



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**MITIGACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE
RADÓN INTRAMUROS MEDIANTE CAPTURA
EN AGUA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

MARIANA CERDA ZORRILLA



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. GUILLERMO CIRANO ESPINOSA
GARCÍA**

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Cerda

Zorrilla

Mariana

55 86 73 31

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

304588020

2. Datos del tutor

Dr

Guillermo Cirano

Espinosa

García

3. Datos del sinodal 1

Dr

Jorge

Rickards

Campbell

4. Datos del sinodal 2

Dr

Fermín

Castillo

Mejía

5. Datos del sinodal 3

M en C

Manuel René

Garduño

López

6. Datos del sinodal 4

M en C

Jesús Armando

Lara

Velázquez

7. Datos del trabajo escrito.

Mitigación de la concentración de radón intramuros mediante captura en agua.

61 p

2012

Índice

Introducción.....	5
Antecedentes	6
Capítulo I. Aspectos Fundamentales	8
1.1 Estructura atómica	8
1.2 Decaimiento radiactivo.....	9
1.3 Radiación alfa, beta y gamma	10
1.4 Interacción radiación con materia	13
1.4.1 Interacción de partículas cargadas con la materia	13
1.4.2. Absorción de radiación electromagnética.	15
1.5 Series radiactivas naturales.....	16
1.6 Gas radón.....	17
1.7 Niveles de acción internacionales sobre concentraciones de Radón intramuros.....	19
1.8 Daños a la salud debido a concentraciones mayores que el nivel recomendado de ²²² Rn.	20
1.9 Detección de radón	21
1.10 Mitigación de radón.....	23
1.11 Física de aerosoles.....	24
1.11.1 Movimiento de los aerosoles.....	24
Capítulo II. Metodología	28
2.1 Antecedentes del estudio.	28
2.2 Medición de radón	30
2.3 Medición de radón y proceso de mitigación	30
2.3.1 Medición de radón en aire.....	30
2.3.2 Método de deshumidificación.	30
2.3.3 Variación de la humedad.....	31
2.3.4 Medición de radón en agua	31
2.3.5 Medición de radón en el aire de la muestra.	32
Capítulo III. Instrumentación	33
3.1 Sistema de detección dinámico. Medición de concentración de radón en aire.	33
3.2 Sistema de detección dinámico. Medición de concentración de radón en agua.....	35
3.3 Protocolo de medición de concentración de radón en agua con el equipo AquaKIT.	36
3.4 Adquisición de datos	37
Capítulo IV. Resultados	38

4.1 Relación entre concentración de ^{222}Rn y humedad relativa.....	38
4.2 Medición de la concentración de radón en agua.	39
4.2.1 Muestra I. Disminución de humedad.	39
4.2.2 Muestra II. Humedad constante.....	41
4.2.3 Agua destilada.	42
4.2.4 Muestra III. Agua con radón de generador.....	42
4.3 Comparación de niveles de concentración de las aguas medidas.....	44
Capítulo V. Radón y Salud.	49
Conclusiones.	53
Apéndice I: Conceptos	54
Apéndice II: Unidades.....	56
Apéndice III: Instituciones.....	57
REFERENCIAS.....	58

Introducción.

La radiación ambiental es un tema de estudio fundamental para el ser humano. Al ser el radón un gas radiactivo y el principal contribuyente a esta radiación, tanto su medición como el estudio de su comportamiento y mitigación de lugares cerrados, es primordial para la comunidad científica, los estudios ambientales y en la salud pública.

Los lugares cerrados es donde normalmente permanecemos la mayor cantidad tiempo, ya que en esta descripción se incluyen las escuelas, los lugares de trabajo, hospitales, casas y edificios. Esto implica que si en estos lugares se tiene una concentración de radón mayor a la del nivel de acción, podría existir la posibilidad de tener un problema de salud y más específicamente cáncer pulmonar.

Hoy en día se le asocia al radón ser la segunda causa de cáncer de pulmón en el mundo, hecho que lo convierte en un problema de salud pública mundial. Es por esta razón que la búsqueda de nuevos métodos de mitigación es algo vigente e importante.

El objetivo de este trabajo de tesis es estudiar y proponer un método de mitigación de concentración de radón intramuros, mediante la captura del átomo de radón en aire, en la molécula de agua. Siendo este un método novedoso, simple tanto arquitectónica como operacionalmente y de bajo costo relativo comparado con otros métodos.

Este método de mitigación por atrapamiento se basa en que el radón que se encuentra en el aire de un lugar cerrado es adherido a las moléculas de agua, que se encuentran en la humedad, por medio de fuerzas de Van der Waals.

Los átomos de ^{222}Rn entonces se moverán siguiendo los principios de los aerosoles ya que a la humedad se le puede caracterizar como uno de estos. Por esta razón al momento de capturar la humedad, también el radón será mitigado.

Esta tesis está estructurada en cinco capítulos. En el primero se tratan los aspectos fundamentales físicos que regirán el trabajo, como lo son: la física de radiaciones, las series radiactivas, las características físicas del radón, los métodos de su detección y de mitigación, los niveles de acción recomendados por distintas organizaciones internacionales y la física de los aerosoles.

En el segundo capítulo se hablará de la metodología que sigue este trabajo, comenzando por los antecedentes que se tienen, como la ubicación del "lugar de estudio" y la concentración de radón y humedad en él medidas. También se describe el método utilizado para la medición de radón tanto en aire como en agua por medio de un sistema de detección dinámico. Finalmente se muestra el método de deshumidificación en el que se basa el método de mitigación por atrapamiento sugerido.

El tercer capítulo describe la instrumentación utilizada para llevar a cabo este trabajo de tesis, el manejo de datos que se empleó tanto para la medición de radón en aire como para radón en agua y el protocolo de medición de concentración de radón en agua con el equipo AquaKIT[®].

En el cuarto capítulo se dan los resultados obtenidos de los distintos experimentos y estudios realizados, comparando estos con los niveles de fondo para la comprobación del atrapamiento de radón en las moléculas de agua y el funcionamiento del equipo de detección para futuras interpretaciones.

En el quinto capítulo se encuentra una revisión de los problemas de salud en los que se encuentra relacionado el gas radón, dejando con esto abierta una puerta a estudios futuros.

Finalmente se encuentran las conclusiones de este trabajo en las que se resumen los resultados obtenidos y las posibilidades a futuro del mismo. También se presentan tres apéndices que contienen: un glosario de conceptos básicos, unidades y una tabla de instituciones, respectivamente, y por supuesto la bibliografía pertinente.

Antecedentes

La radiación ambiental es un tema de interés mundial, ya que al estar los seres vivos expuestos a ella, es de importancia tanto en ciencia como en salud, conocer los parámetros de exposición a estas radiaciones ionizantes. Las principales fuentes de radiación ionizante natural son: los rayos cósmicos, la radiación terrestre, la radiación interna y el radón (Rn^{222}) [5]. Este último tiene una contribución del 36.66% de la dosis anual (NCRP 160, 2006) de la radiación total a la que está expuesto el hombre, por lo cual su estudio y medición es fundamental, compitiendo con los datos (2006) de aportación de dosis al ser humano por diagnósticos y tratamientos médicos, que se han convertido en la actualidad en un problema de salud.

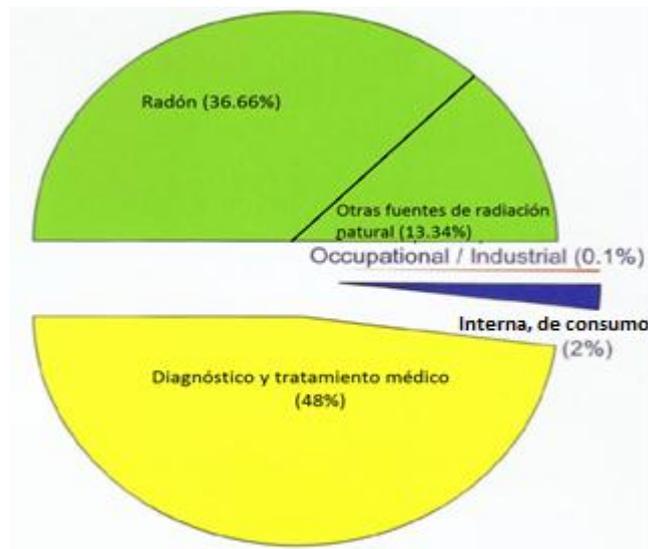


Figura 1. Diagrama proporcional de la dosis anual recibida por el Ser Humano a lo largo del año. [26]

La referencia de la contribución del radón en proporción a la radiación ambiental se puede observar a continuación.

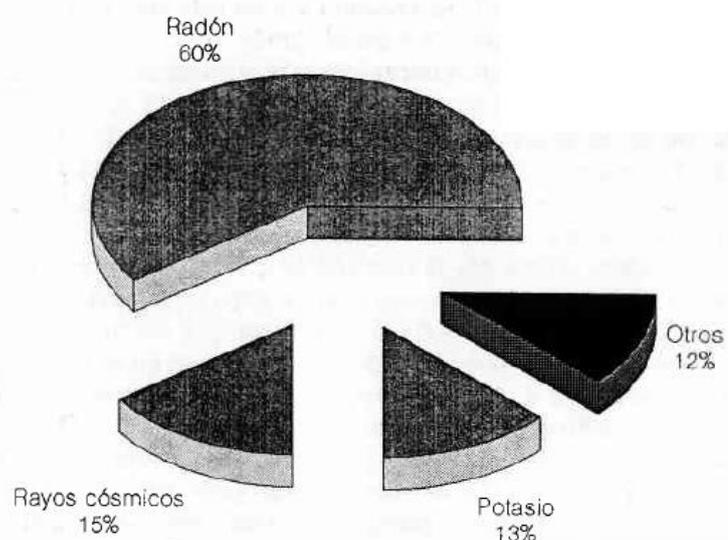


Figura 2. Dosis anual de radiación ambiental recibida por los humanos. [4]

El radón es un gas noble, radiactivo, soluble en agua, incoloro, inodoro e insípido que resulta de la cadena del decaimiento natural del ^{238}U . Cuenta con una vida media de 3.82 días,

siendo emisor de partículas alfa de 5.5 MeV y que tiene como productos del decaimiento los isótopos: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po , con energías de 6, 1.02, 3.27 y 7.68 MeV respectivamente. [1]

Los productos del decaimiento del radón son responsables de daños a la salud, principalmente del cáncer de pulmón. Alrededor de 1920 se comenzó a estudiar el problema del cáncer de pulmón asociado a los mineros, los cuales pasaban largas jornadas bajo tierra [5]. En base al estudio de los trabajadores en minas se despertó el interés en el tema del radón, sin embargo en los años 50's se encontraron algunas casas donde las concentraciones de este gas eran altas, más altas incluso que algunas minas. Esto alarmó a la comunidad científica y médica, las cuales comenzaron a hacer investigación sobre este fenómeno y a buscar alternativas de mitigación.

La propiedad del ^{222}Rn de ser soluble en agua añade un problema más para la salud, ya que con esto se tiene un medio más de ingesta. Por ejemplo al ser un manto acuífero la fuente principal de abastecimiento de agua de una población y existir la posibilidad de que contenga altas concentraciones de radón y que los que la beban ingerirán. Por lo tanto la población posiblemente presentará daños en órganos del aparato digestivo y en otros órganos asociados.

Actualmente se ha estudiado internacionalmente y con gran impulso la distribución de concentración de radón en casas y edificios, posteriormente se ha visto la necesidad de evaluar lugares de trabajo y más recientemente guarderías de niños o áreas cerradas donde permanecen infantes por periodos de tiempo importantes. Por lo que el estudiar y encontrar métodos de mitigación de radón intramuros (tema de esta tesis) que sean eficientes, funcionales, que su instalación no requiera grandes modificaciones arquitectónicas y a costos razonables, es un asunto de actual importancia desde el punto de vista científico, tecnológico y por supuesto de salud pública.

Capítulo I. Aspectos Fundamentales

1.1 Estructura atómica

El universo se compone de materia, la cual está compuesta de elementos los cuales a su vez están compuestos de átomos. Los átomos han sido estudiados desde la época de los griegos, quienes los pensaban como el límite indivisible de la materia, es decir partículas individuales de materia. Sin embargo en la modernidad se ha mostrado que los átomos no son sólidos, ni los objetos indivisibles que los griegos creían, pero se sabe que consiste de un núcleo positivo rodeado por un número suficiente de electrones negativos para que sean eléctricamente neutros. El núcleo es la parte central, positivamente cargada del átomo y está compuesta de neutrones y protones, que se conocen como nucleones.

- Protones: un protón (p) tiene carga eléctrica positiva de magnitud uno en la escala nuclear y una masa de aproximadamente una unidad de masa atómica (uma). A su vez se ha descubierto que este al igual que el neutrón están formados por 3 quarks, lo que los hace parte de la familia de los bariones, también son considerados fermiones al tener espín semi-entero.
- Electrones: los electrones (e^-) tienen una carga eléctrica negativa de la misma magnitud que la carga positiva de los protones, pero tiene una masa de $1/1840$ uma.
- Neutrones: el neutrón (N) es eléctricamente neutro y tiene una masa aproximada a una unidad de masa atómica. [1]

El número de protones recibe el nombre de número atómico Z. El número de nucleones A (número másico), queda determinado como la suma del número de protones más el número de neutrones: $A=Z+N$. A los átomos que les faltan uno o más electrones se les conoce como iones positivos y a los que el número de electrones excede el número atómico se les llama iones negativos.

Con esta aproximación del átomo (Rutherford) se pudo estimar el tamaño del núcleo a un valor de 10^{-15} m, encontrando que el volumen del núcleo es proporcional al número de nucleones contenidos, por lo que se puede calcular el radio del núcleo de manera aproximada como:

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

donde $R_0 = 1.2 \times 10^{-15}$ m

Existen diferentes variedades atómicas, como los isótopos, los cuales son elementos químicos que contienen diferente número de neutrones. La notación que describe a un isótopo es: ${}^A_Z X_N$, pero en general como el número atómico Z es el que caracteriza a dicho elemento, sólo se usa la notación ${}^A X$, y así, queda definido un cierto isótopo; por ejemplo el radón con 222 nucleones: radón-222 que también se escribirá como ${}^{222}\text{Rn}$.

El núcleo atómico permanece unido debido a la llamada fuerza fuerte que existe entre los nucleones, tiene un alcance muy corto, de tal forma que un nucleón interactúa más fuertemente con sus vecinos más cercanos. Se conoce que esta fuerza entre los nucleones es atractiva y debe de ser más grande que la fuerza eléctrica repulsiva entre los protones. Aun así,

se requiere la presencia de los neutrones para aumentar la fuerza fuerte y así estabilizar al núcleo. [2]

En los núcleos más abundantes, los elementos ligeros ($Z < 20$), el número de neutrones es aproximado al número de protones, $N=Z$, estos isótopos son más estables. Esta tendencia se da por la existencia de los niveles de energía nuclear, ya que los nucleones son fermiones y obedecen el principio de exclusión de Pauli, que dice que cada nivel de energía sólo puede contener partículas de espines opuestos, estos niveles de energía se van llenando en secuencia con una configuración de mínima energía y de máxima estabilidad.

Para elementos más grandes, esta estabilidad se obtiene con mayor número de neutrones, pero hay un límite para mantener a los protones y neutrones en el núcleo, en donde la repulsión eléctrica es mayor a la fuerza fuerte de los nucleones, este límite es representado por el isótopo ^{209}Bi , que es el núcleo estable más pesado.

1.2 Decaimiento radiactivo.

La **radiactividad** puede ser definida como la emisión espontánea de masa y/o energía de los átomos que resulta en la transformación de nuevos elementos. Estas transformaciones se llevan a cabo por uno o varios mecanismos diferentes, en estos se incluyen la emisión de partículas alfa, partículas beta, positrones y captura de electrones en los orbitales. Cada una de estas reacciones puede o no llevarse a cabo acompañada por emisión de radiación gamma. [3]

Los diferentes isótopos son transformados a diferentes velocidades y cada uno de estos tiene su propia velocidad de transformación. Así el decaimiento radiactivo de una muestra es estadístico en la naturaleza y es imposible predecir el tiempo de desintegración de un átomo en particular. El resultado de este comportamiento aleatorio para un átomo en particular es que **la ley de decaimiento radiactivo** en la naturaleza es exponencial y es expresada como:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Donde N_0 es el número de los núcleos iniciales, N es el número de núcleos presentes al tiempo t y λ es la constante de decaimiento radiactivo.

La vida media de un núcleo radiactivo es el tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo radiactivo

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (3)$$

De lo que se obtiene,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda \tau_{1/2}} \quad (4)$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda \tau_{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (6)$$

Entonces la velocidad de desintegración o **actividad** de una muestra de isótopos es proporcional al número de núcleos inestables, lo que también varía exponencialmente con el tiempo [1]

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

1.3 Radiación alfa, beta y gamma

Emisión Alfa: Una partícula Alfa consistente de un ensamble de dos protones y dos neutrones altamente energético que es emitido desde el núcleo de un isótopo radioactivo. Tiene carga positiva, y es una partícula masiva. Debido a que el número atómico y el número másico cambian en la transición alfa, se tiene:



Las partículas alfa son esencialmente monoenergéticas. Sin embargo, los espectros alfas muestran grupos de energías discretas, con pequeñas diferencias de energía entre los diferentes grupos. Estas pequeñas diferencias se atribuyen a leves diferencias en los niveles de energía del núcleo hijo, esto es que, un núcleo que emite una de las partículas alfa de mayor energía para cualquier isótopo particular es dejado en su estado base. Un núcleo dejado en un estado excitado emite esta energía de excitación en forma de un rayo gamma, la cual es radiación electromagnética. Como se puede ver un la figura 3.

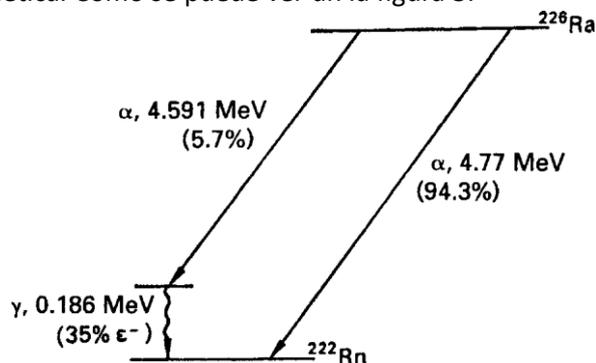


Figura 3. Decaimiento alfa del Ra-226 [1]

Las partículas alfa están extremadamente limitadas en su capacidad de penetrar la materia, estas pueden ser detenidas por una hoja de papel o bien en unos cuantos milímetros de aire. También al ser monoenergéticas todas las partículas alfa que corresponden a un mismo radioisótopo, poseen la misma probabilidad de interacción y en consecuencia igual alcance. [3]

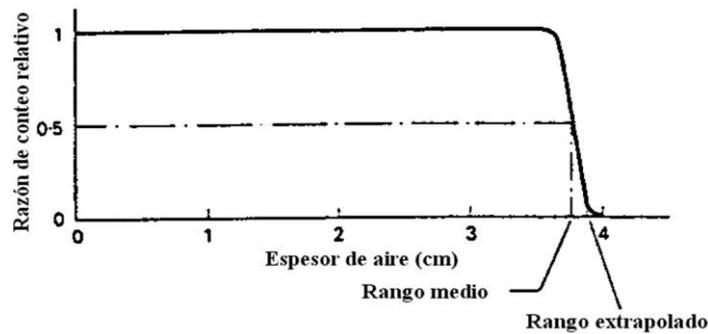


Figura 4. Alcance de una partícula alfa en el aire [1]

Para estimar el alcance de las partículas alfa en aire se puede usar la siguiente forma empírica

$$R(\text{aire}) = 0.318E^{3/2} \quad (9)$$

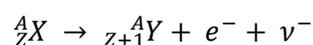
donde el alcance R está dado en centímetros y la energía E la de partícula alfa está en MeV. En alcance en sólidos se obtiene a partir del alcance en aire de acuerdo con la ecuación:

$$R(\text{sólido}) = 3.2 \times 10^{-4} R(\text{aire}) \sqrt{\frac{A}{\rho}} \quad (10)$$

Donde A es el número de masa del sólido y ρ es su densidad en g/cm^3 .

Emisión Beta: Igual que la desintegración alfa, la desintegración beta alterará la composición del núcleo para hacerlo más estable y puede ocurrir por tres formas:

i) Con emisión de un electrón. El modo más frecuente de desintegración es la (β^-) o beta negativo, que es la emisión de un electrón o partícula beta β^- debido a que el neutrón se convierte en un protón liberándose una partícula beta y un antineutrino del electrón: Cuando ocurre esta desintegración, el átomo resultante tiene el mismo número de nucleones pero cambia su número atómico al aumentar un protón. El neutrino ν es una partícula sin carga, al igual que su antipartícula el antineutrino $\bar{\nu}$; estas partículas también se llevan parte de la energía de la desintegración.

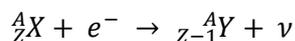


ii) **Con emisión de un positrón.** El positrón fue descubierto en 1932 y dos años después se encontró su emisión espontánea en cierto núcleo. Las propiedades de un positrón son idénticas que las del electrón, excepto que su carga es $+e$ en lugar de $-e$. Esta desintegración también conocida como beta positivo, implica la conversión de un protón dentro de un núcleo a un neutrón, un positrón y un neutrino:



Un neutrón fuera del núcleo puede convertirse en un protón por desintegración beta, dado que su masa es mayor que la del protón. Pero el protón sólo podrá transformarse en un neutrón dentro de un núcleo. La emisión de un positrón lleva a la creación de un núcleo hijo de menor número atómico, con mismo número de nucleones.

iii) **Captura electrónica.** El núcleo puede atrapar un electrón de las capas más internas del átomo, convirtiendo un protón en un neutrón más un neutrino:



Estas partículas no monoenergéticas y son emitidas en un continuo de energías hasta un valor máximo. El principal riesgo radiológico que presentan las radiaciones beta la llamada "radiación de frenado" (Bremsstrahlung), que son rayos X producto de la interacción con materiales de alto número atómico

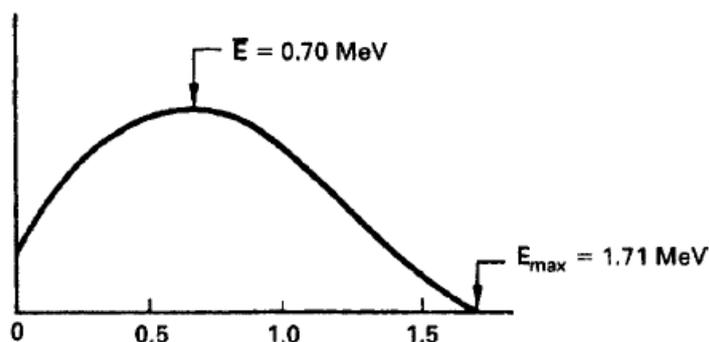
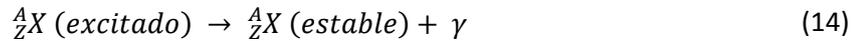


Figura 5. Espectro de energías de una partícula beta [1]

Emisión gamma: La radiación gamma (γ) pertenecen a la clase conocida como radiación electromagnética, la cual es emitida del núcleo de los átomos excitados a consecuencia de una transformación radiactiva; estos resultan ser un mecanismo de eliminación de energía de

excitación de los núcleos. Este tipo de radiación consiste en cuantos de energía transmitidos en forma de movimiento ondulatorio, con una longitud de onda específica. La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, i.e. $E \propto 1/\lambda$ donde E es la energía del cuanto o fotón de la radiación electromagnética y λ es la longitud de onda. [1]



1.4 Interacción radiación con materia

Cuando se habla de reacciones nucleares se hace referencia a todo tipo de interacción con los núcleos atómicos. Las radiaciones en general están conformadas por neutrones y fotones (neutros eléctricamente) y por partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, etc.). La diferenciación de ambos grupos es muy importante al ser los mecanismos de interacción completamente diferentes.

Las partículas neutras presentan la propiedad de interactuar con los electrones atómicos (fotones) y con los núcleos (fotones y neutrones) en un solo proceso, desapareciendo luego del haz original. Las partículas cargadas, en cambio, lo hacen básicamente vía interacción Coulombiana tanto con electrones como con núcleos atómicos, en procesos de múltiples etapas.

En esta sección se explicará de manera general la interacción de las partículas cargadas y la radiación electromagnética con la materia.

1.4.1 Interacción de partículas cargadas con la materia

La interacción de partículas cargadas con la materia tiene lugar a través de colisiones elásticas o inelásticas con núcleos atómicos, con electrones orbitales o con cargas libres. Se dice que se tiene una colisión elástica cuando la energía cinética total del sistema, o sea del conjunto de partículas que intervienen, se mantiene constante.

En cambio la interacción es inelástica cuando esa energía no se conserva; o sea cuando parte de la misma se transforma en algún otro tipo de energía disminuyendo su magnitud. En términos generales las partículas cargadas interactúan con la materia por una de las cuatro alternativas siguientes:

- Colisión elástica con electrones atómicos
- Colisión elástica con núcleos
- Colisión inelástica con electrones atómicos
- Colisión inelástica con núcleos

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio se dan, con distintas probabilidades, algunos de los cuatro procesos indicados. En todos ellos la partícula pierde energía cinética ya sea cediéndola como tal a los electrones o al núcleo con el que interactúa y transformándola en energía de excitación, o convirtiéndola en radiación electromagnética (radiación de frenado).

1.4.1.1. Radiación de frenado

Cuando una partícula cargada con alta energía colisiona con un núcleo atómico por interacción coulombiana se pueden producir bruscas aceleraciones de acuerdo con las leyes de la electrodinámica. Estas aceleraciones darán lugar a la emisión de radiación electromagnética de espectro continuo. Este fenómeno se conoce como radiación de frenado (Bremsstrahlung) y constituye un importante mecanismo de pérdida de la radiación beta, como se mencionó anteriormente.

1.4.1.2. Absorción de partículas alfa e iones pesados

Las partículas alfa constituyen el grupo de partículas cargadas pesadas, al estar constituida por dos protones y dos neutrones, poseen una masa aproximada de 6,000 veces la masa del electrón y al ser proporcional a la energía cinética, tienen una velocidad mucho menor. Esta propiedad y el hecho de poseer una doble carga positiva le confieren a las partículas alfa una elevada probabilidad de interacción.

Su interacción con la materia produce principalmente ionización y excitación en los átomos del absorbente, no existiendo prácticamente radiación de frenado. Estas partículas, emitidas por los núcleos atómicos con energías comprendidas entre los 3 y los 9 MeV son partículas no relativistas (sus velocidades están comprendidas entre 1.1 y 2.2×10^9 cm/s) que se absorben fácilmente en la materia. Una hoja de papel o algunos centímetros de aire bastan para absorber totalmente partículas alfa producidas en reacciones nucleares.

La ionización específica de las partículas α , es muy alta y puede variar entre 5,000 y 80,000 pares iónicos por centímetro de recorrido. En el aire, a medida que su velocidad disminuye, aumenta su ionización específica hasta alcanzar su máximo valor al final de su recorrido, según puede apreciarse en la figura 6.

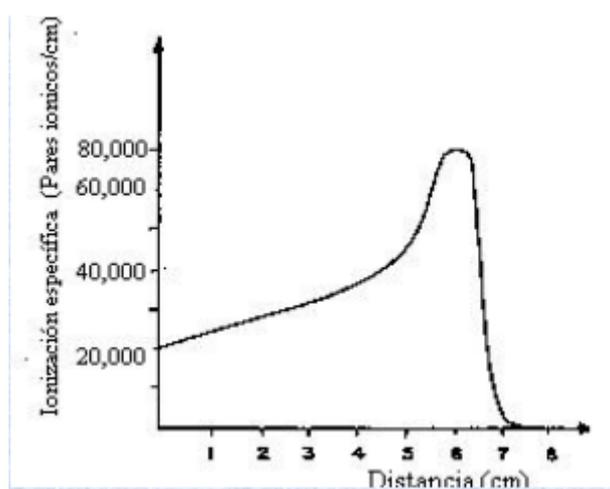


Figura 6. Ionización por centímetro de partículas alfa. [3]

1.4.1.3. Absorción de partículas beta.

Las partículas beta negativas o positivas de origen nuclear, tienen velocidades que pueden llegar hasta prácticamente la velocidad de la luz. Pese a ello sus energías son menores en general que las de las partículas alfa, ya que en su mayoría no alcanzan los 4 MeV. Estas altas velocidades obligan a tratar la radiación beta en forma relativista.

Las partículas beta son mucho más penetrantes que las alfa, lo que hace necesario el empleo de métodos muy distintos para las mediciones de absorción. Para tener una idea comparativa hay que tener en cuenta que una partícula alfa, de 3 MeV, tiene un alcance de 2,8 cm en aire en condiciones patrón y produce alrededor de 4000 pares iónicos por mm de recorrido, mientras que una partícula beta de igual energía tiene un alcance en aire de más de 1000 cm y sólo produce 4 pares iónicos por mm. El que sean tan penetrantes permite emplear absorbentes sólidos que resultan más prácticos que el aire.

1.4.2. Absorción de radiación electromagnética.

La radiación X y gamma, al no tener carga, no pueden ser frenados lentamente por ionización al atravesar un material. Llevan a cabo otros mecanismos que al final los hacen desaparecer, transfiriendo su energía, pueden atravesar varios centímetros de un sólido, o cientos de metros de aire, sin sufrir ningún proceso ni afectar la materia que cruzan. Luego sufren uno de los tres efectos y depositan allí gran parte de su energía. Los tres mecanismos de interacción con la materia son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares; que se describen en forma gráfica en la Figura 7.

a) El *efecto fotoeléctrico* consiste en que el fotón se encuentra con un electrón del material y le transfiere toda su energía, desapareciendo el fotón original. El electrón secundario adquiere toda la energía del fotón en forma de energía cinética, y es suficiente para desligarlo de su átomo y convertirlo en proyectil. Se frena éste por ionización y excitación del material

b) En el *efecto Compton* el fotón choca con un electrón como si fuera un choque entre dos esferas elásticas. El electrón secundario adquiere sólo parte de la energía del fotón y el resto se la lleva otro fotón de menor energía y desviado.

c) Cuando un fotón energético se acerca al campo eléctrico intenso de un núcleo puede suceder la *producción de pares*. En este caso el fotón se transforma en un par electrón- positrón. Como la suma de las masas del par es 1.02 MeV, no puede suceder si la energía del fotón es menor que esta cantidad. Si la energía del fotón original es mayor que 1.02 MeV, el excedente se lo reparten el electrón y el positrón como energía cinética, pudiendo ionizar el material. El positrón al final de su trayecto forma un positronio y luego se aniquila produciéndose dos fotones de aniquilación, de 0.51 MeV cada uno.

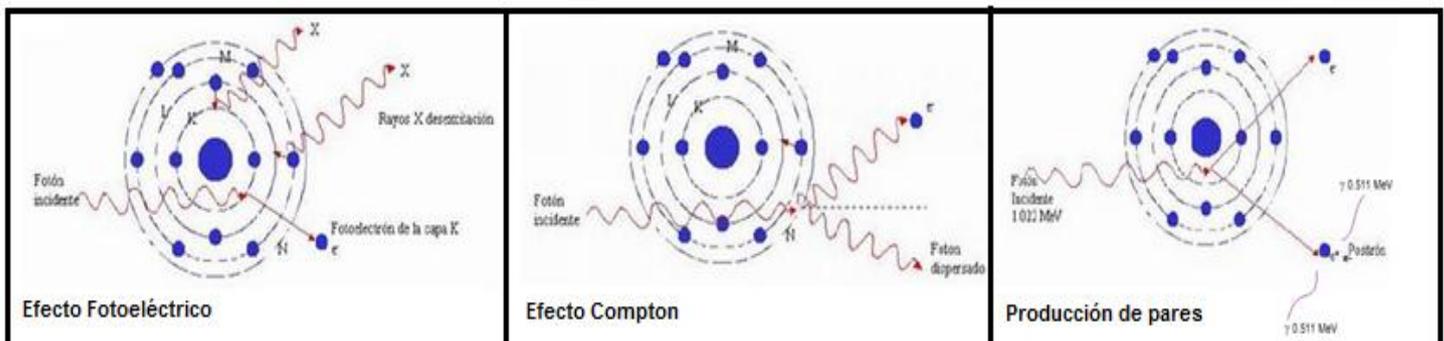


Figura 7. Los tres mecanismos de interacción con la materia de la radiación electromagnética.

Cada uno de los efectos predomina a diferentes energías de los fotones. A bajas energías (rayos X) predomina el fotoeléctrico; a energías medianas (alrededor de 1MeV), el Compton; a energías mayores, la producción de pares.

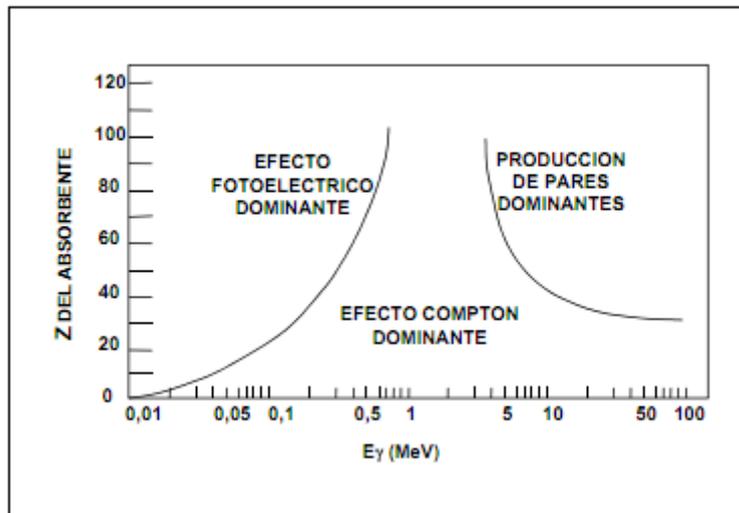


Figura 8. Efectos de interacción en función de la energía

1.5 Series radiactivas naturales.

La naturaleza está compuesta de una gran serie de isótopos radiactivos, los cuales pertenecen a lo que son llamadas las cadenas radiactivas naturales, las cuales se componen de núcleos padres radiactivos con vidas medias del orden de la edad del Universo los cuales se van desintegrando en otros nucleídos y estos en otros sucesivamente hasta que se llega a un nucleído estable ($_{82}Pb$). Estas series son tres llamadas serie de Torio, Uranio-Radio y Actinio. También se incluye a la serie del Neptunio sin embargo esta no ocurre naturalmente porque su vida media es más pequeña que la edad del universo, por lo cual ya no existe. [1]

NOMBRE	NUCLEO DE PARTIDA	NUMERO MASICO	n INICIAL	n FINAL	VIDA MEDIA DEL NUCLEO ESTABLE (AÑOS)	NUCLEO ESTABLE FINAL
Torio	$^{232}_{90}Th$	4n	58	52	1.39×10^{10}	$^{208}_{82}Pb$
Neptunio	$^{237}_{93}Np$	4n+1	59	52	2.20×10^6	$^{209}_{83}Bi$
Uranio-Radio	$^{238}_{92}U$	4n+2	59	51	4.51×10^9	$^{206}_{82}Pb$
Actinio	$^{235}_{92}U$	4n+3	58	51	7.15×10^9	$^{207}_{82}Pb$

Tabla.1. Series de decaimiento radiactivo naturales [1].

Dependiendo de la serie son los productos que se generan y la energía con la que se transforman al decaer. En el caso del ^{222}Rn , forma parte de la serie radiactiva (cadena de decaimiento) del ^{238}U , siendo producto del ^{226}Ra por emisión alfa y padre del ^{218}Po también por emisión alfa

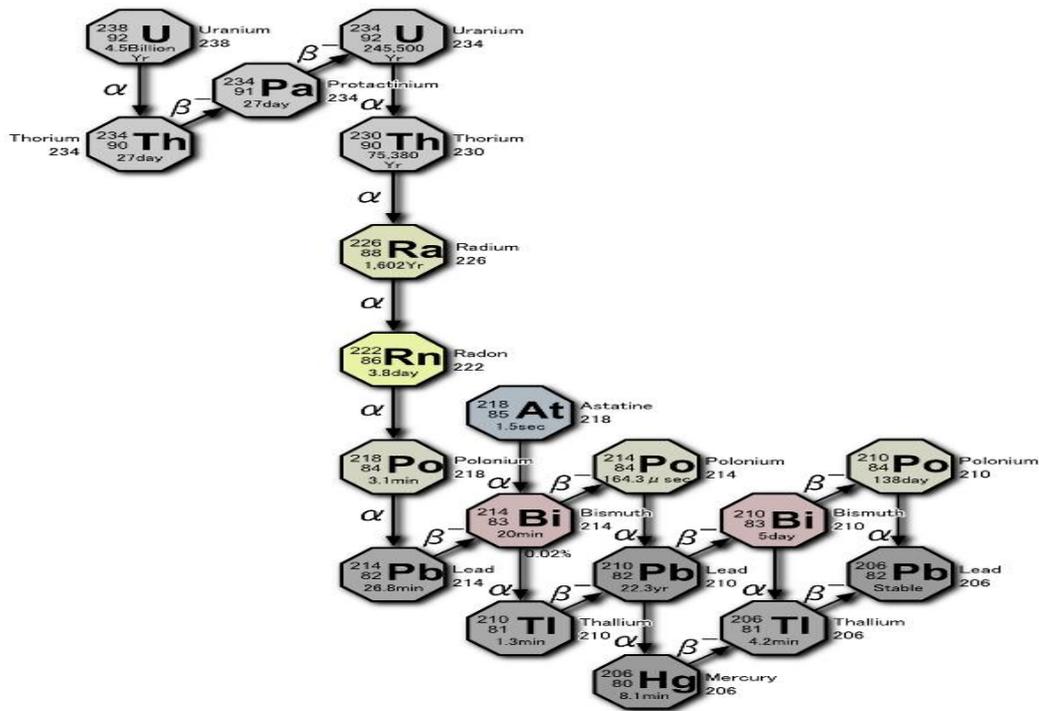


Figura 9. Serie de decaimiento Uranio-Radio (^{238}U).

1.6 Gas radón

El radón es el elemento químico de número atómico $Z=86$. De este se conocen varios isótopos, la mayoría de los cuales no se encuentran en la naturaleza. Los naturales son los siguientes: ^{222}Rn (radón), ^{220}Rn (torón) y ^{219}Rn (actinón). Procedentes de las cadenas del ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U respectivamente.

El radón (^{222}Rn) es un gas noble incoloro, inodoro e insípido, el más abundante de los isótopos del radón. El radón resulta de la cadena de decaimiento natural del ^{238}U y es hijo del ^{226}Ra . Es emisor de partículas alfa de 5.5 MeV con una vida media de 3.82 días [5].

Los primeros cuatro descendientes del radón también son radiactivos y son: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , y ^{214}Po , a estos se les da el nombre de “los productos del decaimiento de radón”. Los primeros dos decaen por partícula alfa y los otros dos por emisión beta, con vidas medias entre 27 min y los 164 μs (ver Figura 9).

Algunos de estos productos del radón en un medio cerrado se ponen en contacto con superficies y son puestos en movimiento. El resto de los productos permanecen suspendidos en el aire en forma de átomos libres o se combinan con otros aerosoles. [6]

La reducida actividad química que caracteriza a todos los gases nobles no impide que existan agregados de radón basados en fuerzas de Van der Waals. Cuanto más pesado es el gas noble, mayor será la facilidad que presentan sus átomos, con capas electrónicas completas, de deformarse adquiriendo momentos dipolares, lo que les confiere su alta solubilidad en agua, que decrece rápidamente con la temperatura, y otros líquidos polares.

El radón presenta una gran facilidad para ser adsorbido por una gran variedad de sólidos (como el carbón activo, geles y materiales de estado sólido de baja densidad), dada la relación existente entre esta propiedad y la facilidad para condensarse.

Por su naturaleza gaseosa, se difunde a través de diferentes medios. Así, para el aire, su coeficiente de difusión es $D=1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, mientras que para el agua líquida es de $D=1.13 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, siendo más difícil su difusión en este último medio.

Si un recipiente hermético contiene disolución acuosa de radón en presencia de aire, a una temperatura dada, se llega a alcanzar una situación de equilibrio cuando la relación entre las concentraciones de radón en las dos fases (líquida y gas) es constante e independiente de las cantidades de una y otra. Esa constante, que depende de la temperatura, es una constante de equilibrio, que se denomina coeficiente de reparto o coeficiente de solubilidad (k). Que en el caso de agua y aire se tendría:

$$k = \frac{\text{Concentración de radón en agua}}{\text{Concentración de radón en aire}} = \frac{C_W}{C_a} \quad (15)$$

El valor de k depende de la temperatura, y para cada valor de ésta, del disolvente. Para el caso del agua a 20° C el valor del coeficiente de solubilidad es de $k=0.26$. Para poner un ejemplo, supongamos que la concentración de actividad de radón en agua es de 0.037 Bq/L y aplicando la expresión anterior (ec.15) a una temperatura de 20° C se tiene que la concentración del gas en el aire es de 0.142 Bq/L .

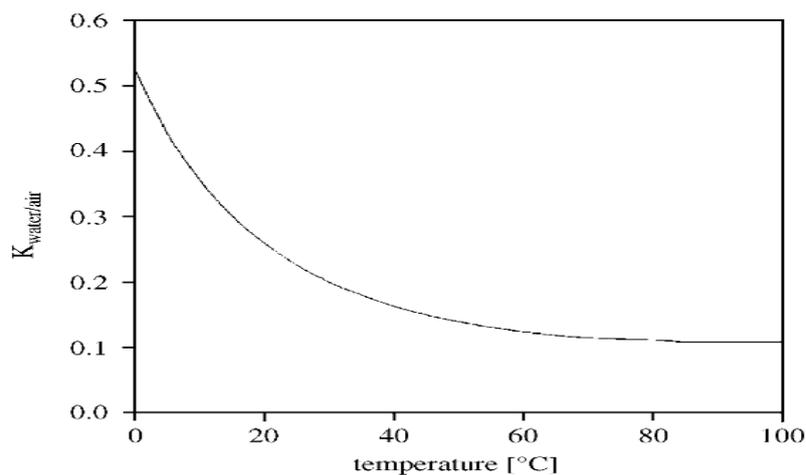


Figura 10. Dependencia del coeficiente de solubilidad respecto a la temperatura (Clever, 1979)

Las condiciones que se deben satisfacer para poder aplicar la ley anterior son las siguientes:

- a) Que el aire en presencia de la disolución permanezca inmóvil y su volumen sea constante. Si la disolución estuviese en contacto con la atmosfera libre, no llegaría a alcanzarse el equilibrio y, por tanto, no podríamos aplicar la ley de reparto (Ley de Henry). Es mas en su intento por alcanzar ese equilibrio, el radón se iría desprendiendo poco a poco y, en todo caso, su concentración en el agua tendría que ser igual a la

cuarta parte de la del aire, es decir unos 0.00185 Bq/L si tomamos una concentración de radón en aire de 74 Bq/m³ lo que es igual a 0.0074 Bq/L.

- b) Se supone que el agua este en reposo. En efecto si el agua está en movimiento, ya no pueden aplicarse sin más las leyes de la termodinámica, puesto que el sistema no se encuentra en estado de equilibrio termodinámico (igualdad de temperatura y composición en todos los puntos de las masas implicadas). Estos movimientos, sean naturales o provocados (aireación), facilitan su desprendimiento, simplemente porque se incrementa la superficie del líquido.[7]

Contando con el coeficiente de solubilidad podemos determinar la concentración del radón en el aire, como [9]:

$$c_a(\infty) = c_w(0) * \frac{1}{V_a/V_w + k} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} c_w(t) &= \text{concentración de radón en agua} \\ c_a(t) &= \text{concentración de radón en aire} \\ k &= \text{coeficiente de solubilidad} \\ V_a &= \text{volumen de aire} \\ V_w &= \text{volumen de agua} \end{aligned}$$

El sistema de medición con el que se trabajará en esta tesis se basa en los principios de solubilidad antes descritos, calculando la concentración en el agua en función a la constante de solubilidad, a la razón de los volúmenes y a la concentración de radón en aire obtenida del burbujeo de la muestra de agua, que se mide con la cámara de ionización. En el capítulo III se tratará esto con mayor detalle.

1.7 Niveles de acción internacionales sobre concentraciones de Radón intramuros.

Dado que el radón está presente de forma natural en el medio ambiente y que, al mismo tiempo es un posible promotor de cáncer para el cual no existe un nivel de riesgo cero, se deben tener niveles de concentración que no excedan los límites recomendados.

Las recomendaciones de protección para radiación son publicadas en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), Publicación 65 (ICRP 1994a). A pesar de que existen recomendaciones internacionales, los valores reales existentes dependerán en cada país, de aspectos geológicos particulares de cada región. En algunos países no existen parámetros de regulación nacionales, como es el caso de México.

La filosofía básica de protección radiológica es el concepto ALARA (As Low As Reasonably Achievable), es decir “tan bajo como sea razonablemente posible” esto aplicado a los valores dados en las recomendaciones y guías de protección radiológica, para fuentes radiactivas pero puede ser extendido para radiación natural ambiental.

A continuación se presenta una tabla que contiene los valores recomendados de algunas instituciones.

Institución	Descripción	Concentración de radón en aire (Bq/m ³)	Referencia
ICRP (International Commission on Radiological Protection)	Nivel de acción (residencias)	200-600	ICRP 1994 ^a
	Nivel de acción (lugares de trabajo)	500-1500	
WHO (World Health Organization)	Nivel de acción promedio por año (residencias)	≥ 100	WHO 2000
USEPA (United States Environmental Protection Agency)	Nivel de acción (residencias)	148	EPA 2004
	Nivel de acción (lugares de trabajo)	400	
UK-HSE (United Kingdom-Health and Safety Executive)	Nivel de acción (residencias)	200	HSE 2004
	Nivel de acción (lugares de trabajo)	400	

Tabla2. Valores recomendados de radón intramuros (aire).

Institución	Descripción	Concentración de radón en agua (Bq/L)	Referencia
WHO	Nivel de acción	100	WHO 2004
USEPA	Nivel de acción	11.1	EPA 2006 ^a

Tabla3. Valores recomendados de radón en agua.

En México, las residencias tienen una concentración de radón en aire entre los 51 y 130 Bq/m³ [17] y los lugares de trabajo entre 13 y 197 Bq/m³ [18]. Mientras que el nivel de radón en el agua potable de la Ciudad de México es menor a los 3.8 Bq/L [19]. Con lo que podemos apreciar, comparando estos datos con las tablas 2 y 3, los niveles que se tienen en el país son generalmente más bajos que los recomendados, sin embargo esto no quiere decir que no existan lugares donde se encuentren niveles de concentración elevados, más allá que el nivel recomendado, por lo que hay que diseñar estrategias de mitigación.

1.8 Daños a la salud debido a concentraciones mayores que el nivel recomendado de ²²²Rn.

Cuando el gas radón es inhalado, las partículas alfa emitidas al decaer, son depositadas en el sistema respiratorio, además de sus productos (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, y ²¹⁴Po) y sus respectivas partículas de decaimiento, siendo estas las más significativas en el daño a tejido. Todo esto interactúa con el tejido de los pulmones, causando un daño en el ADN, lo que puede llevar a una mutación de células y a una alta probabilidad de riesgo de generar un cáncer. [8]

El radón es la causa número uno de cáncer pulmonar entre los no fumadores, de acuerdo con estimados de la Agencia de Protección Ambiental (USEPA, Environmental Protection Agency, USA). En general, el radón es la segunda causa de cáncer pulmonar, siendo la primera el tabaquismo. El radón es responsable de alrededor de 21,000 muertes de cáncer pulmonar cada año tan sólo en Estados Unidos. Aproximadamente, 2900 de estas muertes ocurren entre personas que nunca han fumado. [21]

Según la Organización Mundial de la Salud, (OMS), el 15% de cáncer pulmonar en todo el mundo es causado por el radón. Para los fumadores el riesgo de contraer cáncer pulmonar es mayor debido a los efectos de la combinación del radón con el humo de tabaco. Entre los fumadores, de 1,000 personas unas 62 morirán de cáncer pulmonar mientras que de 1,000 personas que nunca han fumado 7.3 morirán de cáncer pulmonar. [27]

Que el agua contenga altas concentraciones de radón implica principalmente dos situaciones de riesgos para la salud: la primera es que entre el 1 y 2% del radón que se encuentra en el aire proviene del agua, lo que nos lleva al riesgo de cáncer pulmonar; y la segunda es que al encontrarse las altas concentraciones de radón en el agua bebible, estas son ingeridas por medio del aparato digestivo, lo que puede provocar cáncer en el estómago. A pesar de esta posibilidad, el riesgo es menor que el cáncer de pulmón, siendo el 11% de las muertes por cáncer de estómago y 89% por cáncer de pulmón. [8]

1.9 Detección de radón

Para determinar la concentración de radón y de sus descendientes en aire, pueden utilizarse distintos métodos. La elección entre unos u otros depende de los objetivos de la medida a efectuar. En general la medida de la concentración de radón presente en un ambiente determinado se basa en el recuento de partículas α emitidas tanto por él como por sus descendientes de vida corta. Unos pocos métodos se basan en la detección de radiación γ y también existen algunas técnicas que detectan radiaciones β .

Es importante en la práctica distinguir si el método utilizado mide la concentración de gas radón o mide la concentración y/o alguna otra característica de los productos descendientes de radón. En ambos casos los métodos pueden clasificarse como dinámicos o pasivos según se emplee o no aire forzado para la captación de la muestra:

Sistema dinámico.

Los equipos instantáneos son los que requieren una fuente de poder para su funcionamiento y normalmente son utilizados para medidas rápidas. Se basan en la colección de una muestra de aire en un instante de tiempo, seguido por la medición de la concentración de radón a través de la actividad de las partículas alfa. En general los detectores son los que proporcionan una señal de salida cuando la radiación interactúa con su volumen.

Este método es útil para una rápida estimación de la concentración de radionúclidos, y puede ser utilizado también para el seguimiento, en el tiempo de la evolución en un lugar determinado. La ventaja principal de este método es la rapidez de medición y su desventaja es que al ser en función al tiempo de medición no se pueden observar los cambios por factores externos, como podrían ser los ambientales, además que la medición se hace sólo en un punto y no nos puede dar la distribución del radón dentro de un volumen cerrado.

En general los sistemas dinámicos utilizados son: cámara de ionización, cámara de centelleo, deposición electrostática de iones, etc.

Sistema pasivo.

Estos sistemas son los que en general no necesitan de una fuente de alimentación, baterías, para poder funcionar y son utilizados para medidas de tiempos largos. Se basan en el registro de la interacción de la radiación con el sistema durante todo el tiempo de exposición, proporcionando una única concentración, la cual es una medición promedio acumulada durante el período de exposición.

Las características de este método son: proporciona una medición promedio, es simple, de tamaño pequeño y de bajo costo respecto a los otros métodos.

Ejemplos de este son: detectores termoluminiscentes (TLD's), detectores de trazas de partículas en plásticos (LR-115, Makrofol y CR-39), adsorción de radón en carbón activado, detectores basados en la descarga eléctrica de un aislante (Electretes), entre otros. [20]

Los dispositivos utilizados con mayor frecuencia para las mediciones de radón y de sus descendientes destacan:

- **Células de centelleo.** Son sistemas dinámicos que pueden tener distintos tamaños y consisten en cilindros metálicos, con un extremo transparente, que están recubiertos en su interior por una capa uniforme de sulfuro de zinc activado con plata que da respuesta a las partículas alfa. Las muestras de aire se introducen en su interior, previo vacío, y tras alcanzarse el equilibrio se mide el número de destellos de luz con un tubo fotomultiplicador para determinar la concentración de radón en el aire. (CELL de Lucas)
- **Detectores por trazas nucleares en sólidos.** Son sistemas pasivos que se basan en el uso de materiales tales como láminas finas de nitrato de celulosa o policarbonato que tienen la propiedad de que en ellos quedan impresionadas las trazas debidas a las radiaciones emitidas por el radón y sus descendientes después de un tiempo de exposición. Estas huellas o trazas se hacen visibles por medio de un tratamiento químico y con esto se pueden identificar y contar mediante sistemas de microscopia ya sea de forma manual o automática, siendo su número proporcional a la concentración existente durante el tiempo de exposición, proporcionando un valor promedio de la concentración de radón [4].
- **Detectores de carbón activo y de gel** [34]. Son también sistemas pasivos, muy simples, basados en la capacidad del carbón activo para retener el radón. Los tiempos de muestreo empleados varían entre dos y siete días y el nivel de radón se establece, en este caso, midiendo la radiación gamma emitida del ^{218}Bi por el carbón activo con un detector adecuado, como el de germanio hiperpuro.

En esta tesis utilizaremos un sistema dinámico para la detección tanto en aire como en agua, este consiste en una cámara de ionización de la cual se hablará en los siguientes capítulos.

1.10 Mitigación de radón

La mitigación del radón es el proceso usado para reducir las concentraciones de radón intramuros y poder permanecer en el intervalo de nivel recomendado en un ambiente cerrado, como puede ser una zona de ocupación laboral o de vivienda.

Las estrategias de mitigación del radón son necesarias, adaptando las características de la vivienda, la zona climática, las fuentes de radón, y los mecanismos de transporte con el fin de ser rentable y eficiente. Algunos métodos de mitigación son [8]:

- **Cambio de presión entre suelo y cimientos.** Es la forma más común de mitigación y consiste en colocar un sistema de succión por debajo del piso de la casa o edificios que vaya conectado a un sistema de salida (tubería) el cual lo pueda llevar a una salida lejos de la vivienda o a una localización de agua profunda. Se agregan ventiladores para ayudar el movimiento del radón y se sellan las aberturas del suelo como complemento. [11][12]

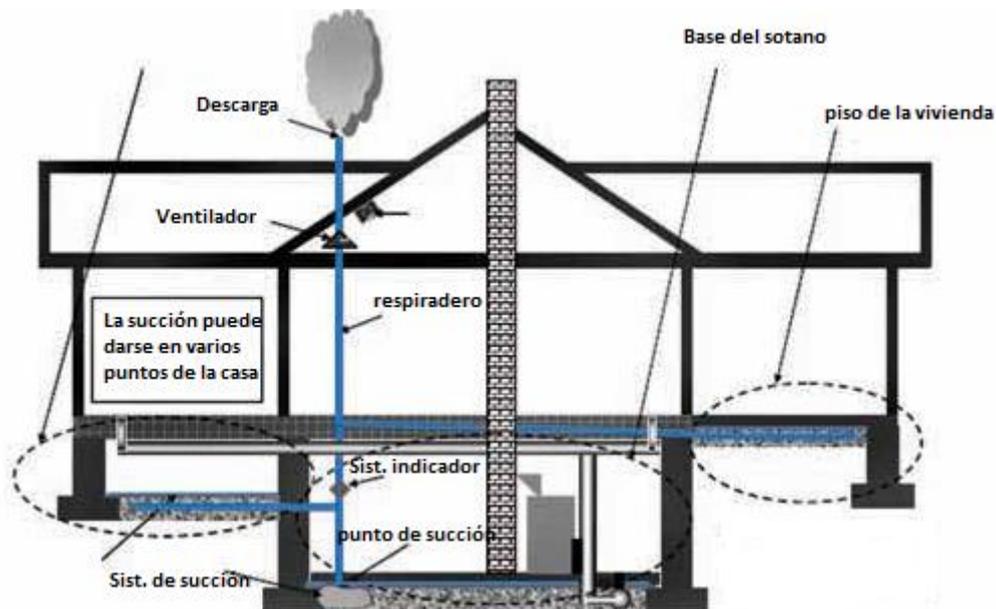


Figura 11. Método de despresurización activa del suelo en una residencia.

- **Ventilación en espacios ocupados.** Este es el método de mitigación más usado en espacios concurridos, pero no es el de mayor eficiencia ya que depende del clima y de la concentración de radón. Se puede hacer activamente mediante el uso de un ventilador dirigido a un lugar abierto o pasivamente operando las ventanas o aberturas de forma manual. [10][12]
- **Impermeabilización de la superficie.** Se trata del sellado de las aberturas (grietas) en la superficie del terreno entre el interior de la casa y el suelo. La eficacia de este método es limitada ya que solo se ha reportado éxito uno de cada 1500 casos. [13]
- **Tratamiento de agua.** En algunos casos relativamente raros, grandes cantidades de radón son transportados al interior de un edificio por el agua de un pozo. En estos casos, el tratamiento del agua se puede utilizar para reducir la concentración de radón en el aire. Las estrategias principales para reducir el radón en el interior del pozo de agua en el punto de entrada a la residencia son [12]:

- **Aireación.** Pasar el agua por un sistema de burbujeo o caída, para que el agua con el movimiento libere el radón disuelto.
- **Filtración.** Se utiliza un filtro de carbón activado que tiene como función atrapar las partículas de radón, este es un método barato pero de poca eficiencia.
- **Captura del radón en la molécula de agua (propuesta de esta tesis).** Se trata de la captura de los átomos de radón en las moléculas de agua existentes en la humedad ambiental, la cual se trata como un aerosol, y al desalojar la humedad por medio de un deshumidificador el radón también es desalojado, pasando de su alta concentración en el aire a estar soluble en el agua resultante de la condensación de dicha humedad. Este es el método que se propone en el presente trabajo de Tesis, siendo novedoso (revisando la bibliografía, no se encuentra este método reportado), fácil de implementar, de relativo bajo costo, alta eficiencia y sin complicadas modificaciones del lugar donde se requiera la mitigación del gas radón.

1.11 Física de aerosoles.

Los aerosoles se definen como la suspensión de partículas en un gas. El humo, la niebla y el smog, son ejemplos claros de estos. Las gotas de lluvia no son consideradas aerosoles ya que son de gran tamaño y son mayormente afectas por la gravedad (caen muy rápido) para decirse que están suspendidas. En general para que cualquier partícula sea considerada una partícula aerosol debe medir entre $0.001\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$.

Las fuentes de aerosoles atmosféricos son muy variadas ya que dependen del viento, y el polvo que este levante, del mar y las partículas de sal que se liberan en la evaporación, de la lluvia, del agua y su condensación, el material biológico, actividades humanas, etc.

Algunas de las fuentes de aerosoles son de tipo radiactivo y las hay tanto naturales como antropogénicos. La única diferencia importante entre las partículas de aerosoles radiactivos y no radiactivos surge del hecho de que las partículas de aerosol radiactivo rara vez se componen exclusivamente de átomos radiactivos, siendo entonces una mezcla de átomos radiactivos y no radiactivos.

Por ejemplo la forma más común de las partículas radiactivas naturales en aerosol es formada a partir de los productos de desintegración de los isótopos de gas radón, estos se acumulan en aerosoles no radiactivos colocando uno o más átomos radiactivos en su superficie. La composición química de la masa de estas partículas y su fuente de emisión original es básicamente la misma que los aerosoles no radiactivos. Sin embargo su vida posterior a la difusión o unión con las partículas radiactivas cambia, al hacerse su superficie radiactiva y esta tener que decaer.

Continuando con el ejemplo anterior; en el interior de las construcciones, dado el poco movimiento del aire, las concentraciones del gas radón son usualmente más altas que en exteriores. Las concentraciones de los aerosoles radiactivos formados por los hijos del radón, también son altas. En el caso del agua las concentraciones de radionúclidos son menores y algunos de los radionúclidos al ser metales pesados ni siquiera son solubles en dicha molécula, sin embargo también se pueden formar aerosoles radiactivos. [14]

1.11.1 Movimiento de los aerosoles.

Los aerosoles presentan dos tipos de movimientos: movimiento uniforme y movimiento difusivo. El movimiento uniforme es el más común en nuestra experiencia, también se le llama movimiento unidireccional. Mientras que el movimiento difusivo es caótico y cambiante de dirección, también se le llama movimiento Browniano. Este movimiento de difusión se puede explicar con la ley de Fick junto con la ecuación de Stokes-Einstein. La ley de

Fick relaciona un gradiente de concentración a un flujo a través del coeficiente de difusión y esta se escribe como:

$$\phi_d = -D_e \nabla C_{Rn} \quad (17)$$

Donde,

ϕ_d = Densidad de flujo difusivo de la actividad del radón por unidad de área del poro del suelo (Bq/m^2s)

D_e = Coeficiente de difusión efectivo

C_{Rn} = Concentración de actividad intesticial del radón (Bq/m^3)

Otro fenómeno importante de los aerosoles es el retroceso (reculeo) dado en un decaimiento radiactivo. Cuando un átomo radiactivo decae y emite radiación nuclear, hay un ímpetu y energía cinética de retroceso impartida al producto del decaimiento. Este fenómeno es más significativo para las partículas alfa al ser altamente masivas.

Siendo el producto de M la masa del átomo en retroceso y V su velocidad igual al producto de m la masa de la partícula alfa emitida y v su velocidad, y con esto por la conservación del momento:

$$mv = MV \quad (18)$$

Ahora E_M la energía cinética del átomo en retroceso y E_m la energía cinética de la partícula alfa, utilizando la ecuación anterior (ec.18)

$$E_M = \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{mv}{M}\right)^2 = \left(\frac{m}{M}\right)\frac{1}{2}mv^2 = \left(\frac{m}{M}\right)E_m \quad (19)$$

Con lo que podemos observar la dependencia a la razón de las masas, lo que nos puede dar un menor o mayor retroceso.

El tener una gran energía de retroceso en un átomo producto de un decaimiento alfa tiene importantes consecuencias. Lo primero es que tiene la energía suficiente para viajar distancias significativas tanto en aire como en algunos sólidos. Por ejemplo cuando el ^{222}Rn emite una partícula alfa de 5.49 MeV, el átomo en retroceso ^{218}Po tiene una energía cinética de 101 keV y un alcance de 50 μ m en aire y cerca de 30 nm en sólidos de densidad 2 g cm⁻³. Si una partícula de aerosol radiactivo ha emitido un átomo, producto de un decaimiento alfa sobre o cerca de su superficie, la energía de retroceso quizá sea suficiente para extraer el átomo en retroceso de las partículas de aerosol, si la dirección del retroceso es hacia el exterior. Para átomos de series radiactivas como la del ^{238}U este proceso puede llevar a remover los átomos producto del retroceso por el decaimiento alfa, que de otra manera se quedarían atrapados en la partícula de aerosol.

Si la dirección de retroceso es hacia adentro del cuerpo de la partícula de aerosol, el átomo en retroceso puede ser embebido por el aerosol con una fuerza mayor a la ejercida por el átomo padre. Esta gran energía puede provocar también que los mismos aerosoles radiactivos sean embebidos por otros materiales. [14]

De lo anterior tenemos que por la naturaleza y física de los aerosoles, pueden servir como medio de transporte para átomos radiactivos. En esta tesis se usará este principio para probar el método de mitigación propuesto.

La humedad es la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se puede expresar de forma absoluta mediante la humedad absoluta, o de forma relativa mediante la humedad relativa o grado de humedad. La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. La humedad puede ser tratada como un aerosol por la definición antes dada.

En el salón donde se realizó el estudio de esta tesis se tiene una humedad relativa constante muy alta, del 82.7 % rH. Lo anterior nos indica la presencia de muchas moléculas de agua en el ambiente con las cuales pueden interactuar los átomos de radón. Como ya se explicó, el movimiento de los aerosoles es determinante para el atrapamiento de los átomos radiactivos.

El método de mitigación propuesto en esta tesis se basa en el atrapamiento del radón en la molécula de agua y esto se da ya que las fuerzas de Van der Waals explican la manera en que los átomos de radón son adheridos a las moléculas de agua provenientes de la humedad, y la manera de cómo se transportan juntos en el salón (átomo de radón + molécula de agua) es descrita por la teoría de los aerosoles, los cuales también pueden contener a los productos del radón cuando este decae.

Existiendo una gran cantidad de moléculas de H₂O en el ambiente del salón y cambios de concentración de radón de cientos de Bq/m³ hay mayor probabilidad de interacción. Sin embargo cuando se lleva a cabo la condensación el acomodo de las moléculas cambiará drásticamente lo que disminuye la concentración. Esto se ve claramente en la transformación de unidades al tener un factor de mil, siendo 1 L = 10⁻³ m³.

En un litro de agua hay 55.55 moles es decir 3.346 X 10²⁵ moléculas de agua, por lo cual si el deshumidificador utilizado en este trabajo nos da 5 L de agua, tenemos un número muy extenso de moléculas de agua en las cuales se pueden atrapar los átomos de radón que están siendo desalojados del salón.

Si pensamos en que todos los átomos de radón se atraparon con una concentración de 300 Bq/m³ al medir su concentración en el agua equivaldría a 0.3 Bq/L, el cual es un nivel muy bajo de concentración en agua, siendo casi despreciable comparado con el número de moléculas de H₂O que hay en la muestra.

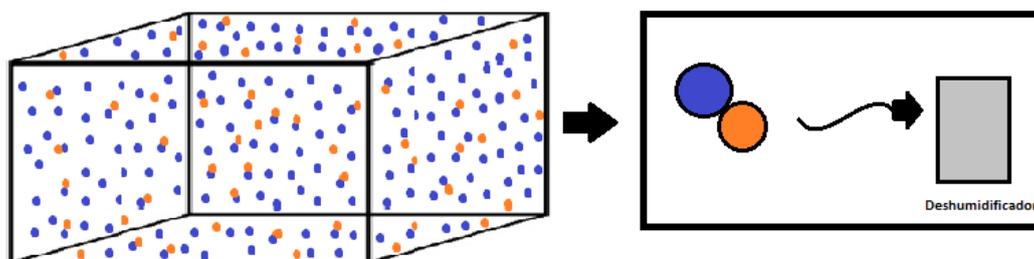


Figura 12. Simulación de un salón cerrado con alto nivel de humedad relativa (círculos azules) y cierta concentración de radón (círculos naranjas)

En la figura 12 se simula el comportamiento esperado del salón en estudio. Existiendo un número mucho mayor de moléculas de agua que de átomos de radón, habrá atrapamiento solo en una pequeña cantidad de las moléculas, además que algunos átomos quedarán libres.

La humedad al comportarse como un aerosol se moverá difusivamente en el salón ya con el átomo de ^{222}Rn pegado a ella por medio de fuerzas de Van der Waals, esto hará que a donde se dirija la humedad también irá el radón, por lo cual, cuando se accioné el deshumidificador el radón se transportará hacia él.

La función del deshumidificador es disminuir y regular los niveles de humedad condensándola, produciendo así agua en estado líquido. Con este principio al ser la humedad condensada el radón que va adherido a ella se disolverá en el agua ya líquida, esto por su característica de solubilidad, y así se tendrá el transporte del ^{222}Rn en aire al agua. Siendo este el principio básico del método de mitigación propuesto en este trabajo de tesis.

Capítulo II. Metodología

2.1 Antecedentes del estudio.

En un salón cerrado con dimensiones de: 2.2 m de alto, 2.2 m de ancho y 6 m de largo de volumen de 30.36 m³ (figura 13), que se encuentra por debajo de nivel de piso en una casa habitación en la zona sur del Distrito Federal, se midió la concentración de radón durante un año.

El área donde se encuentra el salón cerrado a estudiar, se trata de un ecosistema formado por el derrame de lava del volcán Xitle, por lo cual el salón en estudio se compone de piedra volcánica además de concreto.

Sus coordenadas se encuentran entre los 19° 20' 22'' y 19° 13' 25'' N y 99° 8' 26'' y 99° 14' 3'' O, esto a una altura de 2380 m sobre el nivel del mar.

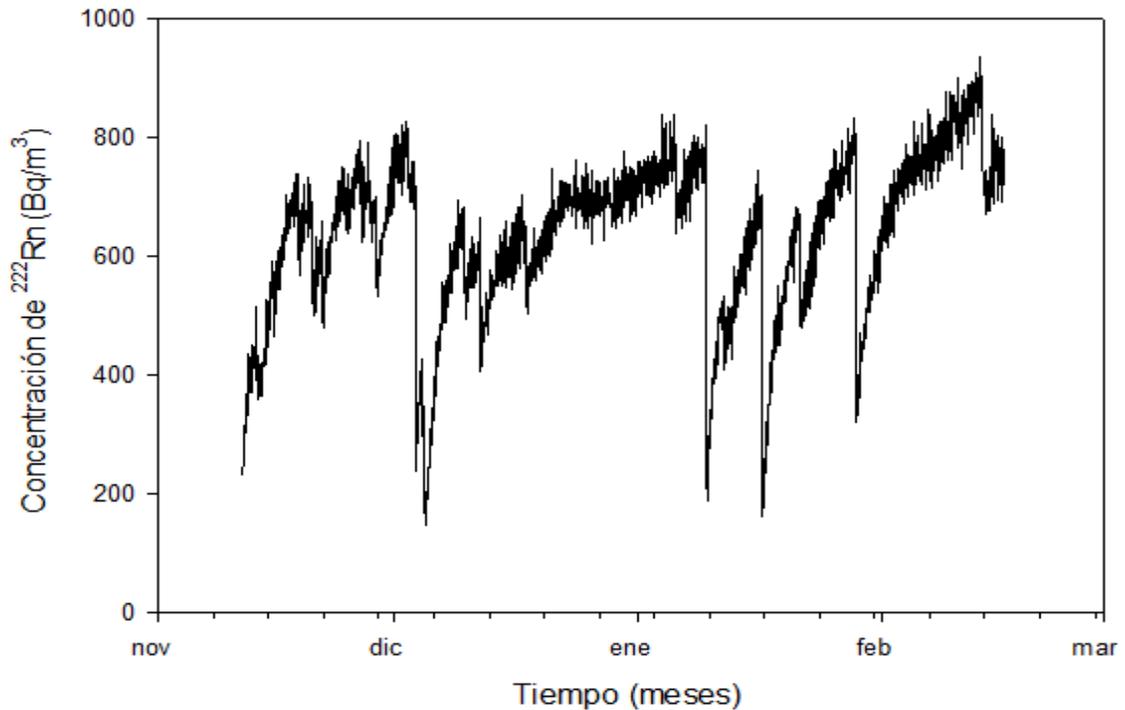
El clima presente en la zona es: Templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano. Topográficamente se localiza entre las isotermas de 15.3° C y 15.6° C y entre las isoyetas de 814.7 mm y 952.7 mm, con un promedio de 870.2 mm al año.

Las mediciones de la concentración de actividad de radón durante cinco meses, noviembre del 2010 a marzo del 2011 (véase Gráfica 1) se realizaron con distintos detectores utilizando tanto el método dinámico (Rad-7, AlphaGUARD, Sun Nuclear 1027 y DOSEman) como el pasivo (CR-39 Lantrack). De estas mediciones se obtuvo una concentración de actividad de radón (que también llamaremos concentración de radón) en aire promedio de 710 Bq/m³ medido con el AlphaGUARD (con un rango entre 533 y 805 Bq/m³ dependiendo del detector) y un valor máximo de 936 Bq/m³ a condiciones ambientales constantes: temperatura de 18.5° C, presión de 800 mbar y humedad relativa de 82.7% [15]. Siendo este un caso atípico en la Ciudad de México [17].

La concentración de actividad de radón en aire obtenida es mucho mayor al valor recomendado por la USEPA y demás organismos de protección radiológica (véase capítulo I), por lo cual la mitigación de los niveles de radón es recomendable.

Por ser un salón cerrado, sin ventanas o salidas de aire, no se puede implementar tan fácilmente un método de mitigación como los descritos en el capítulo anterior ya que se alterarían las condiciones del salón y de su entorno.

Por lo anterior se buscó otro método de mitigación, y dado que la humedad relativa se encontraba en un porcentaje alto, se pensó en un método de mitigación que involucrara este factor. Siendo la humedad y el vapor de agua formas de aerosoles, entonces se tratará como medio de mitigación el atrapamiento de radón en la molécula de agua (véase capítulo I, sección 1.11.1) como posible solución novedosa, para estas condiciones.



Gráfica 1. Concentración de radón en el salón cerrado a través del tiempo (5 meses)

En la gráfica 1 podemos observar claramente como las concentraciones de radón se mantienen casi constantes alrededor de los 700 y 800 Bq/m^3 teniendo en momentos disminuciones drásticas las cuales se debieron a que el salón se ventilaba con solo abrir la puerta de acceso, pero también llegando a valores máximos de 936 Bq/m^3 . En este estudio durante los 5 meses no se observó un cambio significativo en la humedad.

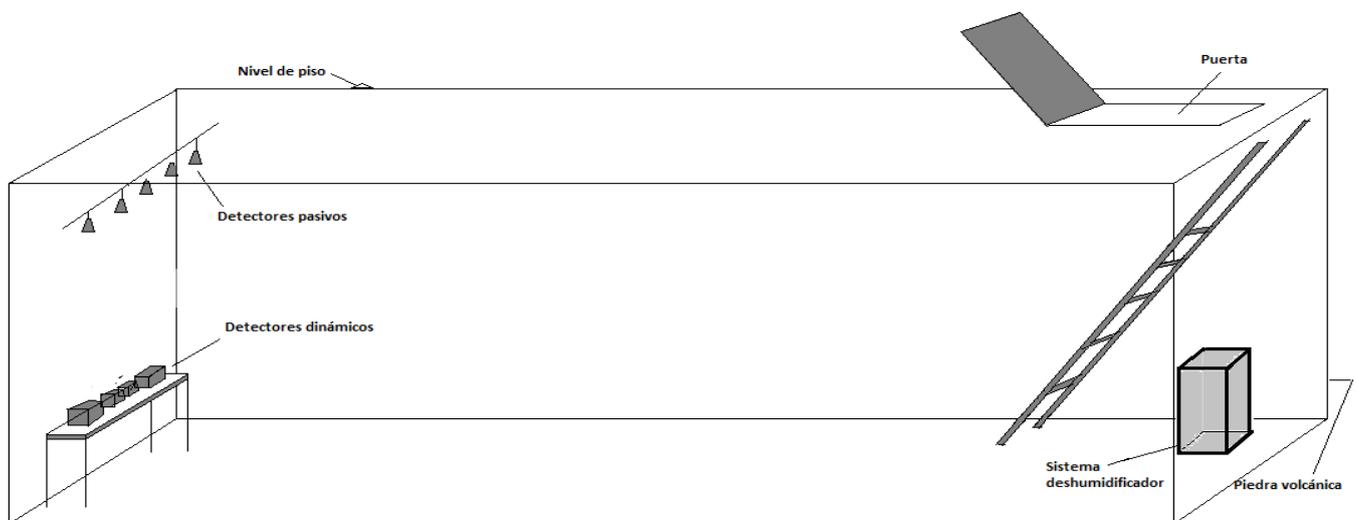


Figura 13. Esquema del salón cerrado en estudio

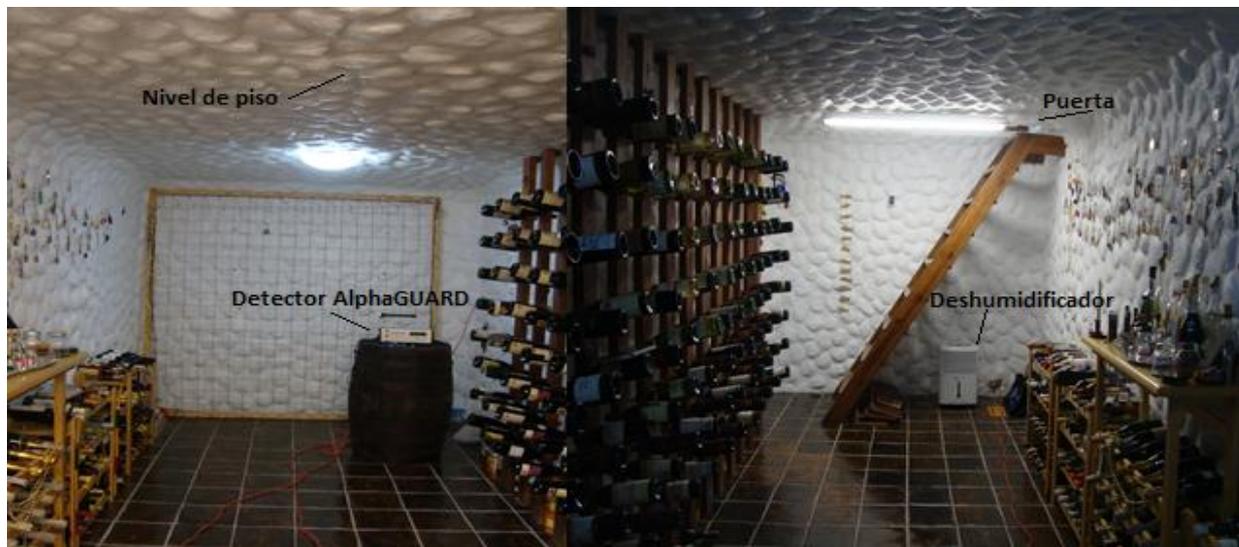


Figura 14. Fotografías del salón cerrado en estudio.

2.2 Medición de radón

Las técnicas de detección y medición de Radón que en este trabajo se utilizan, se basan en la medición continua, siendo sistemas de detección instantáneos (dinámicos), los cuales se explicaron anteriormente (ver cap. 1 secc. 1.8). Con estos se detectarán las partículas alfa emitidas por el ^{222}Rn y de esta manera podremos conocer la concentración de actividad (Bq/m^3) presente, tanto en el aire como en el agua.

Para del desarrollo de esta tesis se utilizaron dos métodos de medición de ^{222}Rn :

1. Medición de radón en aire por un método dinámico, utilizando el sistema AlphaGUARD (cámara de ionización) en modo de difusión.
2. Medición de radón en agua por un método dinámico de aireación, utilizando el sistema AquaKIT con el detector AlphaGUARD (cámara de ionización) en modo de flujo.

2.3 Medición de radón y proceso de mitigación

2.3.1 Medición de radón en aire

Con el sistema AlphaGUARD PQ2000PRO de la marca Genitron Instruments GmbH (modo de difusión) se midió tanto la concentración de ^{222}Rn (Bq/m^3) como la humedad relativa (rH%) del salón de manera continua, colocando el detector en el fondo del salón cerrado y monitoreando durante largos intervalos de tiempo (meses) en los cuales el cuarto permanecía totalmente cerrado (humedad constante), salvo por los momentos que se abría la compuerta (la humedad varía muy poco) como se muestra en la gráfica 1. [15]

2.3.2 Método de deshumidificación.

Para llevar a cabo este método de mitigación se busca la relación entre la humedad y la concentración de radón, y con esto poder observar si existe el atrapamiento del radón en la humedad desalojada. Se utiliza un deshumidificador, el cual es un aparato que reduce la

humedad ambiental. Este usa el efecto Peltier como base para la deshumidificación, convirtiendo las moléculas de humedad en agua por condensación. El Efecto Peltier consiste en la creación de una diferencia de temperatura debido a un voltaje eléctrico. Sucede cuando una corriente se hace pasar por dos metales o semiconductores conectados por dos “junturas de Peltier”. La corriente propicia una transferencia de calor de una juntura a la otra: una se enfría en tanto que la otra se calienta.

El funcionamiento del deshumidificador se basa en pasar una corriente de aire por el evaporador (zona fría), el cual está a una temperatura por debajo del punto de rocío, provocando que la humedad ambiental se condense y gotee a un depósito o un desagüe. Después de ser secado y enfriado el aire pasa por el condensador (zona caliente), con lo que recupera la temperatura ambiental y disminuye aún más su humedad relativa.

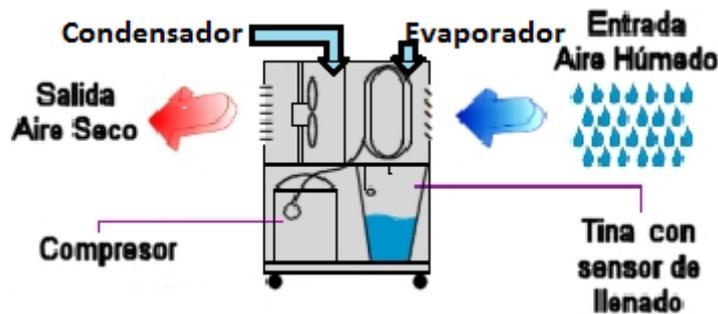


Figura 15. Funcionamiento del deshumidificador.

2.3.3 Variación de la humedad

El deshumidificador cuenta con un controlador de humedad automático, es decir mantiene la humedad que se le programe de manera continua. Gracias a este dispositivo, el experimento a realizar para corroborar el atrapamiento de los átomos de radón en las moléculas de agua, consiste en la variación de la humedad del salón y con esto observar el comportamiento de la concentración de radón. Es importante resaltar que lo único que se va a variar es la humedad relativa ya que parámetros como la presión y la temperatura del salón están constantes.

Si se da una relación lineal entre el cambio de humedad relativa respecto a la concentración de radón en el salón, entonces lo que estará pasando es que al reducir la humedad se reducirá la concentración de radón, por lo cual el agua colectada del deshumidificador deberá contener parte de esos átomos de radón al llevarse a cabo el atrapamiento en la humedad.

2.3.4 Medición de radón en agua

Para determinar si en efecto se da el atrapamiento de radón en la molécula de agua, el agua colectada del deshumidificador se medirá con un sistema dinámico, AquaKIT (Genitron Instruments GmbH), el cual determina la concentración de radón de manera directa, en pequeñas muestras de agua por medio de un detector AlphaGUARD. El sistema empleado se basa en el método de aireación para sacar el radón de las moléculas de agua y que el detector dinámico lo pueda medir (véase capítulo I).

El deshumidificador tiene una capacidad de 5 L de agua, los cuales se recolectan en 5 días. Esto nos indica que tiene una producción de 1 L/día en la disminución de la humedad en un espacio determinado, en nuestro caso un salón de 30.36 m^3 . Esta cantidad de agua (5 L) se separa en alícuotas (100 mL) para la medición, la cual se realiza entre 3 y 5 veces por día y por muestra de agua. Las medidas se repiten más de una vez ya que se esperan valores de concentración de radón muy cercanos al límite inferior de medición por lo tanto se necesita trabajar con la estadística para obtener mejores resultados. Para poder observar el decaimiento del radón por una vida media (3.82 días) se realizan las mediciones (ver protocolo capítulo 3) en tres días distintos: el día de recolección, un día después a este y cuatro días después del día de recolección.

2.3.5 Medición de radón en el aire de la muestra.

Finalmente se mide la concentración en el aire del envase donde es colocada la muestra de agua obtenida del deshumidificador, esto es para conocer el estado del radón, es decir si se encuentra soluble en el agua y su proceso de emanación.

El arreglo experimental utilizado constó del AlphaGUARD en modo de difusión y del AlphaPUMP a una velocidad de 0.5 L/min (figura 16)

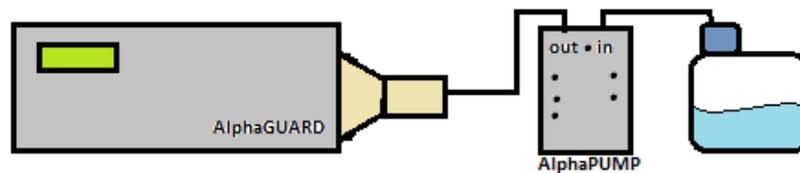


Figura 16. Arreglo experimental para medición de radón en el aire de la muestra.

Este experimento será cuantitativo, buscando observar un aumento en la concentración de radón respecto al medido en el ambiente del laboratorio.

Capítulo III. Instrumentación

3.1 Sistema de detección dinámico. Medición de concentración de radón en aire.

El equipo utilizado para medir la concentración de radón en aire es el AlphaGUARD PQ2000PRO (modo de difusión). Este consiste en una cámara de ionización (espectrometría alfa) de 0.56 litros de volumen activo, con un alto voltaje de operación de 750 V. Es independiente a factores ambientales como la temperatura, presión y humedad, las cuales también tiene la capacidad de medir. Es un excelente monitor continuo de radón con un rango de 2 - 2 000 000 Bq/m³. [57]

Una **cámara de ionización** es un instrumento para medir el número de iones generados dentro de un cilindro lleno de un gas ionizable, entre dos placas de metal conductoras (o dos electrodos planos paralelos o cilíndricos coaxiales). Cuando la radiación entra por la ventana delgada del detector el gas se ioniza y se empiezan a generar iones que se mueven hacia los electrodos del signo opuesto, creando así una corriente de ionización, que puede ser medida por un galvanómetro o un electrómetro.

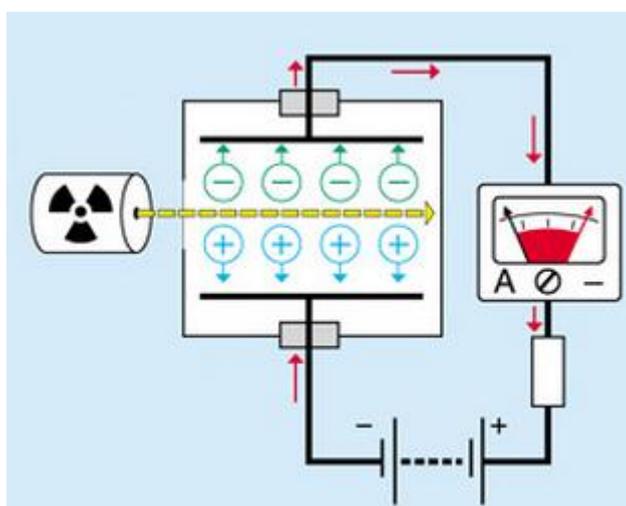


Figura 17. Funcionamiento de una cámara de ionización.

Debido a la baja densidad de un gas (comparado con un sólido), los detectores gaseosos tienen baja eficiencia para detectar radiación X o gamma (típicamente del orden de 1%) pero detectan prácticamente todas las alfas o betas que logran traspasar las paredes del recipiente. En un detector gaseoso puede usarse cualquier gas (incluso aire). Normalmente se usa una mezcla de un gas inerte con un gas orgánico; el primero ayuda a impedir la degradación y el segundo cede fácilmente electrones para recuperar las condiciones iniciales después de una descarga.

La **espectrometría alfa** es un método útil y sensible para la detección de núcleos radioactivos alfa debido a su resolución en energía y gran sensibilidad. Esta técnica se basa en la ionización que las partículas alfa emitidas producen en un medio, o sistema detector. La ionización es proporcional a la energía de las partículas alfa. Tras coleccionar los iones formados y pasar los impulsos electrónicos que se generan por la electrónica asociada al detector, el resultado será

un espectro de partículas alfa o representación del número de partículas detectadas en función de su energía y con ello se permite la identificación de los emisores alfa contenidos en una muestra [16].

El AlphaGUARD es un monitor de radón portable (usando baterías o conectado a la corriente eléctrica) con una gran capacidad de almacenamiento. Mediante la cualidad que tiene dicho monitor de medir tanto concentraciones de radón como parámetros ambientales, es posible dar un mejor panorama temporal y espacial de la distribución del radón, hecho que beneficia sobre todo en estudios de mitigación.



Figura 18. AlphaGUARD PQ2000PRO [57]

Algunas de las características de trabajo de este detector se encuentran en la siguiente tabla:

Tipo de detector	Cámara de ionización HV= 750 VDC	
Volumen total de detector/ activo	0.62 litros/ 0.56 litros	
Modos de operación	Difusión optimizada (10/60 min ciclo)	Flujo optimizado (1/10 min ciclo)
Filtro de hijos de ²²² Rn	Fibra de vidrio (factor de retención >99.9%)	
Sensibilidad	1 CPM por 20 Bq/m ³ (1 CPM por 0.55 pCi/L)	
Rango de concentraciones de radón	< 2 Bq/m ³ (< 0.55 pCi/L) a 2 000000 Bq/m ³ (54000 pCi/L)	
Error lineal	< 3% dentro del rango total	
Rangos de operación:		
• Temperatura	-10.....+50°C (± 1.5 °C)	
• Presión atmosférica	700.....1100 mbar (± 3 mbar)	
• Humedad (no condensada)	0.....99% rH (±3% rH)	

Tabla 4. Características del sistema AlphaGUARD, medidor comercial. [57]

Manejo de Datos

En el caso de la medición en aire los datos obtenidos por el detector son la concentración de radón durante diez minutos. Estos son muy estables, por lo cual el dato con su error asociado que nos proporciona el detector AlphaGUARD es con el que vamos a trabajar.

3.2 Sistema de detección dinámico. Medición de concentración de radón en agua.

Para la medición de concentración de radón en agua de manera continua utilizamos el equipo AquaKIT [58][56], el cual determina la concentración de radón de manera directa, en pequeñas muestras de agua. Este equipo consiste en un circuito formado por varios elementos: detector AlphaGUARD (modo de flujo), un sistema de bombeo eléctrico AlphaPUMP, un par de recipientes de vidrio y un conjunto de tubos conectores (ver figura 19)

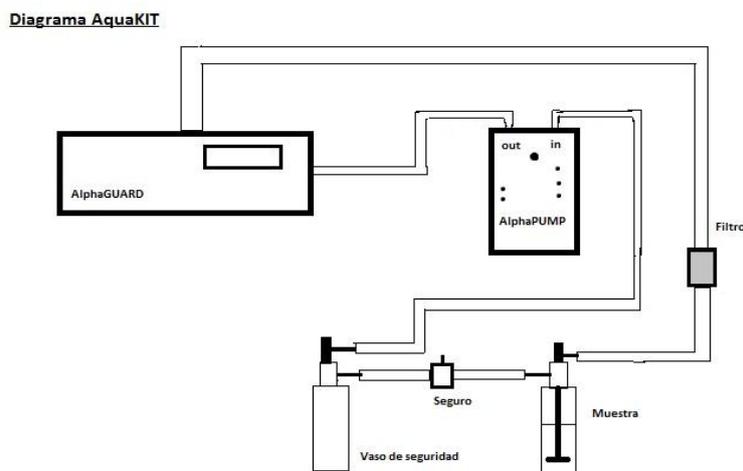


Figura 19. Diagrama de ensamblamiento del equipo AquaKIT

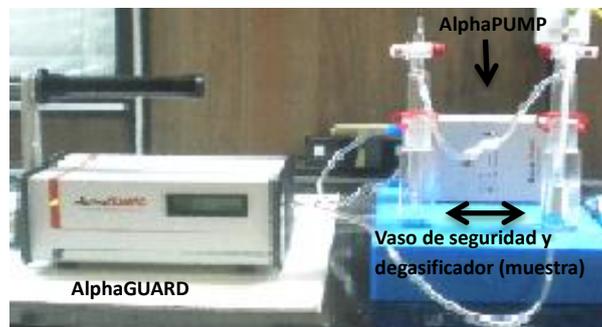


Figura 20. Fotografía del equipo AquaKIT utilizado para esta Tesis.

El arreglo del equipo trabaja de la siguiente manera. El AlphaPUMP (burbujeador) trabajando a una rapidez de 0.3 L/min comienza a inyectar aire al recipiente degasificador para poder burbujear el agua y así sacar el radón que pudiera contener. El radón en gas se transfiere al vaso de seguridad, el cual sirve para almacenar y proporcionar el volumen de aire a burbujear, para después ser absorbido por el AlphaPUMP, el cual lo expulsará hacia el

detector AlphaGUARD para en él medir las partículas alfa provenientes del decaimiento del radón. Después se expulsa el gas sobrante del volumen activo del detector y este gas llega a nuestro recipiente con la muestra de agua (desgasificador) lo que permite el burbujeo.

Características sobresalientes:

- Rápido y seguro en las mediciones directas de gas en ciclo cerrado.
- Procedimiento fácil, compacto y calibrado (operación con baterías)
- Posible disminución de incertidumbres al ser disminuida la muestra.
- Útil para casi todo tipo de agua.
- Buena reproducibilidad ($\pm 5\%$).

Determinación rápida:

- Rango de operación: 5 Bq/L a 20 000 Bq/L
- Tiempo de ejecución: < 15 min/muestra
- Volumen de muestra: 100 mL
- Error estadístico: cada 5 Bq/L $\leq 10\%$ (1-sigma error)

Determinación precisa:

- Rango de operación: < 0.1 Bq/L a 20 000 Bq/L
- Tiempo de ejecución: 30 – 300 min
- Volumen de muestra: > 500 mL

La ecuación que se utiliza para el cálculo de la concentración de radón en agua [58]:

$$C_{ag} = \frac{C_{ai} * \left(\frac{V_s - V_m}{V_m} + k \right) - C_o}{1000} \quad (20)$$

C_{ag} =Concentración de Radón en agua [Bq/L]

C_{ai} =Concentración de Radón en aire después de expelir el Radón [Bq/m³]

C_o =Concentración de Radón en aire antes de ensamblar (de cerrar el ciclo) [Bq/m³]

V_s = Volumen interior del sistema [mL]

V_m = Volumen de la muestra [mL]

K= coeficiente de distribución de Radón

3.3 Protocolo de medición de concentración de radón en agua con el equipo AquaKIT.

1. Ensamblaje del equipo *AquaKIT* (Figura 15) y conexión a una computadora que cuente con el programa *DataEXPERT*.
2. Se enciende el AlphaGUARD (ON).
3. En el programa se accede a la opción de “conectar el instrumento”, en este caso el *AlphaGUARD* y se coloca en modo de flujo “1 min FLOW”.
4. Después de 20 min de encendido, en el *DataEXPERT* se lee la lista de medidas (Bq/m³) y se toman las ultimas 20, para calcular un promedio (cambiando todos los números

- negativos por ceros) que corresponde a la medida en aire (se puede copiar esta lista en un programa de cálculo, como Excel).
5. Sí se desea tener el dato en unidades de Bq/L se tiene que multiplicar el promedio anterior por un factor de 0.01028 (el cual se obtiene de la ec. 20)
 6. En el vaso desgasificador se colocan 100 mL de muestra (agua obtenida del deshumidificador colocado en el salón cerrado). Para esto se retira la tapa del vaso y se vierte el agua lentamente con ayuda de una jeringa, después se vuelve a tapar y se sella.
 7. Para que el circuito de mangueras por donde pasará el agua esté bien cerrado las manijas con las que cuentan las tapas de los vasos (desgasificador y seguridad) deben de estar en posición de las 6 pm es decir el círculo indicador en la parte de abajo.
 8. El *AlphaPUMP* se coloca en la velocidad de 0.3 L/min y se enciende (ON) por 10 minutos. Esto permitirá el burbujeo de la muestra y por lo tanto la desgasificación.
 9. Ya pasados los 10 minutos se apaga (OFF) el *AlphaPUMP* y se deja reposar por 20 minutos.
 10. Después de los 20 minutos se recurre al programa *DataEXPERT* donde se repiten los pasos 4 y 5 simultáneamente, con las últimas 20 medidas dadas por el programa.
 11. Finalmente se retira la muestra, se limpia el dispositivo y se procede a colocar una muestra nueva. Siguiendo esta serie de pasos con 5 muestras por día de medición.

3.4 Adquisición de datos

El programa *DataEXPERT* permite configurar el *AlphaGUARD* así como descargar, administrar, evaluar y reproducir los datos en la computadora:

- Extrae todos los datos que el *AlphaGUARD* mide (Rn, Rn-error, temperatura, presión, humedad, etc.) en una base de datos.
- Los datos pueden ser mostrados en pantalla, ser manejados y hacerles acercamiento.
- Si se requiere el *DataEXPERT* convierte los datos automáticamente en formato ASCII, para poder manejarse en programas comerciales como MS-EXCEL.

Manejo de datos

Para la medición en agua, los datos obtenidos por el *AlphaGUARD* son la concentración de radón por minuto. En este caso los datos al encontrarse en el límite inferior de detección se comportan de manera inestable.

El fabricante indica que para datos menores a 300 Bq/m³, trabajando en el modo de flujo, puede no alcanzarse el equilibrio en el detector a pesar de ser un ciclo cerrado. Por la anterior observación, en este trabajo se realizaron una serie de mediciones para con estas obtener promedios y su desviación estándar.

Para calcular los promedios tomaremos 20 datos (adquiridos en 20 min de lectura). De estas 20 lecturas los valores que sean negativos los consideraremos ceros (nulos), esto ya que las concentraciones de actividad negativas carecen de sentido.

Capítulo IV. Resultados

Los resultados de la medición de ^{222}Rn se presentan como la concentración de su radiactividad, que es proporcional a la cantidad que se encuentra presente en cada una de nuestras muestras, tanto en aire como en agua.

4.1 Relación entre concentración de ^{222}Rn y humedad relativa.

Para mostrar la relación de la humedad y la concentración del radón, tomaremos algunos datos de los meses agosto y septiembre del 2011 con sus condiciones ambientales.

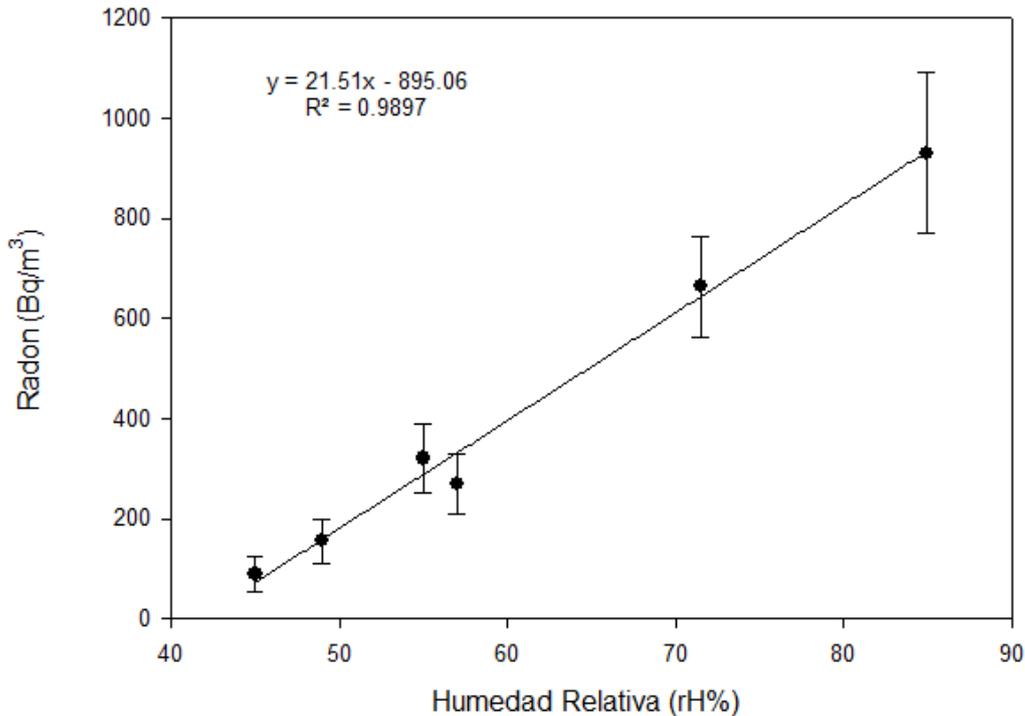
Temperatura (°C)	Bq/m ³	± Bq/m ³	rH %	P (mbar)
18	88	35	45	800
18	155	44	49	800
18	270	60	57	800
18	320	68	55	800
18	664	101	71.5	800
18	930	161	85	800

Tabla 5. Datos de la concentración de radón en aire del salón cerrado y sus condiciones ambientales.

De la tabla 5 se observa como la temperatura y la presión permanecen constantes, mientras que la humedad relativa y la concentración de radón son variables. Correspondiendo la concentración más alta al mayor porcentaje de humedad relativa y viceversa:

- $88 \text{ Bq/m}^3 \rightarrow 45\% \text{ rH}$
- $930 \text{ Bq/m}^3 \rightarrow 85\% \text{ rH}$

Observando esta relación proporcional graficamos los datos anteriores para observar su comportamiento.



Gráfica 2. Concentración de ^{222}Rn vs humedad relativa (salón cerrado)

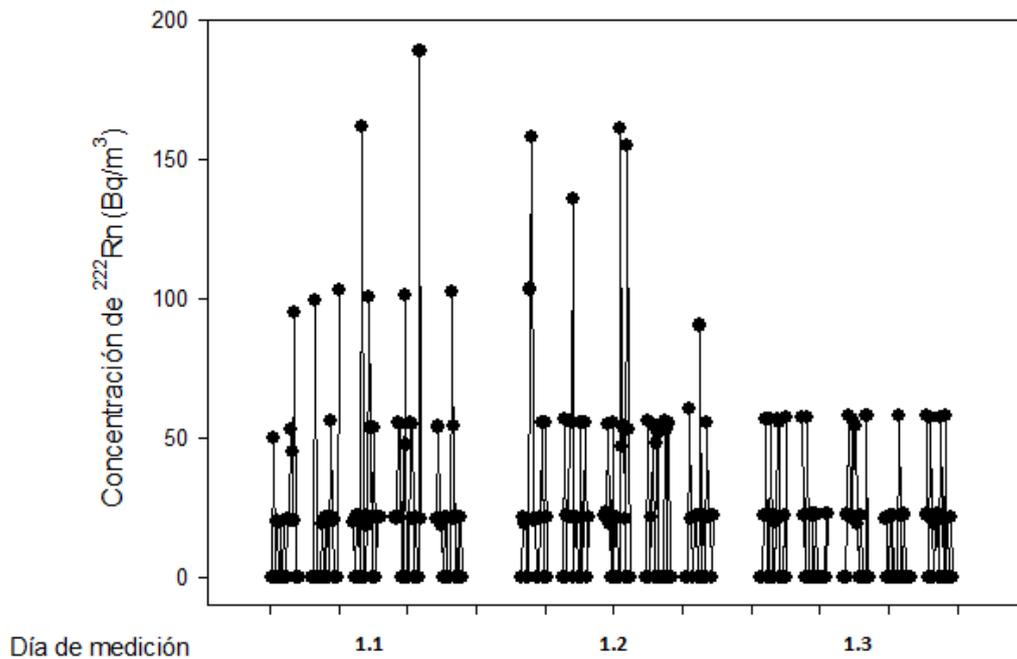
En la gráfica 2 vemos el comportamiento monótonico entre la concentración de radón en el aire y la humedad del salón. Lo que nos indica que al disminuir la humedad del salón (deshumidificar) también se da la disminución de la concentración de ^{222}Rn , hecho que nos muestra la posibilidad de que el radón se esté adhiriendo a la molécula de agua y transportándose con ella por el comportamiento de los aerosoles.

Para demostrar que el radón se atrapa en el agua, procedemos a medir el radón en el agua resultante del proceso de deshumidificación. Con esto podremos comprobar que la cantidad que bajó de la concentración de radón en aire se encuentra atrapada ahora en el agua.

4.2 Medición de la concentración de radón en agua.

4.2.1 Muestra I. Disminución de humedad.

La muestra I corresponde al agua que se recolectó del deshumidificador el día 10 de noviembre de 2011 que fue resultado de la disminución de humedad de 72.5% a 57% rH, lo que provocó un cambio en la concentración de radón de 389 Bq/m³, al bajar el nivel de 630 a 241 Bq/m³.



Gráfica 3. Medición de radón en agua resultante de un cambio de humedad relativa de 15.5% rH.

En esta gráfica podemos observar el comportamiento estadístico de nuestro instrumento de medición, al tener valores tan grandes como 189 Bq/m^3 y después valores nulos. Sin embargo también podemos observar cómo al pasar los días la concentración de radón en el agua va disminuyendo obedeciendo así la ley de decaimiento

Para conocer la concentración de radón en el agua, en unidades de Bq/l , se utilizó la ecuación que se utiliza para el cálculo de la concentración de radón proporcionada por el fabricante (ec. 20).

La temperatura del agua a medir en las condiciones de laboratorio fue de 20°C por lo cual el coeficiente de distribución tuvo como valor $k=0.26$.

De promediar los valores de las lecturas de las 5 alícuotas y restar la concentración ambiental por día se obtuvo:

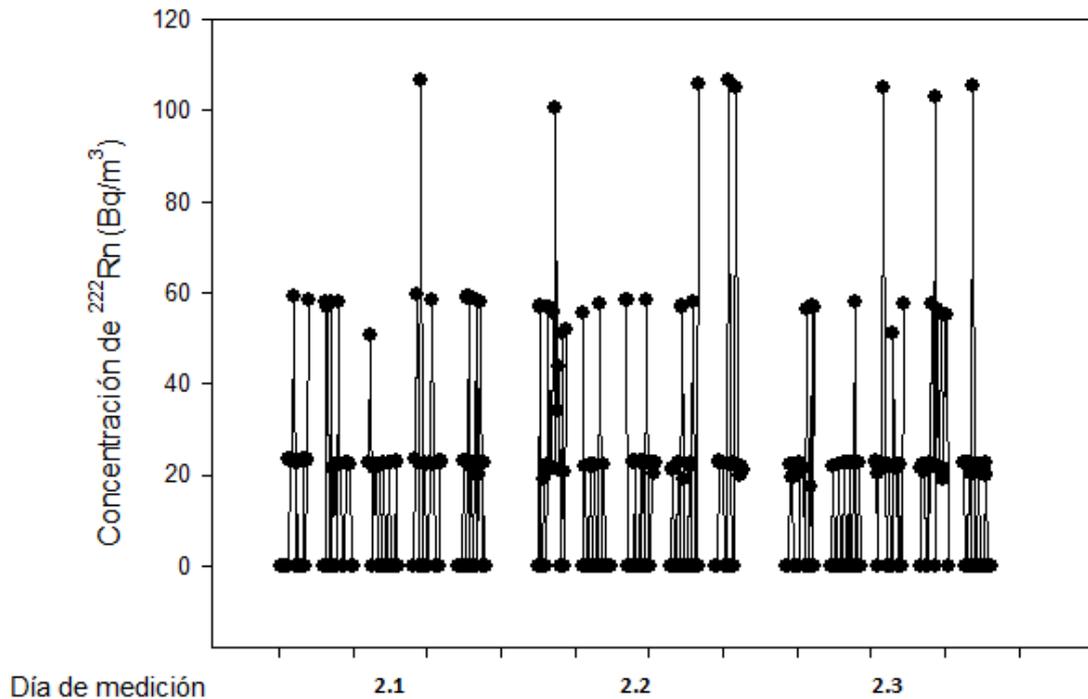
	Día de medición (noviembre)	Concentración promedio de radón en agua	σ
		C_{ag} (Bq/L)	\pm (Bq/L)
1.1	10	0.23	0.33
1.2	11	0.26	0.33
1.3	14	0.16	0.19

Tabla 6. Concentración promedio radón en el agua de la muestra del 10/nov por los tres días de medición.

Convirtiendo la concentración de radón en aire (que disminuyó) a volumen en litros este debió ser de 0.389 Bq/L y de las mediciones se obtuvo una concentración de 0.23 Bq/L el día de la recolección, lo que muestra que no hay un total atrapamiento del radón en el agua teniendo una pérdida del 40.9%.

4.2.2 Muestra II. Humedad constante.

La muestra II corresponde al 28 de noviembre del 2011, esta es el agua resultante de mantener constante el nivel de deshumidificación, en 57 % rH. Así como también se mantiene una concentración de radón constante en el salón de 331 Bq/m³.



Gráfica 4. Medición de radón en agua resultante de mantener la humedad relativa constante, 57% rH.

En este caso no es observable el decaimiento radiactivo de la muestra, teniendo un comportamiento similar para los tres distintos días. Esto puede deberse a que al mantener la humedad constante la concentración de radón también lo es, por lo cual el cambio de la concentración de radón mitigada es pequeña.

Sin embargo a pesar de no tener un decaimiento evidente, los valores de las lecturas de los distintos días van disminuyendo, compensando así el valor promedio en el cual si se observa una disminución. Calculando la concentración promedio de radón en agua de la misma manera que para la muestra I se obtuvieron los siguientes resultados:

	Día de medición (nov-dic)	Concentración promedio de radón en agua	σ
		C_{ag} (Bq/L)	\pm (Bq/L)
2.1	28	0.19	0.19
2.2	30	0.18	0.24
2.3	02	0.15	0.18

Tabla 7. Concentración de radón en agua a humedad constante.

Se siguen observando incertidumbres mayores al 100% y valores muy pequeños, por lo cual buscamos darle un valor al nivel de fondo midiendo la concentración de radón en agua destilada.

4.2.3 Agua destilada.

Siguiendo el mismo procedimiento para la medición y cálculo de la muestra de agua destilada se obtuvo un valor de fondo de:

Día de medición (diciembre)	Concentración promedio de radón en agua	σ
	C_{aq} (Bq/L)	\pm Bq/L
07	0.14	0.20

Tabla 8. Concentración de radón en agua destilada.

4.2.4 Muestra III. Agua con radón de generador.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de detección y comparar con valores más altos de concentración de ^{222}Rn en el agua, se procedió a generar agua con mayores concentraciones de radón, al burbujear radón procedente de una fuente que alcanza concentraciones de 48 KBq/m^3 . Esta muestra III se realizó el día 17 de noviembre del 2011.

El arreglo que se hizo para lograr lo anterior se muestra en la siguiente figura.

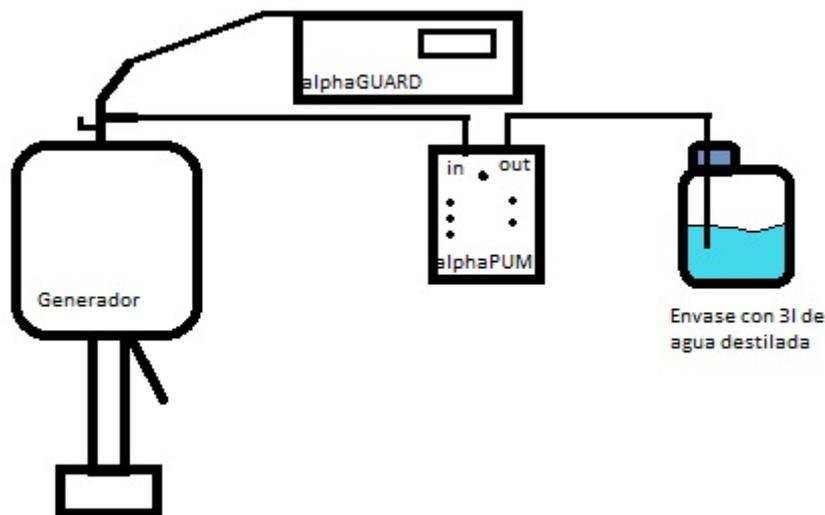
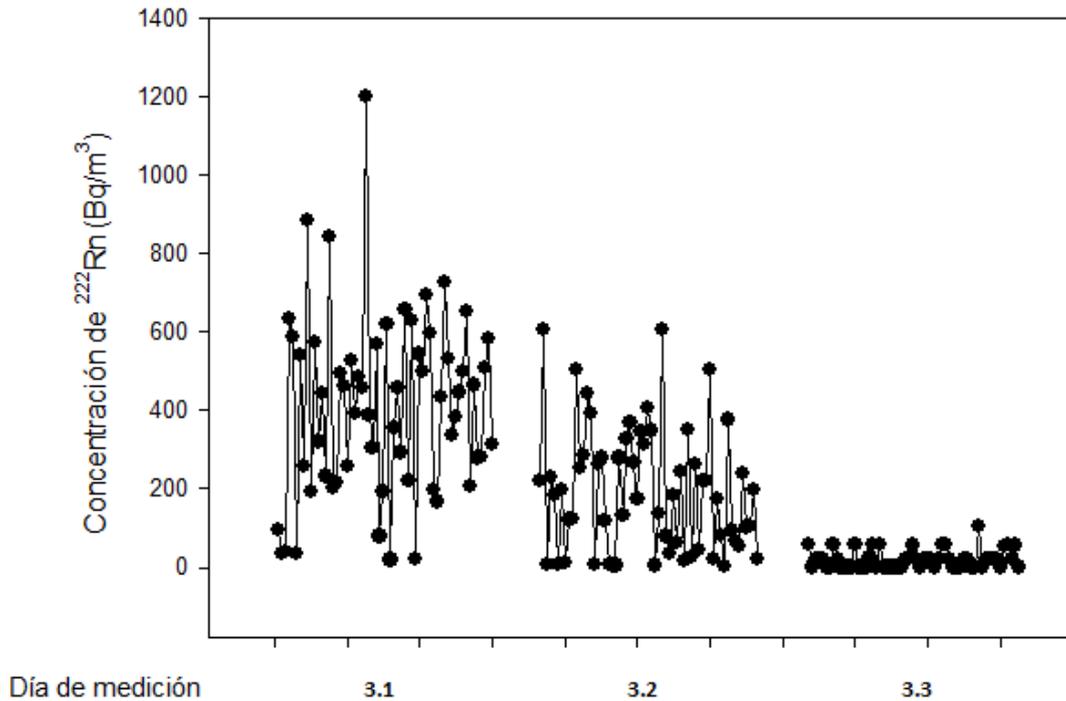


Figura 21. Arreglo generador de agua con radón.

Primero se hizo vacío en la cámara del generador, para esto utilizamos una bomba de vacío mecánica con la cual se alcanza aproximadamente un vacío de 10^{-3} torr. Después de dejarla funcionando por 10 minutos se retira de la boquilla de la cámara del generador y ahí se coloca un tubo en forma de Y para conectar al detector y al burbujeador al mismo tiempo, como se muestra en la figura 14. Finalmente se acciona la palanca para que el radón pueda pasar a la cámara y comenzar a medir la concentración de radón en ella y burbujear en el agua.

La manera en la que se genera el ^{222}Rn es tener en la base minerales con altas concentraciones de ^{238}U y este al decaer llega al radón, el cual al ser gaseoso sube a la cámara y entonces se detecta en esta.



Gráfica 5. Medición de radón en agua generada por el burbujeo de $6 \text{ kBq/m}^3 \pm 1 \text{ kBq/m}^3$

La cámara se mantuvo alrededor de 6 kBq/m^3 (cerrando la entrada de radón) y se burbujó por 20 minutos. Después se procedió a limpiar el detector conectando sólo el AlphaPUMP al detector, circulándole aire. Ya con el detector en el nivel de fondo se procedió a medir el agua resultante del burbujeo de concentración $6 \text{ kBq/m}^3 \pm 1 \text{ kBq/m}^3$ de la misma manera que la muestra del agua del salón cerrado, sin embargo como ahora son concentraciones más altas el tratamiento estadístico no es determinante así que se reducen a tres mediciones por día. De esto se obtuvieron los siguientes resultados:

	Día de medición (noviembre)	Concentración promedio de radón en agua	σ
		C_{aq} (Bq/L)	\pm (Bq/L)
3.1	17	4.18	2.35
3.2	18	1.72	1.34
3.3	23	0.18	0.22

Tabla 9. Concentración de radón en agua generada por el burbujeo de $6 \text{ kBq/m}^3 \pm 1 \text{ kBq/m}^3$

De los resultados anteriores podemos observar como si hay un atrapamiento de radón en el agua y este es proporcional a la concentración que le fue introducida por medio del burbujeo. Otro comportamiento que podemos observar es como al primer día ya decayó la mitad de la actividad y al sexto día su concentración es mínima (ver gráfica 5). Esto podría deberse a que no exista una disolución como tal y solo un atrapamiento superficial el cual puede romperse fácilmente y cada que se mueva la muestra se liberen los átomos de radón con mayor velocidad, lo que disminuye su concentración en el agua.

Finalmente podemos observar claramente el comportamiento estadístico del detector, al mostrar la disminución de la incertidumbre al aumentar el valor de la concentración promedio. Resultando en este caso para el promedio más alto una incertidumbre del 43.8% e ir aumentando esta hacia la concentración menor llegando a ser mayor del 100%.

En la literatura encontramos reportado como la concentración del radón de la fuente sólo se diluye en la muestra de agua aproximadamente un 30% y como no es observable la ley de decaimiento al cambiar rápidamente la concentración ya que el burbujeo emana todo el radón contenido en el agua, lo que provoca que se libere todo el radón antes de poder observar su decaimiento. [30]

Para corroborar el nivel de fondo proporcionado por el agua destilada se midió el agua burbujeada con 6 kBq/m^3 20 días después de su producción de lo que resultó:

Día de medición (diciembre)	Concentración promedio de radón en agua	σ
	C_{aq} (Bq/L)	\pm Bq/L
06	0.14	0.23

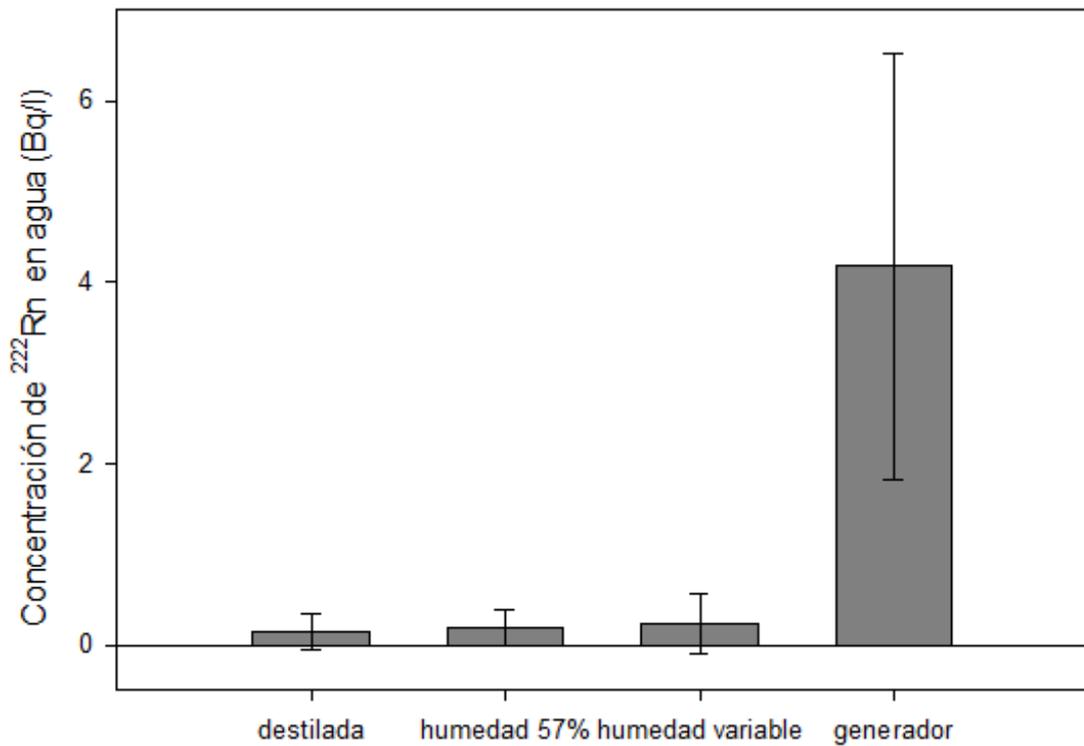
Tabla 10. Concentración de radón en agua generada por el burbujeo de $6 \text{ kBq/m}^3 \pm 1 \text{ kBq/m}^3$ después de 20 días.

Comparando las tablas 8 y 10 podemos dar un valor a la concentración cero (fondo) del detector.

4.3 Comparación de niveles de concentración de las aguas medidas.

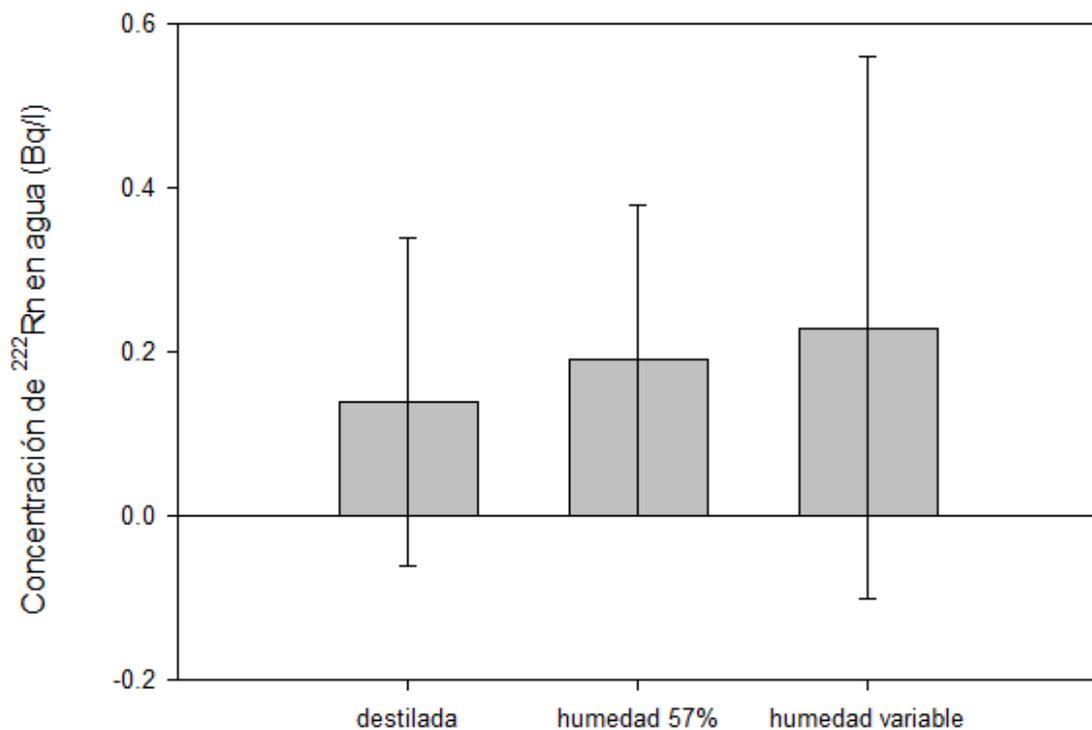
Para observar el atrapamiento del radón en el agua comparamos todos los experimentos anteriormente mencionados y con esto esperamos notar las diferencias entre los niveles de fondo (concentración cero), los que se obtuvieron del agua del salón cerrado (con cambio de humedad y constante) y los del agua con altas concentraciones producida con la fuente de radón.

Se observa que la concentración obtenida para el segundo día en algunos experimentos es mayor al primer día de medición, esto puede ser por la falta de aireación entre medidas y contaminación del detector, sobre todo por posibles repercusiones de sus descendientes en estado sólido. Por esta razón se tomó el valor del primer día como el valor a comparar.



Gráfica 6. Comparación de las distintas concentraciones de radón en el agua.

Haciendo un acercamiento en la gráfica a las aguas producto de la deshumidificación del salón cerrado comparando con el nivel de fondo se tiene:



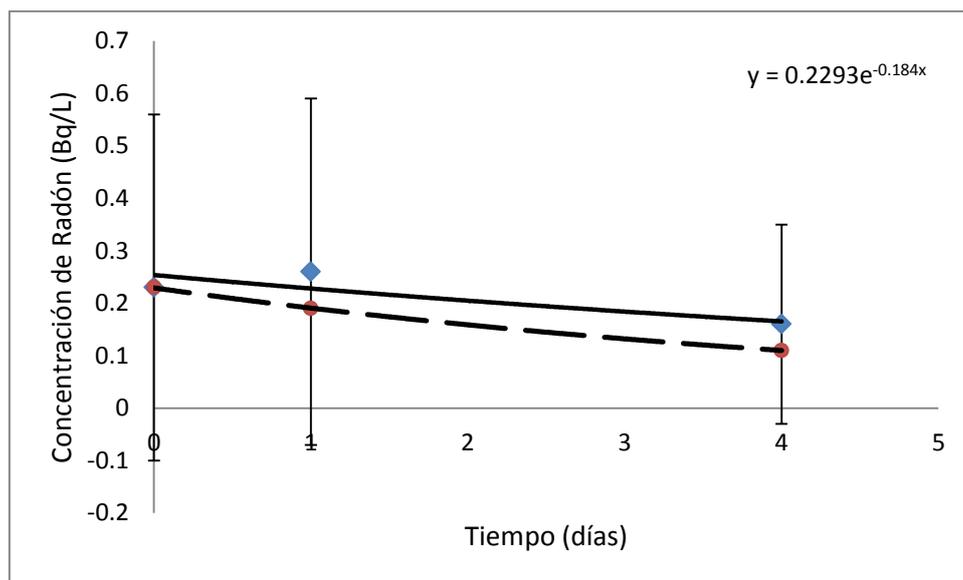
Gráfica 7. Comparación de las distintas concentraciones de radón en el agua producida del deshumidificador.

En la gráfica 6 se puede observar que las concentraciones en el agua obtenida por la deshumidificación son muy pequeñas comparadas con las obtenidas del agua producida con el

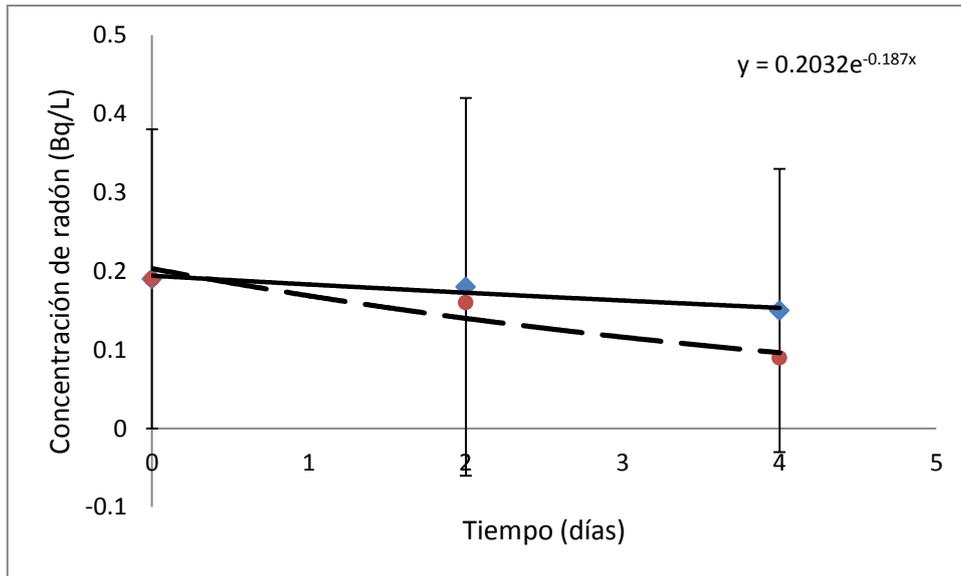
generador de radón. A pesar de esta gran diferencia el agua con concentración del generador tiene una concentración de radón por debajo del nivel recomendado dado por la USEPA, teniendo un valor menor que la mitad de dicho nivel recomendado (11 Bq/L).

Lo anterior muestra que el agua obtenida de la deshumidificación del salón no presenta un nivel de concentración de posible riesgo a la salud por ingestión. En la gráfica 7 se puede apreciar la diferencia entre el fondo y el agua obtenida de la deshumidificación, lo que indica el atrapamiento del radón en esta última.

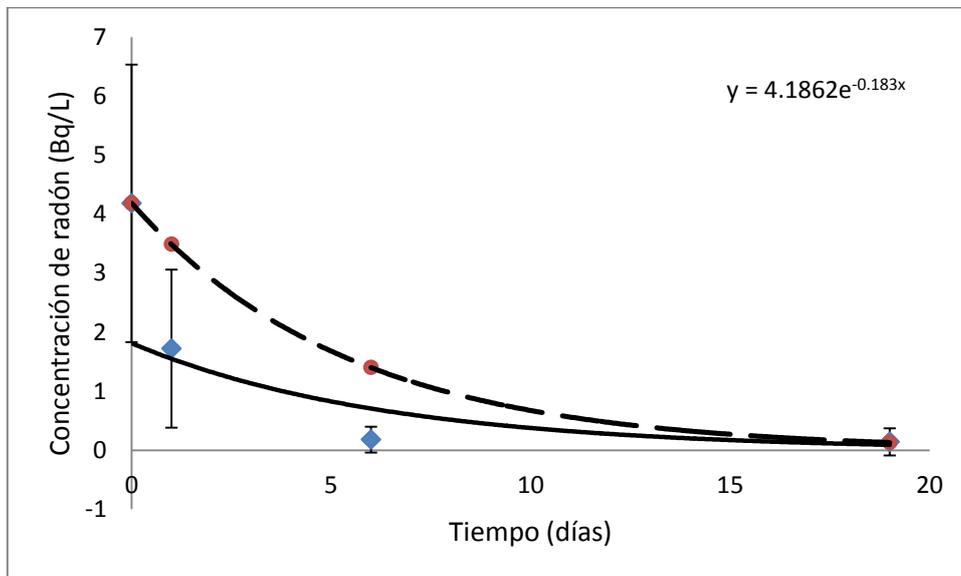
Para poder verificar que contamos con radón en nuestras muestras con los datos promedio (tablas 6, 7 y 9) se reproduce su curva de decaimiento y se compara con la producida por los datos obtenidos del primer dato experimental aplicado a la ecuación 7, que es la ecuación del decaimiento de la actividad. De esto se obtuvieron las siguientes curvas:



Gráfica 8. Comparación entre la curva de decaimiento experimental (línea sólida) de la concentración de radón en el agua del deshumidificador a humedad variable y los esperados (línea de guiones).



Gráfica 9. Comparación entre la curva de decaimiento experimental (línea sólida) de la concentración de radón en el agua del deshumidificador a humedad constante y los esperados (línea de guiones).



Gráfica 10. Comparación entre la curva de decaimiento experimental (línea sólida) de la concentración de radón en el agua producida por el generador y los esperados (línea de guiones).

En estas gráficas podemos observar el comportamiento exponencial de nuestras muestras. Un hecho resaltable es como en la gráfica 10 se muestra que el agua producida con el generador decae más rápido que el valor esperado, teniendo en este caso concentraciones mayores de radón y menores incertidumbres, se puede observar mejor lo que está ocurriendo en el agua. Para explicar esto se realiza el experimento descrito en la sección 2.4.5.

Se midió la concentración del radón en el aire del envase cerrado donde se encuentra la muestra de agua, esto para poder determinar si todo el radón está disuelto en el agua o parte se está liberando [30].

Si todo el ^{222}Rn se encontrará soluble en el agua presentaría el decaimiento exponencial descrito por la Ley de decaimiento, sin embargo si parte de este se estuviera desprendiendo entonces el decaimiento sería distinto al predicho por dicha ley.

En este caso se hizo un experimento cualitativo en el cual comparamos la concentración de radón en el aire del laboratorio con el valor de la concentración de radón en el aire dentro del envase. De esto se obtuvo que la concentración aumentaba más de la mitad de la concentración ambiental

Promedio C_{Rn} (Laboratorio)	C_{Rn} (Aire dentro del envase de la muestra)
$12 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$	$26 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$

Tabla 11. Comparación de la concentración de radón en el aire del laboratorio y el de la muestra.

Con los valores de la tabla 11 podemos observar como si hay un aumento considerable en la concentración de radón lo que nos indica que parte de este si se está liberando del agua. Este comportamiento se puede deber a que no se encuentra en equilibrio o por movimientos del envase. Por lo tanto podemos suponer que sí tenemos átomos de radón en las muestras de agua y de los átomos que se encuentran solubles en ella algunos están adheridos con menos fuerza a sus moléculas, provocando así que su liberación sea más fácil.

Capítulo V. Radón y Salud.

Como ya se vio en el capítulo I, las concentraciones mayores al nivel recomendado de radón intramuros pueden ser un riesgo para la salud, por lo cual algunos organismos como el WHO se han dado a la tarea de estudiar el comportamiento del radón en los sistemas biológicos.

Los efectos biológicos resultantes de la exposición a una fuente de radiación ionizante pueden ser variados; todas las moléculas pueden ser alteradas en función a la dosis y tiempo de exposición. No es de sorprender que grandes concentraciones de radiación puedan romper y destruir el componente estructural de la célula hasta producir muerte celular.

Algunos de los efectos que pueden existir en las células al ser expuestas a la radiación ionizante son sobre:

- La membrana.
- La producción de ATP.
- La división celular.
- El proceso de síntesis.
- Los cromosomas.

De estos efectos biológicos pueden resultar cambios tanto funcionales como morfológicos, los cuales dependen de cada sistema (órgano) y cuanta dosis se le administre. [22]

El ^{222}Rn es inhalado y exhalado continuamente, lo que contribuye con una pequeña dosis al cuerpo; la contribución significativa está dada por sus productos de decaimiento, los cuales emiten partículas alfa y beta, tienen vidas medias cortas y son sólidos.

Algunos de los productos de decaimiento del radón son absorbidos por partículas de aerosoles, lo que les permite ser transportados tanto en los pulmones como en el ambiente.

Al ser respiradas estas partículas son depositadas en la superficie del árbol traqueobronquial y allí es donde se da el decaimiento de dichos productos, lamentablemente la mucosidad bronquial no es lo suficientemente espesa como para absorber las partículas alpha por lo cual se puede generar daño celular. [23]

En promedio un adulto con una rutina dada en un lugar de trabajo respira $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ de aire. Una concentración típica de aerosoles dentro y fuera de una construcción está del orden de 10^{10} por m^3 en un radio centrado alrededor de $0.5 \times 10^{-5} \text{ m}$. Lo que nos da una idea de cuantos átomos de radón y sus productos se pueden ingerir tan solo con el ejercicio de la respiración.

Ahora, si pensamos en una casa con una concentración de radón en aire de $50 \text{ Bq}/\text{m}^3$ entonces aproximadamente de estos 40 Bq de ^{222}Rn son ingeridos en los pulmones por minuto, con un 3% de la dosis dada por una fracción de sus productos de decaimiento no atrapada en aerosoles, siendo iones libres o clusters de tamaño mínimo [24]. Esto corresponde a un modelo de ingesta pulmonar de radón, sin embargo existen varios como este los cuales son complejos al tomar en cuenta diversos factores como la vida media, el factor de equilibrio, el ciclo de vida celular y parámetros de naturaleza completamente estadística. Por lo tanto se sigue buscando el mejor modelo para caracterizarla.

La dosis equivalente anual por decaimiento de radón ha sido calculada por el ICRP 1981 y por el NCRP 1987a y 1987b, que se muestra en la siguiente tabla:

Órgano	mSv/y por Bq/m^3	Referencia
Pulmón completo	7×10^{-3}	ICRP
Superficie bronquial	5×10^{-3}	NCRP

Tabla 11. Dosis equivalente anual de radón

El primer probable efecto adverso a la salud por una exposición continua al radón es el cáncer de pulmón (típicamente bronquiogenético):

- Carcinoma de células escamosas
- Carcinoma de células pequeñas
- Carcinoma de células grandes
- Adenocarcinoma

Otros efectos respiratorios negativos asociados a la exposición crónica son:

1. Efisema
2. Fibrosis pulmonar
3. Neumonía crónica intersticial
4. Silicosis
5. Lesiones respiratorias

Debido a todo lo anterior ya descrito, el radón es considerado como la segunda causa de cáncer de pulmón lo que lo convierte en un importante problema de salud pública.

Dando algunas cifras aproximadas en países como Estados Unidos se tiene que los riesgos cuantificados por distintas concentraciones de radón para personas no fumadoras son:

Concentración de Radón (Bq/m³)	Si 1.000 personas que no han sido fumadores se vieran expuestas a este nivel de radón durante toda la vida,	El riesgo de contraer cáncer por exposición al radón es comparable a	QUÉ HACER:
740	<i>unas 8 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- El riesgo de ser asesinado en un crimen violento</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
370	<i>unas 4 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>		<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
296	<i>unas 3 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- 10 veces el riesgo de morir en un accidente aéreo</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
148	<i>unas 2 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- El riesgo de ahogamiento</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
74	<i>aproximadamente 1 persona podría contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- El riesgo de morir en un incendio en la vivienda</i>	<i>Considere reparar entre 74 y 148 Bq/m³</i>
48.1	<i>menos de 1 persona podría contraer cáncer de pulmón</i>	<i>(Nivel promedio de radón en el interior)</i>	
14.8	<i>menos de 1 persona podría contraer cáncer de pulmón</i>	<i>(Nivel promedio de radón en el exterior)</i>	

Tabla 13. Evaluación de riesgo para personas que nunca han fumado [28].

La primera causa de cáncer pulmonar es el tabaquismo, el cual al conjuntarse con altas concentraciones de radón eleva la posibilidad de presentar un problema de cáncer. En la siguiente tabla 14 podemos observar el aumento considerable de casos que pueden existir a los mismos niveles de radón por el hecho de ser fumador.

Concentración de Radón (Bq/m³)	Si 1.000 personas que han sido fumadores se vieran expuestas a este nivel de radón durante toda la vida,	El riesgo de contraer cáncer por exposición al radón es comparable a	QUÉ HACER: Deje de fumar y
740	<i>unas 135 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- 100 veces el riesgo de morir ahogado</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
370	<i>unas 71 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- 100 veces el riesgo de morir en un incendio en la vivienda</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
296	<i>unas 57 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>		<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
148	<i>unas 29 personas podrían cáncer de pulmón</i>	<i><-- 100 veces el riesgo de morir en un accidente aéreo</i>	<i>Repare su vivienda (mitigación)</i>
74	<i>unas 15 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i><-- 2 veces el riesgo de morir en un accidente de tránsito</i>	<i>Considere reparar entre 74 y 148 Bq/m³</i>
48.1	<i>unas 9 personas podrían contraer cáncer de pulmón</i>	<i>(Nivel promedio de radón en el interior)</i>	
14.8	<i>unas 3 personas podrían</i>	<i>(Nivel promedio de radón en el exterior)</i>	

Tabla 14. Evaluación de riesgo para personas fumadoras [28].

El caso de los efectos de la radiación en los niños es mucho más complicado ya que se tienen pocos datos, sin embargo algunos estudios han mostrado que estos son mucho más sensibles a la radiación que los adultos. Los niños tienen la estructura de los pulmones y patrones de respiración diferentes lo que resulta en una mayor dosis de radiación en el tracto respiratorio.

Hofmann informó de que la dosis absorbida de radón era fuertemente dependiente de la edad, con un valor máximo alcanzado en la edad de 6 años, es decir cuando hay la probabilidad de mayor daño celular. A pesar de estos resultados, no hay datos definitivos respecto de si los niños están en mayor riesgo que los adultos de radón. Debido al tiempo de latencia para que el cáncer se desarrolle y el carácter acumulativo de los riesgos del radón a través del tiempo, hay muy pocas posibilidades de que alguien pueda tener cáncer de pulmón debido al radón antes de los 35 años, a pesar de la exposición antes de que la edad contribuyen al riesgo a edades más tardías. El riesgo relativo de exposición al radón en el hogar

también es mayor para los niños, ya que pasan más tiempo en casa y/o el sótano. En promedio, los niños pasan el tiempo un 70% más en la casa que los adultos. [36][37]

Los pulmones no son lo único que puede resultar afectado a causa del decaimiento del radón, el daño puede llegar a otros órganos esto principalmente por su posible difusión en la sangre. En la siguiente tabla podemos observar la dosis equivalente anual de otros órganos.

Tejido	mSv/y por Bq/m ³	Referencia
Hígado	5.1×10^{-5}	Jacobi and Eisfeld (1980)
Riñones	5.6×10^{-5}	Jacobi and Eisfeld (1980)
Bazo	5.2×10^{-5}	Jacobi and Eisfeld (1980)
Médula ósea	9.6×10^{-5}	Jacobi and Eisfeld (1980)
Superficie de huesos	2.5×10^{-5}	Jacobi and Eisfeld (1980)
Tejido blando	3.0×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Tejido adiposo	9.0×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Piel	50×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Médula	6.3×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Tejido adiposo médula	16×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Superficie hueso (médula)	1.5×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Superficie hueso (tejido adiposo médula)	3.0×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)
Linfocitos T	0.01	Harley and Robbins (1992)
Capilares de alveolar	20×10^{-5}	Harley and Robbins (1992)

Tabla 12. Dosis equivalente anual debido a radón de órganos distintos a los pulmones [25].

Algo resaltable de la Tabla 12 es que a los linfocitos son a los que se les asocia la mayor dosis equivalente anual. Un estudio acerca de esto es uno realizado de la leucemia infantil en Dinamarca (2.400 casos, 6.697 controles) desde 1968 hasta 1994, el cual sugirió una débil, pero estadísticamente significativa, asociación entre la exposición al radón intramuros y la leucemia linfoblástica aguda infantil (LLA).

El estudio danés estimó el riesgo relativo (RR) para una exposición acumulada de 1000 Bq/m³ en un año mientras que para una exposición de 10 años el RR corresponde a una concentración de radón de 100 Bq/m³.

Existen dos maneras en que las partículas alfa pueden dañar el tronco celular por LLA. Una es la dosis de las partículas alfa a la médula ósea, y la segunda es la dosis a la mucosa bronquial, donde se encuentra una abundancia de linfocitos circulantes, lo que está asociado directamente a la manera de ingesta del radón intramuros [31].

Como ya pudimos ver el radón es un grave problema de salud pública por lo cual se siguen buscando soluciones para su control, tanto en términos de mitigación como en modelos que caractericen su transporte e ingesta en el cuerpo humano.

En esta tesis se ha propuesto un método novedoso para la mitigación de un salón cerrado, en el cual por medio del atrapamiento del radón en el agua se logra disminuir la concentración de radón en aire, resultando un salón con concentraciones de radón menores a las recomendadas y una muestra de agua resultante con concentraciones de radón mucho menores al nivel de acción.

Conclusiones.

Las concentraciones obtenidas en el agua procedente de la deshumidificación del salón cerrado en estudio fueron muy bajas, hecho que se debe a que los cambios de concentración de radón en el aire no son muy grandes (cientos de Bq/m³) y al convertir el volumen de concentración a litros, multiplicando por un factor de un milésimo, se reduce el valor considerablemente.

A pesar de que la concentración de radón en el agua era muy pequeña se pudo observar la diferencia con el agua destilada, comprobando así el atrapamiento del radón en las moléculas del agua.

Se observó una relación monotónica entre la humedad relativa del salón y la concentración de radón en el aire de este mismo, lo que nos indica que el ²²²Rn y las moléculas de H₂O están interactuando y transportándose juntas.

El sistema de medición AquaKIT con el detector AlphaGUARD no es un buen medidor de radón en agua para concentraciones menores de 1 Bq/l. La precisión del equipo dejó mucho que desear al tener incertidumbres hasta del 100 % en las mediciones del agua obtenida por la deshumidificación del salón. Se debe tener un protocolo de funcionamiento del equipo muy específico para distintas concentraciones. Los fabricantes no dan mayor explicación de su uso y funcionamiento, por lo cual en esta tesis se propuso un protocolo propio.

El agua procedente de la deshumidificación del salón a humedad variable tuvo mayor concentración de radón (32% más) que la que se produjo a humedad constante. Este comportamiento se atribuye a que la diferencia de concentración de radón en aire que se mitiga es mayor cuando la humedad es variable, esto por la relación lineal entre la humedad y la concentración de ²²²Rn, y cuando la humedad se mantiene constante solo se está mitigando una cantidad menor de radón, para mantener el equilibrio de lo que se continúa generando por el suelo de la construcción.

Las curvas de decaimiento fueron observables, comparándolas con las obtenidas de los valores esperados de donde observamos el mismo comportamiento exponencial, pero con distintos factores de decaimiento, dentro del intervalo de incertidumbres.

El radón se encuentra soluble en el agua procedente de la condensación de la humedad producida dentro del deshumidificador, sin embargo algunos de sus átomos se encuentran menos adheridos a las moléculas de agua lo que provoca su fácil liberación por lo cual parte del radón mitigado lo podemos medir en el agua y parte se podrá medir en el aire del envase donde se coloque la muestra.

Las implicaciones que tienen a la salud las distintas concentraciones de radón es un tema muy importante y de actualidad, del que todavía se desconoce mucho, y al cual se le debería de prestar mayor atención en países como México el cual no tiene un protocolo de regulación.

Con base a las pruebas experimentales que aquí se presentaron, se concluye que este método de mitigación es funcional para salones que cumplan con las características que se contaron en este trabajo, siendo este un método novedoso, sencillo, de fácil acceso a todo público y de bajo costo respecto a los otros métodos.

Apéndice I: Conceptos

Actividad (A): Corresponde a una cantidad de radionúclido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado. Numero de decaimientos por unidad de tiempo.

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

Átomo: es la unidad más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades, y que no es posible dividir mediante procesos químicos.

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

Dosis absorbida: Energía impartida a la materia por radiación ionizante por unidad de masa en el lugar de interés del material irradiado.

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

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

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

Expresión en la que $D_{T,R}$ es la dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R .

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

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

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

Escalas atómicas: del orden de los átomos (10^{-10} m)

Exposición: Exposición de personas a la radiación o a sustancias radiactivas, la cual puede ser externa (irradiación causada por fuentes situadas fuera del cuerpo humano), o interna (irradiación causada por fuentes existentes dentro del cuerpo humano). La exposición puede clasificarse en normal o potencial; ocupacional, médica o del público; así como, en situaciones de intervención, en exposición de emergencia o crónica. También se utiliza el término exposición en dosimetría para indicar el grado de ionización producido en el aire por la radiación ionizante.

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

Fuerza fuerte: es una de las cuatro interacciones fundamentales. Es la fuerza responsable de mantener unidos a los nucleones (protones y neutrones) que coexisten en el núcleo atómico, venciendo a la repulsión electromagnética entre los protones que poseen carga eléctrica del mismo signo (positiva) y haciendo que los neutrones, que no tienen carga eléctrica, permanezcan unidos entre sí al igual que los protones.

Gas noble: son gases monoatómicos inodoros, incoloros y presentan una reactividad química muy baja. Los seis gases nobles que se encuentran en la naturaleza son helio (He), neón (Ne), argón (Ar), kriptón (Kr), xenón (Xe) y el radón (Rn).

Humedad relativa (rH%): es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental y se expresa en tanto por ciento.

Isoterma: curva que une los puntos, en un plano cartográfico, que presentan las mismas temperaturas en la unidad de tiempo considerada.

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

Isoyeta: curva que une los puntos, en un plano cartográfico, que presentan la misma precipitación en un intervalo de tiempo considerado.

Ley de reparto: cuando se reparte una cantidad determinada de soluto entre dos disolventes inmiscibles, se alcanza un estado de equilibrio en el que tanto el potencial químico como la fugacidad del soluto es el mismo en las dos fases.

Ley de Henry: a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelta en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido.

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

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

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

Positronio: sistema cuasiestable formado por un electrón y su antipartícula, el positrón, que unidos forman un átomo exótico.

Principio de exclusión de Pauli: Establece que no puede haber dos fermiones con todos sus números cuánticos idénticos (esto es, en el mismo estado cuántico de partícula individual) en el mismo sistema cuántico ligado.

Radiación ionizante: Energía capaz de producir pares de iones en la materia.

Vida media: tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo radiactivo.

Apéndice II: Unidades

Dimensión	Unidad	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Temperatura	Kelvin	K
Volumen	Litro	L
Tiempo	Segundo	s
	Año	y

Cantidad	Unidad	Símbolo	Unidades Base
Actividad	Bequerel	Bq	s^{-1}
Dosis absorbida	Gray	Gy	$J\ kg^{-1}$

Equivalencias.

Actividad:

$$1\ Bq = 1\ \text{desintegración/s}$$

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

Donde,

- Ci= Curie

Concentración de actividad:

$$1\ Bq/m^3 = 0.001\ Bq/L$$

Dosis equivalente:

$$1\ Sv = 1\ Gy * Q$$

$$1\ Sv = 100\ rem$$

Donde,

- Sv = Sievert
- Q = factor de calidad que depende del tipo de radiación incidente en el tejido. Por ejemplo $Q_{\alpha} = 20$
- rem=Roentgen Equivalent Man (J/kg)

Apéndice III: Instituciones

Siglas	Nombre
ICRP	International Comission on Radiological Protection
WHO	World Health Organization
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UK-HSE	United Kingdom-Health and Safety Executive
NCRP	National Council Radiation Protection & Measurements
NAS	National Academy of Science

REFERENCIAS

- [1] An introduction to radiation protection. Alan Martin and Samuel A. Harbison. Chapman and Hall John Wiley and Sons. 2nd ed.
- [2] Introduction to health physics. Herman Cember. 2009. McGraw-Hill Medical. 4th ed.
- [3] Concepts of Modern Physics. Arthur A. Beiser. 2003. Ed McGraw-Hill. 6^a ed.
- [4] Trazas Nucleares en Sólidos. Espinosa Guillermo. 1994. UNAM. México.
- [5] National Research Council. Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI). Washington, DC:National Academy Press, 1998.
- [6] Risk assessment of Radon in drink water. Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water, Board on Radiation Effects, Research Commission on Life Sciences, National Research Council. 1999. National Academy Press. Washington D.C.
- [7] El Radón y sus riesgos. Universidad de Oviedo. León Garzón Ruipérez. 1992. España.
- [8] WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON, A PUBLIC HEALTH PERSPECTIVE. World Health Organization. 2009.
- [9] A Radon-in-water Monitor Based on Fast Gas Transfer Membranes, Heinz Surbeck. Int. Conf. on technologically enhanced natural radioactivity (TENR) caused by non-uranium mining. 1996
- [10] Arvela H, Hoving P (1993). *Finnish experience in indoor radon mitigation*. The Sixth International Conference on Indoor Air Quality and Climate IV:563-568, Helsinki.
- [11] American Association of Radon Scientists and Technologists (2006). *Active Soil Depressurization Radon Mitigation Standards for Low Rise Residential Buildings*. AARST, Fletcher, NC.
- [12] World Health Organization (2005). *Guidelines for drinking-water quality (Third Edition)*. WHO, Geneva.
- [13] Turk BH et al. (1991). Effectiveness of radon control techniques in fifteen homes. *J Air Waste Manage Assoc.* 41(5):723-734.
- [14] Understanding radioactive aerosols and their measurement. Stephen D. Schery. 2001. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- [15] Segovia, N., Gaso, I., Mena, M., Golzarri, J.I., Espinosa, G. Indoor radon data intercomparison using NTD and different dynamic recording system. *Radiation Measurements* (artículo en revisión).
- [16] Universidad de Extremadura. Espectrometría alfa: www.unex.es/~fan/Computacional/c3/ESPECTROSCOPIA%20ALFA.html.

- [17] G. Espinosa, R. Gammage (2011). An Indoor Radon Survey in Three Different Climate Regions in Mexico, and the Influence of Climate in the Obtained Values. Journal of Environmental Protection.
- [18] G. Espinosa, et al. (2006). Nationwide survey of radón levels in indoor workplaces in Mexico using Nuclear Track Methodology. Elsevier.
- [19] C. Vázquez-López, et al. (2011). A survey of ^{222}Rn in Drinking Water in Mexico City. Radiation Protection Dosimetry (2011). Vol. 145, No. 2-3, pp. 320-324.
- [20] NTP 440: Radón en ambientes interiores. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [21] <http://www.epa.gov/radon/healthrisks.html>
- [22] Radiation Biology. Alison P. Casarett. 1968. United States Atomic Energy Commission. Washington D.C.
- [23] Radiation Biophysics. Edward L. Alpen. 1998. Academic Press. San Francisco California. 2nd ed.
- [24] Radon on the environment. M. W I LKENING. 1990. Departmenr of Physics, New Mexico Insrirure of Mining and Technology, Socorro, U.S.A.
- [25] Risk assessments radon in drink water. Commission on Life Sciences National Research Council. 1999. National Academy Press. Washington D.C.
- [26] NCRP Report No. 160, Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. 2006.
- [27] Naciones Unidas (2000). UNSCEAR 2000 Report Vol. I: Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- [28] Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>.
- [29] Baeza A., Navarro E., Roldán C., Ferrero J.L., Juanes D., Corbacho J.A., Guillén F.J. (2003). Indoor radon levels in buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain). Radiation Protection Dosimetry, 103 (3), 263-268.
- [30] J.R. García-Vindas. Estudio experimental del tiempo de disolución del Rn-222 en agua y algunas implicaciones en la geología. Revista Geológica de América Central, 24: 87-92, 2001.
- [31] Naomi H. Harley, Edith S. Robbins. RADON AND LEUKEMIA IN THE DANISH STUDY: ANOTHER SOURCE OF DOSE. Health Physics. 97(4):343–347; 2009
- [32] L. Colmenero Sujo, M.e. Montero Cabrera, L. Villalba, M. Renterpia Villalobos, E, Torres Moye, M. García León, R. García-Tenorio, F. Mireles García, E.F. Herrera Peraza, D. Sánchez Aroche. Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, México. Journal of Environmental Radioactivity 77 (2004) 205-219.

- [33] Christopher Y. H. Chao, Thomas C.W. Tung and John Burnett. Influence of Ventilation on Indoor Radon Level. *Building an Environment* 32 (1997), No. 6, 527-534.
- [34] ESPINOSA G, Silva, R.J, Gel detectors for Radon - 222 gas, *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 264(2), 2005, 333-336.
- [35] Aud Venke Sundal, Vidar Valen, Oddmund Soldal, Terje Strand. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. *Science of the Total Environment* 389 (2008) 418-428.
- [36] RADIATION AND ENVIRONMENTAL BIOPHYSICS. Volume 20, Number 2 (1982), 95-112, DOI: 10.1007/BF01323931
- [37] Hofmann , W. , Steinhausler , F. , and Pohl , E. (1979). *Health Phys.* 37 : 517 – 532 .
[CrossRef], [PubMed], [Web of Science ®]
- [38] Pirjo Korhonen, Helmi Kokotti, Pentti Kalliokoski. Behaviour of radon, radon progenies and particle levels during room depressurisation. *Atmospheric Environment* 34 (2000) 2373 – 2378.
- [39] Thomas Coskeran, Antony R. Denman, Paul S. Phillips, Gavin K, Gillmore. A critical comparison of the cost-effectiveness of domestic radon remediation programmes in three counties of England. *Environmental Radioactivity* 62 (2002) 129 – 144.
- [40] A.R. Denman, N.P. Groves-Kirkby, C.J. Groves-Kirkby, R. G. M. Crockett, P.S. Phillips, A.C. Woolridge. Health implications of radon distribution in living rooms and bedrooms in U. K. dwellings – A case study in Northamptonshire. *Environment International* 33 (2007) 999 – 1011.
- [41] I. Sarrou, I. Pashalidis. Radon levels in Cyprus. *Journal of Environmental Radioactivity* 68 (2003) 269–277
- [42] Jonathan M. Samet. RESIDENTIAL RADON AND LUNG CANCER: END OF THE STORY?. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 69:527–531, 2006
- [43] Jonathan M. Samet and George R. Eradze. Radon and Lung Cancer Risk: Taking Stock at the Millenium. *Environ Health Perspect* 108(suppl 4):635-641 (2000).
- [44] J.U. Ahmed. Altos niveles de radiación natural: informe de una conferencia internacional celebrada en Ramsar. *BOLETÍN DEL OIEA*, 2/1991.
- [45] Have we been wrong about ionizing radiation and chronic lymphocytic leukemia?. Editorial. *Leukemia Research* 32 (2008) 523–525.
- [46] Johan Paridaens, Louis de Saint-Georges, Hans Vanmarcke. Mitigation of a radon-rich Belgian dwelling using active subslab depressurization. *Journal of Environmental Radioactivity* 79 (2005) 25–37.
- [47] A.V. Nero, A.J. Gadgil, W.W. Nazaroff, K.L. Revzan. *Indoor Radon Decay Products: Concentrations, causes and Control Strategies*. U.S. Department of Energy Office of Health and Environmental Research Washington D.C. (1990)

- [48] W. J. RILEY, A. J. GADGIL, Y. C. BONNEFOUS and W. W. NAZAROFF. THE EFFECT OF STEADY WINDS ON RADON-222 ENTRY FROM SOIL INTO HOUSES. *Atmospheric Environment* Vol. 30, No. 7, pp. 1167-1176, 1996
- [49] S. Przyborowski and W. Röhnsch. Putting the ICRP recommendation on radon into national practice: possibilities and problems. *Environment International*, Vol 22, Suppl. 1, pp. S1093-S1097, 1996
- [50] A. D. Wrixon. New ICRP recommendations. *J. Radiol. Prot.* 28 (2008) 161–168
- [51] International Commission on Radiological Protection Statement on Radon. Approved by the Commission in November 2009.
- [52] H. Lettner, R. Rolle, R. Winkler, F. Steinhäusler. Rn-mitigation in a traditional Austrian farmhouse. *The Science of the Total Environment* 272 (2001). 293-294
- [53] Natasa Todorovic, Jovana Nikolov, Sofija Forkapic, Istvan Bikit, Dusan Mrdja, Miodrag Krmar, Miroslav Veskovic. Public exposure to radon in drinking water in SERBIA. *Applied Radiation and Isotopes* 70(2012)543–549.
- [54] Thomas Coskeran, Antony Denman, Paul Phillips, Gavin Gillmore, Roger Tornberg. A new methodology for cost-effectiveness studies of domestic radon remediation programmes: Quality-adjusted life-years gained within Primary Care Trusts in Central England. *Science of the Total Environment* 366 (2006) 32–46
- [55] C.J. Groves-Kirkby, A.R. Denman, P.S. Phillips, R. Tornberg, A.C. Woolridge, R.G.M. Crockett. Domestic radon remediation of U.K. dwellings by sub-slab depressurisation: Evidence for a baseline contribution from constructional materials. *Environment International* 34 (2008) 428–436.
- [56] M. Schubert, W. Buerkin, P. Peña, A. E. Lopez, M. Balcazar. On-site determination on radon concentration in water samples: Methodical background and results from laboratory studies and a field-scale test. *Radiation Measurement* 41 (2006) 492-497.
- [57] The reference in professional radon measurement AlphaGUARD. Genitron Instruments GmbH. 2007.
- [58] AquaKIT. Genitron Instruments GmbH. 2008.
- [59] ICRP, 1981. Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers. ICRP Publication 32. Ann. ICRP 6 (1).
- [60] NCRP, 1987. Report No. 097 - Measurement of Radon and Radon Daughters in Air.