



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS "FRANCISCO GARCÍA SALINAS"

**EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA LA SALUD ASOCIADO AL
CONTENIDO DE RADÓN-222 EN AGUA POTABLE EN EL
MUNICIPIO DE ZACATECAS, ZAC., MÉXICO.**

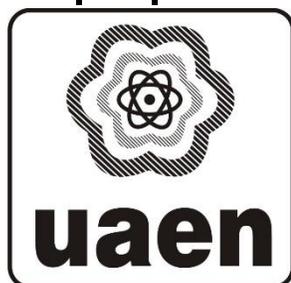
T E S I S

**Presentada en la Unidad Académica de Estudios Nucleares
en cumplimiento de los requisitos para obtener el grado de**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS NUCLEARES
Opción terminal Técnicas Analíticas Nucleares**

**PRESENTA:
QFB CÉSAR ALBERTO ARÉVALO BELTRÁN**

**DIRECCIÓN Y ASESORIA
Dr. J. IGNACIO DÁVILA RANGEL
M. en C. HUGO LÓPEZ DEL RIO**



Diciembre 2016

Propiedad intelectual de César Alberto Arévalo Beltrán y la

Unidad Académica de Estudios Nucleares,

2016 todos los **derechos reservados**

cesar_arevalob@outlook.com

idavilara@gmail.com

hlopezdelrio@hotmail.com

Esta tesis es propiedad conjunta del autor y la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas. No podrá ser publicada en parte o en su totalidad sin el consentimiento por escrito del autor y la Unidad Académica de Estudios Nucleares. La tesis deberá ser citada debidamente cuando sean utilizados los resultados para cualquier propósito.

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
Lista de tablas	3
Lista de figuras	4
Introducción	5
Planteamiento del problema	7
Justificación	7
Objetivo general	8
Objetivos particulares	8
Capítulo I	9
Marco teórico	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Radiactividad	12
1.2.1 Estructura atómica y nuclear	13
1.2.2 Decaimiento α	17
1.2.3 Decaimiento β	19
1.2.3.1 Decaimiento β^-	19
1.2.3.2 Decaimiento β^+	19
1.2.3.3 Captura electrónica	20
1.2.4 Decaimiento γ	20
1.2.5 Tasa de decaimiento radiactivo	21

1.2.6	Equilibrio radiactivo	22
1.2.6.1	Equilibrio secular	23
1.2.6.2	Equilibrio transitorio	23
1.2.6.3	Decaimiento sucesivo	23
1.3	Radón	24
1.3.1	Decaimiento del ^{222}Rn y sus descendientes.	27
1.3.2	Emanación y migración del ^{222}Rn	31
1.4	Medición del ^{222}Rn en una matriz acuosa	33
1.4.1	Detección por centelleo líquido	34
1.5	Efectos biológicos de la radiación	37
1.5.1	Respuesta a nivel celular	38
1.6	Dosimetría y riesgo asociado al ^{222}Rn	42
1.6.1	Dosis absorbida	43
1.6.2	Dosis de radiación equivalente	44
1.6.3	Dosis absorbida por un órgano o tejido	44
1.6.4	Riesgo asociado a la ingesta de ^{222}Rn	45
1.6.5	Riesgo asociado a la inhalación de ^{222}Rn	46
	Capítulo 2	49
	Materiales y métodos	49
2.1	Materiales	49
2.1.1	Equipo de centelleo	49
2.1.2	Líquido de centelleo	50
2.1.3	Aceite mineral	50
2.1.4	Vial	51

2.2 Metodología	51
2.2.1 Zona de muestreo	51
2.2.2 Toma de muestras y procesamiento	52
2.2.3 Análisis del resultado del conteo	53
Capítulo 3	57
Resultados y discusión	57
3.1 Actividad mínima detectable	57
3.2 Actividad de ^{222}Rn en agua potable	58
3.3 Dosis por ingestión y riesgo asociado	67
3.4 Dosis por inhalación y riesgo asociado	70
Capitulo 4 conclusiones	74
Referencias	76

DEDICATORIA

A mi padre †

Gracias por todo tu apoyo, ya que sin él no hubiera conseguido esto, espero que estés donde estés te sientas orgulloso, aunque ya no estés siempre permaneces en mi corazón.

A mi madre

Por todo el cariño que me has demostrado, por el apoyo incondicional, por darme la vida, gracias por todo lo que me has dado, te quiero mucho.

A Jessica

Gracias por tu paciencia, comprensión, cariño y amor que más has ofrecido, no hay hombre más afortunado que yo por tenerte a mi lado.

A mi Hija

Especialmente a ti Isis, dedico esto, eres mi fuerza, mi motivación, mi alegría y mi esperanza, espero motivarte y guiarte por un buen camino, siempre esfuérate y estudia mucho, siempre tendrás mi apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas esas personas que han estado conmigo en todo momento, por su apoyo, su amistad y cariño siempre lo tendré presente. Gracias a toda mi familia que son pilar más fuerte que tengo. A esos amigos que me dan la mano sin importar la situación, gracias por ser parte de mí.

Un agradecimiento especial a la Universidad Autónoma de Zacatecas, por darme la oportunidad de estudiar en sus aulas.

El apoyo brindado, la paciencia y el conocimiento transmitido, por parte de los maestros de la UAEN, es muy apreciado por mí y toda mi gratitud es para ellos, en especial para mis asesores, Dr. J. Ignacio Dávila Rangel y M en C. Hugo López del Río, por guiarme a lo largo de este trabajo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyarme con la beca para terminar mis estudios de maestría.

RESUMEN

El gas radiactivo ^{222}Rn , producto de la serie de decaimiento del ^{238}U , es considerado como una de las fuentes naturales más importantes de radiación. Aporta casi el 50% de la dosis de radiación que una persona recibirá a lo largo de su vida. La exposición a la radiación ionizante que el ^{222}Rn y su descendencia emiten, es considerada un grave problema de salud debido a que la interacción de las partículas alfa de su decaimiento con las células del cuerpo humano puede dañar la molécula de ADN (Ácido Desoxirribonucleico) induciendo la posible aparición de cáncer. Los objetivos de este trabajo fueron cuantificar la actividad de ^{222}Rn en agua destinada para uso y consumo en el municipio de Zacatecas., Zac., y estimar la cantidad de ^{222}Rn que se transfiere al aire interior de una casa por el uso del agua, además de calcular las dosis de radiación al estómago por ingestión de ^{222}Rn disuelto en el agua y la dosis al pulmón por inhalación de ^{222}Rn cuando este se transfiere del agua al aire.

Usando la espectrometría de centelleo líquido, y la extracción de radón del agua, se analizaron 14 muestras de agua potable del suministro público, tomadas del grifo principal de viviendas ubicadas en distintas colonias. La concentración promedio de ^{222}Rn en agua y en aire que se obtuvo fue 2.090 Bq/L y 0.209 Bq/m³ respectivamente. Ambas concentraciones están por debajo del límite máximo permisible que recomienda la USEPA (Environmental Protection Agency of the United States) 11 Bq/l para agua y 148 Bq/m³ para aire.

Las dosis efectivas anuales, en promedio, que reciben tanto el estómago como el pulmón, son 6.07 mSv/a y 1.463 µSv/a respectivamente. En ningún caso se rebasan los 50 mSv/a, que es la dosis máxima permisible recomendada por la ICPR (International Comitee of Radiation Protection), para órganos.

ABSTRACT

The ^{222}Rn radioactive gas, a product of the ^{238}U decay series, is considered to be one of the most important natural sources of radiation. It contributes almost 50% of the radiation dose that a person will receive throughout his life. The exposure to ionizing radiation that ^{222}Rn and its offspring emit is considered a serious health problem because the interaction of alpha particles from their decay with the cells of the human body can damage the DNA molecule (deoxyribonucleic acid) by inducing the possible appearance of cancer.

The objectives of this investigation were to quantify the activity of ^{222}Rn in water intended for use and consumption in the municipality of Zacatecas., Zac, México., and to estimate the amount of ^{222}Rn that is transferred to the interior air of a house by the use of water, in addition of calculating doses of radiation to the stomach by ingestion of ^{222}Rn dissolved in water and the dose to the lung by inhalation of ^{222}Rn when it is transferred from water to air.

Using liquid scintillation spectrometry and radon extraction from the water, 14 samples of potable water from the public supply, taken from the main tap of dwellings located in different colonies, were analyzed.

The average concentration of ^{222}Rn in water and air that was obtained was 2090 Bq/L and 0.209 Bq/m³ respectively. Both concentrations are below the maximum allowable limit recommended by the USEPA (Environmental Protection Agency of the United States) 11 Bq/L for water and 148 Bq/m³ for air.

The annual effective doses, on average, that receive both the stomach and the lung, are 6.07 mSv/y and 1.463 $\mu\text{Sv/y}$ respectively. In no case exceeds the maximum allowable dose recommended by the ICPR, for organs 50 mSv/y.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Principales características del ^{222}Rn y su descendencia	29
Tabla 2 Ubicación de los puntos de muestreo.	52
Tabla 3 Factor de corrección por tiempo para cada una de las muestras	55
Tabla 4 Actividad mínima detectable de cada una de las muestras	58
Tabla 5 Concentración en actividad de ^{222}Rn en Bq/L de cada muestra	59
Tabla 6 Comparación de las concentraciones de ^{222}Rn en agua obtenidas en este trabajo y las reportadas por otros investigadores.	67
Tabla 7 Dosis absorbida y equivalente anuales debido a la ingesta de ^{222}Rn en agua	69
Tabla 8 Riesgo de desarrollar cáncer de estómago por ingesta de ^{222}Rn en agua	70
Tabla 9 Concentración de ^{222}Rn que se transfiere al aire y dosis equivalente anual por inhalación	71
Tabla 10 Riesgo de desarrollar cáncer de pulmón por inhalación	73
Tabla 11 Comparación del Life Time Risk de este trabajo y el de otros investigadores	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fuentes naturales de exposición a la radiación de la población mundial	10
Figura 2 Esquema de decaimiento del Ra-226	18
Figura 3 Solubilidad de los gases nobles en agua.	26
Figura 4 Cadena de decaimiento del U-238	26
Figura 5 Subserie de decaimiento del Rn-222	28
Figura 6 Diagrama esquemático que muestra el proceso de emanación del radón	32
Figura 7 Multiplicación de electrones en un tubo fotomultiplicador.	35
Figura 8 Consecuencias de la interacción de la radiación con las células.	42
Figura 9 Espectro alfa obtenido de la muestra 1	60
Figura 10 Espectro alfa obtenido de la muestra 2	60
Figura 11 Espectro alfa obtenido de la muestra 3	61
Figura 12 Espectro alfa obtenido de la muestra 4	61
Figura 13 Espectro alfa obtenido de la muestra 5	62
Figura 14 Espectro alfa obtenido de la muestra	62
Figura 15 Espectro alfa obtenido de la muestra 7	63
Figura 16 Espectro obtenido de la muestra 8	63
Figura 17 Espectro alfa obtenido de la muestra 9	64
Figura 18 Espectro alfa obtenido de la muestra 10	64
Figura 19 Espectro alfa obtenido de la muestra 11	65
Figura 20 Espectro alfa obtenido de la muestra 12	65
Figura 21 Espectro alfa obtenido de la muestra 13	66
Figura 22 Espectro alfa obtenido de la muestra 14	66

INTRODUCCIÓN

El ser humano ha estado expuesto a la radiación ionizante desde el mismo instante en que apareció en la tierra, ya que algunos de los átomos que constituyen la materia tienden a sufrir transformaciones liberando energía, si esta energía es depositada, por ejemplo, en un tejido vivo, genera ionización de las moléculas que lo constituyen. Estas transformaciones son un fenómeno físico natural llamado radiactividad. El daño biológico ocasionado por la radiactividad está relacionado con la cantidad de energía depositada, los posibles efectos a la salud dependen del tipo de radiación que interactúe con la materia viva y de la radio sensibilidad de esta (González, 2011).

La principal fuente de radiación es de origen natural, los rayos cósmicos que llegan a la tierra y la tierra misma es radiactiva, ya que la mayor parte de la corteza terrestre contiene elementos o núcleos radiactivos, (radionúclidos), el uranio es uno de estos radionúclidos. El ^{238}U es el progenitor de una larga familia de radionúclidos de diversos elementos, los cuales decaen en sucesión hasta llegar al núcleo estable de ^{206}Pb . Entre estos productos de decaimiento se encuentra un isótopo radiactivo del gas radón, el ^{222}Rn , el cual se forma en el subsuelo y por emanación y exhalación por las grietas rocosas o los poros, asciende a la superficie y hacia el medio ambiente.

Dentro de las fuentes naturales de radiación, el ^{222}Rn es una de las más importantes, ya que es responsable del 50%, aproximadamente, de la dosis media debida a fuentes de radiación natural. El ^{222}Rn y sus productos de decaimiento de vida corta son considerados un grave problema de salud, ya que provocan un gran número de muertes por cáncer de pulmón, por la interacción de las partículas alfa que emiten con las células de este órgano vital. Una sola partícula alfa puede causar daños genéticos significativos en una

célula, la posibilidad de daños al ADN asociado al radón se da con cualquier nivel de exposición según la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2015).

El agua subterránea, es el agua existente bajo la superficie terrestre y que se concentra en un acuífero. Un acuífero es una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos, que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir ya sea el flujo significativo o la extracción en cantidades significativas de aguas subterráneas, para el abastecimiento de agua potable usada por la población de grandes ciudades (López Gueta y otros, 2009), como es el caso de los habitantes del municipio de Zacatecas, Zac.

Por lo general las capas de roca de los acuíferos contienen ^{238}U , el cual es una fuente continua de ^{222}Rn que migra de la roca y se disuelve en el agua. Una vez en el agua del acuífero, el ^{222}Rn , es transportado mecánicamente por bombeo para el suministro de agua y se integra a la red pública de agua potable que abastece a la población, de esta manera el ^{222}Rn llega a los hogares de las personas, donde el uso directo (consumo) o indirecto (aseo) del agua, representa una forma de exposición al ^{222}Rn y sus productos de decaimiento.

El riesgo asociado a la presencia de radón en aguas de consumo procedentes de aguas subterráneas suele ser bajo comparado con el correspondiente al del radón inhalado, pero es un riesgo diferenciado de este, puesto que la exposición se produce por el consumo del gas disuelto y por la inhalación del ^{222}Rn liberado. Aun así cualquier forma de exposición a la radiación, por mínima que sea, o en dosis bajas puede aumentar la incidencia de cáncer a largo plazo. En los sistemas públicos de abastecimiento de agua, procedente de fuentes subterráneas, la concentración media de ^{222}Rn suele ser de 20 Bq/L, sin embargo, en pozos en varias partes del mundo se han encontrado concentraciones que van de los 400 a los 10 000 Bq/L (World Health Organization, 2011).

Planteamiento del problema

La serie radiactiva natural del ^{238}U , el cual está presente prácticamente en toda la corteza terrestre, da origen como producto de decaimiento al ^{226}Ra quien a su vez decae directamente por emisión de partículas alfa a ^{222}Rn que es un gas radiactivo con un tiempo de vida media de 3.823 días, este estado físico del ^{222}Rn le permite migrar considerables distancias a través del suelo e incorporarse al aire mediante un proceso de exhalación. Una de sus principales características es su propiedad de disolución en el agua por lo que está presente en contenidos importantes sobre todo en aguas subterráneas que son la principal fuente de abastecimiento para la población en todo el mundo, lo que está asociado a un riesgo de exposición interna por ingestión del agua del suministro público y posible daño al organismo por la interacción de las partículas alfa de su propio decaimiento y de la radiación emitida por sus descendientes con las células del cuerpo humano, derivando en daños en órganos y/o tejidos.

Justificación

De este trabajo de investigación se obtendrá información referente a las concentraciones de ^{222}Rn presente en el agua potable de consumo en el municipio de Zacatecas y zona conurbada con ello se podrán establecer los factores de riesgo a la salud humana, conocer la dosis interna debida al ^{222}Rn y sus descendientes y en caso de que las dosis sean superiores a los límites establecidos por organismos reguladores en el mundo, proponer medidas de prevención y control para disminuir hasta donde sea posible los riesgos de daños a la salud humana.

Objetivo general

Obtener información referente a las concentraciones de ^{222}Rn presente en el agua potable de consumo en el municipio de Zacatecas, conocer la dosis interna debida al ^{222}Rn y sus descendientes y establecer los factores de riesgo a la salud humana.

Objetivos particulares

Cuantificar la concentración de ^{222}Rn en muestras de agua potable en el municipio de Zacatecas, México, mediante la medición de la radiactividad alfa por análisis de centelleo líquido.

Determinar la cantidad de radón que se transfiere al aire interior de una casa por el uso del agua del suministro público.

Estimar las dosis efectivas anuales que reciben tanto el estómago como el pulmón, por ingestión e inhalación respectivamente, y determinar la posibilidad de desarrollar cáncer por exposición a estas concentraciones.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, fue necesario aplicar el conocimiento relativo al fenómeno de la radiactividad y su interacción con la materia, comprender a detalle cómo es que se forma el radionúclido ^{222}Rn , y cómo es que este da lugar a la formación de otros radionúclidos los cuales son conocidos como descendencia o radionúclidos hijos del ^{222}Rn . Así como también la forma por la cual estos radionúclidos llegan hasta las fuentes de agua potable. Debido a esto, se presentan de forma general, los conceptos fundamentales para el mejor entendimiento del decaimiento radiactivo involucrado antes y después de la formación del ^{222}Rn , y de la migración que tiene lugar para que pueda llegar hasta el agua de consumo.

1.1 Antecedentes

A nivel mundial la radiación proveniente del radón representa un grave problema de salud ya que se estima que casi el 50% de la radiación que el ser humano recibe a lo largo de toda su vida se debe a este radionúclido, figura 1, (González, 2011). Los medios principales por los cuales el radón ingresa al cuerpo son el aire y el agua, razón por la cual se han realizado diversos estudios para determinar las concentraciones de ^{222}Rn en estas matrices.

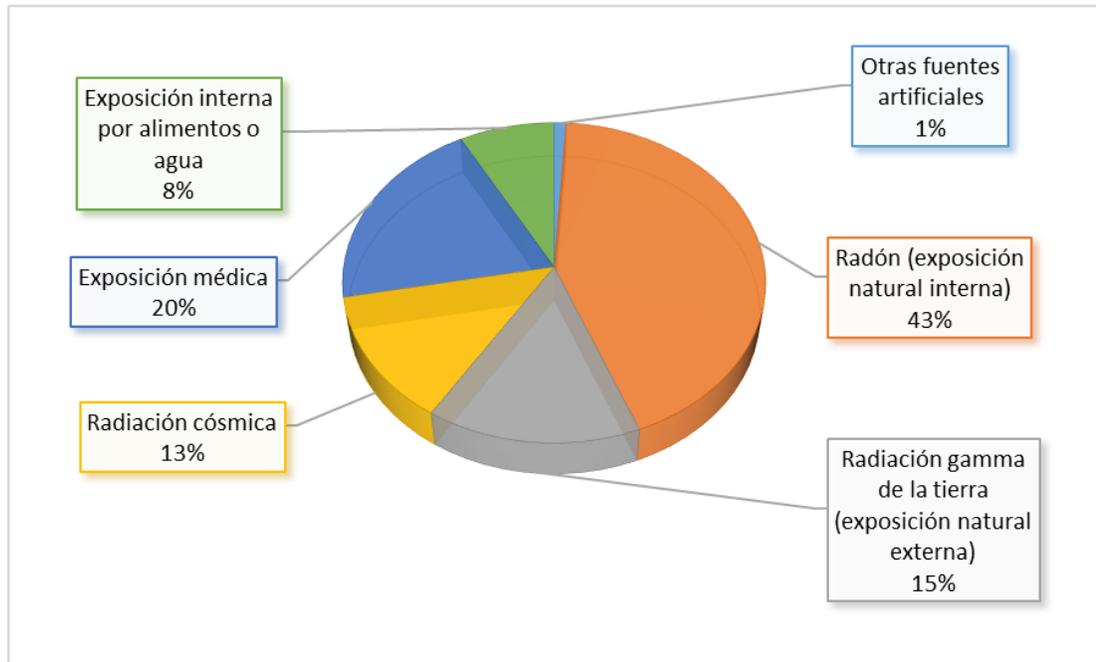


Figura 1 Fuentes naturales de exposición a la radiación de la población mundial

En el sureste de Korea las concentraciones de ^{222}Rn medidas por Cho y otros, (2004) van de los 0 a los 300 Bq/L, las cuales fueron encontradas en muestras de aguas subterráneas destinadas para el consumo humano.

Santiago H., (2004) realizó un estudio comparativo de las concentraciones de ^{222}Rn que hay en aguas termales y las que hay en agua potable en el estado de Falcón Venezuela usando el método de centelleo, donde reportaron un rango de concentraciones de ^{222}Rn para el agua potable de 1.4 a 5.2 Bq/L y el rango encontrado en las aguas termales fue de 24 a 186 Bq/L. Atribuyendo los amplios rangos a el tiempo de acumulación, difusión y desintegración del ^{222}Rn .

En Chihuahua, México, Villalba y otros, (2005) reportaron concentraciones de ^{222}Rn en 114 muestras de agua potable y subterránea que van de los 0.99 a los 29.18 Bq/L, algunas de ellas excediendo el límite recomendado por la USEPA de 11.1 Bq/L.

Ali Yalim y otros, (2007) estudiaron muestras de agua de pozos en Afyon, Turquía, encontrando rangos de radiactividad desde 2.2 a 22.7 Bq/L procedente del ^{222}Rn , reportaron también un rango de dosis efectiva anual debida al consumo de agua de esos pozos de 13.2 a 136.2 $\mu\text{Sv/año}$.

Muestras de agua provenientes de aguas superficiales, de pozo y de manantiales de Transilvania en Rumania, fueron analizadas por Cosma, Moldovan, Dicu, y Kovacs, (2008), midieron la concentración de ^{222}Rn por el método de la celda de Lucas encontrando concentraciones que van desde los 0.5 Bq/L a 129.3 Bq/L, aclarando que las concentraciones más bajas se encontraron en las aguas superficiales y las más altas en el agua de manantial.

Usando el método de centelleo líquido para determinar la concentración de ^{222}Rn en muestras de agua de pozos y de manantiales en Extremadura, España, Galán López y Martín Sánchez, (2008) encontraron rangos que van desde los 0.24 a los 1168 Bq/L con un promedio de 111 Bq/L, sobrepasando en algunas muestras el límite de 100 Bq/L recomendado por la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM).

Somashekar y Ravihumar, (2010) midieron la actividad del ^{222}Rn en las cuencas hidrográficas de Varahi y Markandeya en el estado de Karnataka, India. El rango de radiactividad de la primer cuenca es de 0.2 a 10.1 Bq/L con un promedio de 2.07 Bq/L, las cuales están por debajo del nivel máximo según la USEPA, de 11.1 Bq/L, mientras que algunas de las muestras de la cuenca de Markadenya sobrepasan este nivel ya que el rango de radiactividad en ellas es de 1.66 a 27.3 Bq/L.

En Zacatecas, México Favila Reyna, (2010) determinó la concentración de ^{222}Rn en aguas termales del estado encontrando rangos de 3.889 a 32.567 Bq/L, reportando también dosis efectivas por consumo de estas aguas que van de 9.9 a 83.2 $\mu\text{Sv/año}$.

Khattak, Khan, y Shah, (2011) reportaron rangos de radiactividad debida al ^{222}Rn de 1.6 a 18.6 Bq/L, con un promedio de 8.8 Bq/L en muestras de agua potable del campus de la Universidad de Peshawar de Pakistán, haciendo evidente que algunas muestras sobrepasan el nivel máximo de contaminantes recomendado por la USEPA de 11.1 Bq/L.

Yalcin y otros, (2011) en muestras de agua tomada directamente del grifo y muestras de agua de albercas en Kastamonu, Turquía. Reportaron concentraciones de ^{222}Rn en un rango desde 0.36 Bq/L. hasta 9.29 Bq/L.

En 2011 Todorovic y otros, analizaron muestras de agua potable en Serbia, en una comunidad cuya fuente de agua está directamente relacionada con rocas de origen volcánico. Encontrando una concentración de 1463 Bq/L de ^{222}Rn , excediendo por mucho el límite recomendado por la EURATOM de 100 Bq/L.

1.2 Radiactividad

La radiactividad es un fenómeno físico en el cual el núcleo de un elemento químico (radionúclido) emite radiación. La emisión de radiación no es otra cosa que la liberación de energía por un radionúclido cuando se mueve de un estado energético a otro. Hoy en día la radiación hace referencia a la totalidad del espectro electromagnético así como a todas las partículas atómicas y subatómicas que se han descubierto (electrones, positrones, protones, alfas, neutrones, iones pesados y mesones). La radiación se divide en dos grupos: radiación ionizante y radiación no ionizante, la radiación no ionizante es radiación electromagnética con una longitud de onda λ de alrededor de 10 nm, la parte del espectro que comprende son las ondas de radio, microondas, luz visible y luz ultravioleta. Por otro lado la radiación ionizante, llamada así por su capacidad de ionizar un átomo o una molécula cuando atraviesa un medio,

comprende la parte restante del espectro (rayos X y rayos γ) así como todas las partículas ya mencionadas.

Poco más de un siglo ha pasado desde el descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel en 1896. Desde aquel tiempo los conceptos de la estructura básica de la materia han cambiado dramáticamente. El fenómeno de la radiactividad ha tenido un gran impacto en la vida diaria debido a sus usos tanto constructivos como destructivos. La última parte del siglo 19 y la primera parte del siglo 20 se obtuvieron los mayores avances en los campos de la química y la física que permitieron entender la estructura atómica, durante este periodo la visión de la estructura de la materia fue revolucionada completamente. (Ehmann y Vance, 1993; Tsoulfanidis y Landsberger 2011).

1.2.1 Estructura atómica y nuclear

El átomo: a través del tiempo varios modelos atómicos han sido propuestos para describir sus propiedades, entre ellos los desarrollados por JJ. Thomson, Rutherford, Bohr. Lo que hoy en día es bien sabido, gracias a estos modelos, es que cada átomo consiste de un núcleo central con carga positiva alrededor del cual giran electrones de carga negativa en órbitas estables, el número de electrones es igual al número de cargas positivas en el núcleo, debido a esto el átomo es eléctricamente neutro.

La evidencia experimental disponible sugiere los siguientes postulados con respecto al movimiento de los electrones del átomo (Tsoulfanidis y Landsberger 2011):

1. El electrón gira alrededor del núcleo en una órbita estable sin emitir radiación. Cada órbita corresponde a cierto nivel de energía, llamado nivel energético o estado energético.

2. Solo son permitidas orbitas determinadas, es decir, los estados de energía de los electrones ligados forman un espectro discreto, (la energía del electrón esta cuantizada y solo puede tener ciertos valores).
3. Cuando un electrón salta de un estado de mayor energía E_2 a un estado de menor energía E_1 , se emite radiación electromagnética (rayos X) con frecuencia $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, donde h es la constante de Plank.

Núcleo: experimentalmente se ha demostrado que el núcleo está conformado por A partículas:

$$A = N + Z \quad (1)$$

Donde, A es el número másico, N el número de neutrones y Z es el número de protones y también el número atómico del elemento.

Así pues el núcleo está compuesto de protones y neutrones que reciben el nombre de nucleones. Una especie atómica con valores específicos de Z y A se le conoce como un núclido y se simboliza como A_ZX , donde X es el símbolo químico del elemento. El radio del núcleo se puede estimar mediante la expresión

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (2)$$

Donde, R_0 es una constante cuyo valor se ha determinado experimentalmente tomando un valor de 1.3×10^{-15} cm alrededor de 1.3 fermis (1 fermi = 1 femtómetro = 1 fm = 10^{-13} cm) (Arya, 1966).

Las estructuras del núcleo (nucleones) permanecen unidas gracias a la interacción de la llamada fuerza fuerte o fuerza nuclear, de una gran intensidad pero de poco alcance. El rango de la fuerza nuclear es del orden de los 10^{-15} m pero es tan poderosa que contrarresta la repulsión coulombiana de los protones en el núcleo (Turner 2007).

La diferenciación entre el número másico, la masa nuclear o isotópica y la masa atómica es algo que debe tenerse en cuenta. El número másico A es casi siempre un número entero ya que simplemente es la suma de protones y neutrones en el núcleo (Tsoulfanidis y Landsberger 2011). La masa atómica o peso atómico se refiere a la media ponderada de las masas de todos los isótopos naturales de un mismo elemento. Por último la masa nuclear es la masa de un núclido dado o isótopo de un átomo, la unidad usada para medir esta masa es la unidad de masa atómica unificada (uma), (Ehmann y Vance 1993) que es igual a $1/12$ de la masa del isótopo del ^{12}C :

$$1\text{uma} = \frac{1}{12} \text{ de la masa del } ^{12}_6\text{C} = 1.660540 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (3)$$

Así pues la masa de un núcleo con número másico A y número atómico Z , representada como $M_N(A,Z)$, puede escribirse de la siguiente forma:

$$M_N(A, Z) = ZM_p + NM_n - \frac{B(A, Z)}{c^2} \quad (4)$$

donde M_p = masa del protón

M_n = masa del neutrón

$B(A,Z)$ = energía de amarre nuclear

c^2 = velocidad de la luz en el vacío (de la relación $E = mc^2$)

El término masa en exceso o defecto de masa, simbolizado como Δ , es igual a la diferencia entre la masa del núcleo y el número másico:

$$\Delta = M_N - A \quad (5)$$

El valor de masa en exceso para todos los núclidos está dado en tablas, usualmente en su equivalente en energía. La equivalencia entre masa y energía está dada por la relación de Einstein, $E=mc^2$, donde c es la velocidad de la luz que equivale a aproximadamente 3×10^8 m/s. La unidad de energía

que comúnmente se usa para medir las energías involucradas en la emisión de radiación, es el electronvolt (eV), el KeV (10^3 eV) y el MeV (10^6 eV). (Ehmann & Vance, 1993; Turner, 2007) Un electronvolt es la energía que adquiere un electrón de carga q (1.6×10^{-19} coulombs) cuando es acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 volt. La relación entre electronvolt y Jouls ($\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$) es la siguiente:

$$1 \text{ eV} = 1.0219 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (6)$$

$$1 \text{ MeV} = 1.0219 \times 10^{-13} \text{ J} \quad (7)$$

Se deduce entonces que 1 uma equivale a una energía de:

$$\begin{aligned} E(1 \text{ uma}) &= Mc^2 = (1.660540 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} \times \frac{1 \text{ MeV}}{1.60219 \times 10^{-10} \text{ J}} = 931.49 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (8)$$

Como ya se dijo los radionúclidos tienden a liberar de forma espontánea energía ya sea en forma de partículas subatómicas o como fotones, esta liberación de energía trae consigo una transformación o transmutación del núcleo. En cada transmutación el radionúclido padre da lugar a un radionúclido hijo y así sucesivamente hasta llegar a un núcleo estable, lo que se conoce como decaimiento radiactivo. Todos los elementos con $Z > 83$ son radiactivos, por ejemplo el uranio y el torio dan lugar a una serie de radionúclidos hijos que en conjunto reciben el nombre de cadenas de decaimiento, las cuales terminan en isótopos estables del plomo o bismuto. En las transmutaciones nucleares hay varias propiedades que siempre se conservan como la carga eléctrica, el número de nucleones, la masa/energía y el momentum (Kenneth Shultis y E. Faw, 2002; Turner, 2007). Los diferentes tipos de transmutaciones o decaimientos radiactivos se describen a continuación.

1.2.2 Decaimiento α

En el decaimiento alfa, el núcleo emite una partícula alfa con cierta energía cinética formada por dos protones y dos neutrones, que no es otra cosa más que el núcleo del átomo del ${}^4\text{He}$. La partícula alfa pierde rápidamente su energía cinética conforme atraviesa un medio por ionización y excitación de los átomos presentes en ese medio, hasta que adquiere 2 electrones orbitales y se convierte en un átomo neutro de ${}^4\text{He}$. Esta emisión resulta en la disminución del número másico A en 4 unidades y de 2 unidades en el número atómico Z. La ecuación general del decaimiento alfa puede ejemplificarse mediante la siguiente expresión que muestra el decaimiento alfa del ${}^{226}\text{Ra}$:



La energía liberada como resultado de la emisión de la partícula, alfa es llamada energía decaimiento Q_α y está definida por:

$$Q_\alpha = (\text{masa del núcleo padre}) - (\text{masa de los productos de decaimiento})$$

$$Q_\alpha = M_{\text{Ra}} - M_{\text{Rn}} - M_{\text{He}} \quad (10)$$

Donde M_{Ra} , M_{Rn} y M_{He} son las masas del núcleo padre, masa del núcleo hijo y la masa de la partícula alfa respectivamente. Sustituyendo las masas de los componentes se obtiene una energía de decaimiento Q_α de 4.88 MeV.

La energía de desintegración Q_α se reparte entre la partícula alfa y el núcleo hijo, es decir la partícula alfa es expulsada con cierta energía cinética E_α , y el átomo hijo experimenta una fuerza en dirección contraria a la partícula, energía de reculado E_r . Por la conservación de la energía y momentum, se obtienen ambas energías:

$$E_\alpha = \frac{M_h Q}{M_\alpha + M_h} \quad (11)$$

$$E_r = \frac{M_\alpha Q}{M_\alpha + M_h} \quad (12)$$

En el caso del decaimiento del Ra la partícula alfa sale expulsada con una energía aproximada de 4.79 MeV, mientras que el átomo de Rn recula con una energía de solo 0.09 MeV.

Con frecuencia subsecuente al decaimiento alfa, el núcleo puede quedar en un estado excitado dando lugar a la emisión de rayos gamma. Para el decaimiento del ^{226}Ra , basándonos en su esquema de decaimiento, figura 2, se puede ver que tiene dos energías para la partícula alfa: la primera de 4.785 MeV que se da en un 94.4% de las veces y la segunda de 4.602 MeV que ocurre en un 5.5 %. Cuando se expulsa la partícula de 4.602 MeV el átomo de ^{226}Ra queda en un estado excitado que regresa al estado base mediante la emisión de un fotón energético, cuya energía varia en el rango de unos pocos keV hasta varios MeV, en este caso el fotón emitido tiene una energía de 0.186 MeV, figura 2.

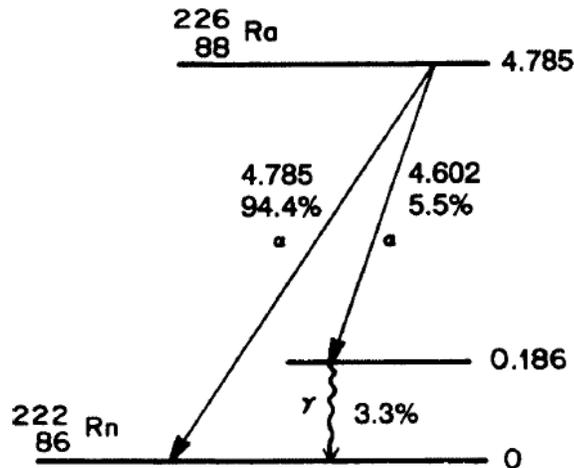


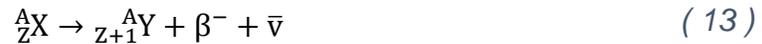
Figura 2 Esquema de decaimiento del Ra-226

1.2.3 Decaimiento β

El decaimiento β da como resultado un cambio en el número atómico Z para estabilizar el núcleo, mediante 3 formas la emisión de un negatrón β^- , la emisión de un positrón β^+ o la captura electrónica.

1.2.3.1 Decaimiento β^-

Muchos radionúclidos ricos en neutrones decaen cambiando un neutrón por un protón, lo que hace que el número atómico Z aumente en una unidad y la subsecuente emisión de un electrón energético negativo o negatrón, está representada por la siguiente ecuación:



donde $\bar{\nu}$ es un antineutrino, una partícula sin carga y con nula o muy poca masa.

La energía del decaimiento β^- Q_{β^-} es:

$$Q_{\beta^-} = M_p - M_h \quad (14)$$

La energía de decaimiento Q_{β^-} , también se reparte entre en el núcleo hijo y el negatrón, por lo tanto la energía máxima de la partícula β^- ocurre cuando el antineutrino obtiene energía despreciable, y dado que la masa del negatrón es mucho menor que la del núcleo hijo, la energía máxima del negatrón es aproximadamente igual a Q_{β^-} .

1.2.3.2 Decaimiento β^+

En este proceso los núcleos que tiene protones en exceso se estabilizan cambiando uno de ellos por un neutrón y emitiendo un positrón β^+ y un neutrino,

lo que hace que el número atómico Z disminuya en una unidad, la expresión que representa este decaimiento es:



La energía de decaimiento Q_{β^+} es:

(16)

$$Q_{\beta^+} = M_p - M_h - 2m_e$$

1.2.3.3 *Captura electrónica*

Cuando el proceso de emisión de un positrón no puede llevarse a cabo, el núcleo captura un electrón de las capas orbitales K o L , para que uno de los protones en exceso se convierta en un neutrón para poder estabilizarse. Dejando al núclido hijo en un estado excitado. En núcleo hijo se estabiliza mediante la eyección de un neutrino y la emisión de rayos X característicos por el reacomodo electrónico en los orbitales, la ecuación general es la siguiente:



En los procesos del decaimiento beta que dejan al núcleo en un estado excitado, la estabilización del mismo sigue después de la emisión de rayos gamma.

1.2.4 *Decaimiento γ*

La emisión gamma no es un proceso de decaimiento primario, como ya se dijo esta emisión es producida cuando el núcleo queda en un estado excitado después de haber decaído por emisión de partículas alfa o beta. El núcleo en

estado excitado regresa al estado base mediante la emisión de un fotón gamma, los cuales son altamente penetrantes en la materia causando daños orgánicos graves. El decaimiento gamma se representa como sigue:



1.2.5 Tasa de decaimiento radiactivo

La tasa de decaimiento, es llamada actividad (A), y representa el número de núclidos padres que decaen por unidad de tiempo, a menudo se usa la unidad de desintegraciones por segundo (dps), para este proceso. Hay otras unidades que comúnmente se usan para expresar la actividad, una de ellas es el bequerel (Bq), que es igual a una desintegración por segundo, la otra es el curie (Ci) el cual es definido como exactamente 3.7×10^{10} dps. La ecuación de la actividad se escribe como:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (19)$$

Donde N = número de átomos padres, y t es el tiempo. Dado que la actividad es directamente proporcional al número de átomos padres se tiene que:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (20)$$

Donde λ es la constante de decaimiento.

Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (21)$$

Donde N_0 es el número de átomos originales. Como el número de átomos es proporcional a la actividad:

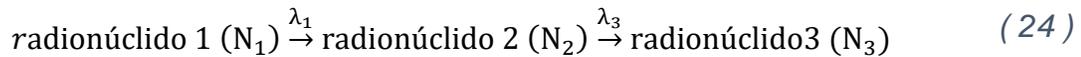
$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (22)$$

El tiempo necesario para que la mitad de átomos en una muestra decaiga es conocido como tiempo de vida media $t_{1/2}$ y se expresa como:

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (23)$$

1.2.6 Equilibrio radiactivo

En el equilibrio radiactivo se analiza la actividad de un radionúclido padre el cual da lugar a un segundo radionúclido hijo, el equilibrio se alcanza cuando la actividad del hijo se estabiliza y decae con la misma tasa de producción que el padre (Arya 1966), la relación general de este proceso puede escribirse como una serie de decaimiento de la siguiente manera:



La producción neta del radionúclido 2 está determinada por dos procesos: el decaimiento del radionúclido 1 y el propio decaimiento del radionúclido 2, esto es:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (25)$$

El número de átomos N_1 está dado por $N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$, donde N_1^0 = número de átomos N_1 al tiempo 0, sustituyendo:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 (N_1^0 e^{-\lambda_1 t}) - \lambda_2 N_2 \quad (26)$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (27)$$

1.2.6.1 *Equilibrio secular*

Si el tiempo de vida media del padre es al menos 10 veces más grande que la del hijo ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) y si no hay cambio en la actividad del padre durante la observación experimental, la condición de equilibrio secular se obtiene (Henia 2011).

Para tiempos de decaimiento muy largos con respecto al tiempo de vida media del hijo, las actividades de padre e hijo se igualarán:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 \quad \text{ó} \quad N_2 \lambda_2 = N_1^0 \lambda_1 \quad (28)$$

1.2.6.2 *Equilibrio transitorio*

Esta condición de equilibrio se produce cuando el tiempo de vida media del padre es aproximadamente de 3 a 10 veces más grande que el tiempo de vida media del hijo ($\lambda_1 < \lambda_2$), después de un tiempo de decaimiento de 3 a 5 veces el tiempo de vida media del hijo el término $e^{-\lambda_2 t}$ se hace tan pequeño que puede ser despreciado:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad (29)$$

1.2.6.3 *Decaimiento sucesivo*

El decaimiento consecutivo hace referencia a una serie de decaimiento en la que el radionúclido N_1 decae a un radionúclido N_2 el cual a su vez decae a un radionúclido N_3 , y así sucesivamente hasta llegar a un radionúclido estable:



La actividad de cualquier miembro de la cadena de decaimiento puede ser calculada mediante la ecuación de Bateman (Ehmann y Vance 1993), descubierta por H. Bateman, si se cumplen 2 condiciones: primero que la única actividad que exista en $t = 0$ sea la del padre y segundo que no existan 2 constantes de decaimiento iguales en la cadena, cumpliéndose esto en número de átomos de cualquier hijo se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3 e^{-\lambda_3 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (31)$$

Donde C_n son constantes:

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0 \quad (32)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0 \quad (33)$$

Para el cálculo de estas constantes: el numerador es el producto de todas las constantes de desintegración excepto de la del radionúclido al que se le está calculando la actividad. En el denominador, la constante de desintegración de interés es restada de todas las demás en la cadena, después los residuos se multiplican.

1.3 Radón

En el año 1900, el científico alemán Friedrich Dorn, descubrió el radio el cual desprendía un gas que fue llamado emanación del radio, después en 1908 William Ramsey y R. W. Witlaw-Gray aislaron este gas para estudiar sus

propiedades físicas, encontrando que era el gas más denso (9.73 g/dm^3) y lo llamaron nitón. En 1920 el nombre Radón, símbolo Rn, fue adoptado para todos los isótopos del elemento con número atómico 86. El radón (Rn) es un elemento químico con 86 protones, pertenece al grupo de los gases nobles, es incoloro, inodoro y es un gas radioactivo. Hay veintisiete isótopos conocidos del radón desde el ^{200}Rn hasta el ^{226}Rn , pero tres de ellos son los más estudiados debido a su abundancia: ^{219}Rn , ^{220}Rn y principalmente el ^{222}Rn , el cual es el objeto de esta investigación.

Se pueden encontrar concentraciones de ^{222}Rn disueltas en el agua proveniente del decaimiento natural del ^{238}U , presente prácticamente en toda la corteza terrestre, ya que el radón tiene una alta solubilidad en agua comparada con otros gases nobles como el helio y el neón, debido a que la solubilidad de estos gases es directamente proporcional a su masa atómica, figura 3. (National Research Council 1999).

El ^{222}Rn proviene de la cadena de desintegración del ^{238}U , figura 4, en esta se observa que el ^{222}Rn es hijo directo del ^{226}Ra y a su vez el ^{222}Rn , con un tiempo de vida media de 3.8 días, decae a ^{218}Po emitiendo una partícula alfa con una energía característica.

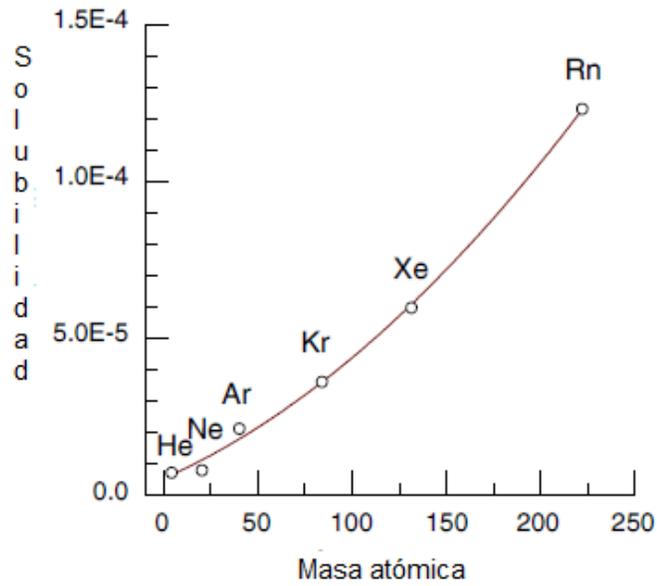


Figura 3 Solubilidad de los gases nobles en agua.

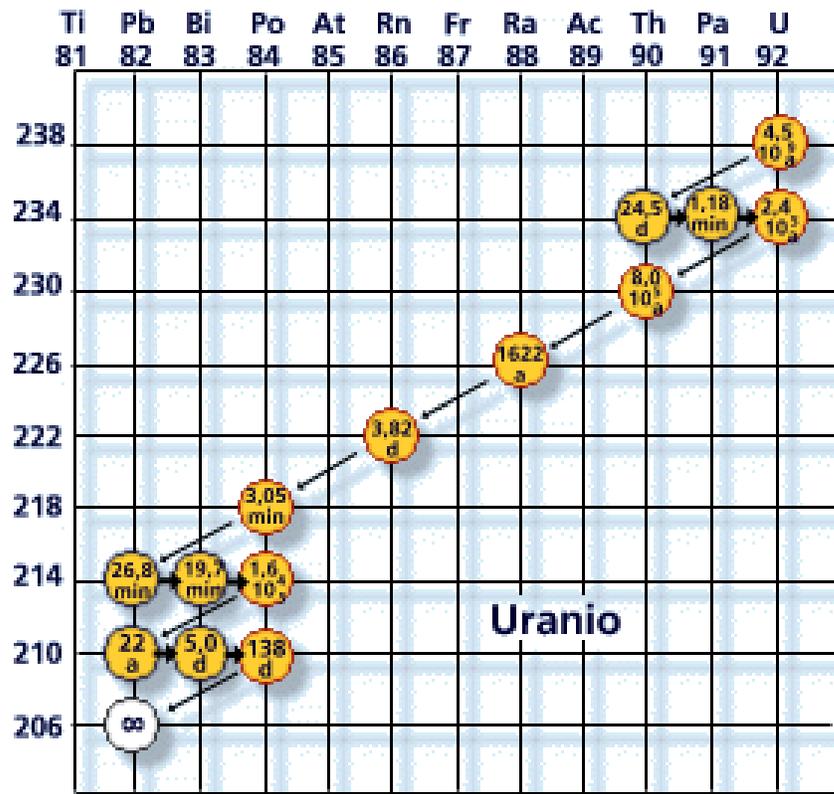


Figura 4 Cadena de decaimiento del ²³⁸U

A nivel mundial la radiación proveniente del ^{222}Rn , en adelante solo radón, representa un grave problema de salud. Los medios principales por los cuales el radón ingresa al cuerpo son el aire y el agua razón por la cual se han realizado diversos estudios para determinar las concentraciones de radón en estas matrices (Yusuoka y otros, 2014).

El radón y sus hijos de vida media corta, en su proceso de decaimiento, emiten partículas alfa, las cuales tienen la energía suficiente para ionizar la materia. La energía producida por las radiaciones ionizantes es absorbida por las células muy rápidamente, (en un tiempo de 10^{-7} segundos) causando lesiones que no son específicas, es decir, no se pueden distinguir de las causadas por otros agentes físicos o químicos (Comisión Chilena de Energía Nuclear Departamento de Protección Radiológica y Ambiental, 2010). Estos cambios producidos por las radiaciones ionizantes en las células son siempre de tipo lesivo, suponen una alteración de los procesos normales de las mismas y además no se presentan regularmente de forma inmediata, sino que pueden tardar hasta años en manifestarse.

1.3.1 Decaimiento del ^{222}Rn y sus descendientes.

En la cadena de desintegración del ^{238}U se observa que el ^{222}Rn es hijo directo del ^{226}Ra y a su vez el ^{222}Rn , el ^{238}U con una vida media de 4.5 billones de años y sus productos de desintegración intermedios ^{230}Th y ^{226}Ra de 75 380 y 1 600 años respectivamente, implican una fuente perpetua de radón que existe de manera natural. A su vez el radón decae a ^{218}Po emitiendo una partícula alfa con una energía asociada de 5.59 Mev (Turner 2007). El seguimiento de este proceso de desintegración se describe mediante la siguiente ecuación:



Debido a que las partículas alfa son muy másicas su recorrido libre medio, es muy corto dando lugar a una gran pérdida de energía por unidad de longitud es decir que depositan una gran cantidad de energía en una zona pequeña. Además por su carga positiva, interacciona con otros átomos produce un gran desprendimiento de electrones orbitales ocasionando una gran densidad de ionizaciones. Por la gran diferencia de masa comparada con los electrones que colisiona, su trayectoria es prácticamente rectilínea. Cuando hay una exposición al radón, las vías principales de ingreso al cuerpo son mediante la inhalación de aire y consumo de agua contaminados con este radionúclido, en estos casos, la energía es depositada de un solo golpe en las células de las estructuras superficiales de órganos y tejidos con los que interacciona, (estómago y/o pulmón) lo que daña y mata a esas células, algunas células pueden repararse o sustituirse por otras, pero cuando hay exposición prolongada puede dar origen a defectos celulares lo que puede eventualmente evolucionar en un cáncer en estos órganos (Gosink, Baskaran y Holleman 1990).

La desintegración del ${}^{222}\text{Rn}$ conlleva una serie de etapas donde se estarán formando radioisótopos hijos, los cuales emiten radiación, hasta llegar a un isotopo estable de ${}^{206}\text{Pb}$, figura 5, los cuales son parte de la sub-serie de

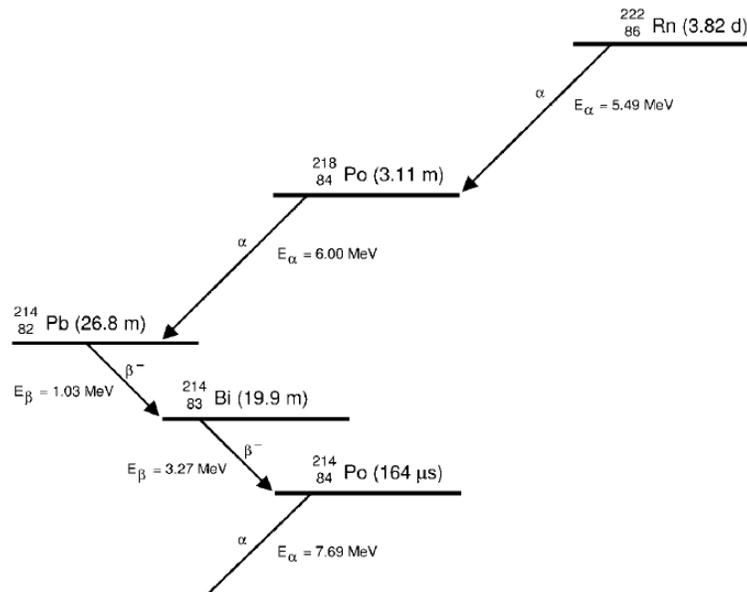


Figura 5 Subserie de decaimiento del ${}^{222}\text{Rn}$

decaimiento del radón.

Algunas características de los radionúclidos presentes en esta subserie se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Principales características del ^{222}Rn y su descendencia

Radionúclido	Tiempo de vida media	Energía de la radiación emitida (MeV)		
		Alfa	Beta	Gamma
^{222}Rn	3.823 d	5.49		
^{218}Po	3.05 min	6.00		
^{214}Pb	28.8 min		0.67	0.295
			0.73	0.352
			1.02	
^{214}Bi	19.7 min		1.0	0.690
			1.51	1.12
			3.26	1.764
^{214}Po	164 μs	7.69		
^{210}Pb	22.3 años		0.015	0.047

La ecuación de Bateman se puede usar para determinar el número de átomos de cada uno de los átomos del radón a través del ^{214}Po . Dada la corta

vida media del ^{214}Po , su actividad será la misma que la del ^{214}Bi de tal manera que la determinación de la cantidad de los productos y del radón en función del tiempo involucra ecuaciones para los cuatro primeros miembros de la serie radiactiva empezando por el ^{222}Rn . Cuando los valores numéricos de las constantes de desintegración de estos miembros de la cadena son sustituidos en la ecuación de Bateman, el número de átomos de cada producto en cualquier tiempo t (en segundos) puede ser calculado mediante las siguientes ecuaciones (Becker, y otros 2005):

El número de átomos de ^{222}Rn es:

$$N_{\text{Rn}} = N_1^0 \quad (35)$$

El número de átomos de ^{218}Po (N_2) es:

$$N_2 = N_1^0(5.657 \times 10^{-4}e^{-2.10 \times 10^{-6}t} - 5.657 \times 10^{-4}e^{-3.71 \times 10^{-3}t}) \quad (36)$$

Para el ^{214}Pb (N_3) es:

$$N_3 = N_1^0(4.875 \times 10^{-3}e^{-2.10 \times 10^{-6}t} + 6.4 \times 10^{-4}e^{-3.71 \times 10^{-3}t} - 5.557 \times 10^{-4}e^{-4.31 \times 10^{-4}t}) \quad (37)$$

Y para el ^{214}Bi (N_4) es:

$$N_4 = N_1^0(3.6176 \times 10^{-3}e^{-2.10 \times 10^{-6}t} - 8.81 \times 10^{-5}e^{-3.71 \times 10^{-3}t} - 1.59 \times 10^{-2}e^{-4.31 \times 10^{-4}t} + 1.237 \times 10^{-2}e^{-5.81 \times 10^{-4}t}) \quad (38)$$

Ya que el ^{214}Po puede ser considerado como un estado alfa-isomérico del ^{214}Bi (Martin 2006), el número de átomos que producen emisiones alfa procedentes del ^{214}Po , será el mismo que N_4 :

$$N_5 = N_4 \quad (39)$$

1.3.2 *Emanación y migración del ^{222}Rn*

El ^{222}Rn se forma dentro de las rocas como producto de desintegración del radio. La concentración de radio se expresa típicamente en unidades de actividad por unidad de masa, en estos términos el contenido de radio es equivalente a la tasa de producción total de radón en la roca, así por ejemplo si una roca contiene 1 Bq kg^{-1} de radio implica una tasa de producción de radón de $1 \text{ átomo kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ correspondiente a $0.0076 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. (W. W. Nazaroff 1992) Cuando el átomo de radio decae, la energía Q_α se reparte entre la partícula alfa, la cual se queda con la mayor parte, y el nuevo átomo de ^{222}Rn que se queda con una pequeña fracción de ella, esta pequeña cantidad de energía (aproximadamente 100 keV) hace que el átomo de radón recule en dirección opuesta a la partícula alfa y que recorra distancias aproximadas de $63 \mu\text{m}$ en aire, $0.1 \mu\text{m}$ en agua y $0.02\text{-}0.07 \mu\text{m}$ en la propia roca, de esta manera solo el radio que decae en la parte más superficial de la roca o cerca de una grieta o un poro en la misma, tiene la probabilidad de liberar radón, aun así solo el 0.5% del radón que se produce a la distancia de reculado de no más de $0.07 \mu\text{m}$ de la superficie se libera. Esto solo es posible si el radón recula en la dirección correcta, es decir hacia la periferia, lo que se conoce como reculado directo, ya que de lo contrario se quedara en la roca y decaerá en ella, el reculado directo es el proceso por el cual se libera la mayor parte del radón, a esta liberación se le conoce como poder de emanación o coeficiente de emanación, que indica la relación entre la cantidad liberada de radón y el total de radón producido el cual se expresa como un porcentaje.

En la figura 6 se esquematiza como el radón escapa de la roca, las dos esferas representan 2 granos de roca, los puntos negros A,B;C y D, representan átomos de radio que decaen y los puntos blancos A';B';C' y D',

representan los átomos de radón que reculan en diferentes direcciones, el átomo A decae muy lejos de la superficie por lo que el átomo de radón A' queda atrapado en la roca, los átomos B y D están cerca de la superficie en la zona de escape de radón R pero el radón recula en dirección hacia otros granos de roca y también quedan atrapados, el átomo C decae en la zona de escape y el átomo de radón recula en dirección donde se encuentra una grieta o un poro quedando libre de la roca.

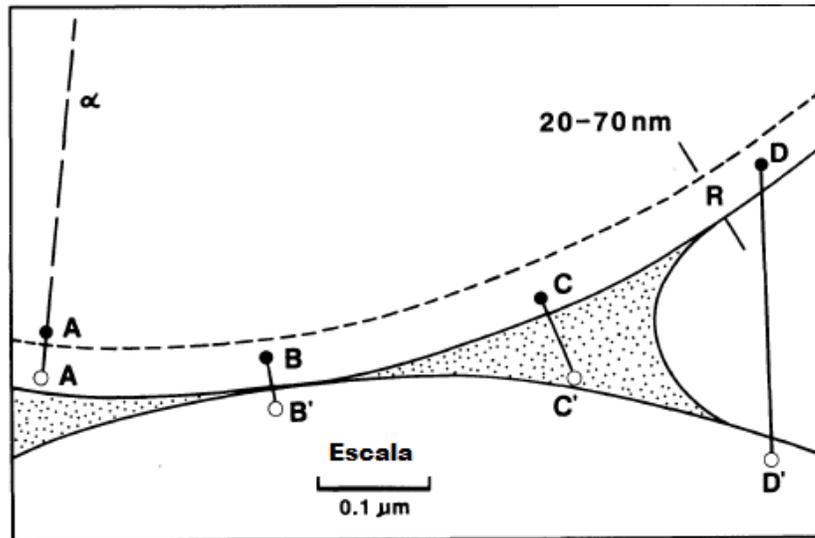


Figura 6 Diagrama esquemático que muestra el proceso de emanación del radón

Existen varios factores que incrementan el coeficiente de emanación del radón en las rocas, como por ejemplo la porosidad, la humedad y la temperatura, una buena combinación de estas 3 características hacen que el coeficiente de emanación de radón aumente hasta un 55% (W. W. Nazaroff 1992).

En el subsuelo existen formaciones geológicas en forma de rocas porosas (arena, grava, etc) o rocas fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) las cuales pueden contener agua en sus huecos (agua subterránea), aquellos terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan acuíferos. El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, la cual se filtra a través del suelo hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más, una vez en ese

nivel se acumula con los años llenando los acuíferos y poco a poco circula a favor del gradiente hasta encontrar un punto de salida en la superficie (manantiales, fuentes, lechos de ríos). Cuando se hace una perforación que atraviesa el acuífero, el agua de las oquedades pasa a esta perforación a la cual se le denomina pozo, llenándolo hasta cierto nivel, si con una bomba u otro tipo de mecanismo se extrae el agua del pozo se tiene lo que se denomina captación de agua subterránea.

En los acuíferos de donde se extrae el agua para el abastecimiento de las ciudades, como es en el caso de esta investigación, las rocas están completamente saturadas en agua por lo que todo el radón que se libera se disuelve en ella, la captación de esta agua subterránea es distribuida en la red de agua potable. De esta manera el radón disuelto en esta agua llega hasta los hogares, donde se le da el uso para consumo, aseo personal etc. Así pues esta es la vía principal por la que el radón migra desde su lugar de formación hasta nuestras casas.

1.4 Medición del ^{222}Rn en una matriz acuosa

El radón disuelto en agua puede medirse de forma general por varios métodos, puede ser medido directamente en muestras de agua, siempre y cuando hayan pasado 3 horas desde la toma de muestra para garantizar el equilibrio del radón con su descendencia, mediante la detección de los rayos gamma emitidos por el ^{214}Pb y ^{214}Bi en un detector de germanio hiper-puro, o por la detección de la radiación alfa del ^{214}Po mediante un detector de centelleo líquido. También la concentración de radón en agua puede ser medida indirectamente, extrayendo el radón del agua con un gas libre de radón y haciéndolo pasar por un filtro absorbedor de carbón activado y el radón atrapado puede medirse por la detección de partículas alfa y beta en cámaras de ionización, cámaras de centelleo, cámaras de deposición electrostática,

cámaras de difusión con espectrometría alfa y por el método del segundo filtro. (Becker y otros, 2005)

En este trabajo se midió el radón disuelto en agua de forma directa, extrayendo el radón de las muestras de agua, usando la técnica de centelleo líquido, ya que ofrece una eficiencia de conteo alta y una preparación simple de las muestras.

1.4.1 Detección por centelleo líquido

La técnica de medición de ^{222}Rn que se utilizó en este trabajo se basa en la captación de centelleos luminosos o luminiscencia que producen ciertas sustancias cuando la radiación pasa por ellas, es decir cuando el radón se pone en contacto con una sustancia centelladora las partículas alfa de su decaimiento, interaccionarán con ella produciendo pulsos luminosos que serán captados por fotomultiplicadores para producir una señal medible y poder determinar la concentración de radón que hay en las muestras.

La propiedad de centelleo fue observada por primera vez en 1910, en los experimentos de dispersión alfa de Rutherford, donde las partículas alfa chocaban en una pantalla de sulfuro de zinc el cual producía centelleos que eran observables a simple vista, por la desexcitación de estas moléculas tras el paso de la radiación ionizante. De esta manera los detectores de centelleo se basan en los fenómenos de excitación, (Tsoulfanidis y Landsberger 2011).

El conteo por centelleo líquido sigue una serie de pasos o etapas, (Passo Jr & Cook, 1994; Olgúin Gutiérrez M. T., 1990):

1. Amplificación de los fotones producidos por el centellador. Los fotones que produce el centellador son de baja intensidad como para producir una señal medible, por lo que habrá que amplificar la luz que emite el líquido centellador, esto se logra mediante un tubo fotomultiplicador (TFM), los fotones producidos llegan al fotocátodo del TFM, cuando

estos fotones son de una longitud de onda apropiada, alrededor de los 420 nm, el fotocátodo emite 13 fotoelectrones por cada 100 fotones incidentes, los cuales son acelerados hacia el primer dinodo donde liberan 3 electrones en promedio, dependiendo del voltaje que se aplique. La diferencia de potencial entre los dinodos (160 V entre cada uno) aceleran a los electrones secundarios de uno a otro dinodo, multiplicándose en cada uno, el proceso general de multiplicación de electrones se observa en la figura 7. Generalmente los TFM contienen 11 dinodos que dan una multiplicación total de 10^5 , es decir si se producen 100 fotoelectrones, del TFM saldrán 10^7 electrones.

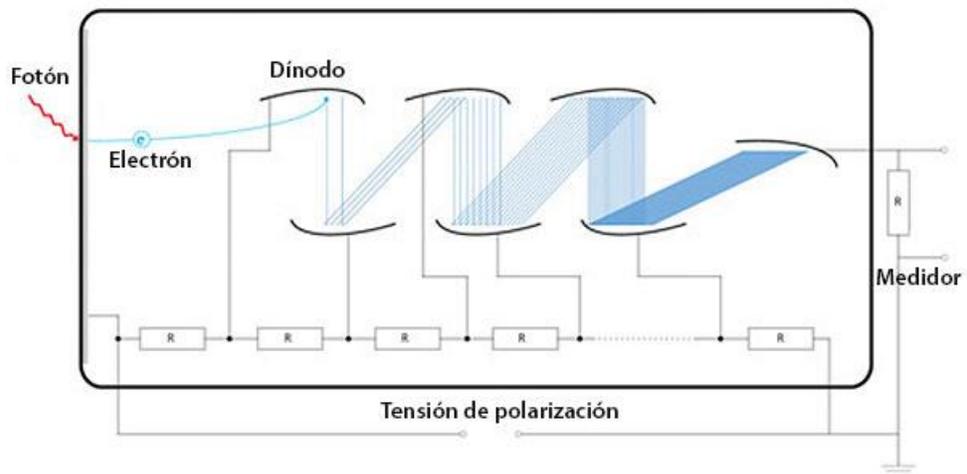


Figura 7 Multiplicación de electrones en un tubo fotomultiplicador.

2. Detección en coincidencia. Este tipo de detección permite distinguir la radiación de baja energía, del ruido electrónico. Si el centelleo producido por la radiación se recibe en varios fotomultiplicadores se producirán pulsos simultáneos, en tanto el ruido electrónico producirá pulsos desordenados, ambos pulsos pasaran al detector de coincidencias, de tal manera que se contarán solo aquellos que tengan lugar simultáneamente en los TFM t que corresponden sólo a la radiación del radionúclido a medir.

3. Análisis de forma de pulsos. Los electrones que salen del TFM son recogidos en el ánodo dando lugar a una señal eléctrica que se puede medir en forma de un pulso o pico de energía, cada pulso está conformado por una componente rápida y una retardada. La baja eficiencia de conversión de fluorescencia para una partícula alfa en el centellador líquido se debe a que la parte inicial del pulso luminoso (componente rápida) contiene una gran cantidad de apagamiento (quenching) por ionización que no contribuye a la intensidad luminosa del pulso, y la componente retardada o cola del pulso es más grande con respecto a su parte inicial, en otras palabras las partículas alfa producen pulsos con colas más largas que los pulsos producidos por las partículas beta. Debido a esto los tiempos de decaimiento de los pulsos resultado de las interacciones de una partícula alfa son mayores respecto a los tiempos de decaimiento de los pulsos provenientes de la interacción beta. Esta diferencia en la forma de pulsos es la base del análisis de forma de pulsos PSA del contador de centelleo líquido Wallac-Oy, que se utilizó en este trabajo. El PSA compara el área de la componente retardada de los pulsos con su área total y discrimina los pulsos utilizando un parámetro límite de forma de pulso, de este modo aquellos pulsos con un parámetro de forma por debajo del límite fijado se clasifican como pulsos cortos originados por eventos beta y se mandan a un multicanal almacenándolos como un espectro beta, y los pulsos con un parámetro por arriba de este límite se clasifican como pulsos largos resultado de la interacción alfa los cuales se almacenan en un segundo multicanal como un espectro alfa.

De acuerdo con estos pasos, en el contador de centelleo líquido, la muestra radiactiva junto con el líquido de centelleo se deposita en un

contenedor que se coloca entre dos fotomultiplicadores y reciben la radiación en simultáneo. Un equipo mecánico se encarga de poner el contenedor en la posición correcta y acabado el tiempo de conteo lo retira y pone otro para su conteo.

1.5 Efectos biológicos de la radiación

La radiación ionizante se utiliza en diversas aplicaciones beneficiosas para el hombre a la vez que puede producir efectos dañinos en la salud de las personas. Para poder protegernos de los posibles efectos nocivos de la radiación es necesario conocer detalladamente las características de esta así como los diversos factores biológicos que influyen en dichos efectos. La Radiobiología es la ciencia que estudia los fenómenos que suceden cuando el tejido vivo absorbe la energía que los diferentes radionúclidos ceden en su proceso de decaimiento, la acción de esta energía sobre el organismo es siempre del tipo lesivo, es decir que produce daño y/o altera el buen funcionamiento de un sistema (Alcaraz Baños y López Alegria, 2003).

Conocer el tipo de lesiones que se producen y la forma en que el cuerpo intenta compensar la lesión es parte del estudio de la radiobiología, la siguiente serie de etapas intenta explicar las modificaciones que ocurren al organismo cuando la radiación interactúa en él, las cuales pueden observarse clínicamente cuando ha transcurrido cierto tiempo (desde unas horas hasta incluso varios años), y que dependen de la dosis de radiación absorbida:

1. Absorción de la radiación por el organismo.
2. Modificación bioquímica en el lugar de absorción.
3. Afección molecular.
4. Modificación celular.
5. Modificación del tejido.

6. Pérdida del buen funcionamiento del organismo pluricelular cuando el cuerpo no pueda reparar la lesión.

Los efectos biológicos de las radiaciones sobre los seres vivos se han estudiado por más de 70 años, por lo que en la actualidad son bien conocidos, en particular para dosis moderadas y altas, sin embargo para dosis bajas (inferiores a 100 mSv) los expertos aun no conocen del todo dichos efectos, por lo que las investigaciones actuales se centran en esta área (Comisión Chilena de Energía Nuclear Departamento de Protección Radiológica y Ambiental 2010)

La protección radiológica es la principal disciplina desarrollada para prevenir y/o contrarrestar los efectos nocivos de la radiación ionizante sobre la población en general. Se basa en tres principios básicos que deben seguirse al pie de la letra:

- 1) Justificación: cualquier exposición a la radiación debe estar justificada de modo que los beneficios de dicha exposición sean mayores que sus riesgos.
- 2) Optimización: basada en el criterio ALARA (As Low as Reasonably Achievable) la cual indica que la exposición debe ser tan baja como sea razonablemente posible.
- 3) Limitación de dosis: la dosis recibida no debe superar los límites recomendados por la ICRP.

1.5.1 Respuesta a nivel celular

La unidad básica de cualquier organismo vivo es la célula, la cual cumple las funciones de nutrición, relación y reproducción, siendo esta última la más importante desde el punto de vista del daño radio-inducido. En organismos pluricelulares las células sufren un proceso de especialización, es decir la célula realiza una determinada función y pierde la capacidad para realizar otras. Existen dos grandes grupos celulares en cuanto a reproducción se refiere:

- Células somáticas, las cuales constituyen los órganos y tejidos.
- Células germinales, encargadas de transmitir la información genética a la descendencia

El daño de la radiación a la célula viene determinado por procesos de excitación, ionización y radiólisis, los cuales afectan fundamentalmente en la molécula del ADN, así como también el medio en el que se encuentran los organelos celulares (agua). Según la intensidad de la radiación, los daños causados pueden producir retrasos y alteraciones en la reproducción o muerte celular, los mecanismos de acción de tales daños se pueden clasificar en dos grupos, mecanismos de acción directa y mecanismos de acción indirecta los cuales se describen a continuación (Cember y Johnson, 2009):

1. Acción directa: tiene lugar cuando la radiación interactúa con una molécula biológica a la que cede su energía (principalmente ADN), lo cual provoca una ionización o excitación de dicha molécula, provocando una radiólisis y una posterior alteración molecular, que da lugar a las lesiones radio-inducidas más graves.
2. Acción indirecta: esta implica la absorción de la energía en medios intracelulares, principalmente agua, dando lugar a la formación de radicales libres (moléculas con un electrón de un orbital externo desapareado), que presentan una alta reactividad química por la tendencia del electrón libre a unirse a otro electrón de un átomo de una molécula próxima, provocando variadas reacciones químicas que pueden causar cambios y lesiones en la célula en zonas relativamente alejadas del sitio de la interacción primaria de la radiación

La respuesta celular a la radiación no es igual para todas las células y está determinada por la radiosensibilidad de estas, es decir la respuesta a la radiación de los diferentes órganos, depende de los tejidos que los componen y de sus poblaciones celulares así como de las características físicas de la

radiación. La radiosensibilidad de una célula depende de su grado de diferenciación, una célula diferenciada es aquella que tiene una función especializada o bien definida morfológicamente mientras que la no diferenciada aquella que tiene pocas características morfológicas o funciones especializadas y cuya principal misión es la división, proporcionando las células necesarias para mantener el equilibrio entre la población celular y así reemplazar aquellas células diferenciadas que han terminado su vida útil. Por lo tanto una célula es más radiosensible cuando mayor es su actividad reproductora y cuando tenga que realizar varias divisiones para alcanzar su forma definitiva

Dependiendo del tipo de daño que la radiación provoque en las células, los efectos biológicos se clasifican, de forma general, en 2 grandes grupos estocásticos y deterministas (Alcaraz Baños y López Alegria, 2003):

1. Si la radiación recibida produce la muerte de un gran número de células de un órgano o tejido, dando lugar a la pérdida de la función de ese órgano o tejido se habla de un efecto determinista, cuya gravedad es proporcional a la dosis de radiación recibida, la cual será mayor a la dosis umbral, es decir, la dosis que establece al límite de la aparición o no del efecto. En los efectos deterministas, la relación entre la magnitud del daño o la gravedad de la enfermedad y la dosis es directa, además los efectos se producen en un tiempo relativamente breve
2. De forma contraria cuando la célula no muere después de recibir la radiación pero sufre modificaciones y/o mutaciones se habla de efectos estocásticos, los cuales se observan a dosis bajas y moderadas de radiación, los efectos se observan a plazo medio-largo de tiempo, aquí la gravedad del efecto estocástico no es proporcional a la dosis recibida, pero si la probabilidad de que tenga lugar el efecto. Tales efectos se caracterizan por: ser menos frecuentes, aparecen al

azar solo en algunos individuos, estadísticamente no existe umbral de dosis o estos son muy difíciles de determinar.

Como ya se mencionó, la radiación puede afectar a dos regiones en la célula, el núcleo y el citoplasma. Cuando la interacción ocurre en el núcleo, la radiación puede alterar el ácido desoxirribonucleico (ADN), el cual es el constituyente fundamental del material genético, responsable de transmitir la información para el buen control fisiológico, bioquímico, reproductivo y hereditario, pudiendo causar un grave daño a la célula, sin embargo, la célula pese un enorme potencial de reparación a nivel somático y genético con lo cual es posible revertir el daño causado.

Si las células no se reparan, los daños causados pueden ser permanentes y provocar cambios en tejidos y órganos. Una alteración causada sobre el ADN a causa de la radiación se denomina mutación radioinducida, la cual modifica cierta actividad celular y es susceptible de ser transmitida a la descendencia. Las principales afecciones de las mutaciones radioinducidas recaen a nivel de las células somáticas y en las células germinales provocando cáncer radioinducido y transmisión de la mutación a generaciones posteriores. En la figura 8 se resumen las principales vías de daño celular.

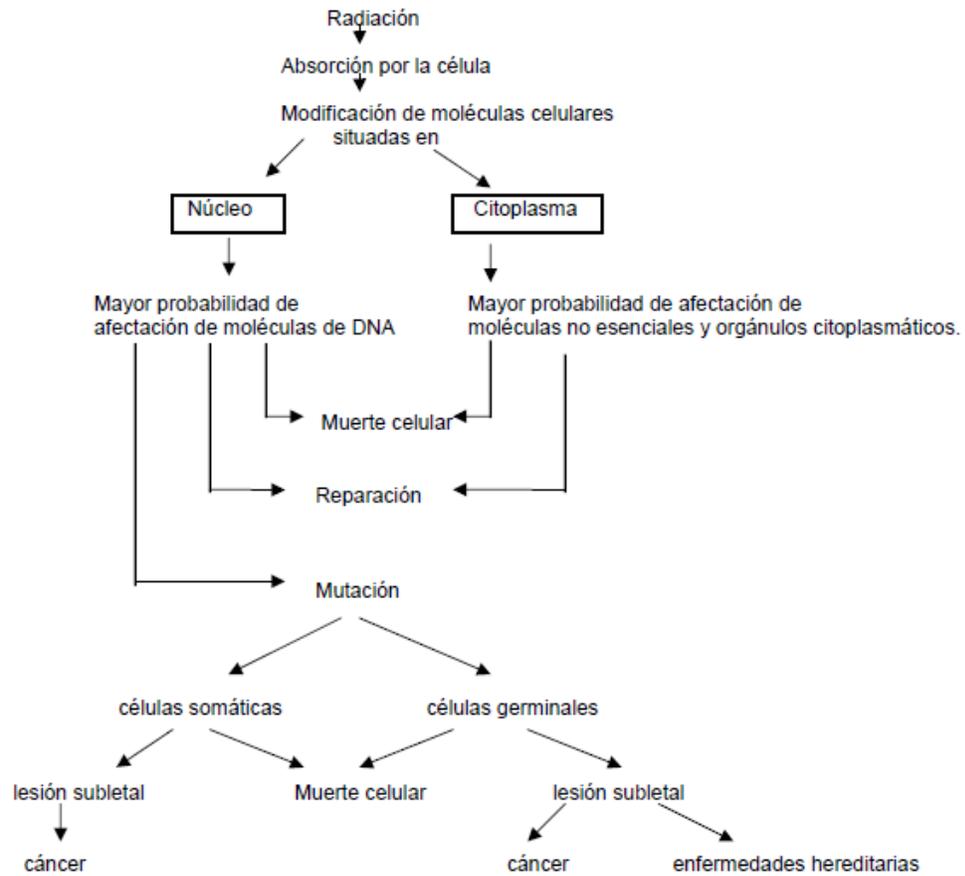


Figura 8 Consecuencias de la interacción de la radiación con las células.

1.6 Dosimetría y riesgo asociado al ^{222}Rn

La exposición a la radiación es un grave problema que trae consigo diferentes afecciones a la salud, en especial cuando se trata de radionúclidos emisores alfa depositados internamente en el cuerpo humano como resultado de la ingesta o la inhalación de los mismos, tal es el caso del radón y su progenie contenidos en el agua y el aire. La dosimetría de la radiación es el cálculo de la dosis absorbida en tejidos y materia como resultado de la exposición a la radiación ionizante, en este trabajo de investigación se analizaron las dosis recibidas directamente en el estómago y en el pulmón como resultado al consumo de agua que contiene cierta cantidad de radón y a

la inhalación del radón cuando este se incorpora al aire del interior de una vivienda por el uso de esa agua (Cember y Johnson, 2009).

Hablar pues de dosimetría implica conocer las unidades de medición de las dosis, las cuales se describen en los siguientes párrafos. Al igual que la dosis, también se analizó el riesgo de desarrollar una afección nociva como el cáncer, por la exposición interna del radón y sus hijos, tal riesgo se le conoce como *Life Time Risk*, el cual ha adquirido una atención especial ya que este tipo de emisores alfa ocurren de manera natural en nuestro medio ambiente.

El término dosis de radiación comprende dos conceptos fundamentales: uno es la energía depositada por gramo del medio absorbente, en este caso tejido biológico, la cual es la dosis absorbida, y el otro es el efecto dañino del tipo de radiación al cual se le conoce con el término de dosis efectiva equivalente. El término exposición a la radiación hace referencia a la cantidad de ionización que los rayos X y gamma producen solo en el aire, el cual no forma parte de este trabajo.

1.6.1 Dosis absorbida

La dosis absorbida se define como la cantidad de energía depositada por unidad de masa ($\Delta E/\Delta m$), la unidad convencional para la dosis absorbida es el rad (dosis de radiación absorbida) que es igual a la absorción de 100 erg de energía en 1 gramo de tejido (1 rad = 100 erg/g).

En unidades del sistema internacional, la unidad de dosis absorbida es el gray (Gy) que es la absorción de 1 joule de energía por kilogramo de tejido, $1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$, dado que $1 \text{ J} = 10^7 \text{ ergs}$, y $1 \text{ Kg} = 1000\text{g}$, $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$. Un miligray (mGy) son 100 mrad, que es la cantidad de radiación recibida por un individuo de forma natural en un año, excluyendo al radón. La velocidad con la que se recibe una dosis es de especial interés, en el SI (Sistema Internacional

de Unidades), la razón o tasa de dosis puede expresarse como Gy/s, mGy/h o incluso $\mu\text{G}/\text{h}$ (Cember y Johnson 2009).

El concepto de dosis de radiación absorbida implica que la energía absorbida se distribuye uniformemente en el órgano o tejido de interés.

1.6.2 Dosis de radiación equivalente

La dosis equivalente hace referencia al daño biológico que cada tipo de radiación causa. Los efectos biológicos no solo dependen de la energía depositada, sino también de la distribución de esta a lo largo del recorrido de la radiación. El daño provocado por la radiación se incrementa con la Transferencia de Energía Lineal o LET, el daño biológico causado por un LET alto (partículas alfa, neutrones, etc.) es más grave que uno provocado por un LET bajo (partículas beta, rayos X y gamma, etc.) (Turner 2007).

La dosis equivalente se denota por la letra H, y es el producto de la dosis absorbida y el factor de calidad Q, el cual está caracterizado por el daño asociado con cada tipo de radiación:

$$H = D (\text{dosis absorbida}) \times Q (\text{factor de calidad}) \quad (40)$$

Las unidades en el sistema convencional para la dosis equivalente es el rem ($\text{rad} \times Q$) y en el SI la unidad es el sievert ($\text{Sv} = \text{Gy} \times Q$). el valor de Q para el caso del radón, el cual es un emisor alfa es 20.

1.6.3 Dosis absorbida por un órgano o tejido

La dosis de radiación debida a un emisor que se encuentra en el interior de un órgano o tejido, en este caso en estómago y pulmón, no puede ser medida directamente solo calcularse siguiendo la definición de dosis absorbida (energía depositada por unidad de masa). para hacer los cálculos se deben hacer algunas suposiciones, primero se asume que el radionúclido depositado se

distribuye uniformemente en la masa del tejido, segundo el radionúclido es la fuente S de emisión de energía, la cual es absorbida, en su totalidad o solo una fracción, por un órgano o tejido T, AF (T←S). Para el caso de emisores alfa el órgano o tejido absorbe toda la energía emitida, esto es, AF(T←S) = 1. (Turner 2007).

Si la tasa de decaimiento q(t) en desintegraciones por segundo, de un radionúclido uniformemente depositado en un órgano de masa m_T, la tasa de deposición de energía por transformación es:

$$\dot{D}(\text{Gy/d}) = \frac{q \times E \times 1.6 \times 10^{-13} \left(\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right) \times 8.64 \times 10^4 \left(\frac{\text{S}}{\text{d}} \right)}{m \frac{1 \text{ J/Kg}}{\text{Gy}}} \quad (41)$$

Donde: q(t) = actividad en dps del radionúclido en el órgano a cualquier tiempo t

E = Promedio de energía (MeV) de cada radiación emitida.

m = masa del órgano blanco en kilogramos.

1.6.4 Riesgo asociado a la ingesta de ²²²Rn

El uso directo, o consumo de agua que contiene disuelto radón, puede traer consecuencias a la salud si este se encuentra en altas concentraciones. El consumo de agua recomendado por la WHO es 2 litros por día (World Health Organization 2011), sin embargo, el consumo es mucho menor. Un valor promedio de consumo de agua es 1.2 litros, incluyendo jugos, bebidas gaseosas, café etc., de esta manera el consumo de agua que puede contener disuelto radón disminuye solo a 0.6 litros (National Research Council, 1999).

La evidencia sugiere que cuando el radón es ingerido, el estómago es el órgano crítico, ya que es susceptible de recibir más del 95% del total de la dosis, debido a que el radón permanece poco más de 1 hr en él, antes de ser descargado al intestino delgado, y por lo tanto todos los hijos del radón

producidos en el estómago permanecerán ahí y ahí también decaen (Kendall y Smith, 2002).

Estudios previos muestran que la dosis recibida en la pared estomacal puede ser significativa (Haeley y Robbins, 1994) lo cual implica cierto riesgo de desarrollar cáncer de estómago, sin embargo la asociación entre el radón y el cáncer de estómago no ha sido demostrada en estudios epidemiológicos, no obstante es un factor que hay que tener en cuenta (Bo, 1968).

El riesgo de desarrollar cáncer de estómago a lo largo de la vida de un individuo (*Life Time Risk*) debido al consumo de agua con cierta cantidad de radón está basado en un promedio de vida por persona de 50 años, además de un consumo diario de agua y una concentración de radón constantes. De esta manera el riesgo de la aparición de cáncer de estómago por la ingesta de radón en agua a una concentración de 1 Bq/m^3 a lo largo de 50 años es 1.6×10^{-9} . (National Research Council, 1999)

1.6.5 Riesgo asociado a la inhalación de ^{222}Rn

El radón disuelto en el agua, se transfiere al aire cuando usamos esa agua para diferentes usos de aseo doméstico y personal, de tal manera que el radón pasa a formar parte de la atmósfera interna de una casa, en la que las personas y sus familias pasan la mayor parte del tiempo, las cuales inhalan radón y sus productos de decaimiento.

Después de la inhalación del radón, la principal interacción y la de mayor consecuencia, se da entre las partículas alfa de los productos de decaimiento del radón (^{218}Po y ^{214}Po) y el epitelio pulmonar, donde la energía puede actuar directamente con el núcleo de las células, pudiendo favorecer la aparición de un proceso cancerígeno. En contraste con la ingestión de radón, el cáncer de pulmón relacionado a la inhalación de radón ha sido bien establecida en numerosos estudios, principalmente en personas dedicadas a la minería.

La concentración promedio de radón en interiores C_a resulta solamente del uso del agua y se puede estimar como sigue (Nazaroff y otros, 1987):

$$C_a = \frac{C_w W e}{V \lambda} \quad (42)$$

Donde:

C_w = concentración de radón en el agua que entra a la vivienda.

W = uso de agua por habitante (m^3 habitante $^{-1}$ h $^{-1}$)

e = promedio ponderado de la eficiencia de la transferencia de radón en el agua al aire.

V = volumen de la vivienda (m^3)

λ = tasa de ventilación de la vivienda (h^{-1})

Debido a la incertidumbre que existe en todas estas cantidades, principalmente en el volumen de la vivienda, el uso de agua, la tasa de ventilación y la transferencia del radón del agua al aire, la Agencia de Protección al Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA) integra estas variables en un solo factor llamado factor de transferencia f :

$$f = \frac{W e}{V \lambda} \quad (43)$$

La USEPA en base a modelos experimentales ha asignado 1.0×10^{-4} como el mejor valor estimado para el factor de transferencia, de esta manera la concentración de radón en aire interior, como consecuencia del uso del agua es:

$$C_a = C_w \bullet 1.0 \times 10^{-4} \quad (44)$$

De la misma manera en base a la incertidumbre relacionada con la cantidad de aire inhalado por persona, el tiempo de permanencia en el interior de la

vivienda, el sexo y la edad de las personas, de acuerdo con la ICRP (1981), la dosis al pulmón es 7×10^{-3} mSv/año por Bq/m³.

La evaluación del riesgo de cáncer pulmonar ocasionado por la inhalación de radón en interiores, se basa en el modelo propuesto por el Cuarto Comité del Consejo Nacional de Investigación sobre los Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (BEIR IV) en su reporte, *Health Risks of Radon and Others Internally Deposited Alpha-Emitters 1988* y en la revisión del mismo en 1999 (BEIR VI), en el que se describen los efectos observados en mineros expuestos a altas concentraciones de radón. El riesgo de cáncer pulmonar en mineros pudo ser extrapolado para determinar el riesgo por exposición al radón en interiores, donde las concentraciones son mucho menores que en las minas, así el riesgo de desarrollar cáncer pulmonar para una exposición continua de 1 Bq/m³ de radón es 1.6×10^{-4} . (National Research Council 1999)

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la cuantificación de radón en agua, este se extrajo de las muestras con ayuda de un aceite mineral de alta eficiencia para extracción de radón en agua, para su posterior medición por centelleo líquido, el cual es uno de los dos métodos recomendados por la USEPA para medirlo, el otro es midiendo la emanación del radón en agua con la técnica de la celda de Lucas. Entre las ventajas que ofrece la técnica de centelleo líquido, la más importante, es que al usar un líquido de centelleo para la detección del radón, asegura una geometría 4π para resultados más precisos (Passo Jr y Cook, 1994).

2.1 Materiales

2.1.1 Equipo de centelleo

Para la cuantificación del radón disuelto en muestras de agua, se recurrió a la detección de pulsos luminosos que se originan cuando la radiación alfa emitida por él y sus productos de decaimiento, interaccionan con el líquido de centelleo esto mediante el uso del contador de centelleo líquido Wallac-Oy®, el cual es capaz de separar los pulsos originados por radiación alfa, de los originados por la radiación beta.

El contador de centelleo líquido consta de un sistema electrónico en coincidencia, que capta las pulsaciones una vez que han sido amplificadas por los tubos fotomultiplicadores, los cuales están protegidos por un blindaje de plomo de 48 mm de espesor (Dávila Rangel, 2001).

2.1.2 Líquido de centelleo

Los líquidos de centelleo, también llamados cocteles centelladores, son una mezcla de compuestos que se compone principalmente de un solvente el cual contiene en pequeñas concentraciones un centellador primario o soluto primario (Kitto, 1994), a menudo también contiene un centellador o soluto secundario. Cuando la radiación ionizante atraviesa el líquido de centelleo genera que una gran cantidad de moléculas del solvente en estado excitado, las cuales al tener que regresar a su estado basal transfiere esta energía en exceso a las moléculas del centellador primario, las cuales a su vez también entran en un nivel energético elevado y mediante colisiones intermoleculares y la emisión de un fotón luminoso liberan esa energía. Por lo general las longitudes de onda de los fotones emitidos es de unos 300 a 400 *nm*, dado que los tubos fotomultiplicadores captan pulsos luminosos correspondientes a longitudes de onda en la región visible (400-500 *nm*), es necesario incorporar en el líquido de centelleo un centellador secundario cuya función es absorber el fotón emitido por el centellador primario para después volverlo a emitir a una longitud de onda que pueda ser captada por el tubo fotomultiplicador.

En este trabajo se utilizó el líquido de centelleo OptiPhase HiSafe® 3 de Wallac, que usa como solvente el derivado de naftaleno DIN (diisopropilnaftaleno). El centellador responde adecuadamente a la separación de forma de pulsos, es biodegradable, no tóxico, con una presión de vapor muy pequeña, sin olor, resistente al apagamiento químico, y no penetra a través de las paredes de los viales de polietileno.

2.1.3 Aceite mineral

En la técnica implementada en este trabajo, el radón fue extraído de las muestras de agua para concentrarlo en un pequeño volumen (Leaney y Harczeg, 2006), esto se logró mediante el uso de un aceite mineral para la

extracción de radón en agua, en este caso se utilizó el *HIGH EFFICIECY MINERAL OIL SCINTILLATOR* el cual asegura la extracción solamente del ^{222}Rn y no de sus productos de decaimiento, además de tener un coeficiente de extracción de radón en agua de 23 (Lowry, 1991).

2.1.4 Vial

El líquido de centelleo junto con el radón extraído del agua con el aceite mineral se depositan en viales de polietileno de alta densidad, los usados en este trabajo son de este tipo que en conjunto con el líquido de centelleo ofrecen una buena medición tanto de emisores alfa como de emisores beta.

2.2 Metodología

2.2.1 Zona de muestreo

El muestreo se realizó en el municipio de Zacatecas, Zac, tomando muestras de agua potable de la red de suministro, los sitios de muestreo fueron seleccionados de manera aleatoria, en puntos de diferentes colonias de este municipio, siendo la ubicación exacta de los puntos de muestreo, la que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Ubicación de los puntos de muestreo.

Muestra	Colonia	Ubicación	
		Latitud	Longitud
1	Estrella de oro	22°45'20.51" N	102°36'6.01" O
2	Huerta vieja	22°45'14.22" N	102°36'29.85" O
3	Europa	22°44'50.66" N	102°36'52.74" O
4	Las huertas	22°44'49.94" N	102°36'51.10" O
5	Picones	22°45'16.81" N	102°37'58.85" O
6	El orito	22°44'57.41" N	102°36'22.29" O
7	Gonzales Ortega	22°45'25.23" N	102°35'34.31" O
8	Lomas del lago	22°45'21.88" N	102°35'20.89" O
9	Felipe Ángeles	22°45'39.47" N	102°35'49.31" O
10	Benito Juárez	22°45'29.05" N	102°35'17.93" O
11	Minera	22°46'2.67" N	102°35'6.65" O
12	Lomas de la pimienta	22°46'2.78" N	102°35'13.32" O
13	La herradura	22°45'29.97" N	102°35'11.18" O
14	Las haciendas	22°45'56.97" N	102°35'1.59" O

2.2.2 Toma de muestras y procesamiento

Se tomaron 2 muestras de aproximadamente 1 litro de agua en cada punto de muestreo, al día se tomaron 4 muestras correspondientes a 2 colonias. Se

llevaron las muestras al laboratorio de la UAEN en donde se midieron alícuotas de 500 mL que se transfirieron a un matraz de extracción, una vez en el matraz se le agregó a las muestras 8 mL de aceite mineral para la extracción del ^{222}Rn , se cerró el matraz y se agitó intensamente durante 4 minutos y se dejó reposar por 3 horas, esto para garantizar la separación completa de las fases y para garantizar que tanto el ^{222}Rn como sus hijos sean detectados cuantitativamente. Pasado el tiempo de reposo se desecha la fase acuosa y se deposita la fase orgánica, que es donde se encuentra el ^{222}Rn en un vial de polietileno e inmediatamente se le agregan 12 mL de líquido de centelleo, se cerró el vial y se agitó para que se mezclara con la fase orgánica.

Inmediatamente después, se llevaron los viales al equipo de centelleo líquido para su conteo por 6 horas, el cual se llevó a cabo bajo el protocolo especificado para este propósito.

2.2.3 Análisis del resultado del conteo

Debido a la baja resolución que ofrece el contador de centelleo líquido, el pulso originado por la emisión de la partícula alfa del radón no puede ser separado del pulso originado por la emisión alfa proveniente del ^{218}Po , ya que sus energías son muy similares, 5.48 y 6.00 MeV respectivamente. Sin embargo el pulso originado por la emisión alfa del ^{214}Po (7.68 MeV) está bien definido y separado de las demás energías de los otros emisores alfa.

De esta manera cuando se alcanza el equilibrio radiactivo, (Kinner, y otros 1991) aproximadamente en 3 horas, y de acuerdo con las ecuaciones de Bateman la actividad del ^{214}Po es igual a la del ^{222}Rn , $A_{214\text{Po}} = A_{222\text{Rn}}$, La cuantificación de la concentración de radón está dada por el promedio de la actividad medida en las dos muestras tomadas en cada punto de muestreo, así la concentración de radón C_{Rn} en agua en Bq/L al momento de la toma de muestra está dada por:

$$C_{Rn} = \frac{A_{222Rn} - B}{\epsilon f \epsilon_{ext} V} \quad (45)$$

Donde: A_{222Rn} = actividad medida del radón extraído del agua en cps

B = actividad del fondo en cps, el cual se obtiene de la medición de un vial que contiene solo líquido de centelleo y aceite mineral libre de radón.

ϵ = la eficiencia del conteo del detector de centelleo.

f = factor de corrección por tiempo.

ϵ_{ext} = eficiencia de extracción del radón en agua por el aceite mineral.

V = volumen de la muestra en litros

La eficiencia de conteo del contador de centelleo líquido Wallac Oy usado en este trabajo, fue calculada por Favila en 2010, en su procedimiento el reporta una eficiencia de conteo de 80.22 ± 0.56 %.

La eficiencia de extracción del radón en agua con el aceite mineral de alta eficiencia, fue obtenida de manera experimental por Lowry en 1991, en su estudio propone la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{ext}(\%) = \frac{100 \times D_{Rn} \times V_{org}}{D_{Rn} \times V_{org} + V_{aq}} \quad (46)$$

Dónde: D_{Rn} = coeficiente de distribución entre el agua y el aceite mineral, que tiene un valor de 23 (también reportado por Lowry)

V_{org} = volumen de la fase orgánica utilizada para la extracción (8 ml).

V_{aq} = volumen de agua de la cual se extrajo el radón (500 ml)

Así, la eficiencia de extracción de radón, en las muestras de agua tomadas de las diferentes colonias es 26.9 %.

La aplicación de un factor de corrección por tiempo considera el decaimiento del radón en el tiempo que transcurre desde la toma de muestra hasta el

momento de su conteo, el factor de corrección para cada muestra se da en la tabla 3.

Tabla 3 Factor de corrección por tiempo para cada una de las muestras

Muestra	Colonia	Factor de corrección
1	Estrella de oro	0.83
2	Huerta vieja	0.80
3	Europa	0.79
4	Las huertas	0.76
5	Picones	0.96
6	El orito	0.88
7	Glez. Ortega	0.94
8	Lomas del lago	0.86
9	Felipe Ángeles	0.94
10	Benito Juárez	0.86
11	Minera	0.94
12	Lomas de la pimienta	0.86
13	La herradura	0.94
14	Las haciendas	0.86

A un nivel de confianza del 95%, la actividad mínima detectable (AMD) para el radón, es decir la actividad que hace que la muestra produzca una tasa de

conteo que supere la del fondo, se calcula de la manera siguiente (Currie 1968):

$$AMD \left(\frac{Bq}{L} \right) = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B \times t}}{\varepsilon f \varepsilon_{ext} V} \quad (47)$$

Donde, t es el tiempo de conteo en segundos.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en base a la metodología implementada, además se hace una discusión de los mismos y se evalúa el riesgo a la salud por la exposición del radón disuelto en agua de uso directo o consumo, así como del radón que se transfiere a la atmósfera interna de una vivienda y que es inhalado.

Así pues se da a conocer la concentración de radón tanto en agua como en aire, las dosis de radiación recibidas por las vías de ingestión e inhalación, y suponiendo una exposición constante, se calcula el riesgo de desarrollar cáncer de estómago (ingestión) o cáncer de pulmón (inhalación) debido a la exposición de radón en las concentraciones calculadas.

3.1 Actividad mínima detectable

La actividad mínima detectable para cada muestra se calculó con la ecuación 47 los resultados se muestran en la tabla 4, la actividad del vial que solo contenía aceite mineral libre de radón y líquido de centelleo, el cual se usó para conocer la actividad del fondo, es 4.940 ± 0.489 cpm.

Tabla 4 Actividad mínima detectable de cada una de las muestras

Muestra	Colonia	AMD (Bq/L)
1	Estrella de oro	0.103 ± 0.039
2	Huerta vieja	0.107 ± 0.039
3	Europa	0.107 ± 0.039
4	Las huertas	0.112 ± 0.039
5	Picones	0.089 ± 0.039
6	El orito	0.097 ± 0.039
7	Glez. Ortega	0.091 ± 0.039
8	Lomas del lago	0.099 ± 0.039
9	Felipe Ángeles	0.091 ± 0.039
10	Benito Juárez	0.099 ± 0.039
11	Minera	0.090 ± 0.039
12	Lomas de la pimienta	0.099 ± 0.039
13	La herradura	0.091 ± 0.039
14	Las haciendas	0.099 ± 0.039

3.2 Actividad de ^{222}Rn en agua potable

De acuerdo con la ecuación 45 y de los datos obtenidos al final del conteo de cada muestra, las concentraciones de ^{222}Rn en Bq/L en los sitios de muestreo se muestran en la tabla 5. Las concentraciones están en un intervalo de 0.315 a

4.415 Bq/L, donde la concentración más baja corresponde a la colonia Felipe Ángeles y la más alta a la colonia Huerta Vieja. La concentración promedio es 2.090 ± 0.156 Bq/L.

Tabla 5 Concentración en actividad de ^{222}Rn en Bq/L de cada muestra

Muestra	Colonia	Actividad del Rn (cpm)	Concentración de Rn (Bq/L)
1	Estrella de oro	22.7 ± 1.0	3.300 ± 0.163
2	Huerta vieja	27.7 ± 1.1	4.415 ± 0.186
3	Europa	24.4 ± 1.1	3.776 ± 0.174
4	Las huertas	26.4 ± 1.1	4.343 ± 0.191
5	Picones	31.0 ± 1.2	4.193 ± 0.163
6	El orito	18.7 ± 0.9	2.408 ± 0.141
7	Glez. Ortega	18.5 ± 1.3	2.234 ± 0.181
8	Lomas del lago	9.1 ± 1.2	0.755 ± 0.181
9	Felipe Ángeles	6.9 ± 0.8	0.315 ± 0.116
10	Benito Juárez	9.0 ± 0.9	0.729 ± 0.142
11	Minera	8.2 ± 0.8	0.541 ± 0.116
12	Lomas de la pimienta	7.7 ± 0.9	0.493 ± 0.132
13	La herradura	12.9 ± 1.3	1.306 ± 0.175
14	Las haciendas	7.4 ± 0.8	0.447 ± 0.131

En las figuras 49 a la 22, se muestran los espectros de conteo alfa del ^{222}Rn y su descendencia para cada una de las muestras, en los cuales se identifican 3 picos medibles correspondientes al ^{222}Rn , ^{218}Po y ^{214}Po de energías 5.48, 6.00 y 7.68 MeV, respectivamente.

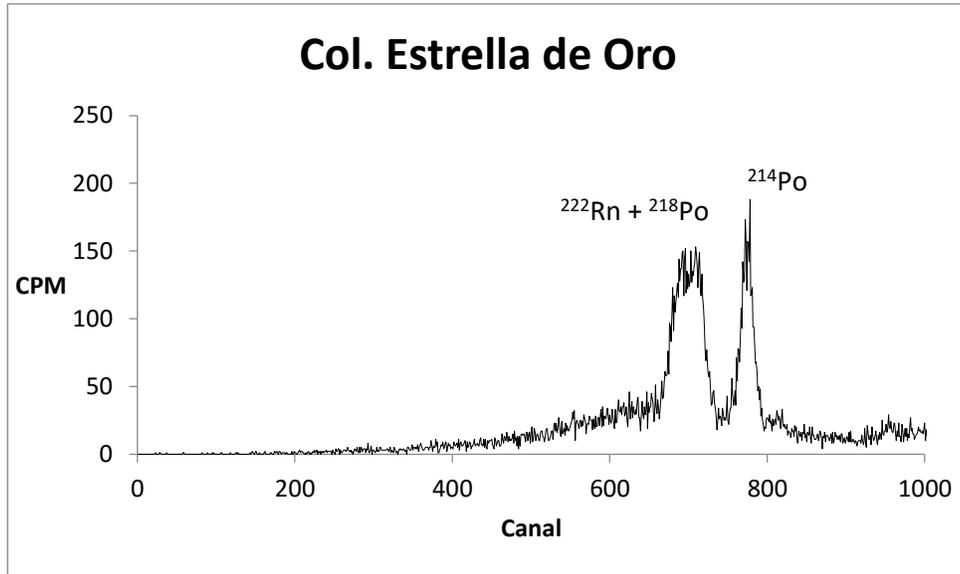


Figura 9 Espectro alfa obtenido de la muestra 1

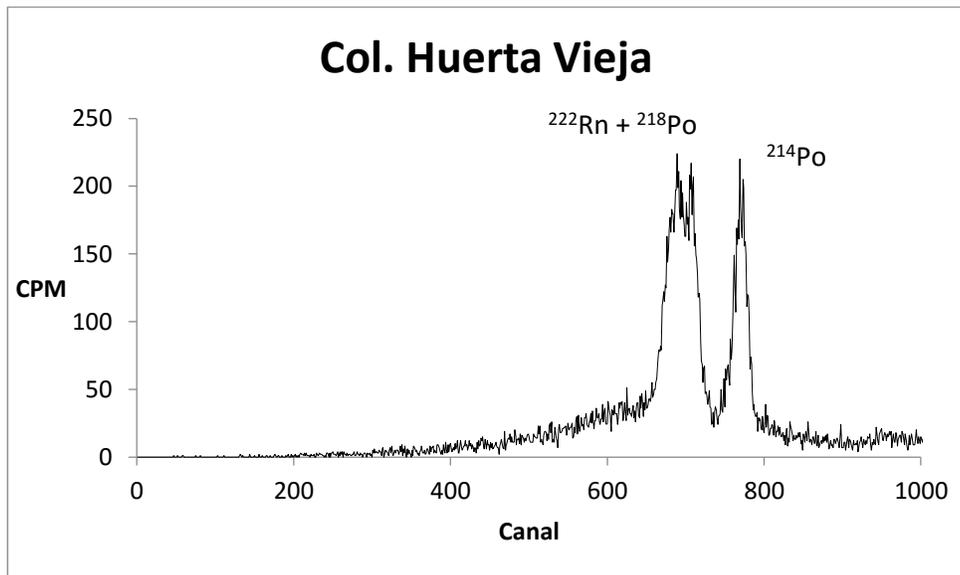


Figura 10 Espectro alfa obtenido de la muestra 2

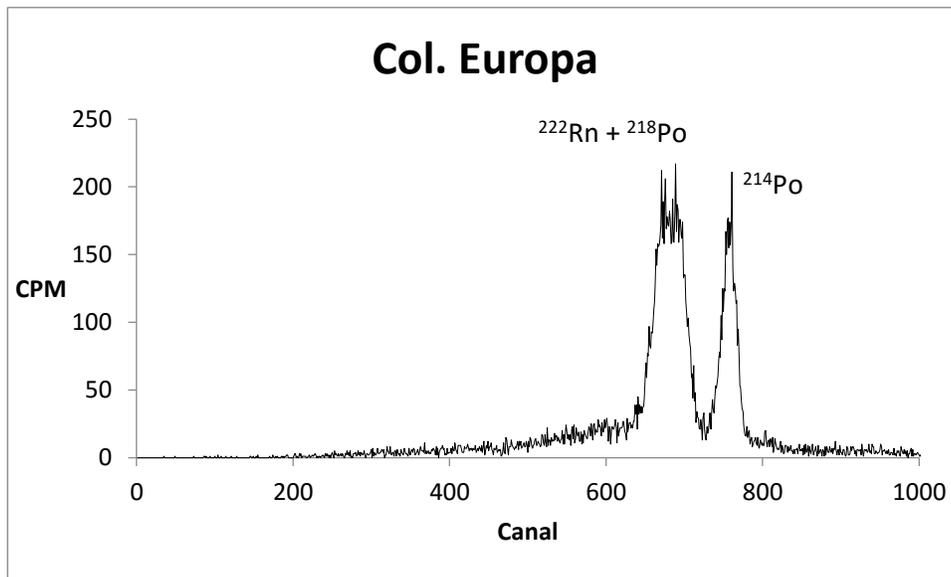


Figura 11 Espectro alfa obtenido de la muestra 3

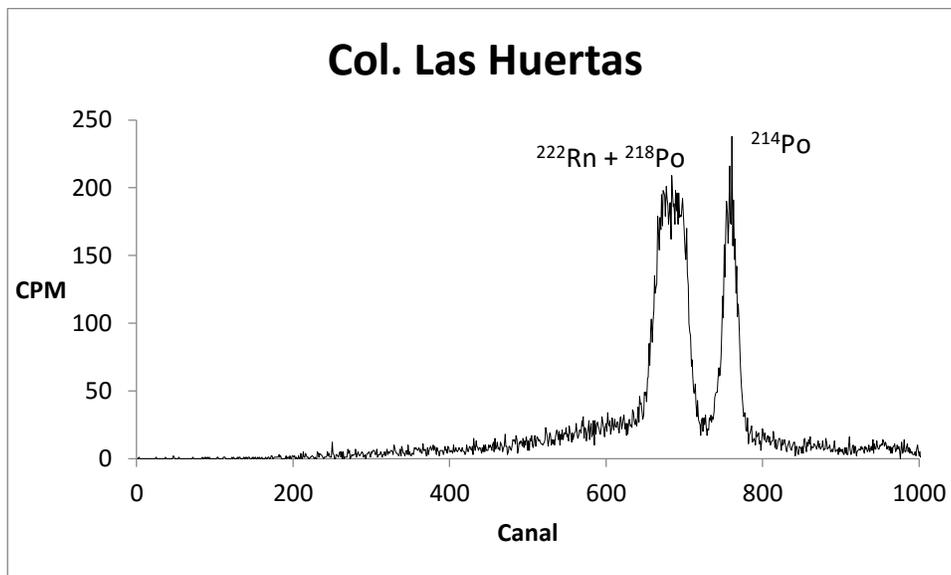


Figura 12 Espectro alfa obtenido de la muestra 4

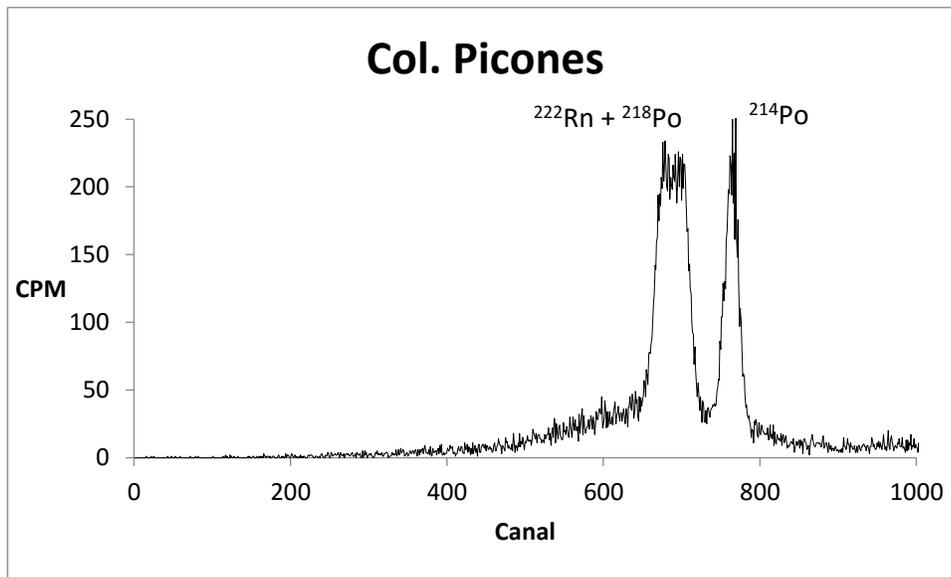


Figura 13 Espectro alfa obtenido de la muestra 5

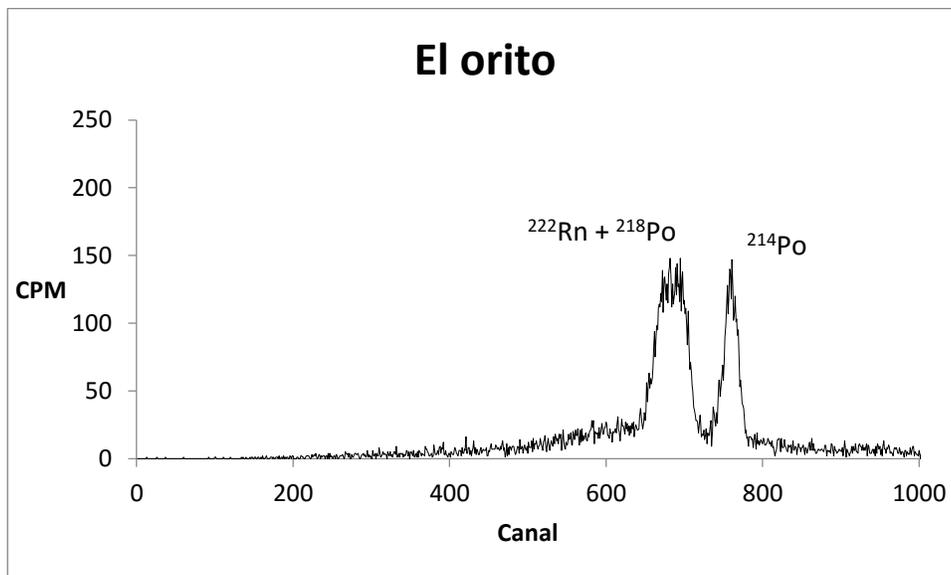


Figura 14 Espectro alfa obtenido de la muestra

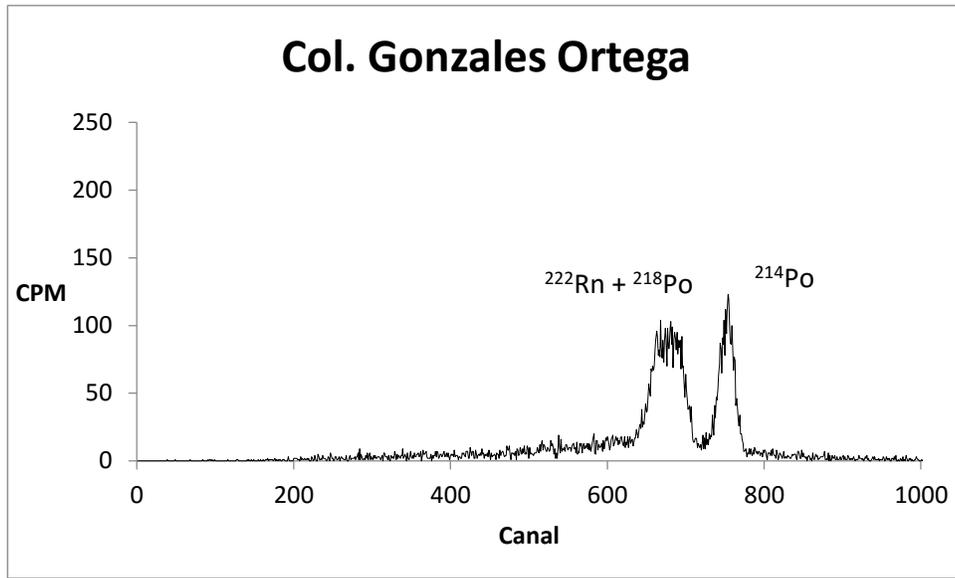


Figura 15 Espectro alfa obtenido de la muestra 7

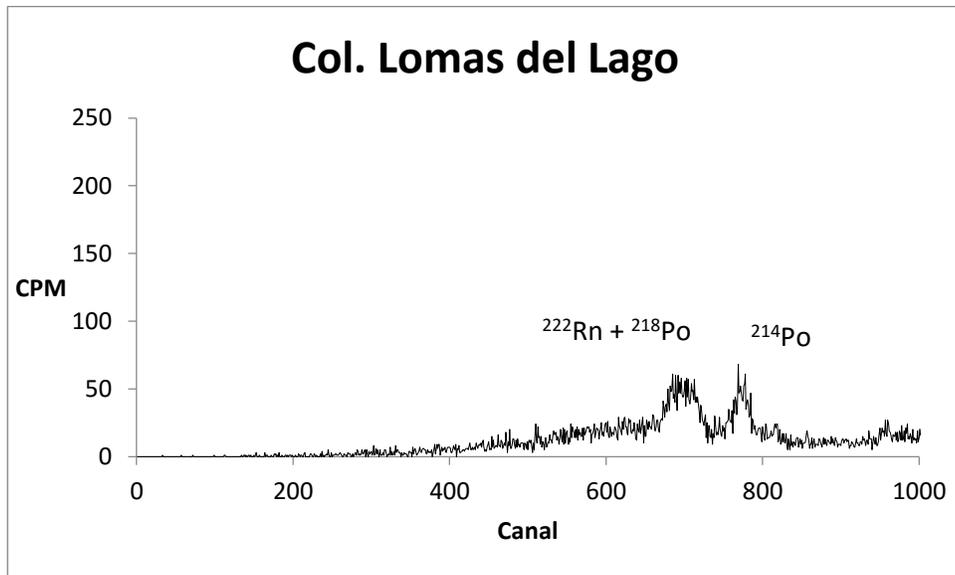


Figura 16 Espectro obtenido de la muestra 8

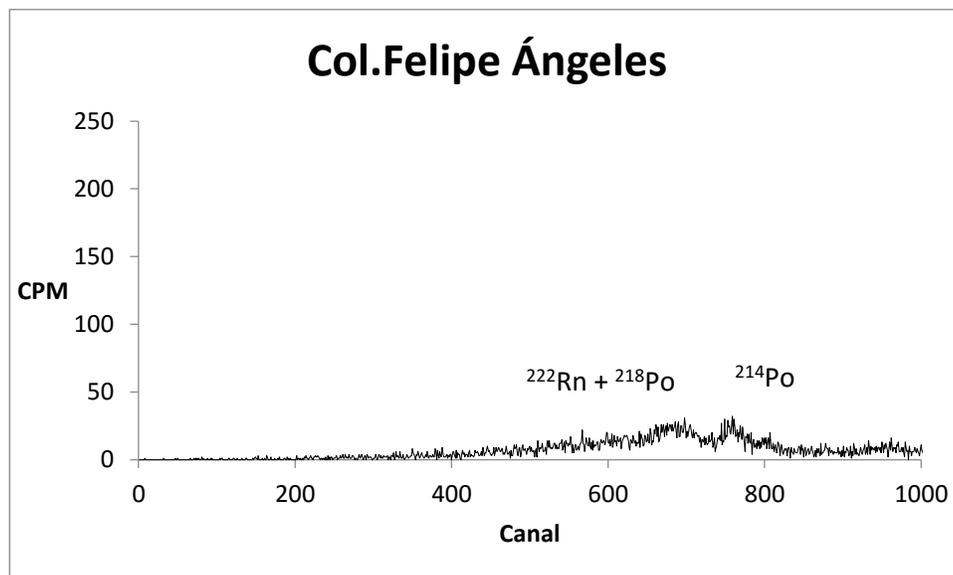


Figura 17 Espectro alfa obtenido de la muestra 9

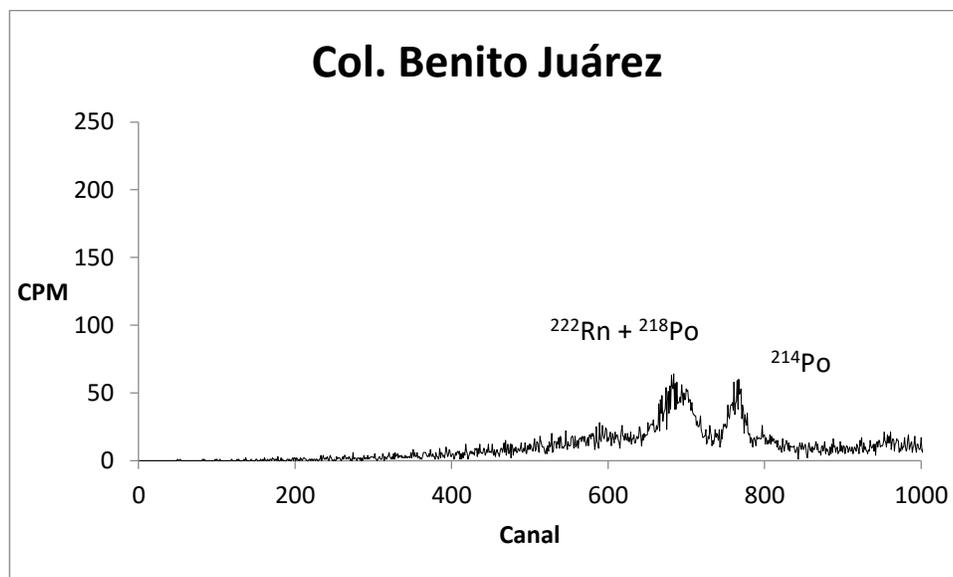


Figura 18 Espectro alfa obtenido de la muestra 10

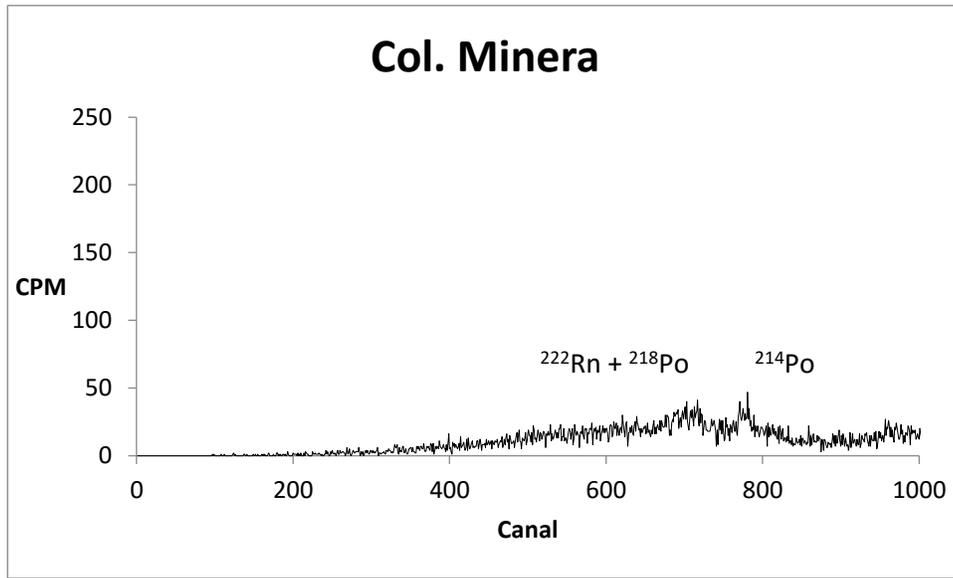


Figura 19 Espectro alfa obtenido de la muestra 11

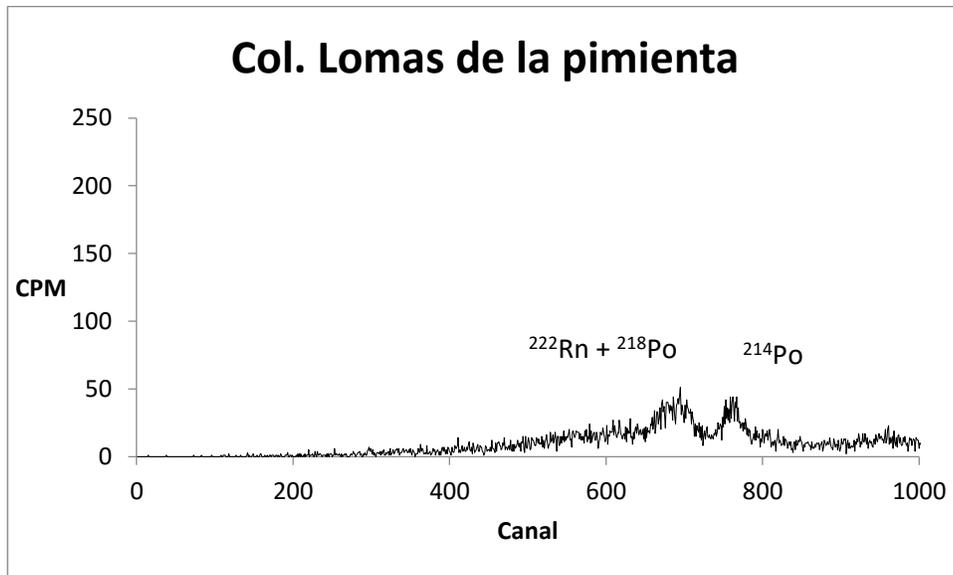


Figura 20 Espectro alfa obtenido de la muestra 12

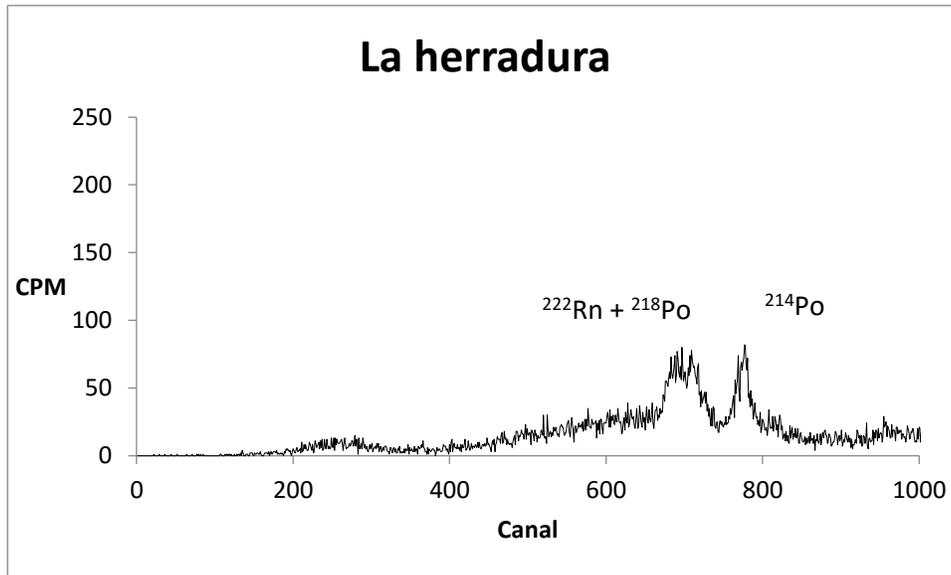


Figura 21 Espectro alfa obtenido de la muestra 13

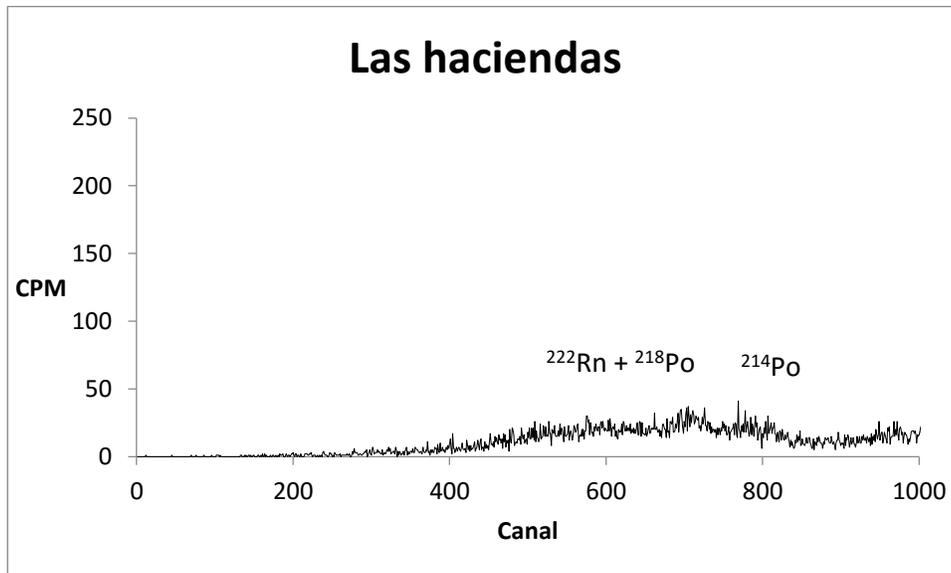


Figura 22 Espectro alfa obtenido de la muestra 14

La concentración máxima permisible de radón en agua potable de acuerdo con la OMS es 100 Bq/L, por otro lado la USEPA recomienda un límite máximo de 11.1 Bq/L. Atendiendo estas recomendaciones ninguna muestra rebasa los límites establecidos.

De manera comparativa en la tabla 6 se muestran los rangos de concentraciones de radón en agua potable, obtenidos por varios investigadores en México y diferentes partes en el mundo.

Tabla 6 Comparación de las concentraciones de ^{222}Rn en agua obtenidas en este trabajo y las reportadas por otros investigadores.

Autor	Lugar	Rango de concentración (Bq/L)
Alfaro, y otros (2002)	Michoacán, México	0.88 - 4.75
Gómez, y otros (2001)	Toluca, México	1.5 - 13
Villalba y otros (2004)	Chihuahua, México	1.4 - 33.8
Santiago H. (2004)	Falcón, Venezuela	1.4 - 5.2
Somashekar y Ravihumar (2010)	Karnatak, India	0.2 - 10.1
Khattak, Khan y Shah (2011)	Pakistán	1.6 - 18.6
Yalcin, y otros (2011)	Turquia	0.36 - 9.29
Este trabajo	Zacatecas, México	0.31 – 4.41

3.3 Dosis por ingestión y riesgo asociado

El órgano crítico o el que recibe la mayor dosis por ingesta de radón es el estómago (Husrh y otros, 1965), la dosis de radiación absorbida en el estómago se calculó conforme a la ecuación 41 y bajo el supuesto de un consumo constante de 0.6 litros de agua por día.

La energía considerada para el cálculo de la dosis al estómago proviene solamente del radón y sus hijos emisores alfa de vida media corta (^{218}Po y ^{214}Po), (Suomela y Kahlos, 1972) ya que pueden causar una dosis significativa a las paredes del estómago, sumando las energías de la emisión alfa de cada uno tenemos un total de 19.2 MeV. La emisión beta y gamma provenientes del ^{214}Pb y ^{214}Bi se pueden despreciar.

Así la dosis absorbida en cada punto de muestreo, así como la dosis equivalente usando un factor de calidad de 20, se muestran en la tabla 7.

La carcinogénesis por radiación ionizante ha sido bien establecida a lo largo de la segunda mitad del último siglo. Se observó que la radiación gamma, de manera externa, indujo cáncer de estómago en los sobrevivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, (Cothorn, 1987) y también en pacientes que reciben radioterapia para el tratamiento de cáncer cervical. Sin embargo no hay evidencia certera de que el radón que ingresa al cuerpo por ingestión provoque el desarrollo de cáncer de estómago, aunado a esto, hay quien atribuye que solo la emisión gamma del ^{214}Bi y ^{214}Pb , es la que puede provocar el cáncer de estómago (Haeley y Robbins, 1994). Sin duda alguna se requiere más investigación para esclarecer estas cuestiones. Lo que si está bien demostrado es que las partículas alfa causan cambios genómicos en las células, incluyendo mutaciones que potencializan la aparición de cáncer.

La estimación del riesgo de mortalidad por cáncer a lo largo de la vida (*Life Time Risk*) se realizó siguiendo el modelo propuesto por la USEPA en 1998, basado en la tasa de dosis absorbida. Así, el riesgo de mortalidad por cáncer por la ingestión de una concentración de radón, disuelto en agua, de 1 Bq/m^3 , a lo largo de la vida (50 años) es de 1.3×10^{-9} . Con este dato y usando la concentración promedio de radón en agua que se reporta en este trabajo, el *Life-Time Risk* por ingesta de radón se muestra en la tabla 8.

Tabla 7 Dosis absorbida y equivalente anuales debido a la ingesta de ²²²Rn en agua

Muestra	Colonia	D (mGy/a)	H (mSv/a)
1	Estrella de oro	0.480 ± 0.024	9.59 ± 0.47
2	Huerta vieja	0.642 ± 0.027	12.83 ± 0.54
3	Europa	0.549 ± 0.025	10.97 ± 0.51
4	Las huertas	0.631 ± 0.028	12.62 ± 0.55
5	Picones	0.609 ± 0.024	12.19 ± 0.47
6	El orito	0.350 ± 0.021	7.00 ± 0.41
7	Glez. Ortega	0.325 ± 0.026	6.49 ± 0.53
8	Lomas del lago	0.110 ± 0.026	2.19 ± 0.52
9	Felipe Ángeles	0.046 ± 0.017	0.92 ± 0.34
10	Benito Juárez	0.106 ± 0.021	2.12 ± 0.41
11	Minera	0.079 ± 0.017	1.57 ± 0.34
12	Lomas de la pimienta	0.072 ± 0.019	1.43 ± 0.38
13	La herradura	0.190 ± 0.025	3.80 ± 0.51
14	Las haciendas	0.065 ± 0.019	1.30 ± 0.38

Tabla 8 Riesgo de desarrollar cáncer de estómago por ingesta de ²²²Rn en agua

Concentración de radón en agua (Bq/m ³)	Riesgo de desarrollar cáncer
1 (USEPA 1998)	1.3 ×10 ⁻⁹
2090 (Este trabajo)	2.72 ×10 ⁻⁶

3.4 Dosis por inhalación y riesgo asociado

Se estima que el radón que ingresa al cuerpo por la vía de la inhalación, causa miles de muertes al año, debido a que puede provocar el desarrollo de cáncer pulmonar, solamente fumar causa más muertes por este tipo de cáncer. Dado que el radón ocurre de manera natural en casi todos los tipos de suelo, la ruta más común hacia el aire interior de una casa del gas radiactivo es la infiltración a través de grietas y de otros agujeros en las cimentaciones. Otra de las vías de entrada, es mediante el suministro de agua, ya que el radón disuelto en ella, se transfiere al aire cuando se usa agua de la ducha y de la que se usa en otras actividades de aseo en la casa, (USEPA, 2003).

Las dosis de radiación que recibe el pulmón, por inhalación de radón, que se presentan en este trabajo se deben solamente al radón que se transfiere del agua de uso doméstico, que se calcula de acuerdo con la ecuación 44. La dosis equivalente anual en cada punto de muestreo, es calculada en base a la dosis equivalente anual propuesta por la ICRP 1981 que es de 7×10^{-3} mSv/año por Bq/m³. Tanto la concentración de radón que se transfiere al aire interior, como la dosis equivalente anual debida a esta concentración, se pueden ver en la tabla 9.

Tabla 9 Concentración de ^{222}Rn que se transfiere al aire y dosis equivalente anual por inhalación

Muestra	Colonia	Radón en aire (Bq/m^3)	H ($\mu\text{Sv/a}$)
1	Estrella de oro	$0.330 \pm 2 \times 10^{-4}$	2.310 ± 0.001
2	Huerta vieja	$0.441 \pm 2 \times 10^{-4}$	3.090 ± 0.001
3	Europa	$0.378 \pm 2 \times 10^{-4}$	2.643 ± 0.001
4	Las huertas	$0.434 \pm 2 \times 10^{-4}$	3.040 ± 0.001
5	Picones	$0.419 \pm 2 \times 10^{-4}$	2.935 ± 0.001
6	El orito	$0.241 \pm 2 \times 10^{-4}$	1.686 ± 0.002
7	Glez. Ortega	$0.223 \pm 3 \times 10^{-4}$	1.564 ± 0.002
8	Lomas del lago	$0.076 \pm 3 \times 10^{-4}$	0.529 ± 0.002
9	Felipe Ángeles	$0.032 \pm 2 \times 10^{-4}$	0.221 ± 0.002
10	Benito Juárez	$0.073 \pm 2 \times 10^{-4}$	0.510 ± 0.002
11	Minera	$0.054 \pm 2 \times 10^{-4}$	0.379 ± 0.002
12	Lomas de la pimienta	$0.049 \pm 2 \times 10^{-4}$	0.345 ± 0.002
13	La herradura	$0.131 \pm 3 \times 10^{-4}$	0.914 ± 0.002
14	Las haciendas	$0.045 \pm 2 \times 10^{-4}$	0.313 ± 0.002

La concentración de radón en aire y dosis equivalente promedio son de $0.209 \pm 0.0004 \text{ Bq/m}^3$ y $1.463 \pm 0.002 \mu\text{Sv/año}$. La USEPA recomienda una concentración máxima de radón en aire interior de 148 Bq/m^3 (concentración promedio de radón en aire libre), en base a este límite se puede observar que

la concentración promedio de radón que se transfiere al aire interior de una casa está muy por debajo de este nivel.

La ocurrencia de cáncer de pulmón después de la inhalación de radón, ha sido bien establecida mediante varios estudios realizados en trabajadores de minas de uranio en varias partes del mundo los cuales estaban expuestos a altas concentraciones de radón en aire, ya que es bien sabido que las partículas alfa provenientes del radón y sus hijos ^{218}Po y ^{214}Po , pueden dañar el ADN de las células pulmonares, este daño es el primer paso en la cadena de eventos que culmina en la aparición de cáncer.

Las concentraciones aquí reportadas son bajas en comparación, sin embargo conlleva cierto riesgo. No todas las personas expuestas al radón en aire desarrollarán cáncer pulmonar, además el tiempo que lleva entre la exposición al radón y el comienzo de la enfermedad puede ser de muchos años. El riesgo de contraer cáncer de pulmón debido al radón depende de cuánto radón hay en la casa, la cantidad de tiempo que las personas permanecen en el interior de la casa y de si se es o no fumador, no hay estudios ni datos concluyentes que demuestren que la edad sea factor a tomar en cuenta.

Siguiendo el modelo propuesto por el Cuarto Comité del Consejo Nacional de Investigación sobre los Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (BEIR IV), se estima que el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón para una exposición continua de una concentración de radón en el interior de una casa de 1 Bq/m^3 de por vida es 1.6×10^{-4} , asumiendo una permanencia en el hogar del 70% del total del tiempo, independientemente de si se fuma o no. De esta manera el riesgo de desarrollo de cáncer de pulmón relacionado con la concentración promedio de radón en aire que aquí se reporta se presenta en la tabla 10.

Tabla 10 Riesgo de desarrollar cáncer de pulmón por inhalación

Concentración de radón en aire (Bq/m ³)	Riesgo de desarrollar cáncer
1 (BEIR VI)	1.6 ×10 ⁻⁴
0.209 (Este trabajo)	3.3 ×10 ⁻⁵

El riesgo de desarrollar tanto cáncer de estómago como de pulmón, por exposición a las concentraciones de radón en agua y aire reportadas en este trabajo, comparadas con los riesgos calculados con otros investigadores son del mismo orden. El cálculo de los riesgos, se basa en modelos que utilizaron los datos obtenidos de estudios epidemiológicos de los casos excesivos de cáncer que se presentaron en los sobrevivientes de las bombas atómicas de Japón, y en los trabajadores de minas de uranio en diferentes partes del mundo. El *Lite Time Risk* para cáncer de estómago y pulmón calculados en esta investigación, aunque las concentraciones de ²²²Rn en agua y aire estén por debajo de los límites máximos permisibles, indican que la probabilidad de aparición del cáncer existe.

Tabla 11 Comparación del Life Time Risk de este trabajo y el de otros investigadores

Tipo de Cáncer	Concentración de ²²² Rn en agua a la que se está expuesto (Bq/L)	Life Time Risk
Pulmón	3 (Cothorn, 1987)	1×10 ⁻⁵
	2.09 (éste trabajo)	3.3×10 ⁻⁵
Estómago	5.5 (Haeley y Robbins, 1994)	1.1×10 ⁻⁶
	2.09 (éste trabajo)	2.72×10 ⁻⁶

CAPITULO 4 CONCLUSIONES

La técnica de centelleo líquido usada para la cuantificación de la concentración en actividad de radón en agua, es un método sencillo que ofrece una alta eficiencia de conteo (80.22%) además de una sencilla preparación de muestras. Sin embargo, su baja resolución no permite la medición directa del radón, por lo que se hace mediante la medición del ^{214}Po , que en el equilibrio tiene la misma actividad que el radón.

El rango de concentraciones de radón, encontrado en las diferentes colonias va de 0.315 a 4.415 Bq/L, con una concentración promedio de 2.090 ± 0.156 Bq/L. En varios estudios referidos, se reportan concentraciones similares como se observa en la tabla 6.

El límite máximo permisible de radón en agua potable recomendado por la USEPA es 11.1 Bq/L, basándonos en este límite, en ninguna colonia, el agua del suministro no representa riesgo radiológico. De igual forma usando el límite propuesto por la OMS de 100 Bq/L, el radón disuelto en el agua no es de riesgo alguno.

Cuando se usa el agua del suministro de agua potable, ya sea para ducharse u otras actividades del quehacer doméstico, el radón se transfiere al aire del interior de la vivienda. Las concentraciones de radón en aire interior, ocasionadas por esta transferencia, van de 0.032 a 0.441 Bq/m³, con un promedio de 0.209 ± 0.0002 Bq/m³. Estas concentraciones están por debajo del límite máximo permisible establecido por la USEPA de 148 Bq/m³.

Las dosis equivalentes anuales para el estómago, considerado como el órgano crítico, por la ingesta de radón disuelto en el agua potable de las diferentes colonias de la ciudad de Zacatecas, que se muestrearon, están comprendidas en el rango de 0.92 a 12.83 mSv/a con un promedio de $6.07 \pm$

0.46 mSv/a, las cuales están por debajo del límite de dosis equivalente anual máximo permisible para órganos que marca la ICRP de 50 mSv/a.

Dentro del mismo contexto, el promedio de dosis equivalente anual para el pulmón, considerando sólo el radón que se transfiere del agua de uso doméstico al aire y que luego es inhalado, es $1.463 \pm 0.002 \mu\text{Sv/año}$, que también está por debajo del límite máximo permisible.

Las concentraciones de radón en agua y las dosis de radiación recibidas que aquí se reportan, en ambos casos están por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por diferentes organismos, sin embargo, expertos en protección radiológica consideran cualquier exposición a la radiación como potencialmente dañina y se debe minimizar tanto como sea posible.

De acuerdo con las concentraciones de radón, tanto en agua como en aire, se evaluó el riesgo de desarrollar un proceso patológico maligno como lo es el cáncer, por la exposición continua a estas concentraciones por un tiempo de vida de 50 años.

El riesgo de desarrollar cáncer de estómago, por ingesta de radón disuelto en agua, a una concentración promedio de 2090 Bq/m^3 es de 2.72×10^{-6} , lo que significa que probabilidad de la aparición del cáncer es de aproximadamente 3 casos por cada un millón de personas expuestas y el de cáncer de pulmón, debido a la inhalación de radón en el aire del interior de una casa, en una concentración promedio de 0.209 Bq/m^3 es 3.3×10^{-5} , es decir, 3 casos de cancer por cada 100 mil personas expuestas.

Los riesgos de desarrollo de cáncer estomacal y pulmonar, que aquí se reportan reflejan que, sin importar que las concentraciones de ^{222}Rn tanto en agua como en aire estén por debajo de los límites máximos permisibles, la exposición a estas puede afectar seriamente dichos órganos y la aparición de cáncer es posible.

REFERENCIAS

- Alcaraz Baños, Miguel Angel, y Carmen López Alegria. *Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico*. segunda. España: EDITUM, 2003.
- Aleissa, Khalid Abdulaziz, Abdulrahman Sayeed Alghamdi, Fahad Ibrahim Almasound, y Md. Shafiqul Islam. «Measurement of radon levels in groundwater supplies of Riyadh with liquid scintillation counter and the associated dose.» *Radiation Protection Dosimetry* 154, nº 1 (2013): 95-103.
- Alfaro, R., y otros. «Determinación de la calidad del agua y contenido de radón en los pozos localizados en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán.» *Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN*, 2002: 98-101.
- Ali Yalim, Huseyin, Bekir Oruncak, Ahmet Akkurt, Unal Ridvan, y Ismail Hakki Sarpun. «Radon concentrations and annual average effective doses of some well water in Afyonkarahisar-Cay- Sultandagi Line .» *Journal of New World Science Academy Natural and Applied Sciences*, 2007: 334-339.
- Arya, Atam P. *Fundamental of nuclear physics*. Morgantown, West Virginia: Allyn and Bacon, 1966.
- Auvinene, Anssi, Laina Salonen, Juha Pekkanen, Eero Pukkala, Taina Ilus, y Paivi Kurttio. «Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in Finland.» *International Journal of Cancer* 114 (2005): 109-113.
- Becker, D., y otros. *Radiological Protection*. Vol. 4. New York: Springer, 2005.
- Bo, Lindell. «Ingested radon as a source of human radiation exposure.» *National Institute of Radiation Protection*, 1968: 719-725.

- Canadian Nuclear Safety Commission. *Estimation of the Range of Radiation Dose for a Radon Progeny Working Level Due to Physical Parameters*. Richmond Hill, Ontario: SENES Consultants Limited, 2103.
- Cember, Herman, y Thomas E. Johnson. *Introduction to Health Physics*. Fourth. New York: Mc Graw Hill, 2009.
- Cho, J. S., J. K. Ahn, H. Ch. Kim, y D. W. Lee. «Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method.» *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004: 105-112.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear Departamento de Protección Radiológica y Ambiental. «Efecto de las radiaciones ionizantes en el ser humano.» Chile, 2010.
- Correia, John A., Steven B. Weise, Ronald J. Callahan, y William H. Strauss. *The Kinetics on Ingested Rn-222 In Humans Determined from Measurements with Xe-133*. Boston, MA: EPA, 1987.
- Cosma, C., M. Moldovan, T. Dicu, y T. Kovacs. «Radon in water from Transilvania (Rumania).» *Radiation Measurements*, 2008: 1423-1428.
- Cothorn, C. Richard. «Estimating the Health Risks of Radon in Drinking Water.» *American Water Works Association*, 1987: 153-158.
- Crawford-Brown, D. J. «The biokinetics and dosimetry of radon-222 in the human body following ingestion of groundwater.» *Environmental Geochemistry and Health* 11(1), 1989: 10-17.
- Currie, Lloyd A. «Limits for Qualitative Detection Quantitative Determination.» *Aplication to Radiochemistry. Analitical Chemistry*, 1968: 586-593.
- Dávila Rangel, J. Ignacio. *Caracterización radiológica de agua potable en las ciudades de Zacatecas y Guadalupe, del estado de Zacatecas, México (Tesis de maestría)*. San Nicolas de los Garza, N.L.: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001.

- Edler, Ronald. *Cocktails for liquid scintillation counting*. Waltham MA: PerkinElmer, Inc, 2015.
- Ehmann, W. D., y D.E. Vance. *Radiochemistry and nuclear methods of analysis*. New York: John Wiley Sons, 1993.
- Environmental Protection Agency. *Manual informativo sobre el radon . La guía para proteger a su familia y a usted del radón*. Washington, D.C.: EPA, 2003.
- Environmental Protection Agency. *National Primary Drinking Water Regulations; Radon-222*. EPA, USA: Federal register, 1999.
- Favila Reyna, Esteban. «Estudio de la concentración de radon en aguas termales en el Estado de Zacatecas, México (Tesis de maestría).» s.f.
- Galán López, M., y A. Martín Sánchez. «Present status of Rn-222 in groundwater in Extremadura.» *Journal of Environmental Radioactivity* , 2008: 1539-1534.
- Gómez, A. C., y otros. «Calidad del agua de los pozos de Toluca y Lerma, Estado de México.» México, D.F., 2001.
- González, Abel J. «Una mirada a la radiación natural.» *Hojitas de conocimiento. Comisión Nacional de Energía Atómica*, 2011: 41-42.
- Gosink, T. A., M. Baskaran, y D. F. Holleman. «Radon in the human Body from Drinking Water.» *Health Physics* 59, nº 6 (1990): 919-924.
- Haeley, Naomi H., y Edith S. Robbins. «A biokinetic model for Rn gas distribution and alpha dose in humans following ingestion.» *Environment International* 20, nº 5 (1994): 605-610.
- Henia, Balter. «Equilibrio.» *Curso Básico de Metodología de los Radioisótopos*. CIN- Facultad de Ciencias, 2011.

- Husrh, John B., Donald A. Morcken, Thomas P. Davis, y Arvin Lovaas. «The fate of radon ingested by man.» *Health Physics* 11 (1965): 465-476.
- ININ. «Radiación natural.» *Contacto Nuclear, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares* 61 (2011): 16-20.
- INSHT. *NTP: El radón y sus efectos sobre la salud*. España: Ministerio de trabajo y asuntos sociales España, 1999.
- Kendall, G. M., y T. J. Smith. «Doses to organs and tissues from radon and its decay products.» *Journal of Radiological Protection* 22, 2002: 389-406.
- Kenneth Shultis, J., y Richard E. Faw. *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*. first. Ney York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- Khattak, N. U., M. A. Khan, y M. T. Shah. «Radon concentration in drinking water sourcer of the Main Campus of the University of Peshawar and sorrounding areas, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan.» *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2011: 493-505.
- Kinner, Nancy E., James P. Malley, Jonathan A. Clement, Peter A. Quern, Gretchen S. Schell, y Carol E. Lessard. «Effects of Sampling Technique, Storage, Cocktails, Sources of Variation, and Extraction on the Liquid Scintillation Technique for Radon in Water.» *Anviromental Science and technology* 25, 1991: 1165-1171.
- Kitto, E. M. «Characteristics of liquid acintillation analysis or radon in water.» *Journal of Radioanalytival and Nuclear Chemistry*, 1994: 91-99.
- Leaney, Fred W., y Andrew Harczeg. «A rapid fielf extraction method for determination or radon in natural waters by liquid scintillation counting.» *Limnology and Oceanography: Methods* 4, 2006: 254-259.
- Leory, Claude, y Pier Giorgio Rancoita. *Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection*. Second. Singapore: World Scientific Publishing, 2009.

- López Gueta, Juan Antonio, Juan María Fornés Azcoiti, Gerardo Ramos González, y Fermín Villarroya Gil. *Las aguas subterráneas . Un recurso natural del subsuelo*. España: Instituto Geológico y Minero de España, 2009.
- Lowry, Jerry D. «Measuring Low Radon Levels in Drinking Water Supplies.» *Journal American Water Works Association* 83, nº 4 (1991): 149-153.
- M., Pedro, y Santiago H. *Determinación de los parámetros dinámicos del gas radón en aguas termales y potables del distrito Miranda, Ddo. Falcón (tesis de Maestría)*. Universidad de Zulia, Maracaibo Venezuela.
- Magill, Joseph, y Jean Galy. *Radioactivity Radionuclides Radiation*. Berlin: Springer Science and Business Media, 2005.
- Martin, James E. *Physics for Radiation Protection*. second. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2006.
- National Research Council. *Health effects of exposure to radon (BEIR VI)*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.
- National Research Council. *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. Washintong, D.C.: National Academy Press, 1999.
- Nazaroff, W. W., S. M. Doyle, A. V. Nero, y R. G. Sextro. «Patable water as a source af airborne Rn-222 in U.S. dwellings: a review and assessment.» *Health Physics* 52, nº 3 (1987): 281-295.
- Nazaroff, William W. «Radon transport from soil to air.» *Rewiews of Geophysics*, 1992: 137-160.
- Olgin Gutierrez, Maria Teresa. *Niveles de Rn-222 en las aguas de los pozos profundos del municipio de Toluca Estado de México (tesis de maestría)*. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 1990.

- Olgin Gutierrez, María Teresa. *Niveles de Rn-222 en las aguas de los pozos profundos del municipio de Toluca Estado de México, Tesis de Maestría*. Toluca, México: Universidad Autónoma de Estado de México, 1990.
- OMS. *Manual de la OMS sobre el radón en interiores . Una perspectiva de salud pública*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2015.
- Passo Jr, Charles J., y Gordon T. Cook. *Handbook of Enviromental Liquid Scintillator Spectrometry . A Compilation of Theory and Methods*. Meriden CT: PACKARD, 1994.
- Povh, Bogdan, Klaus Rith, Cistophh Scholz, y Frank Zetsche. *Particles and Nuclei . An Introduction to the Physical Concepts*. Fifth. Heidelberg, Berlin: Springer, 2006.
- Quindós, L. S., y otros. «Radón, principal fuente de radiación natural.» *Revista Española de Física*, 1989: 22-27.
- Somashekar, R. K., y P. Ravihumar. «Radon concenration in groundwater or Varahi and Markandeya river basins, Karnataka state, India.» *Journal of Radioanalytical and Chemestry*, 2010: 343-351.
- Suomela, M., y H. Kahlos. «Studies on the elimination rate and the radiation exposure following ingestion of Rn-222 rich water.» *Health Physics*, 1972: 641-652.
- Todorovic, Natasa, y otros. «Public exposure to radon in drinking water in Serbia.» *Applied Radiation and Isotopes*, 2012: 543-549.
- Tsoufanidis, Nicholas, y Sheldon Landsberger. *Measurement and detection of radiation*. USA: Taylor and Francis Group , 2011.
- Turner, J. E. *Atoms, Radiation, and Radiación Protection*. Third. Germany: WILEY-Vch Verlag GmnH and Co. KGaA, 2007.

- Villalba, L, y otros. «Radon concentrations in groundwater in the state of Chihuahua, Mexico.» *Journal of Enviromental Radioactivity*, 2005: 139-151.
- Villalba, Lourdes, Luis Colmenero Sujo, y M. E. Montero Cabrera. *Determinación de Rn-222 en muestras de agua de pozos y domicilio de las ciudades de Chihuahua y Aldama, México*. Congreso Internacional SNM y SMRS, 2004.
- World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality*. Switzerland: WHO, 2011.
- Yalcin, Sezai, Orhan Gurler, Urkiye Akar Tarim, Fulya Inciri, Gokay Kaynak, y Ozcan Gondogdu. «Measurements of radon concentration in drinking water samples from Kastamonu (Turkey).» *Isotopes in Enviromental and Health Studies*, 2011: 438-445.
- Yusuoka, Yumi, y otros. «Experimental demonstration for measurement of radon in water by liquid Scintillation counter using large vials.» *Radiation Emergency Medicine* 3, nº 2 (2014): 39-42.