y una extensa biblioteca de funciones matemáticas. La biblioteca de la base de *Julia*, escrita mayormente en

*Julia* misma, también integra las bibliotecas C y Fortran de código abierto para álgebra lineal, generación de números aleatorios y procesamiento de señales y cadenas. Presenta múltiples características entre las que destacan: el despacho múltiple que permite definir el comportamiento de las funciones a través de diversas combinaciones de tipos de argumentos, el buen desempeño, acercándose al de lenguajes estáticamente compilados tales como C, el gestor de paquetes integrado, la facilidad para llamar funciones de Python, mediante el paquete PyCall o funciones de C, la generación automática de código eficiente y especializado para diferentes tipos de argumentos, el soporte eficiente para Unicode, licencia libre y de código abierto, entre otras. Personalmente, utilicé *Julia* desde un navegador en *JuliaBox.com*, no requiere instalación y todos los paquetes de graficación están preinstalados.

Los datos obtenidos representan la concentración de radón por minuto, si un dato se encuentra en el límite inferior de detección del instrumento, la cuenta tomará valores negativos. El fabricante menciona que en datos menores a 0.3 Bq/l, trabajando en modo de flujo, es poco probable alcanzar el equilibrio en el detector. Por tanto, los valores que sean negativos se consideran nulos, ya que las concentraciones de actividad negativas carecen de sentido físico.



# Capítulo III

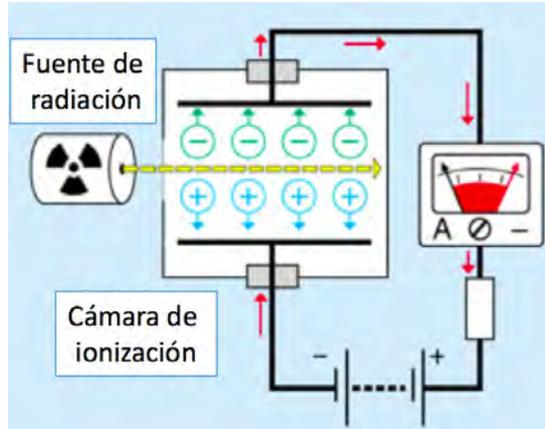
## Instrumentación

### 3.1. Funcionamiento del sistema AlphaGUARD

Como se había mencionado, el sistema AlphaGUARD es un monitor de radón portable que se compone de una cámara de ionización. Una cámara de ionización mide la carga a partir del número de iones generados dentro de un gas ionizante, véase la **Figura 3.1**. Se compone de una cámara llena de gas ionizable con dos electrodos. Los electrodos pueden estar en forma de placas paralelas o una disposición de cilindros con un hilo interno coaxial. Se aplica un potencial entre los electrodos para crear un campo eléctrico en el gas. Cuando el gas ubicado entre los electrodos se ioniza por radiación incidente, se crean pares de iones, los iones positivos resultantes se desplazan a los electrodos de la polaridad opuesta bajo la influencia del campo eléctrico.

Cada par de iones crea depósitos o elimina una pequeña carga eléctrica, de manera que la carga acumulada es proporcional al número de pares de iones creados y por tanto, a la dosis de radiación. Debido a la baja densidad de un gas al ser comparado con un sólido, los detectores gaseosos tienen baja eficiencia para detectar radiación X o gama, pero detectan prácticamente todas las alfas

y betas que traspasan las paredes de la cámara.



**Figura 3.1:** Funcionamiento de una cámara de ionización [62].

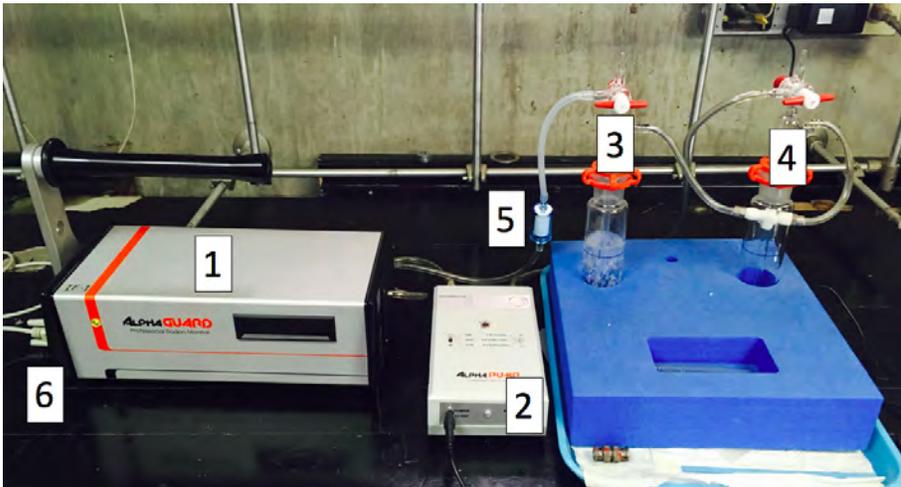
### 3.2. Rangos de operación y características del sistema AlphaGUARD

El sistema AlphaGUARD puede medir simultáneamente: presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa. Tiene aplicaciones en medición de actividad en agua, emanación de radón en superficies, emanación de radón en el subsuelo y adicionalmente opera en ambientes húmedos. Presenta lecturas de concentración de radón en un rango de  $2 \times 10^{-3}$  a 2000 Bq/l [45], que se pueden almacenar en la memoria del propio instrumento y además pueden descargarse a una computadora. En la **Tabla 3.1** y **Tabla 3.2** se muestran: rangos de operación datos técnicos y características del sistema AlphaGUARD.

**Tabla 3.1:** Rangos de operación del sistema AlphaGUARD. [17]

Rangos de operación	
Temperatura	-10 a 50°C $\pm$ 1.5°C
Presión atmosférica	700 a 1100 mbar $\pm$ 3mbar
Humedad (no condensada)	0 a 99% rH $\pm$ 3% rH

La **Figura 3.2** es una fotografía el montaje experimental del sistema AlphaGUARD PQ2000 PRO y el sistema periférico AquaKIT.



**Figura 3.2:** Montaje experimental del sistema AlphaGUARD y el sistema periférico AquaKIT. Se muestran: 1.- Sistema AlphaGUARD, 2.- Bomba de aire, 3.- Tubo de burbujeo, 4.- Tubo de seguridad, 5.- Filtro de papel desecante, 6.- Cable de 9 polos SUB-D.

**Tabla 3.2:** Datos técnicos y características del sistema AlphaGUARD. [17]

AlphaGUARD	
Tipo de detector	Cámara de ionización HV=750 VDC
Principio de evaluación	Espectroscopia alfa
Volumen total de detector/activo	0.62 l /0.56 l
Modos de operación	Difusión optimizada (10/60 min ciclo)
	Flujo optimizado (1/10 min ciclo)
Filtro de hijos del $^{222}Rn$	Fibra de vidrio (factor de retención > 99.9 %)
Sensibilidad	1 CPM por 1 CPM por 0.55 pCi/l
Rango de concentraciones de radón	< 0.55 pCi/l a 54000 pCi/l
Error lineal	< 3 % del rango total
Peso	4.5 Kg

Con lo anterior observamos que el sistema AlphaGUARD es adecuado para la realización del presente estudio por las características únicas de este sistema. Su funcionamiento, rangos de operación y manejo de datos lo postulan como el mejor candidato para la medición de la concentración de radón en agua, en específico para el estudio del agua potable de CU. Este trabajo es un experimento piloto para un futuro estudio de la concentración de radón del agua de diferentes zonas del país, siguiendo los mismos lineamientos descritos y utilizando el sistema AlphaGUARD.

# Capítulo IV

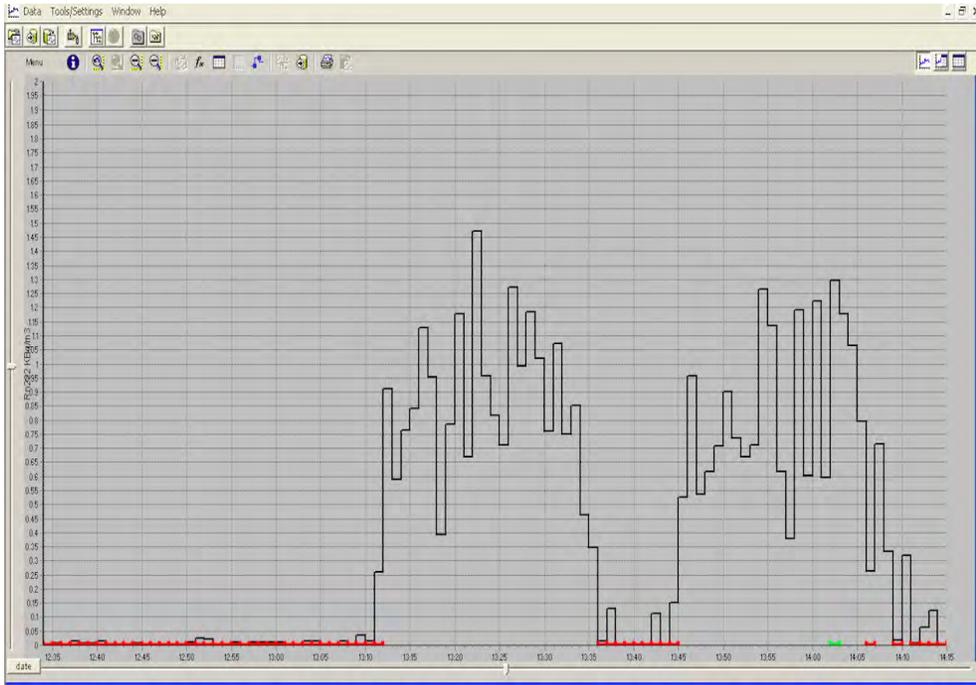
## Resultados

### 4.1. Tratamiento de datos

Como se mencionó, utilizando el software *Experto en Datos* compatible con el sistema AlphaGUARD, se obtiene la información de concentración de radón por unidad de tiempo de la muestra de estudio, véase la **Figura 4.1**, dicha información se extrae y se coloca en una hoja de cálculo, después se coloca en la entrada de los programas de *Julia* que se muestran en el **Anexo 4.5**. Con estos programas se promedian los datos y se obtiene la desviación estándar de acuerdo con la **ecuación 4.2**.

La información importada del software *Experto en Datos* tiene unidades de  $\text{Bq/m}^3$  y se requiere en  $\text{Bq/l}$ , por lo que, de acuerdo con la **ecuación 2.2** y, por ejemplo, suponiendo que tenemos un dato de  $C_{ai} = 1500 \text{ Bq/m}^3$ , entonces:

$$C_{ag} = C_{ai}(0.01028) = (1500\text{Bq/m}^3)(0.01028\text{m}^3/\text{l}) = 15.42\text{Bq/l} \quad (4.1)$$



**Figura 4.1:** Captura de pantalla del software *Experto en Datos*. Muestra la gráfica de concentración de radón por minuto de un líquido.

## 4.2. Estadística utilizada

El tratamiento estadístico llevado a cabo para obtener la concentración de radón en las diferentes muestras es el siguiente. Como se ha mencionado, los datos se extraen del software *Experto en datos*, se colocan en una hoja de cálculo, se promedian, después se colocan en la entrada de los programas de *Julia* en donde se promedian y se obtiene la desviación estándar. La desviación estándar se expresa como:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.2)$$

Se utilizó esta fórmula porque, cuando los casos tomados son iguales al total de la población se aplica la fórmula de desviación estándar poblacional, mejor conocida como desviación estándar. Así la desviación estándar es el promedio de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de la variable y el promedio de la distribución. En caso de que la variable  $x$  no se distribuya uniformemente, sino con una probabilidad  $p_i$  para cada  $x_i$ , la desviación estándar será diferente, utilizando  $n - 1$  en el denominador según la corrección de Bessel, esta fórmula es conocida como desviación estándar muestral y se expresa como:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

### 4.3. Agua destilada por ionización

Se realizaron mediciones de concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) utilizando agua destilada por ionización, para calibrar el sistema AlphaGUARD. El tratamiento estadístico se describe en la **Sección 4.1** de este trabajo y los programas utilizados en *Julia* se muestran en el **Anexo 4.5**.

El resultado de la concentración de radón en agua destilada por ionización utilizando el sistema AlphaGUARD se muestra en la **Tabla 4.1**.

**Tabla 4.1:** Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua destilada por ionización.

Equipo	Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) [Bq/l]	Incertidumbre $\pm$ [Bq/l]
AlphaGUARD	0.14	$\pm 0.12$

## 4.4. Tabla de Resultados

Los resultados de la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua en: PVA, PFQ, PPNBP y TIF utilizando el sistema alphaGUARD se muestran a continuación. Se describirá a continuación el tratamiento de datos para obtener la concentración de radón en agua de PVA.

Del software *Experto en Datos* se extrae la información de concentración de radón por unidad de tiempo, véase la **Tabla 4.2**.

**Tabla 4.2:** Concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua de PVA.

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	99.50	34	42.25
2	48.50	35	30.50
3	54.75	36	34.00
4	63.25	37	52.00
5	249.50	38	103.50
6	59.00	39	63.00
7	61.50	40	76.50
8	60.00	41	35.00
9	59.25	42	118.00
10	49.00	43	199.50
11	49.25	44	67.50
12	52.50	45	56.75
13	25.13	46	139.00
14	249.50	47	71.50
15	47.00	48	50.50
		49	36.75
		50	62.50
		51	52.25

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
52	51.75	68	49.50	84	56.25
53	65.00	69	53.00	85	46.00
54	50.00	70	38.50	86	51.75
55	130.00	71	50.50	87	60.00
56	33.50	72	44.25	88	11.75
57	69.50	73	111.00	89	59.00
58	41.50	74	58.50	90	55.00
59	50.75	75	64.00	91	18.00
60	36.50	76	70.13	92	65.25
61	43.25	77	144.25	93	36.25
62	62.25	78	43.00	94	45.00
63	42.00	79	59.00	95	59.00
64	36.38	80	58.00	96	81.50
65	79.75	81	36.25	97	21.50
66	58.75	82	76.00	98	100.30
67	57.25	83	43.25	99	48.75
				100	30.50

Ingresando la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*, se obtiene el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua en PVA, utilizando unidades de Bq/m<sup>3</sup>, véase la **Figura 4.2** y la **Figura 4.3** .

```
In [125]: PVA=[99.50,48.50,54.75,63.25,249.50,59.00,61.50,
60.00,59.25,49.00,49.25,52.50,25.13,249.50,47.00,
67.00,46.50,44.25,67.50,83.00,53.00,66.50,83.00,
88.00,25.38,54.50,47.50,46.00,56.00,218.00,43.25,
50.25,48.25,42.25,30.50,34.00,52.00,103.50,63.00,
76.50,35.00,118.00,199.50,67.50,56.75,139.00,71.50,
50.50,36.75,62.50,52.25,51.75,65.00,50.00,130.00,
33.50,69.50,41.50,50.75,36.50,43.25,62.25,42.00,
36.38,79.75,58.75,57.25,49.50,53.00,38.50,50.50,
44.25,111.00,58.50,64.00,70.13,144.25,43.00,59.00,
58.00,36.25,76.00,43.25,56.25,46.00,51.75,60.00,
11.75,59.00,55.00,18.00,65.25,36.25,45.00,59.00,
81.50,21.50,100.30,48.75,30.50]
```

**Figura 4.2:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*.

```
In [93]: promedio(PVA)
Out[93]: 64.5957

In [94]: desviacions(PVA)
Out[94]: 40.955505033023336
```

**Figura 4.3:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PVA, en unidades de  $\text{Bq}/\text{m}^3$ .

El resultado tiene unidades de  $\text{Bq}/\text{m}^3$  y se requiere en  $\text{Bq}/\text{l}$ , por lo que, de acuerdo con la **ecuación 2.2**, debemos multiplicar el resultado anterior por un factor de conversión de 0.01028, véase 4.4.

```
In [66]: promedio(PVA)*0.01028
```

```
Out[66]: 0.6640437959999999
```

```
In [69]: desviacions(PVA)*0.01028
```

```
Out[69]: 0.42102259173947987
```

**Figura 4.4:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PVA, en unidades de Bq/l.

Del software *Experto en Datos* se extrae la información de concentración de radón por unidad de tiempo, véase la **Tabla 4.3**.

**Tabla 4.3:** Concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua de PFQ.

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	5.50
2	5.00
3	17.38
4	29.30
5	12.17
6	8.25
7	3.25
8	24.25
9	29.88
10	29.75
11	4.44
12	36.00
13	38.00

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
14	41.25
15	33.25
16	35.75
17	30.88
18	0.00
19	8.00
20	17.35
21	13.69
22	21.50
23	12.50
24	27.50
25	12.17
26	7.74
27	13.75
28	28.38
29	18.63

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
30	6.50
31	6.75
32	7.50
33	20.10
34	12.17
35	8.50
36	8.75
37	6.10
38	42.17
39	5.70
40	6.75
41	12.17
42	10.10
43	5.40

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
44	4.25	63	3.38	82	7.75
45	6.25	64	21.40	83	8.50
46	39.00	65	0.00	84	7.30
47	7.50	66	16.60	85	12.17
48	0.00	67	6.80	86	6.30
49	20.50	68	12.50	87	10.20
50	7.70	69	29.50	88	44.38
51	5.75	70	4.20	89	3.10
52	8.25	71	18.50	90	6.80
53	3.50	72	22.30	91	7.50
54	4.50	73	21.10	92	8.30
55	5.50	74	12.00	93	9.20
56	7.50	75	6.60	94	9.30
57	5.25	76	28.00	95	17.50
58	7.20	77	8.30	96	8.50
59	12.17	78	16.80	97	10.50
60	20.30	79	13.40	98	0.00
61	6.80	80	3.50	99	9.50
62	0.00	81	9.50	100	31.60

Ingresando la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*, se obtiene el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua en PFQ, utilizando unidades de Bq/m<sup>3</sup>, véase la **Figura 4.5** y la **Figura 4.6** .

```
In [95]: PFQ=[5.50,5.00,17.38,29.30,12.17,8.25,3.25,24.25,
29.88,29.75,4.44,36.00,38.00,41.25,33.25,35.75,
30.88,0.00,8.00,17.35,13.69,21.50,12.50,27.50,
12.17,7.74,13.75,28.38,18.63,6.50,6.75,7.50,
20.10,12.17,8.50,8.75,6.10,42.17,5.70,6.75,12.17,
10.10,5.40,4.25,6.25,39.00,7.50,0.00,20.50,7.70,
5.75,8.25,3.50,4.50,5.50,7.50,5.25,7.20,12.17,
20.30,6.80,0.00,3.38,21.40,0.00,16.60,6.80,12.50,
29.50,4.20,18.50,22.30,21.10,12.00,6.60,28.00,8.30,
16.80,13.40,3.50,9.50,7.75,8.50,7.30,12.17,6.30,
10.20,44.38,3.10,6.80,7.50,8.30,9.20,9.30,17.50,
8.50,10.50,0.00,9.50,31.60]
```

**Figura 4.5:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*.

```
In [96]: promedio(PFQ)
Out[96]: 13.688699999999999

In [97]: desviacions(PFQ)
Out[97]: 10.716775229050949
```

**Figura 4.6:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PFQ, en unidades de Bq/m<sup>3</sup>.

El resultado tiene unidades de Bq/m<sup>3</sup> y se requiere en Bq/l, por lo que, de acuerdo con la **ecuación 2.2**, debemos multiplicar el resultado anterior por un factor de conversión de 0.01028, véase **4.7**.

```
In [98]: promedio(PFQ)*0.01028
```

```
Out[98]: 0.140719836
```

```
In [99]: desviacions(PFQ)*0.01028
```

```
Out[99]: 0.11016844935464375
```

**Figura 4.7:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PFQ, en unidades de Bq/l.

Del software *Experto en Datos* se extrae la información de concentración de radón por unidad de tiempo, véase la **Tabla 4.4**.

**Tabla 4.4:** Concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua de PPNBP.

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	240.00
2	62.75
3	137.00
4	727.25
5	91.00
6	238.00
7	60.50
8	192.75
9	48.25
10	90.00
11	100.00
12	148.25
13	152.00

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
14	162.75
15	140.50
16	186.00
17	100.00
18	138.25
19	31.50
20	33.25
21	140.25
22	146.75
23	38.25
24	100.00
25	289.00
26	229.25
27	57.00
28	154.75
29	128.63

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
30	74.00
31	146.00
32	144.00
33	133.50
34	151.50
35	142.25
36	734.00
37	35.75
38	180.50
39	159.50
40	149.50
41	233.50
42	69.75

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
43	145.75	63	119.50	82	134.75
44	138.00	64	136.75	83	255.50
45	160.50	65	139.75	84	37.75
46	120.00	66	152.25	85	137.50
47	86.00	67	158.00	86	117.88
48	165.00	68	130.88	87	148.00
49	142.50	69	165.50	88	41.50
50	133.00	70	243.25	89	138.25
51	85.00	71	54.75	90	135.25
52	144.25	72	39.75	91	253.00
53	295.00	73	159.75	92	50.25
54	45.25	74	147.25	93	309.00
55	143.50	75	135.25	94	74.00
56	131.63	76	211.25	95	152.25
57	0.00	77	78.75	96	142.00
58	189.50	78	134.25	97	133.00
59	155.50	79	136.00	98	29.88
60	140.25	80	100.25	99	243.25
61	173.50	81	146.75	100	125.75
62	55.50				

Ingresando la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*, se obtiene el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua en PPNBP, utilizando unidades de Bq/m<sup>3</sup>, véase la **Figura 4.8** y la **Figura 4.9** .

```
In [79]: PPNBP=[240.00,62.75,137.00,727.25,91.00,238.00,60.50,
192.75,48.25,90.00,100.00,148.25,152.00,162.75,140.50,
186.00,100.00,138.25,31.50,33.25,140.25,146.75,38.25,
100.00,289.00,229.25,57.00,154.75,128.63,74.00,146.00,
144.00,133.50,151.50,142.25,734.00,35.75,180.50,159.50,
149.50,233.50,69.75,145.75,138.00,160.50,120.00,86.00,
165.00,142.50,133.00,85.00,144.25,295.00,45.25,143.50,
131.63,0.00,189.50,155.50,140.25,173.50,55.50,119.50,
136.75,139.75,152.25,158.00,130.88,165.50,243.25,54.75,
39.75,159.75,147.25,135.25,211.25,78.75,134.25,136.00,
100.25,146.75,134.75,255.50,37.75,137.50,117.88,148.00,
41.50,138.25,135.25,253.00,50.25,309.00,74.00,152.25,
142.00,133.00,29.88,243.25,125.75]
```

**Figura 4.8:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*.

```
In [83]: promedio(PPNBP)
Out[83]: 146.15900000000002

In [84]: desviacions(PPNBP)
Out[84]: 103.6596721922272
```

**Figura 4.9:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PPNBP, en unidades de Bq/m<sup>3</sup>.

El resultado tiene unidades de Bq/m<sup>3</sup> y se requiere en Bq/l, por lo que, de acuerdo con la **ecuación 2.2**, debemos multiplicar el resultado anterior por un factor de conversión de 0.01028, véase **4.10**.

```
In [85]: promedio(PPNBP)*0.01028
```

```
Out[85]: 1.50251452
```

```
In [86]: desviacions(PPNBP)*0.01028
```

```
Out[86]: 1.0656214301360956
```

**Figura 4.10:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de PPNBP, en unidades de Bq/l.

Del software *Experto en Datos* se extrae la información de concentración de radón por unidad de tiempo, véase la **Tabla 4.5**.

**Tabla 4.5:** Concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua de TIF.

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
1	289.05
2	279.83
3	49.08
4	280.85
5	489.05
6	249.08
7	287.00
8	323.90
9	289.05
10	249.08
11	276.75
12	85.98
13	257.28

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
14	254.20
15	146.00
16	318.78
17	353.18
18	489.05
19	268.55
20	146.00
21	384.95
22	246.00
23	358.00
24	108.00
25	90.00
26	428.00
27	98.00
28	374.00
29	384.00

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
30	49.00
31	480.00
32	164.00
33	320.00
34	157.28
35	393.15
36	313.65
37	246.00
38	220.00
39	257.28
40	293.15
41	349.08
42	300.33

No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	$^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]
43	249.08	63	257.28	82	157.28
44	251.13	64	276.26	83	152.15
45	65.48	65	342.93	84	601.35
46	80.85	66	189.05	85	249.08
47	449.08	67	89.05	86	289.05
48	389.05	68	457.28	87	187.00
49	157.28	69	489.05	88	346.00
50	69.58	70	389.05	89	257.28
51	257.28	71	156.25	90	157.28
52	303.40	72	289.05	91	246.00
53	548.50	73	146.00	92	279.83
54	274.70	74	279.83	93	72.65
55	257.28	75	257.28	94	557.28
56	247.03	76	549.08	95	246.00
57	57.28	77	274.70	96	589.05
58	459.33	78	89.05	97	252.15
59	146.00	79	253.18	98	189.05
60	357.28	80	489.05	99	149.08
61	168.55	81	77.78	100	346.00
62	508.53				

Ingresando la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*, se obtiene el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua en TIF, utilizando unidades de Bq/m<sup>3</sup>, véase la **Figura 4.11** y la **Figura 4.12** .

```
In [120]: TIF=[289.05,279.83,49.08,280.85,489.05,249.08,287.00,
323.90,289.05,249.08,276.75,85.98,257.28,254.20,
146.00,318.78,353.18,489.05,268.55,146.00,384.95,
246.00,358.00,108.00,90.00,428.00,98.00,374.00,384.00,
49.00,480.00,164.00,320.00,157.28,393.15,313.65,246.00,
220.00,257.28,293.15,349.08,300.33,249.08,251.13,65.48,
80.85,449.08,389.05,157.28,69.58,257.28,303.40,548.50,
274.70,257.28,247.03,57.28,459.33,146.00,357.28,168.55,
508.53,257.28,276.26,342.93,189.05,89.05,457.28,489.05,
389.05,156.25,289.05,146.00,279.83,257.28,549.08,274.70,
89.05,253.18,489.05,77.78,157.28,152.15,601.35,249.08,
289.05,187.00,346.00,257.28,157.28,246.00,279.83,72.65,
557.28,246.00,589.05,252.15,189.05,149.08,346.00]
```

**Figura 4.11:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra la información importada del software *Experto en Datos* al programa de *Julia*.

```
In [121]: promedio(TIF)
Out[121]: 273.67060000000004

In [122]: desviacions(TIF)
Out[122]: 131.85012552758528
```

**Figura 4.12:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de TIF, en unidades de  $\text{Bq}/\text{m}^3$ .

El resultado tiene unidades de  $\text{Bq}/\text{m}^3$  y se requiere en  $\text{Bq}/\text{l}$ , por lo que, de acuerdo con la **ecuación 2.2**, debemos multiplicar el resultado anterior por un factor de conversión de 0.01028, véase **4.10**.

```
In [123]: promedio(TIF)*0.01028
Out[123]: 2.813333768

In [124]: desviacions(TIF)*0.01028
Out[124]: 1.3554192904235765
```

**Figura 4.13:** Captura de pantalla del programa de *Julia* desde *www.juliabox.com*. Muestra el promedio y la desviación estándar de la concentración de radón en agua de TIF, en unidades de Bq/l.

La tabla de resultados se muestra a continuación, los resultados mostrados tienen dos cifras significativas después del punto decimal, pues más cifras carecen de sentido físico real y representan únicamente estadística. Se respetó la convención de redondeo con las siguientes reglas:

1. Dígito menor que 5: si el siguiente decimal es menor que 5, el anterior no se modifica.
2. Dígito mayor que 5: si el siguiente decimal es mayor que 5, el anterior se incrementa en una unidad.
3. Dígito igual que 5 no seguida de ceros: si el siguiente decimal es igual a 5 no seguida de ceros, el anterior se incrementa en una unidad.
4. Dígito igual que 5 seguida de ceros: si el siguiente decimal es igual a 5 seguida de ceros, el anterior se incrementa en una unidad si esta es impar y se conserva si es par.

**Tabla 4.6:** Concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en: PVA, PFQ, PPNBP y TIF. Utilizando el sistema alphaGUARD.

Código	Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) [Bq/l]	Incertidumbre $\pm$ [Bq/l]
PVA	0.66	0.42
PFQ	0.14	0.11
PPNBP	1.50	1.07
TIF	2.81	1.36

De los resultados mostrados en la **Tabla 4.6** podemos observar que el límite inferior medido se encuentra en el pozo de la Facultad de Química localizado en el circuito escolar de Ciudad Universitaria.

El agua de Ciudad Universitaria y la zona del Pedregal de San Ángel, contienen concentraciones de gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que no rebasan las recomendaciones internacionales, de 11.1 Bq/l y por consiguiente no constituyen directamente un riesgo radiológico para la población de CU.

## 4.5. Comparación con otros datos reportados

Haciendo un análisis comparativo de los resultados encontrados en las muestras estudiadas y los reportados en artículos científicos recientes, podemos encontrar lo siguiente

**Tabla 4.7:** Ejemplos de rangos de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  (radón-222) en diferentes locaciones [34].

Región	Concentración de $^{222}\text{Rn}$ [Bq/l]	Referencia
Noruega	10 – 300	[49]
Suecia, Condado de Estocolmo	4 – 63560	[50]
Bélgica	47 – 1600	[51]
Finlandia	77000	[52]
Serbia/Novi Sad	< 3	[53]
Chipre y Grecia (Ática-Creta)	0.3 – 24	[54]
Austria	1.46 – 644	[55]
Alemania	< 1.3 – 1800	[56]
Portugal	1.9 – 112.77	[57]
Reino Unido	0.19 – 71.1	[58]
España, La Garrotxa	1 – 1000	[49]
Polonia, las montañas de Sudety	3043	[59]
Alemania, Baviera oriental	1220	[60]
Reino Unido, Irlanda del Norte	5.8 – 36.6	[61]

Haciendo una revisión de trabajos publicados por otros grupos de investigación, véase la **Tabla 4.7** en referencia a la concentración de radón en agua de diferentes regiones en el mundo, como: Noruega, Suecia, Bélgica, Finlandia, Serbia, Chipre, Grecia, Austria, Alemania, Portugal, Reino Unido, España, Polonia e Irlanda del Norte se encontró que existe una enorme variedad de concentraciones de radón en agua, que como se mencionó anteriormente, depende de las características específicas de cada región. Al comparar la concentración de radón de estos países y las concentraciones de radón medidas en los lugares de muestreo estudiados, podemos notar que el agua de CU tiene niveles bajos de radón en agua, véase la **Tabla 4.6**.

# Conclusiones y Recomendaciones

Desde el punto de vista de Física de Radiaciones y Radioactividad Ambiental, el estudio de los contenidos de contaminantes radiactivos naturales, en el agua, aire, suelos y alimentos, es una prioridad actual, pues estos son un riesgo en salud, para el ser humano y los seres vivos.

El nivel de riesgo está asociado directamente a la concentración de elementos radiactivos y de su interacción en el medio, pudiendo tener efectos a mediano y largo plazo, creando situación epidemiológicas y de desarrollo poblacional.

Las concentraciones de gas radón en el agua potable, en todo el mundo, deben evaluarse y mantenerse controladas, evitando un posible daño a las poblaciones regionales y nacionales. En la actualidad existen recomendaciones internacionales sobre los niveles de concentración de radón en agua potable, las cuales son responsabilidad de los estados, de seguir y fortalecer.

En este trabajo se encontró que para la ciudad de México, los niveles de radón en el agua potable están por debajo de los 11.1 Bq/l, límite de acción recomendado por la USEPA. Sin embargo, en México debería establecerse, un estudio y control permanente de la concentración de radón en agua; por las autoridades pertinentes.



# Anexos

## a) Definiciones

**Átomo:** Unidad más pequeña de un elemento químico.

**Molécula:** Conjunto de al menos dos átomos enlazados que forman un sistema estable y eléctricamente neutro.

**Elemento:** Materia constituida por átomos de la misma clase. En su forma más simple posee un número determinado de protones en su núcleo, haciéndolo pertenecer a una categoría única clasificada por su número atómico.

**Gases nobles:** Grupo de elementos químicos con propiedades muy similares: por ejemplo, son gases monoatómicos inodoros, incoloros y presentan una reactividad química muy baja. Los siete gases son helio (He), neón (Ne), argón (Ar), kriptón (Kr), xenón (Xe), radón (Rn) y oganesón (Og).

**Isótopos:** Átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en masa.

**Decaimiento Radioactivo:** Proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable, emitiendo partículas y/o fotones y liberan-

do energía durante el proceso.

**Vida Media:** Tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo radiactivo.

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

en donde:

$T_{\frac{1}{2}}$  = Vida media

$\ln(2) \approx 0.6931$

$\lambda$  = constante de desintegración

**Fuente radiactiva:** Cualquier material que pueda causar exposición a la radiación, ya sea emitiendo radiación ionizante o liberando sustancias o materiales radiactivos.

**Fuente radioactiva:** Cualquier material que contenga isotopos de la cadena de desintegración del radio.

**Ionización:** Fenómeno químico o físico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.

**Radiación ionizante:** Energía capaz de producir pares de iones, o iones y electrones en la materia.

**Solubilidad:** Capacidad de una sustancia o un cuerpo (solute) para disolverse en un determinado medio (disolvente).

**Coefficiente de Reparto:** También llamado coeficiente de distribución (D)

o coeficiente de partición (P) es el cociente de concentraciones de un compuesto en una mezcla de dos disolventes inmiscibles en equilibrio. Dicho coeficiente mide la solubilidad diferencial de una sustancia en esos dos disolventes y es una medida de la diferencia en la solubilidad del compuesto en estas dos fases. Se expresa como:

$$K = \frac{S_1}{S_2}$$

en donde:

$S_1$  = Concentración de la sustancia en un primer disolvente

$S_2$  = Concentración de la misma sustancia en un segundo disolvente

**Actividad (A):** Número de desintegraciones por unidad de tiempo.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

en donde:

A = Actividad

N = Desintegraciones

t = Unidad de tiempo

**Exposición (X):** Se define como la carga eléctrica liberada por radiación, dividida entre la masa del aire.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

en donde:

X = Exposición

Q = Valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en el aire

m = Masa

**Dosis:** Medida de la radiación recibida o absorbida por un blanco. Se utilizan, según el contexto, las magnitudes denominadas dosis absorbida, dosis

equivalente, dosis efectiva, o dosis efectiva comprometida.

**Dosis Absorbida (D):** Energía impartida a la materia por radiación ionizante por unidad de masa en el lugar de interés del material irradiado.

$$D = \frac{dE}{dm}$$

en donde:

D = Dosis absorbida

E = Energía emitida a la materia por radiación

m = Masa

**Dosis Equivalente ( $H_{T,R}$ ):** Se define como:

$$(H_{T,R}) = (D_{T,R})W_R$$

en donde:

$H_{T,R}$  = Dosis Equivalente

$D_{T,R}$  = Dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un órgano o tejido T

$W_R$  = Factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R

Cuando el campo de radiación se compone de diferentes tipos de radiación con diferentes valores de  $W_R$ , la dosis equivalente es:

$$H_{T,R} = \sum_R W_R D_{T,R}$$

en donde:

$H_{T,R}$  = Dosis Equivalente

$D_{T,R}$  = Dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un órgano o tejido T

$W_R$  = Factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación

tipo R

**Límite de dosis:** Valor de la dosis efectiva o de la dosis equivalente causada a los individuos por prácticas controladas, que no se deberá rebasar.

**Nivel de Acción:** Nivel de la tasa de dosis o de la concentración de la actividad por encima del cual deberían adoptarse acciones reparadoras o acciones protectoras en situaciones de exposición crónica o de exposición de emergencia.

**Agua subterránea:** Agua que queda almacenada, o se infiltra, cuando el agua de lluvia, o la que proviene de ríos o lagos, llega hasta las capas impermeables de la tierra, luego de atravesar las permeables.

**Subsuelo:** También conocido como sustrato, es la capa de suelo debajo de la capa superficial de la tierra.

**Pozo:** Excavación, agujero o túnel vertical que perfora la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar: una reserva de agua subterránea de una capa freática o fluidos como el petróleo.

**Capa freática:** Acumulación de agua subterránea que se encuentra a una profundidad relativamente pequeña bajo el nivel del suelo.

## b) Unidades

### Unidades del Sistema Internacional

Magnitud	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Temperatura	kelvin	K
Capacidad	litro	l
Cantidad de Sustancia	mol	mol

**Tabla 4.8:** Unidades del Sistema Internacional

### Unidades de Radiación y Radiactividad

Magnitud	Nombre	Símbolo	Unidad	Año
Actividad	Curie	Ci	$3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	1953
	Becquerel	Bq	$\text{s}^{-1}$	1975
Exposición	Roentgenio	R	$2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$	1928
Dosis Absorbida	rad	rad	100 erg/g	1953
	Gray	Gy	J/kg	1975
Dosis equivalente	rem	rem	100 erg/g	1971
	Sievert	Sv	J/kg $W_R$	1977

**Tabla 4.9:** Unidades de Radiación y Radiactividad.

### Actividad

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/s} \approx 27 \text{ pCi}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

## Exposición

La unidad utilizada es el Roentgen (R), definida como la exposición producida por un haz de radiación X o gamma, que absorbida en  $1 \text{ cm}^3$  de aire seco (1.293 mgr. de peso) y en condiciones normales de temperatura y presión que produce, por ionización, la liberación de una unidad electrostática de carga.

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

## Dosis Absorbida

La unidad utilizada es el Gray (Gy), pretende valorar la cantidad de radiación que es absorbida por la materia. El Gray es la dosis de radiación absorbida que equivale a 100 rads. El nombre de la unidad rad proviene de, dosis de radiación absorbida, por sus siglas en inglés (radiation absorbed dose), se definía como la dosis de radiación que depositaba 100 ergios de energía por cada gramo de tejido.

$$1 \text{ Gy} = \text{J/kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gramo}$$

$$1 \text{ R} = 98 \text{ ergs/gramo}$$

$$1 \text{ cSv} = 1 \text{ rem}$$

## Dosis Equivalente

La magnitud que toma en consideración la pluralidad de los efectos biológicos observables, se denomina rem. El nombre de la unidad rem hace referencia a la radiación equivalente entre mamíferos, por sus siglas en inglés (radiation equivalent mammalian), es la cantidad de radiación ionizante, de cualquier tipo, que tiene el mismo efecto biológico que un rad de rayos X producido a 200 KeV.

Sin embargo, para valorar otros tipos de radiación ionizante se creó el concepto de Eficacia Biológica Relativa (EBR). En la práctica la Eficacia Biológica Relativa representa el cociente en donde se compara el efecto biológico de un rad de rayos X producido a 200 KeV, con el efecto biológico de un rad de cualquier otro tipo de radiación ionizante. El resultado es un número adimensional que recibe la denominación de Factor de Calidad (Q).

El Sievert (Sv) se define como la dosis de radiación que es equivalente a 100 rem.

$$1 \text{ Sv} = \text{Gy}Q$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ R} \approx 1 \text{ rad} \approx 1 \text{ rem} \text{ (para rayos X y gamma)}$$

donde:

Sv= Sievert

Q= Factor de calidad que depende del tipo de radiación incidente en el tejido.

Por otro lado, la dosis equivalente se define como:

$$H_{T,R} = D_{T,R}W_R$$

Expresión en la que  $D_{T,R}$  es la dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un órgano o tejido T y  $W_R$  es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R. Cuando el campo de radiación se compone de diferentes tipos de radiación con diferentes valores de  $W_R$ , la dosis equivalente es:

$$H_{T,R} = \sum_R W_R D_{T,R}$$

## d) Programas de computación

### Programas de *Julia* de aplicación estadística

*Julia* es un lenguaje de programación dinámico de alto nivel y alto rendimiento para la computación numérica. Proporciona un compilador sofisticado de compilación en tiempo de ejecución (justo a tiempo, JIT por sus siglas en inglés), ejecución paralela, precisión numérica y una extensa biblioteca de funciones matemáticas. La biblioteca de la base de *Julia*, escrita mayormente en *Julia* misma, también integra las bibliotecas C y Fortran de código abierto para álgebra lineal, generación de números aleatorios y procesamiento de señales.

```
In [3]: function promedio(v)
        p = sum(v)/length(v)
        p
    end
Out[3]: promedio (generic function with 1 method)
```

**Figura 4.14:** Código de programación para obtener promedios en *Julia*, usando *JuliaBox.com*, un navegador de acceso libre que no requiere instalación y es gratuito.

Presenta múltiples ventajas entre las que destacan: el despacho múltiple que permite definir el comportamiento de las funciones a través de diversas combinaciones de tipos de argumentos, el buen desempeño; acercándose al de lenguajes estáticamente compilados tales como C, el gestor de paquetes integrado, la facilidad para llamar funciones de Python, mediante el paquete PyCall o funciones de C, la generación automática de código eficiente y especializado para diferentes tipos de argumentos, el soporte eficiente para Unicode, licencia libre y de código abierto, entre otras.

Personalmente, utilicé *Julia* desde *JuliaBox.com*, un navegador de acceso libre que no requiere instalación y es gratuito.

El código de programación para obtener desviación estándar se muestra a continuación, lo escribí en *Julia* y lo corrí en *JuliaBox.com*. Usé la **ecuación 4.2** para escribirlo.

```
In [4]: function desviacions(v)

        X = promedio(v)
        n = length(v)
        s = zeros(n) # diferencia (xi-X)^2

        for i in 1:n

            s[i] = (v[i]-X)^2

        end

        S = sqrt(sum(s)/n)

    end

Out[4]: desviacions (generic function with 1 method)
```

**Figura 4.15:** Código de programación para obtener desviación estándar en *Julia*, usando *JuliaBox.com*, un navegador de acceso libre que no requiere instalación y es gratuito.

# Bibliografía

- [1] MARTIN A., HARBISON S., *An Introduction to Radiation Protection*, Springer-Science Business Media, B.v, 4th edition, UK 1996.
- [2] KRANE K., *Introductory nuclear physics*, ed. John Wiley, USA 1988.
- [3] ACOSTA V., *Curso de Física Moderna*, Oxford University Press, 1975.
- [4] COHEN B., *Concepts of nuclear physics*, ed. McGraw-Hill, USA 1917.
- [5] CHERRY S., SORENSON J., PHELPS M., *Physics in Nuclear Medicine*, 4th Edition, Saunders Elsevier, April 2012.
- [6] ESPINOSA G., *Gas Radón en Cuevas: Su origen, medición, distribución y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública*, IFUNAM, México 2016.
- [7] BARTRAM J., *Routledge Handbook of Water and Health*, earthscan from Routledge, UK 2015.
- [8] BEISER A., *Concepts of Modern Physics*, 6ta edición, McGraw-Hill., USA 2003.
- [9] ESPINOSA G., GAMMAGE R., *An indoor radon survey in three different climate regions in Mexico, and the influence of climate in the obtained values*, Journal of Environmental Protection, 2011.
- [10] ESPINOSA G., *Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using Nuclear Track Methodology*, Elsevier, 2006.

- [11] VÁZQUEZ-LÓPEZ C., *A survey of  $^{222}$  Radon in drinking water in Mexico City*, Radiation Protection Dosimetry, Año 2011, Vol. 145, No. 2-3, p.p. 320-324.
- [12] ICRP, 1994, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Publicación 65.
- [13] USEPA United States Environmental Protection Agency, *www.epa.gov*, revisado el 20-03-17.
- [14] WHO, *Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective Nonserial Publications* World Health Organization.
- [15] UKRADON, Public Health England, <http://www.ukradon.org/information/level>, revisado el 21-03-17.
- [16] Report to Congress RADON IN DRINKING WATER REGULATIONS, <http://water.epa.gov/laysregs/rulesregs/sdwa/upload/epa815r12002.pdf>, revisado el 20-03-17.
- [17] SAPHYMO, *The reference in professional radon measurement*.
- [18] SAPHYMO, *User Manual. Portable Radon Monitor. AlphaGUARD.*, Germany 2010.
- [19] ESPINOSA G., *Trazas nucleares en sólidos*, UNAM, México 1994.
- [20] *Adapted from Mladjenovic M: Radioisotope and Radiation Physics*. New York 1973, Academic Press.
- [21] CERDA M., *Mitigación de la concentración de radón intramuros mediante captura en agua*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [22] <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>, revisado el 05-04-17.

- [23] SHAW S., ECKHARDT D., *An Assessment of Radon in Grounwater in New York State*, Health Physics, September 2012, Volume 103, Number 3.
- [24] HAYNES W., *Handbook of Chemistry and Physics* ed. CRC Press, Taylor and Francis, 95th Edition, 2014.
- [25] WEDEPOHL K., *Handbook of Chemistry*, Springer-Verlag, Berlín 1969.
- [26] REINER A., PRATZEL H., RESCH T., *Long-Term Efficacy of Radon Spa Therapy in Rheumatoid Arthritis, a randomized sham-controlled study and follow-up*, Rheumatology 2000;39;894-902.
- [27] Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th Edition, Geneva, Switzerland, <http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151eng.pdf>
- [28] The Council of the European Union, *Council Firective 2013/51/Euratom*, Official Journal of the European Union 2013.
- [29] ESPINOSA G., SILVA, R.J., *Industrial commercial available respiratory filter as indoor radon monitor.*, J. Radioanal. and Nuclear Chem. Año 2005. Vol. 264, 107-111.
- [30] KOTRAPPA P., DEMPSEY J., RAMSEY R., STIEFF L., *A practical E-PERM (electret passive environmental radon monitor) system for indoor 222rn measurement.* Año 1990, Health Physics 54(4): 461-467.
- [31] ESPINOSA G., *Termoluminiscent response of commercial SiO2 optical fiber to gamma radiation*, J. Radioanal. and Nuclear Chem. Año1998. 234, 283.
- [32] ESPINOSA G., SILVA, R.J., *Transuranic Elements Alpha Particle Energy Analysis Using Nuclear Track in Solids Methodology*, J. Radioanal. and Nuclear Chem. Año1998. 234, 283
- [33] ESPINOSA A., DÍAZ C., *Drinking Water Quality in a Mexico City University Community: Perception and Preferences*, International Association of Ecology and Health, 2014.

- [34] JOBBÁY V., ALTZITZOGLU T., *A brief overview on radon measurements in drinking water*, Journal of Environmental Radioactivity, Octubre 2016.
- [35] FLORES F., SOLIS R., MORA D., *Radioactividad en agua*, DDF - IFUNAM, Departamento del Distrito Federal, Secretaria General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 2001.
- [36] <http://www.inegi.org.mx>, revisado el 02-04-17.
- [37] [HTTP://RADONLAB.COM](http://RADONLAB.COM), Radon progeny monitoring Dose assessment Underground workplaces Mining, Water works.
- [38] <http://www.estadistica.unam.mx/numeralia/>, revisado el 05-04-17.
- [39] MOREN V., BACH J., *Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa Spain* J. Environmental Radioactivity, 128, 1-8, 2014.
- [40] LERMAN A., *Geochemical Processes: Water and Sediment Environments*, Wiley-Interscience, New York, 1979.
- [41] CLEVER H., *Solubility Data Series Volume 2: Krypton, Xenon and Radon Gas Solubilities*, Pergamon Press, Oxford, 1979.
- [42] FONOLLOSA E., BORRULL F., AGUILAR C, *Radon in spring waters in the south of Catalonia* J. Environmental Radioactivity, 151, 275-281, 2006.
- [43] <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/566/A5.pdf>, revisado el 06-05-17.
- [44] ESPINOSA, G. SILVA, R., *Gel detectors for 222 Radon gas*. J. Radioanal. And Nuclear Chemistry, Año 2005, Vol. 264, 333-336.
- [45] GENITRON INSTRUMENTS, *The Reference in Professional Radon Measurement AlphaGUARD* GmbH, 2007.

- [46] BALTZER P., GÖRSTEN K., BÄCKLIN A., *A pulse-counting ionization chamber for measuring the radon concentration in air*, Volume 317, Issues 1–2, 15 June 1992.
- [47] KATASE A., MICHIKUNI S., *Radon and Thoron in the Human Environment: Proceedings of the 7th Tohwa University International Symposium Fukuoka Japan, 23-25 October 1997*.
- [48] SCHUBERT M. , KOPITZ J., CHALUPNIK S., *Sample volume optimization for radon-in-water detection by liquid scintillation counting*. Journal of Environment Radioactivity 01/2014, 134:109-113.
- [49] ISO 13164–3, 2013, *Water Quality - Radon-222- Part 1–3. International Organization for Standardization*, Geneva.
- [50] SKEPPSTROM K., OLOFSSON B., *A prediction method for radon in groundwater using GIS and multivariate statistics*. Sci. Total Environ. 367, 666-680, 2006.
- [51] BOURGOIGNIE R., LEJEINE P., POFFIJN A., SEFAERT O., UYTENHOVE J., *On the Rn- 222 and Ra-226 concentrations in water from the Pletrou*. Ann. Belg. Ver. Stralingsbescherm 7, 5-16, 1982.
- [52] SALONEN L., *Natural radionuclides in groundwaters in Finland*. Radiat. Prot. Dosim., 1988.
- [53] TODOROVIC N., NIKOLOV J., FORKAPIC S., BIKIT I., MRDJA D., KRMAR M., VESKOVIC M., *Public exposure to radon in drinking water in SERBIA*. Appl. Radiat. Isot. 70, 543 – 549, 2012.
- [54] NIKOLOPOULOS D., LOUZI A., *Study of indoor radon and radon in drinking water in Greece and Cyprus: implications to exposure and dose*, Radiat. Meas. 43, 1305 – 1314, 2008.
- [55] WALLNER G., STEININGER G., *Radium isotopes and  $^{222}\text{Rn}$  in Austrian drinking waters*. J. Radioanal. Nucl. Chem. 274, 511 – 516, 2007.

- [56] BEYERMANN M., BÜNGER T., SCHMIDT K., OBRIKAT D., *Occurrence of natural radioactivity in public water supplies in Germany:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  and gross alpha activity*. Radiat. Prot. Dosim. 141, 72 – 81, 2010.
- [57] LOPES I., MADRUGA M., CARVALHO F., *Application of liquid scintillation counting techniques to gross alpha, gross beta, radon and radium measurement in Portuguese waters*. In: IAEA-TECDOC-1472, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM IV), Proceedings of an International Conference Held in Szczyrk. IAEA, Vienna, Poland, pp. 357 – 367, 2005.
- [58] HENSHAW, D, PERRYMAN J., KEITCH P., ALLEN J., CAMPLIN C., *Radon in domestic water supplies in the UK*. Radiat. Prot. Dosim. 46, 285 – 289, 1993.
- [59] PRZYLIBSKI T., GORECKA J., KULA A., FIJAŁKOWSKA-LICHWA L., ZAGOZDZON K., ZAGOZDZON P., MISTA W., NOWAKOWSKI R.,  *$^{222}\text{Rn}$  and  $^{226}\text{Ra}$  activity concentrations in groundwaters of southern Poland: new data and selected genetic relations*, J. Radioanal. Nucl. Chem. 301, 757 – 764, 2014.
- [60] TRAUTMANNSSHEIMER M., SCHINDLMEIER W., HÜBEL K., *Radon exposure levels of the staff in the drinking water supply facilities in Bavaria*. Ger. Int. Congr. Ser. 1225, 81 – 86, 2002.
- [61] GIBBONS D., KALIN R., *A survey of Radon-222 in ground water from the Sherwood sandstone aquifer: belfast and Newtownards, Northern Ireland*. Groundw. Monit. Remediat. 17, 88 – 92, 1997.
- [62] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia.htm>, revisado el 02-04-17.
- [63] <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U238.png>, revisado el 10-03-17.
- [64] <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/Th232.png>, revisado el 10-03-17.

- [65] <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U235.png>, revisado el 10-03-17.
- [66] <https://www.google.com.mx/maps/place/Cd.+Universitaria,+Ciudad+de+M%C3%A9xico,+CDMX/@19.3216675,-99.1939132,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x85ce000920979a1b:0x7c9f3c0207ba804d!8m2!3d19.3188895!4d-99.1843676>, revisado el 10-03-17.