

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**PUCP**

**MEDICIÓN DE LA PROGENIE DEL  
RADÓN EN MUESTRAS DE POLVO  
AMBIENTAL**

Tesis para optar el grado de Magíster en Física

**Autor**

Jessica Beatriz Toribio Calero

**Asesora**

Dra. Maria Elena Lopez Herrera

**Jurado**

Dr. Daniel Francisco Palacios Fenandez

Mg. Patrizia Edel Pereyra Anaya

Lima -Perú - 2018

# Agradecimientos

Agradezco a mi asesora Dra. María Elena Lopez por sus consejos, confianza y apoyo para que ésta tesis sea lograda, al Dr. Daniel Palacios por su sugerencias a ésta investigación, a mis compañeros de grupo que de algún modo han colaborado con mi conocimiento, a mi amiga Lorena Villanueva por el préstamo de la bomba de muestreo y a CIENCIACTIVA-CONCYTEC por el financiamiento.

Un especial agradecimiento a mis padres Evaristo y Soraida por brindarme confianza y soporte a lo largo de toda mi educación.

# Resumen

El gas radón ( $Rn\ 222$ ) decae a polonio ( $Po\ 218$ ) y este a su vez decae en otros elementos radiactivos llamados progenie del radón, que son sólidas. Durante el decaimiento se emiten partículas radioactivas ionizantes alfa o beta, las que pueden causar efectos en la salud, estas causan daños a nivel de ADN, ARN, etc. El poder de penetración de las partículas alfa es pequeño, pueden ser detenidas por la epidermis de la piel que actúa como blindaje para el cuerpo, pero si ingresan al organismo por inhalación de aire con progenie adherida al polvo, pueden causar problemas, al ser retenidas en el tracto respiratorio de manera indefinida.

En este trabajo, se propone una metodología para detectar partículas alfa de la progenie del radón adherida al polvo acumulado en lugares con baja ventilación. Utilizando un sistema portátil diseñado y ensamblado para este propósito, inicialmente se acumula polvo en un filtro, el cual es colocado en una cámara de difusión con dimensiones ajustadas al volumen efectivo asociado a este tipo de emisores alfa y al detector.

Partículas de polvo con progenie adherida, emiten a su vez, partículas alfa que son registradas usando detectores de trazas nucleares de estado sólido SSNTD. En esta investigación, se eligen áreas bajo condiciones especiales como poca ventilación, acumulación de polvo, etc; se contrasta con un detector testigo para discernir de las huellas registradas por las alfas del gas radón. Se busca que los resultados del estudio pueden ser útiles mas adelante para plantear soluciones que ayuden a disminuir la contaminación ambiental producida

por estos elementos radiactivos de origen natural perjudiciales a la salud.

Aplicando la metodología desarrollada en esta tesis, se encuentra que los mejores resultados de registro de la progenie del radón se obtienen usando una bomba de alto caudal para recolectar polvo en un filtro de poro del orden de micras y con el detector CR-39 dentro de un casete ajustable. El detector permanece expuesto durante todo el procedimiento de acumulación de polvo ambiental que es de 3 horas.



# Índice general

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Radiactividad . . . . .	4
2.1.1. Inicios de los estudios de la radiactividad . . . . .	5
2.1.2. Tipos de radiaciones . . . . .	6
2.1.3. Energía de desintegración $\alpha$ de un núcleo . . . . .	6
2.1.4. Ecuación de decaimiento de un elemento radiactivo . . . . .	8
2.1.5. Decaimiento alfa en la materia . . . . .	11
2.2. Estudio del radón y su progenie . . . . .	13
2.2.1. Características del radón y su progenie . . . . .	14
2.2.2. Cadena de desintegración del radón y su progenie . . . . .	17
2.2.3. Otras características de la progenie del radón . . . . .	20
2.3. Posibles consecuencias por la inhalación de radón y progenie . . . . .	21
2.3.1. Inhalación de la progenie del radón . . . . .	24
2.3.2. Recomendaciones de los organismos internacionales . . . . .	25
2.4. Comportamiento de la progenie adherida y no adherida en partículas de polvo . . . . .	26
2.5. Aerosoles y progenie . . . . .	29

2.5.1.	Deposición de particulado en región pulmonar . . . . .	30
2.5.2.	Partículas inhalables y respirables . . . . .	31
<b>3.</b>	<b>Metodología y materiales usados</b>	<b>36</b>
3.1.	Captura de aerosoles con progenie de radón . . . . .	36
3.2.	Condiciones ambientales . . . . .	40
3.3.	Detectores . . . . .	41
3.3.1.	Detectores LR-115 . . . . .	42
3.3.2.	Detector CR-39 . . . . .	45
3.4.	Lectura de la densidad de huellas en detectores . . . . .	45
3.5.	Arreglo experimental . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>48</b>
4.1.	Captura de aerosoles con alto y bajo caudal . . . . .	48
4.1.1.	Densidad de huella en CR-39 dentro de un casete . . . . .	48
4.1.2.	Densidad de huellas en LR-115 en una cámara cerrada . . . . .	49
4.2.	Captura de aerosoles con una bomba de alto caudal . . . . .	50
4.2.1.	Densidad de huellas de CR-39 colocados frente al filtro . . . . .	50
4.2.2.	Detectores CR-39 situados en los laterales del casete . . . . .	51
4.2.3.	Densidad de huellas en CR-39 en cámara cerrada . . . . .	52
4.3.	Otros métodos similares para la medición de la progenie del radón . . . . .	53
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>54</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	54
5.2.	Recomendaciones . . . . .	55
	<b>Bibliografía</b>	<b>56</b>
<b>A.</b>	<b>Cálculos de alcance con SRIM</b>	<b>61</b>
<b>B.</b>	<b>Trabajos previos para establecer una posible metodología</b>	<b>63</b>

# Índice de figuras

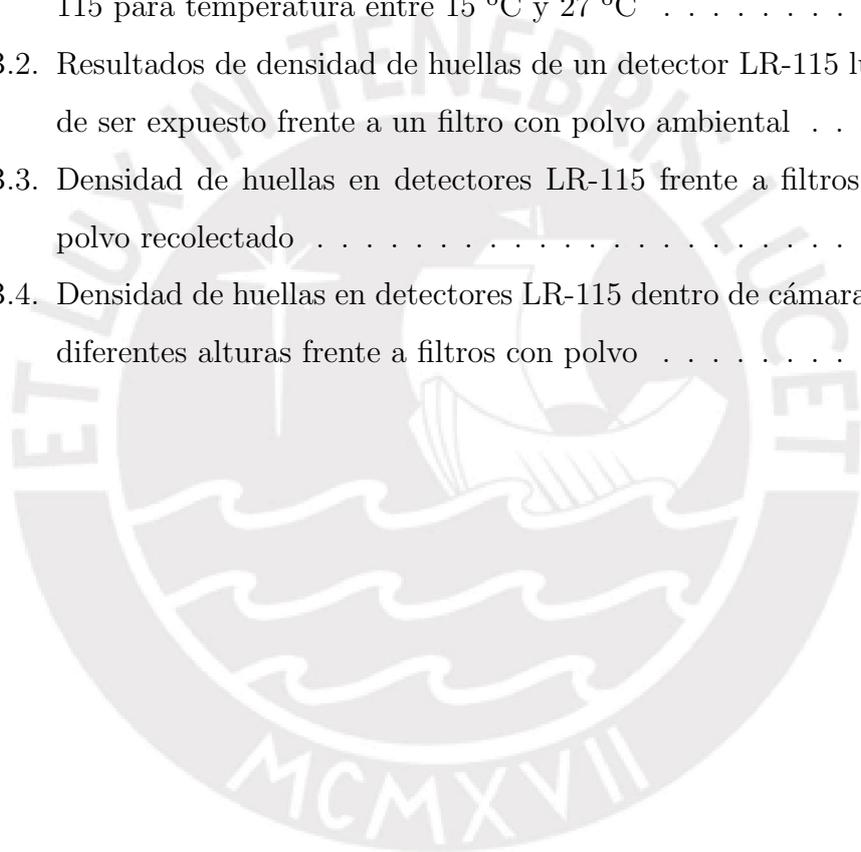
2.1. Capacidad de atenuación de las radiaciones $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ . . . . .	5
2.2. Cadena de decaimiento del Uranio 238 [28] . . . . .	14
2.3. Fuentes de radón y rutas de entrada, A desde el suelo, B a partir de materiales de construcción, C desde el exterior, D por gas liberado del agua [38] . . . . .	15
2.4. Cadena de decaimiento del Torio 232 [28] . . . . .	16
2.5. Progenie del Rn 222, imagen adaptada de la ref. [15] . . . . .	19
2.6. Tamaño de partículas que ingresan en el pulmón, imagen adaptada [16] . . . . .	23
2.7. Modelo de tracto respiratorio humano ICRP 66, imagen adaptada de la ref. [21] . . . . .	24
2.8. Actividad para cada elemento de tiempo de vida corta de la progenie, $A_i$ , respecto a una actividad contante de Rn, $A_0$ [11] .	27
2.9. Proceso básico de influencia en el balance de actividad de la progenie del radón [11] . . . . .	28
2.10. Adherencia a una partícula del aire; puede existir retroceso para el Po 218 debido a su energía de retroceso al emitir la partícula alfa [30] . . . . .	28
2.11. Porcentajes de deposición vs diámetro de partículas. [22] . . . .	31
2.12. Variación del promedio anual del PM10 en Lima y Callao durante 2007- 2014 [29] . . . . .	32
2.13. Comparación de tamaño con material particulado (PM) [13] . .	34

2.14. Deposición de partículas en el pulmón dependiendo de su tamaño [26] . . . . .	34
2.15. Convenios establecidos en la Norma UNE-EN 481 para las fracciones: inhalable, torácica y respirable . . . . .	35
3.1. Bomba de vacío, marca KARL SUSS MÜNCHEN GARCHING, modelo AL 017 L . . . . .	37
3.2. Bomba de muestreo de aire personal marca SKC de flujo constante, modelo AIRCHECK XR5000 configurado a 1,7 L/min 3.2 . . . . .	38
3.3. Filtro whatman N° 42 con tamaño de poro 2,5 $\mu\text{m}$ . . . . .	38
3.4. Filtro de PVC de tamaño de poro de 5 $\mu\text{m}$ . . . . .	39
3.5. (a) Casete vacío y (b), (c) y (d) casetes con porta-filtro y filtro	40
3.6. (a) Desplazamiento de electrones en un cristal y (b) Rompimiento de cadenas moleculares en un polímero [17] . . . . .	41
3.7. Ventana de energía de LR-115 . . . . .	43
3.8. Baño termostático con configuración graduable . . . . .	43
3.9. Microscopio óptico . . . . .	44
3.10. Detector LR-115 expuesto a una fuente de americio 241 . . . . .	44
3.11. Imagen transversal del arreglo de los dos casetes, en el casete 1 contiene el detector testigo y en el casete 2 contiene el detector expuesto frente al filtro con polvo ambiental . . . . .	46
3.12. Esquema durante la recolección de aerosol y exposición del detector . . . . .	47
4.1. Comparación de métodos de medida de progenie de radón [23] .	53

# Índice de tablas

2.1. Isótopos del radón . . . . .	10
2.2. Energía y alcance de las partículas alfa emitidas por el Rn 222 (radón) y Rn 220 (torón) y su progenie respectiva [11] . . . . .	12
2.3. Rn 222 y su progenie [10] . . . . .	19
2.4. Tabla de Rn-220 y su progenie [10] . . . . .	20
2.5. Comparación de dosis absorbida de progenie adherida y no ad- herida según regiones del pulmón [22] . . . . .	29
2.6. Índice de calidad del aire para PM10 [29] . . . . .	32
2.7. Categorías de riesgo y significado [14] . . . . .	33
3.1. Diferentes caudales usados para determinar la radiactividad en filtros . . . . .	37
4.1. Comparación de densidad de huellas en CR-39 obtenidas con bomba de aire de bajo caudal y alto caudal, $\rho$ es la densidad de huellas (huellas/cm <sup>2</sup> ) en CR-39 . . . . .	49
4.2. Densidad de huellas de LR-115 expuesto frente al filtro con polvo en cámara cerrada de 5,6 cm . . . . .	50
4.3. Densidades de huellas en CR-39 colocados frente al filtro, donde $\rho$ son las densidades (huellas/cm <sup>2</sup> ) . . . . .	51
4.4. Densidad de huellas en detectores CR-39 colocados al lado late- ral del casete principal, $\rho$ es la densidad de huellas (huellas/cm <sup>2</sup> ) . . . . .	52

4.5. Densidad de huellas en detectores CR-39 puestos dentro de una cámara . . . . .	52
A.1. Alcance, distancia mínima y máxima de detección para el detector LR-115 calculado con el programa SRIM en dependencia de la temperatura. . . . .	62
B.1. Distancia mínima y máxima de detección para el detector LR-115 para temperatura entre 15 °C y 27 °C . . . . .	63
B.2. Resultados de densidad de huellas de un detector LR-115 luego de ser expuesto frente a un filtro con polvo ambiental . . . . .	64
B.3. Densidad de huellas en detectores LR-115 frente a filtros con polvo recolectado . . . . .	65
B.4. Densidad de huellas en detectores LR-115 dentro de cámaras de diferentes alturas frente a filtros con polvo . . . . .	66



# Capítulo 1

## Introducción

El radón es un gas radioactivo natural que emana de rocas y suelos con tendencia a concentrarse en espacios cerrados como minas subterráneas, en casas o lugares construidos con baja ventilación [42]. Es incoloro, insípido e invisible, más pesado que el aire y poco reactivo con otros elementos, puede difundirse en agua o en otros líquidos. Tiene su origen en la cadena de decaimiento de las familias naturales radioactivas del uranio y sus isótopos; el radón y su progenie se encuentran en el aire que se respira, tanto en interiores como en exteriores. Otras fuentes de radiación que se reciben naturalmente son: radiación cósmica, los presentes en algunos alimentos o bebidas, así como también de otros materiales radiactivos de origen natural (NORM). Se encuentra que un 55 % de la radiación recibida por el hombre proviene del radón, siendo entonces el mayor contribuyente a la dosis de radiación ionizante recibida por la población en general, por lo cual es de interés conocer su presencia y niveles de concentración así establecer medidas de prevención futuras.

El radón ( $Rn\ 222$ ) decae a polonio ( $Po\ 218$ ) y este a su vez decae en otros elementos radiactivos, llamados hijas de radón o progenie, emitiendo partículas radioactivas ionizantes alfa y beta y radiación gamma, las que pueden causar efectos en la salud dañando el ADN, ARN, etc. El poder de penetración de las partículas alfa es pequeño, estas pueden ser detenidas por la epidermis de

la piel que actúa como blindaje para el cuerpo humano, pero si penetran al organismo por inhalación, que es lo que ocurre con el polvo respirable con progenie del radón de vida corta como el Po 214, Po 218 y los de vida larga como Bi 210, Po 210 y Pb 210 pueden causar problemas al ser detenidas en el tracto respiratorio durante un tiempo relativamente largo.

En este trabajo se plantea una metodología sencilla y portable para detectar la progenie del radón en muestras de polvo, conociendo que las hijas de radón se adhieren a los aerosoles (polvo) que se acumulan principalmente en lugares con baja ventilación y/o áreas cerradas con falta de limpieza. Utilizando un equipo portátil diseñado y ensamblado para este propósito se procede a la obtención de muestras de polvo con adherencia de progenie de radón, demostrando que el sistema resulta adecuado para este propósito. Usando detectores de trazas nucleares de estado sólido SSNTD se verifica la presencia de la progenie al obtener trazas dejadas por las partículas alfa. Se ha tenido en cuenta las condiciones ambientales durante la toma de muestras, debido a que hay mayor probabilidad de encontrar la progenie de radón en áreas con poca ventilación, con acumulación de polvo, etc. y en contraste se utiliza un detector testigo simultáneamente a los detectores usados en el sistema.

Como resultado del estudio en esta tesis, se evidencia la presencia de la progenie en los aerosoles ambientales y nos conduce a buscar soluciones para disminuir la contaminación ambiental producida por estos elementos radiactivos de origen natural perjudiciales para la salud.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

Las radiaciones ionizantes naturales pueden ser un riesgo potencial si son recibidas en altas dosis. Una de las fuentes de origen natural es el gas radón, debido a que representa el mayor porcentaje del total de radiación recibida por los seres vivos [5].

El isótopo más abundante del radón es el Rn 222, gas noble formado a partir del decaimiento del radio (Ra 226) y es un producto de la serie natural del uranio 238. El uranio y el radio están presentes de forma natural en suelos y rocas [42].

Los productos de decaimiento de Rn 222 pueden adherirse a partículas de polvo suspendidas en el aire, a superficies de interiores como paredes e ingresar en el sistema respiratorio humano donde pueden ser depositados directamente o luego de adherirse a las partículas respirables. Algunos emiten partículas alfa que son de importancia en la dosis de radiación recibida.

### 2.1. Radiactividad

El fenómeno de radiactividad es el proceso en que un núcleo inestable emite espontáneamente partículas alfa  $\alpha$ , beta  $\beta$ , gamma  $\gamma$ , neutrones, protones o neutrinos dependiendo sus características. Las partículas  $\alpha$  son núcleos de helio, las partículas  $\beta$  son electrones con espectro continuo de energía y los

rayos  $\gamma$  son fotones de origen nuclear con energías discretas.

Cuando un núcleo emite radiación  $\alpha$  cambia su identidad debido a que los dos protones perdidos significa un cambio en su número atómico [2].

### 2.1.1. Inicios de los estudios de la radiactividad

Desde el descubrimiento de la radiactividad del uranio por Henri Becquerel en 1896 [2] se continuó su estudio, ahora se sabe que las radiaciones estudiadas por Becquerel eran electrones emitidos en la desintegración  $\beta$  de la progenie del U 238.

Tras la publicación de Becquerel; Pierre y Marie Curie continuaron los estudios de radiactividad del uranio y descubrieron nuevos elementos, como el polonio y el radio, ambos radiactivos.

Las experiencias de Curie y Rutherford demostraron que las radiaciones emitidas por los elementos radiactivos tenían diferente capacidad o poder de penetración. Por ejemplo, las partículas que se atenuaban a corta distancia en el aire o por una lamina muy delgada (aproximadamente de 0.1 mm) se les denominó alfa, las que se atenuaban en un espesor de 1 mm de plomo se les denominó beta y las que atravesaban 10 cm de plomo se les llamó gamma [6], como se muestra en la figura 2.1.

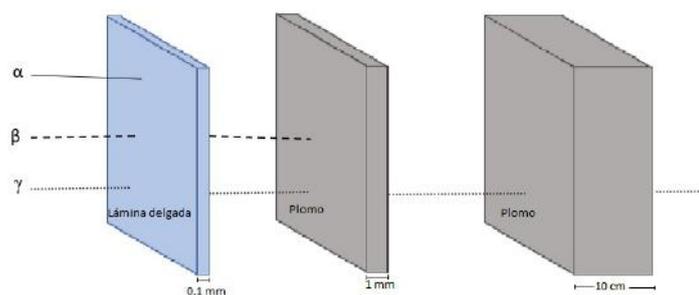


Figura 2.1: Capacidad de atenuación de las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$

### 2.1.2. Tipos de radiaciones

Se habla de radiación cuando hay un transporte de energía o masa en el espacio. Los tipos de radiación pueden ser agrupados según su poder de ionización, peligrosidad y si son ondas o partículas; para esto último si consideramos la dualidad de partícula-onda sería una categorización que genera confusión y no será usada.

Tomando en cuenta la peligrosidad, hay algunas partículas que pasan a través de nuestro cuerpo (neutrinos provenientes del Sol) sin causar daño observable, aunque existe la posibilidad de causar mutación o daño, la mayoría de nosotros no experimentamos efectos adversos. En la categorización de la radiación no se debe considerar como partículas individuales sino como una probabilidad del comportamiento que la caracteriza.

Por otro lado, todos los tipos de radiación ionizante, sin importar la intensidad, son capaces de causar daños en las células del cuerpo humano. Sin embargo, la probabilidad de que ocurra disminuye al disminuir el flujo o la intensidad de la radiación [2].

### 2.1.3. Energía de desintegración $\alpha$ de un núcleo

La energía de desintegración es la energía perdida durante un proceso de decaimiento. Teóricamente es bastante útil para predecir si es posible o no dicho proceso; si el valor de la energía de desintegración es positivo significa que podrá desintegrarse emitiendo en este caso particular partículas  $\alpha$ , si el valor fuese negativo significa que no podrá decaer este tipo de partículas [2].



Donde Y es el descendiente o hija y X es el padre. Como se debe cumplir la conservación de energía, entonces:

$$E_{0,X} + T_X = E_{0,Y} + T_Y + E_{0,\alpha} + T_\alpha \quad (2.1)$$

$$E_{0,X} + T_X = E_{0,Y} + T_Y + E_{0,\alpha} + T_\alpha \quad (2.2)$$

Donde  $E_0$  es la energía en reposo y  $T$  la energía cinética,  $E_0 = m_0c^2$ ,  $m_0$  es la masa nuclear en reposo, se asume la energía del núcleo X está en reposo  $T=0$ .

$$(m_X - m_Y - m_\alpha)c^2 = T_Y + T_\alpha \quad (2.3)$$

Donde  $m_X$  es la masa en reposo de X,  $m_Y$  es la masa en reposo de Y y  $m_\alpha$  es la masa en reposo de  $\alpha$ .

Luego la energía de decaimiento  $E_d$  será dado por:

$$E_d = (m_X - m_Y - m_\alpha)c^2 = T_Y + T_\alpha \quad (2.4)$$

Para conocer la energía cinética de la partícula alfa  $T_\alpha$  reemplazamos  $T_Y = \frac{1}{2}m_Yv_Y^2$  en la siguiente ecuación:

$$T_\alpha = E_d - T_Y \quad (2.5)$$

$$T_\alpha = E_d - \frac{1}{2}m_Yv_Y^2$$

$$E_d = \frac{1}{2}m_Yv_Y^2 + \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \quad (2.6)$$

Por conservación de momento

$$v_Y = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_Y}$$

Reemplazando en la ecuación 2.6

$$E_d = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \left( \frac{m_Y + m_\alpha}{m_Y} \right)$$

$$E_d = T_\alpha \left( \frac{m_Y + m_\alpha}{m_Y} \right)$$

$$T_\alpha = E_d \frac{m_Y}{m_Y + m_\alpha} \quad (2.7)$$

Escribiendo la energía de decaimiento en función de las masas atómicas se tiene:

$$E_d = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 \quad (2.8)$$

#### 2.1.4. Ecuación de decaimiento de un elemento radiactivo

El proceso de desintegración radiactivo es estadístico por lo tanto solo se puede calcular la probabilidad que esto ocurra en un determinado tiempo [19].

El proceso radiactivo es aleatorio que cumple con la distribución de Poisson ya que el decaimiento de núcleos solo depende de la cantidad de núcleos en la muestra [2].

Partimos de la hipótesis de que la probabilidad  $p$  de que un átomo se desintegra en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  suficientemente pequeño y que  $p$  es independiente de la historia anterior del átomo [19].

$$p = \lambda \Delta t$$

y la probabilidad de no desintegrarse será:

$$1 - p = 1 - \lambda \Delta t$$

entonces el número de átomos que no se han desintegrado será:

$$N = N_0(1 - p) = N_0(1 - \lambda \Delta t)$$

luego en el instante  $2\Delta t$

$$N = N_0(1 - \lambda \Delta t)(1 - \lambda \Delta t)$$

$$N = N_0(1 - \lambda\Delta t)^2$$

si sucede en el instante  $n\Delta t$

$$N = N_0(1 - \lambda\Delta t)^n$$

luego si  $n \rightarrow \infty$

$$N = \lim_{n \rightarrow \infty} N_0(1 - \lambda\Delta t)^n$$

para  $t = n\Delta t$

$$N = \lim_{n \rightarrow \infty} N_0\left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n$$

$$N = N_0(e^{-\lambda t}) \quad (2.9)$$

luego al derivar la ecuación 2.9 resulta:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.10)$$

$dN$  es el número de núcleos radiactivos en la muestra en un intervalo de tiempo  $dt$  y  $\lambda$  es la constante de decaimiento [2].

El valor de la constante de decaimiento  $\lambda$  es diferente para cada isótopo. Los isótopos de un mismo elemento tienen la misma característica física como química (ejemplo isótopos del radón mostrados en la tabla 2.1) y sus constantes de desintegración sirven para diferenciarlos entre sí, es decir para cada isótopo le corresponde una constante  $\lambda$  diferente. Por tanto,  $\lambda$  es una característica del isótopo, independiente de su estado físico o condición química [19].

Tabla 2.1: Isótopos del radón

	Rn 222 (radón)	Rn 220 (torón)	Rn 219 (actinón)
Protones	86	86	86
Neutrones	136	134	133
$T_{1/2}$ (periodo de semi-desintegración)	3,82 d	56 s	4 s

La actividad es el número  $dN$  de desintegraciones nucleares espontaneas de una cantidad de radio-nucleído de cantidad  $N$  durante un tiempo corto  $dt$  y su unidad es el Bequerelio (Bq) [22]. La actividad es definida de la siguiente manera:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.11)$$

de la ecuación 2.10 también se puede escribir:

$$A = \lambda N \quad (2.12)$$

luego haciendo uso de la ecuación 2.9 podemos escribir:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

donde  $A_0$  es la actividad inicial de la muestra [2].

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = 0,693\tau$$

El período de semi-desintegración es independiente del número de átomos presentes inicialmente, la vida media de los átomos es el promedio de las vidas de éstos como se muestra en [19]:

$$\tau = \frac{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \dots}{N_1 + N_2} = \frac{\sum N_i t_i}{\sum N_i}$$

Para una cantidad pequeña  $dN$

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t dN}{\int_0^\infty dN}$$

Reemplazando el valor de N de la ecuación 2.9

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

### 2.1.5. Decaimiento alfa en la materia

Las partículas alfa son núcleos de helio los que contienen 2 protones y 2 neutrones ligados.

Las partículas  $\alpha$  por su mayor masa y carga que los protones o electrones, se consideran de alto riesgo si están dentro del organismo, por ejemplo si ingresan por inhalación al pulmón pueden conducir a daños irreversibles.

En el aire las partículas  $\alpha$  debido a su carga eléctrica pueden interactuar fácilmente con las partículas suspendidas y recorrer solo pocos centímetros hasta convertirse en átomos de helio al capturar 2 electrones [2].

Cuando hay desintegración con emisión de partículas  $\alpha$  estas tienen velocidades altas ( $E = \frac{1}{2}mv^2, v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ ), un valor aproximadamente de 14 000 Km/s para  $E = 4$  Mev, para una misma energía las partículas alfa al tener mayor masa que los electrones sus velocidades son menores. Estas partículas  $\alpha$  actúan como proyectiles atravesando algunos materiales perdiendo energía (cinética) hasta detenerse, por tener carga positiva interaccionan eléctricamente con los electrones de la materia ionizando los átomos.

Como se muestra en la figura 2.1 las partículas  $\alpha$  tienen menor poder de penetración y recorren menor distancia que las  $\beta$  y  $\gamma$  debido a su mayor masa

y carga. Las partículas  $\alpha$  pierden energía gradualmente, en cada ionización se pierde  $35\text{ev}/\text{par}_{\text{ionico}}$  en el aire, hasta llegar al reposo. Cuanto menor sea la velocidad mayor será el tiempo de interacción coulombiana sobre los electrones de la materia, así las partículas  $\alpha$  al tener mayor carga y menor velocidad que las partículas  $\beta$  producirán mayor número de ionizaciones [36].

Las partículas  $\alpha$  son frenadas por las moléculas y partículas presentes en el aire hasta detenerse, a la distancia máxima de recorrido se le llama alcance o rango. Una fórmula empírica para determinar los alcances ( $R_{\alpha}^{\text{aire}}$ ) por las partículas  $\alpha$  en el aire dependiendo de la energía  $E$ , es la siguiente [2] :

$$R_{\alpha}^{\text{aire}} = (0,05E_{\alpha} + 2,85)E_{\alpha}^{3/2} \rightarrow 4\text{Mev} \leq E_{\alpha} \leq 15\text{Mev} \quad (2.14)$$

Utilizando la ecuación 2.14 se calcula el alcance en aire para cada nucleído, los resultados son mostrados en la siguiente tabla. Los valores calculados son muy parecidos a los presentados en la bibliográfica especializada [11].

Tabla 2.2: Energía y alcance de las partículas alfa emitidas por el Rn 222 (radón) y Rn 220 (torón) y su progenie respectiva [11]

Nucleído	Energía de la partícula $\alpha$ (Mev)	Alcance en el aire calculado (cm)
Rn 222	5,48	4,0
Po 218	6,00	4,6
Po 214	7,70	6,9
Rn 220	6,28	5,0
Po 216	6,77	5,6
Po 212	8,78	8,6

## 2.2. Estudio del radón y su progenie

El radón y su progenie se encuentran en forma natural. Los materiales radiactivos como el radio, uranio, torio, potasio y sus productos de desintegración radiactiva que no han sido intervenidos por las actividades humanas son llamados NORM (Naturally Occurring Radioactive Material), y los que han sido expuesto o concentrados hacia el medio ambiente como resultado de actividades son llamados TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material) [8]. La concentración de radón y su progenie son elementos que se encuentran de forma natural, pero pueden verse incrementado debido a actividades como trabajos de construcción como excavaciones.

Los isotopos de elementos con un número atómico  $Z > 82$  son radiactivos, estos son aproximadamente 70. Los nucleídos radiactivos naturales se clasifican en 3 categorías: nucleídos primarios, secundarios e inducidos. Los primarios son los que tienen un periodo de semi-desintegración muy grande por lo que aun podemos encontrar en la naturaleza. Los nucleídos secundarios son los que tienen un  $T_{1/2}$  pequeño y son los que forman luego de la desintegración de los nucleídos principales. Los nucleídos inducidos son los que se al interactuar con la radiación cósmica como el C-14 o los que ocurre con reacciones nucleares en el seno de la corteza terrestre. [35]

Según Garzón Ruiperez [36] para que un grupo de elementos de una cadena logre el equilibrio, es necesario un tiempo equivalente de 7 veces el mayor periodo de semi-desintegración del grupo, este tiempo es tomado en cuenta para el control global del proceso. Por ejemplo, el tiempo que debe transcurrir para lograr el equilibrio entre el radón y sus 4 primeras hijas es  $7 \times 26,8$  minutos, resultando un tiempo de 3 horas y 12 minutos.

### 2.2.1. Características del radón y su progenie

La característica principal del radón (Rn) es por ser un gas noble tiene más importancia radiológica que sus antecesores de la cadena del uranio 238 o torio 232, ver en las figuras 2.2 y 2.4, debido a que tiene una reactividad química muy baja y facilidad de movimiento logrando subir hasta la superficie a través del aire o agua, suficientemente rápido antes que decaiga la progenie [30].

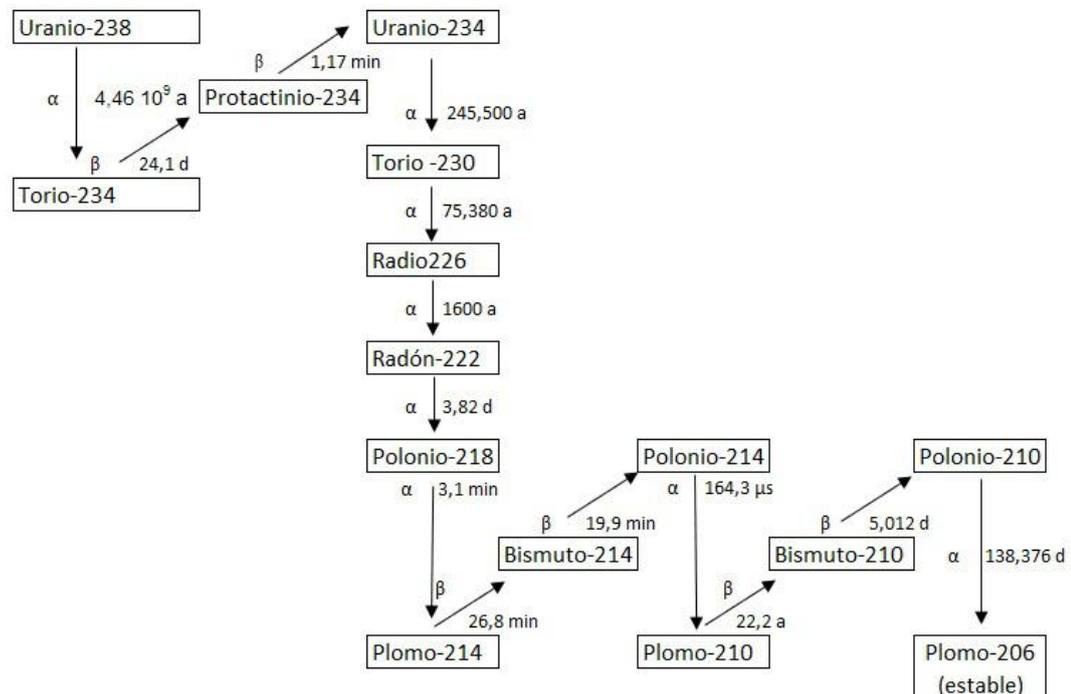


Figura 2.2: Cadena de decaimiento del Uranio 238 [28]

El isótopo más importante del radón es el Rn 222 debido a su mayor periodo de semi-desintegración, 3,82 días, tiempo suficiente para salir del suelo hacia la superficie ambiental. El radón escapa desde aproximadamente un metro de profundidad y puede ser mayor debido a la permeabilidad de las rutas de transporte [30].

El ingreso del radón puede ingresar a nuestros hogares por algunas las rutas de entrada, ver figura 2.3, y luego de decaer en su progenie.

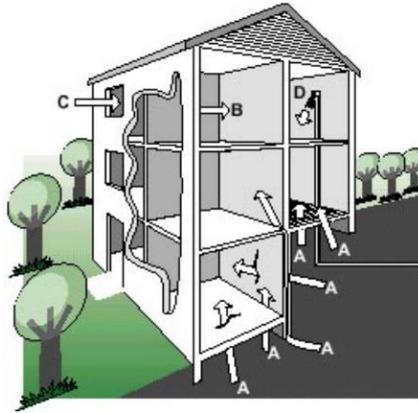


Figura 2.3: Fuentes de radón y rutas de entrada, A desde el suelo, B a partir de materiales de construcción, C desde el exterior, D por gas liberado del agua [38]

Los isótopos del radón son: el Rn 220 llamado torón tiene un periodo de semi-desintegración ( $T_{1/2}$ ) de muy corto tiempo de 56 segundos limitando su recorrido antes de decaer, el Rn 219 pertenece a la cadena de desintegración del U 235 como se muestra en la figura 2.4, tiene un periodo de semi-desintegración de solo 4 segundos por lo que su abundancia es menor en el aire, el Rn 222 el más abundante perteneciente a la cadena de decaimiento del U 238 [30] , ver figura 2.2 .

Otra característica del radón es que las siguientes cuatro hijas o progenie son químicamente activas, de vida corta y su  $T_{1/2}$  es menor de 30 minutos. Esto ocasiona, que si ingresan al pulmón se pueden alojar y decaer a Pb 210 ( $T_{1/2} = 22.3$  años) antes de que el pulmón los expulse. Del mismo modo ocurre con los descendientes de Rn 220 donde la dosis más significativa es entregada por el Pb 212 ( $T_{1/2} = 10.6$  h).

La radiación de la progenie, de tiempos de vida corta, incrementa el riesgo a contraer cáncer, debido a que depositan su energía en zonas sensibles del pulmón.

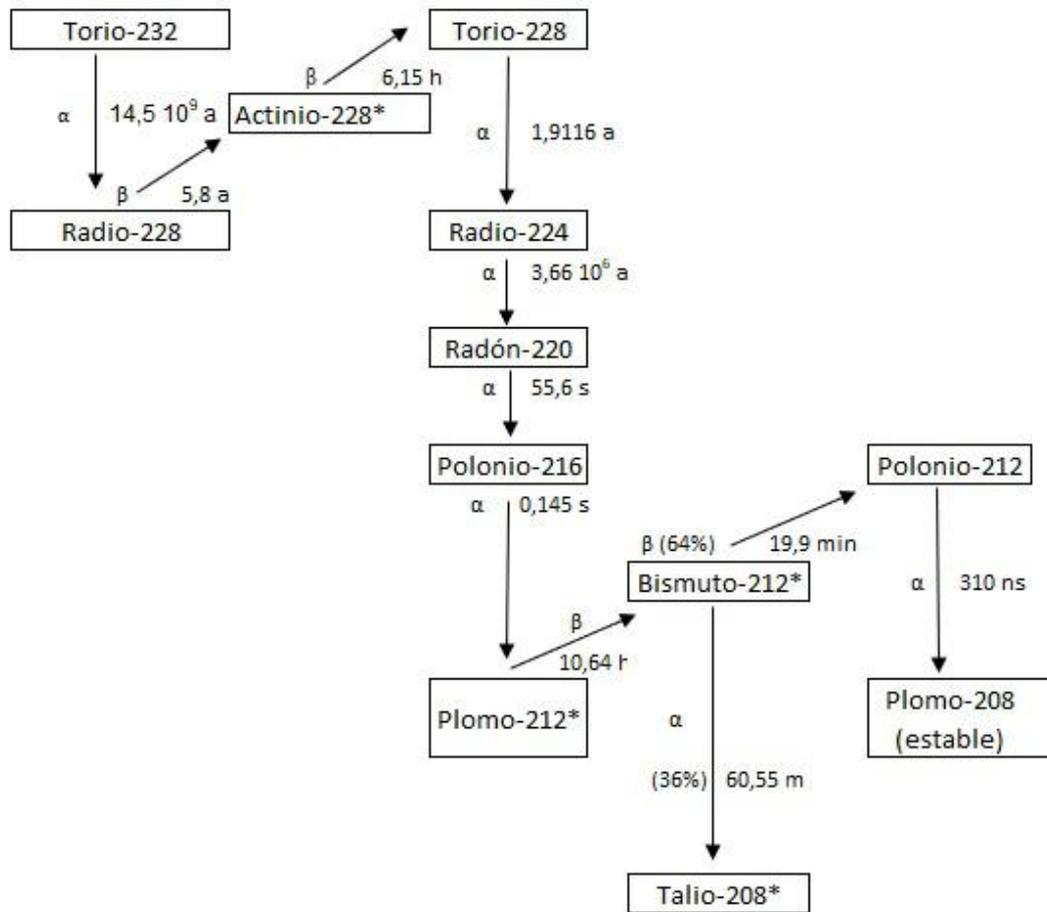


Figura 2.4: Cadena de decaimiento del Torio 232 [28]

La concentración de la progenie de tiempo de vida corta no es considerada de forma individual, sino de manera conjunta. Es normalizada de acuerdo a la cantidad de energía de decaimiento alfa, esta cantidad se define como el Concentración de Equilibrio Equivalente de productos de Decaimiento o equilibrium-equivalent decay-product concentration (EEDC). La tasa de EEDC es representada por un factor, siendo el mayor valor 1 cuando radón y su progenie se encuentran en equilibrio [30].

## 2.2.2. Cadena de desintegración del radón y su progenie

Para un mejor entendimiento del fenómeno de desintegración, es importante conocer como varía la actividad y la cantidad de cada elemento, luego de decaer [2].  $N_p$  es la cantidad inicial, el signo negativo significa de pérdida debido a que al decaer va disminuyendo la cantidad.

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda_p N_p \quad (2.15)$$

$$\frac{dN_d}{dt} = -\lambda_d N_d + \lambda_p N_p$$

$$\frac{dN_d}{dt} = -\lambda_d N_d + \lambda_p (N_{0p} e^{-\lambda_p t})$$

$$\frac{dN_d}{dt} = -\lambda_d N_d + \lambda_p N_{0p} e^{-\lambda_p t} \quad (2.16)$$

Resolviendo esta ecuación  $N_p$  se puede expresar como:

$$N_d = C_1 e^{-\lambda_d t} + \frac{\lambda_p N_{0p}}{\lambda_d - \lambda_p} \quad (2.17)$$

Hallando el valor de  $C_1$ :

$$C_1 = N_{0d} - \frac{\lambda_p N_{0p}}{\lambda_d - \lambda_p}$$

Remplazando en la ecuación 2.17:

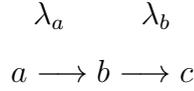
$$N_d = N_{0d} e^{-\lambda_d t} - \frac{\lambda_p}{\lambda_d - \lambda_p} N_{0p} e^{-\lambda_d t} + \frac{\lambda_p}{\lambda_p - \lambda_p} N_{0p} e^{-\lambda_p t}$$

$$N_d = N_{0d} e^{-\lambda_d t} + \frac{\lambda_p}{\lambda_d - \lambda_p} N_{0p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t}) \quad (2.18)$$

También se puede expresar en términos de actividad.

$$A_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_p} A_{0p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t}) + A_{0d} e^{-\lambda_d t} \quad (2.19)$$

Ahora pasemos al caso donde un elemento  $a$  se desintegra formando el elemento  $b$  y éste a otro  $c$  considerado estable [19]:



Donde  $\lambda_a, \lambda_b$  son las constantes de desintegración de cada elemento. La ecuación del primer elemento  $a$  estará dado por 2.15 y el segundo  $b$  estará dado por 2.16.

Por último los átomos  $c$  se forman únicamente por la desintegración de  $b$ , entonces tendremos el sistema:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad \frac{dN_a}{dt} = -\lambda_a N_a \\ 2) \quad \frac{dN_b}{dt} = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \\ 3) \quad \frac{dN_c}{dt} = \lambda_b N_b \end{array} \right\}$$

Considerando inicialmente solo la existencia del elemento  $a$  y solo la cantidad del elemento  $c$  al final o al tiempo  $\infty$ . Entonces  $N_{0d} = 0$  en la ecuación 2.18, y reemplazando  $p \longrightarrow a$  y  $d \longrightarrow b$ .

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_{0a} (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t})$$

Para el último elemento  $c$ , se puede obtener luego de remplazar la ecuación anterior en la tercera ecuación del sistema.

$$\frac{dN_c}{dt} = \lambda_b \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} \right) N_{0a} (e^{\lambda_a t} - e^{\lambda_b t}) \quad (2.20)$$

Como resultado:

$$N_c(t) = N_{0a} \left[ \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} e^{-\lambda_b t} - \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} e^{-\lambda_a t} \right] + C_2 \quad (2.21)$$

Al considerar que todo se ha convertido finalmente a  $N_c$  entonces  $N_c(\infty) = N_{0a} = C_2$ , donde  $C_2$  es una constante.

Se obtiene :

$$N_c(t) = N_{0a} \left[ \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} e^{-\lambda_b t} - \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} e^{-\lambda_a t} + 1 \right] \quad (2.22)$$

Los cálculos anteriores se pueden generalizar, la solución fue dada por Bateman para el caso que inicialmente solo existe los átomos del elemento  $a$ .

En la figura 2.5 se muestra la progenie del Rn-222 con las respectivas energías de decaimiento de la partícula  $\alpha$  [10], donde las flechas oblicuas significa decaimiento  $\beta$  y el horizontal  $\alpha$ .

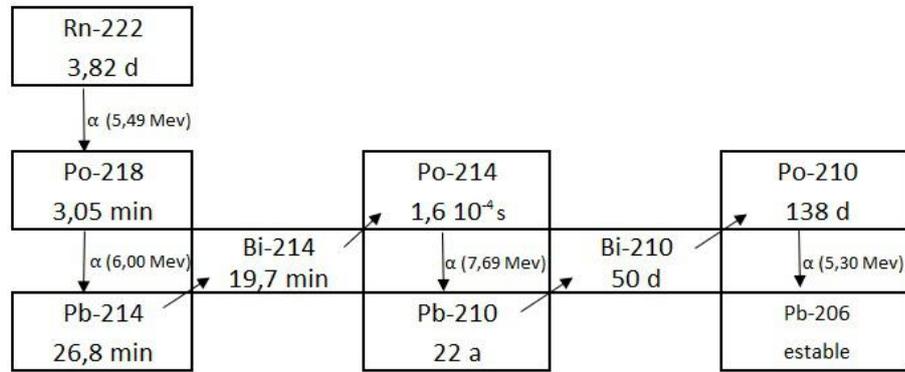


Figura 2.5: Progenie del Rn 222, imagen adaptada de la ref. [15]

Es importante conocer, las energías de decaimiento de las partículas alfa, debido a que dependen de estas para conocer el alcance o rango. En las tablas 2.3 y 2.4 se muestran las energías de decaimiento de la partícula  $\alpha$  como  $E_\alpha$ .

Tabla 2.3: Rn 222 y su progenie [10]

Isótopo	T	Tipo de emisión	$E_\alpha$ (Mev)
Rn-222	3,82 días	$\alpha$	5,49
Po-218	3.05 min	$\alpha$	6,00
Pb-214	26,8 min	$\beta\gamma$	—
Bi-214	19,8 min	$\beta\gamma$	—
Po-214	164 $\mu s$	$\alpha$	7,69
Pb-210	22,3 años	$\beta\gamma$	—
Bi-210	5,01 días	$\beta$	—
Pb-206	estable	—	—

Para el elemento conocido como torón (Rn-220) y su progenie, se muestra en la tabla 2.4 las energías de decaimiento  $\alpha$ . Notar que el periodo de semi-desintegración del Rn-220 es corto.

Tabla 2.4: Tabla de Rn-220 y su progenie [10]

Isótopo	T	Tipo de emisión	$E_{\alpha}$ (Mev)
Rn-220	55,6 s	$\alpha$	6,29
Po-216	0,15 s	$\alpha$	6,78
Pb-212	10,64 h	$\beta$	-
Bi-212	60,55 min	$\beta$ (66,3%) para Po-212	-
Bi-212	60,55 min	$\alpha$ (33,7%)(para Tl -208)	6,1
Po-212	0,3 $\mu$ s	$\alpha$ (para Pb-208)	8,78
Tl-208	3,05 min	$\beta$ (para Pb-208)	-
Pb-208	estable	-	-

### 2.2.3. Otras características de la progenie del radón

Los descendientes del radón se distinguen por ser químicamente activos, al ser sólidos y cargados eléctricamente pueden adherirse a partículas presentes en el aire o sobre superficies macroscópicas en áreas cerradas. Si ingresan al sistema respiratorio pueden adherirse directamente en las cavidades internas del pulmón, o luego de adherirse a partículas del aire.

Los decaimientos de la progenie que contribuyen a una dosis son Po 218, Po 214, Bi 212 y Po 212 porque son sólidos y emiten alfas a excepción de Bi 212 que emite betas. La concentración total de partículas  $\alpha$  es dada como potencial alfa (PAEC o EEDC por sus siglas en inglés), los que dependen de la cantidad de los 3 primeros descendientes del Rn 222: Po 218, Po 214 y Bi 212 y los descendientes del Rn 220: Pb 212, Bi 212 y Po 212 .

La velocidad de los productos de desintegración no adheridos a partículas suspendidas, es más pequeña que la velocidad de los demás átomos encontrados en el aire. Por lo tanto, al referirnos a un producto de decaimiento, realmente

se esta hablando de un grupo (cluster) de átomos que incluyen a un átomo producto del decaimiento.

La medida de la distribución de estos productos de decaimiento, se dividen en dos grupos, los de diámetro alrededor de 100 nm y los de diámetro de 10 nm [30].

### **2.3. Posibles consecuencias por la inhalación de radón y progenie**

Al ser el radón, un gas radiactivo e inerte; no se metaboliza, pero sí puede interactuar con los tejidos biológicos pulmonares de los seres vivos. Las partículas  $\alpha$  que emite la progenie del radón producen ionizaciones en la materia celular por poseer una gran energía cinética que se disipa en el interior de la misma, mediante la creación de iones y radicales libres o rompiendo las moléculas claves como las de ADN. Las células afectadas por partículas  $\alpha$  pueden experimentar modificaciones profundas llegando hasta la destrucción, con fines ilustrativos se muestra la figura 2.6.

En 1988 el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC), organismo de OMS, clasifica al radón como cancerígeno, basándose en datos obtenidos de estudios en trabajadores de minas subterráneas expuestos al radón [42].

En un ambiente cerrado donde se encuentra el radón también se encuentra su progenie. Estos descendientes que se encuentran en estado sólido pueden ingresar a los pulmones por inhalación, adheridas al polvo respirable, y una parte pueden quedar atrapados en el sistema respiratorio emitiendo partículas  $\alpha$  dañinas a nivel de ADN y potencializando la aparición de un posible cáncer; dependiendo de la concentración y tiempo de exposición.[5]

Debido a que cada partícula  $\alpha$  puede provocar daño genético en una célula, por lo cual se considera que el daño se produce ante cualquier nivel de expo-

sición, es improbable un nivel de concentración umbral por debajo del cual el radón no constituya un riesgo en relación al cáncer de las vías respiratorias [42].

La concentración de la progenie de radón en el ambiente depende del decaimiento, de la ventilación, de la deposición en paredes o muebles; estos pueden formar aglomerados "clusters" y pueden adherirse a partículas existentes en el aire. Estas características modifican la tasa de deposición en paredes, muebles y el grado de deposición en los pulmones.

El gas Rn 222 es suministrado de forma continua, pero la progenie tiene un comportamiento mucho más complicado; su presencia depende de la cantidad de radón, de la ventilación del ambiente, de su actividad química, de la cantidad de particulado presente en el aire y de la naturaleza del recinto o contenedor que encierra un cierto volumen de aire donde se encuentran presentes [30].

Entre la progenie, se encuentra el Pb 210 que tiene una vida media de 22,3 años; pero biológicamente se estima que tiene 10 años de vida media en el organismo de un ser humano, en la sangre se estima que tiene una vida media de 35 días y en los huesos de 20 a 30 años [37]. Sin embargo, como se encuentra en pocas cantidades en los pulmones, se puede concluir que no es de riesgo radiactivo, porque antes de decaer la mayor cantidad será expulsado del organismo del ser humano.

En 1960 los experimentos en voluntarios que inhalaban iones de Pb 212, otro componente de la progenie del Rn 220, se obtuvo como resultado un tiempo medio de absorción desde los pulmones hacia la sangre de 10 horas. Luego, por motivos de simplicidad se consideró que la progenie del Rn 222 (218 Po, 214 Pb y 214 Bi) se absorbía en un tiempo medio de 10 h. Marsh y Bailey (2013) supusieron que tanto, estas últimas adheridas como no adheridas tienen el mismo tiempo de absorción [22].

La USEPA (United States Environmental Protection Agency) para el año 2003 estimó 21000 muertes al año por cáncer de pulmón debidos al radón residencial, para el año 2005 se estimó una cantidad similar en 25 países

Europeos.

Por otro lado, a partir de estudios epidemiológicos, se estima que entre un 3 % y un 14 % de las personas con cáncer de pulmón son atribuidos al radón, este porcentaje nos dice que es un riesgo de salud pública significativa.[42]

La OMS en la nota descriptiva N° 292 de febrero 2016, menciona que más de 50 % de muertes en menores de 5 años son por neumonía causada por inhalación de partículas en un ambiente interior contaminado, además que cada año 3.8 millones de defunciones prematuras son debidas a enfermedades no transmisibles dentro de las cuales está el cáncer de pulmón atribuidos a la exposición de aire interior contaminado por el uso de combustibles sólidos para cocinar, además del radón y su progenie [32].

En setiembre del 2016, en otra nota descriptiva, la OMS menciona que las partículas más perjudiciales para la salud son las de igual o menor tamaño a  $10 \mu m$  de diámetro, ya que estas pueden ingresar al interior de los pulmones, y uno de los riesgos a la exposición a estas es el cáncer de pulmón. Además, la OMS pide mejorar la calidad de aire, ya que está relacionada directamente con la cantidad de mortalidad [31].

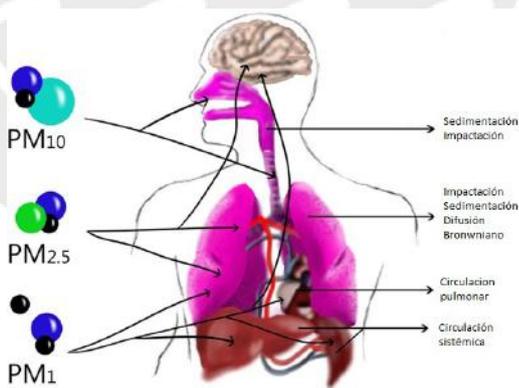


Figura 2.6: Tamaño de partículas que ingresan en el pulmón, imagen adaptada [16]

### 2.3.1. Inhalación de la progenie del radón

Las inhalación de la progenie del radón provoca una mayor dosis que la inhalación del gas de radón, aproximadamente dos órdenes de magnitud más altas. Por lo tanto es de mayor interés el estudio de la progenie [22].

Ahora, si se toma en cuenta las regiones bronquiales, como se puede ver la figura 2.7, las dosis más altas son recibidas por la región bronquial (bronquios (BB) y bronquiolares (bb)) del pulmón humano, producida por partículas alfa emitidas por la progenie de radón de vida corta depositada en las superficies bronquiales de las vías respiratorias; más que la región alveolar-intersticial (AI) debido a que la masa de BB y bb es muy pequeña (gramos) comparado con la masa de la región AI (aproximadamente 1 Kg). Por otro lado, la dosis efectiva en la región extratorácica es muy pequeña comparado con la de los pulmones.

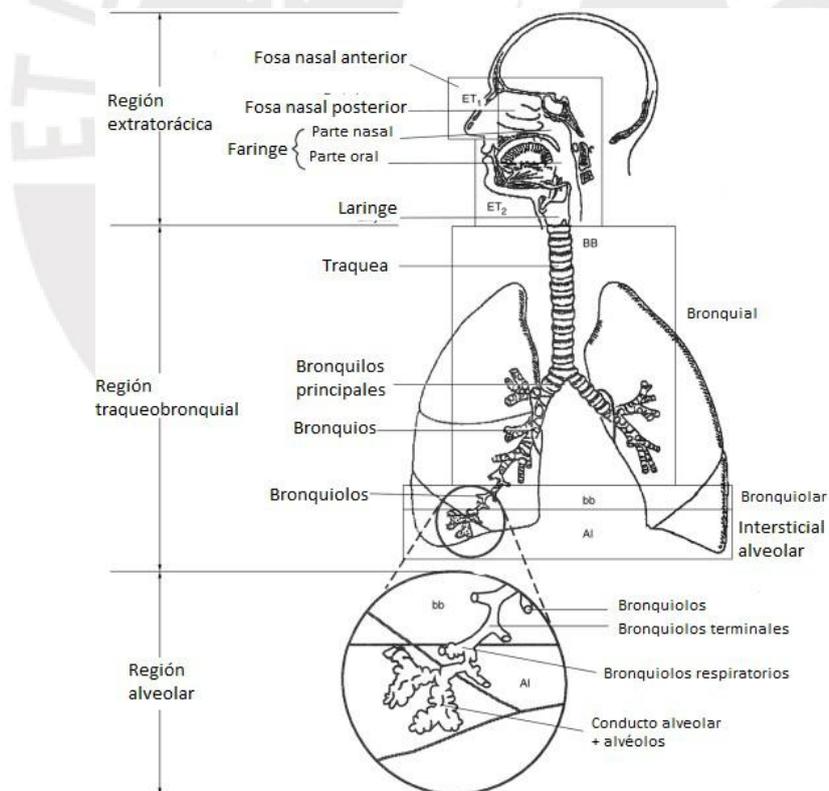


Figura 2.7: Modelo de tracto respiratorio humano ICRP 66, imagen adaptada de la ref. [21]

La progenie de más importancia del Rn 222 son: Po 218 y Po 214, debido a la radiación alfa asociada que incide sobre el tejido pulmonar. Mientras que para la progenie del torón es el Pb 212 ( $T_{1/2}$  aproximado a 10 h), este a pesar de ser un emisor  $\beta$  sus dos siguientes descendientes son Bi 212 y Po 212 (ver las figuras 2.2 y 2.4). El de mayor tiempo de semidesintegración es el Pb 212 de 10 h, pero para este tiempo el Pb 212 ya habrá sido absorbido hacia la sangre y no habrá decaimiento en el pulmón.

”Las fracciones de deposición de la progenie de radón inhalado dependen exclusivamente de las propiedades de los aerosoles y los parámetros de respiración y no de sus concentraciones de actividad. Por lo tanto, para los parámetros de aerosoles definidos y las condiciones de inhalación, las concentraciones de progenie de radón ambiental afectan las dosis bronquiales de forma proporcional, proporcionando una relación simple entre la dosis bronquial y la concentración de la actividad.” [22]

### **2.3.2. Recomendaciones de los organismos internacionales**

Las organizaciones principales que han investigado sobre el radón son:

- International Commission on Radiological Protection (ICRP)
- Comunidad Europea de Energía Atómica (EURATOM)
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (International Atomic Energy Agency / IAEA)
- Organización Mundial de la Salud (OMS)
- Agencia de Protección Ambiental EE.UU. (EPA)

La OMS recomienda un nivel máximo de  $100 \text{ Bq/m}^3$  para la exposición al radón en interiores. Además el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los  $300 \text{ Bq/m}^3$ , que equivalen aproximadamente a 10 mSv anuales

según cálculos recientes de la Comisión Internacional de Protección Radiológica [42]. Otra recomendación de la Agencia de Protección Medioambiental-EPA es no superar  $4\text{pCi/l}$  ( $148\text{ Bq/m}^3$ ) [12]. Según el ICRP 126 para viviendas se recomienda  $300\text{ Bq/m}^3$  [28].

Según decreto supremo en Perú "El nivel de actuación para la exposición crónica de radón en viviendas es una concentración media anual de  $200\text{ Bq/m}^3$  a  $600\text{ Bq/m}^3$  de Rn 222 en el aire en puestos de trabajos es  $1000\text{ Bq/m}^3$  [18].

## 2.4. Comportamiento de la progenie adherida y no adherida en partículas de polvo

Si la concentración de Rn fuera estable, y solo ocurriera decaimiento, se encontraría en equilibrio con su progenie. Pero en realidad, es mucho más complicado lograr el equilibrio del radón, debido a que la progenie puede ser adherida en partículas, superficies, y cuyas velocidades de adherencia varían de acuerdo a las condiciones ambientales como ventilación, cantidad de particulado en el aire y otros factores.

Existen varios parámetros de influencia, para la concentración de radón y su progenie, en el aire. Uno de estos es la adherencia a los aerosoles atmosféricos y otra, la deposición (plate-out) en superficies [11].

La cantidad de partículas en el aire es de interés debido a que está relacionada directamente con la adherencia o no de los descendientes o progenie del radón [30].

Se dice progenie de radón no adherido cuando es formado inmediatamente después del decaimiento y es principalmente de carga positiva. Sus tamaños se encuentran en el orden de aproximadamente  $0.5\text{ nm} - 5\text{ nm}$ . Por otro lado, la progenie de radón adherida es la progenie que se adhiere a los aerosoles. Se dice progenie depositada cuando tanto la progenie adherida y no adherida se deposita en las superficie [22].

Las características de los descendientes adheridos son, que se pueden depositar tanto sobre sólidos como sobre superficies libres y tienen menor movilidad que los no adheridos. El efecto plate-out es la fijación en superficies, como paredes, de la progenie adherida o no a aerosoles, donde las hijas no adheridas por su alta movilidad se adhiere más eficientemente.

La adherencia de descendientes puede ser hasta el 100 % como, por ejemplo en lugares con  $10^6$  por  $\text{cm}^3$  (lugar muy contaminado), lugares donde se fuma etc [36].

Como se puede ver en la figura 2.8 el Po 218 tiene  $T_{1/2}=3$  minutos, por lo tanto en un tiempo de aproximadamente 20 minutos logra el equilibrio con la actividad del Rn 222 y para el Pb 214 se acerca al equilibrio en aproximadamente 3 horas [11].

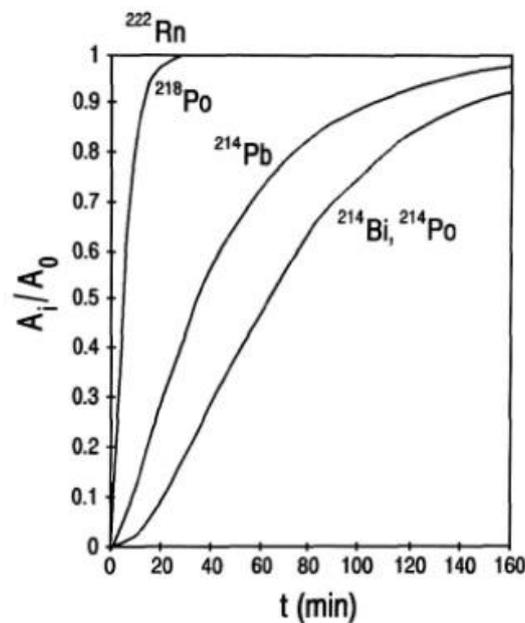


Figura 2.8: Actividad para cada elemento de tiempo de vida corta de la progenie,  $A_i$ , respecto a una actividad constante de Rn,  $A_0$  [11]

Si los procesos de ionización, fuerza electrostática, gravedad y flujo de aire son despreciados y solo se toma en cuenta la difusión molecular en estado

estacionario, con un coeficiente de difusión igual para Rn 222, Po 218 y Po 214 en aire y con un valor de  $0.06 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , se tiene una concentración de actividad reducida de los productos de radón cerca de superficies debido a que se han depositado en ésta, como se muestra en la figura 2.9, esta disminución se da a distancias menores de 10 cm cerca de las paredes [11].

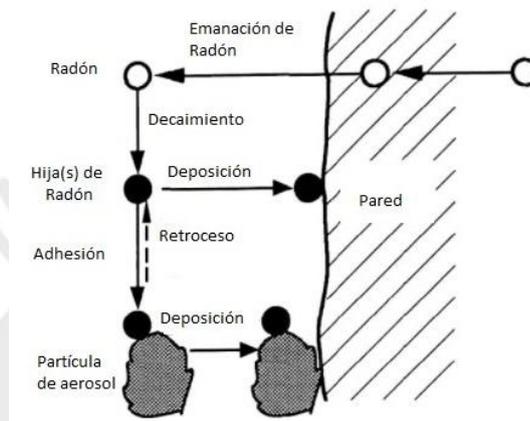


Figura 2.9: Proceso básico de influencia en el balance de actividad de la progenie del radón [11]

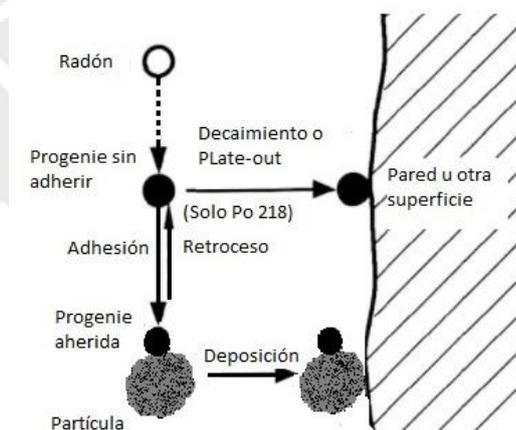


Figura 2.10: Adherencia a una partícula del aire; puede existir retroceso para el Po 218 debido a su energía de retroceso al emitir la partícula alfa [30]

En la figura 2.10 se muestra el mecanismo de retroceso que se produce cuando se emite la partícula alfa del Po 218 adherido a una partícula de polvo ambiental.

En la tabla 2.5 se muestra una comparación de dosis absorbida entre la progenie del radón adherida y no adherida a las partículas de polvo, según las regiones del pulmón humano BB, bb y AI y por modelos de dosimetría pulmonar RADEP/IMBA, RADOS y IDEAL-DOSE. La exposición fue 1 WLM.

Tabla 2.5: Comparación de dosis absorbida de progenie adherida y no adherida según regiones del pulmón [22]

Región	Modo	Dosis absorbida por WLM ( $\text{mGY WLM}^{-1}$ )		
		RADEP/IMBA	RADOS	IDEAL-DOSE
BB	No adherido	76.5	81.1	76.7
	Adherido	7.9	6.1	7.0
bb	No adherido	25.0	10.4	4.9
	Adherido	5.6	3.3	3.3
AI	No adherido	0.01	0.001	0.003
	Adherido	0.4	0.3	0.3

En ésta tabla se puede ver que la dosis en la región AI es más pequeño que las regiones BB y bb así como también que la dosis en la región no adherida (unattached) es mucho mayor que los que están adheridos por lo tanto son los que más contribuyen a la dosis en las regiones BB y bb [22].

## 2.5. Aerosoles y progenie

El proceso de adsorción de la progenie del radón en los aerosoles es directamente proporcional al grado de contaminación, un valor indicativo es 10000 partículas por  $\text{cm}^3$  y sus tamaños más abundantes son ( $1\mu\text{m}$ ) [36].

La importancia del estudio de los aerosoles es el peligro, debido al tamaño y lugar en donde se depositan, el filtrado de aire es comparable a la respiración,

con la diferencia de que en una respiración el aire cambia continuamente de dirección, mientras que en el filtrado el aire ingresa en una sola dirección. La velocidad de aire en la respiración es aproximadamente  $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $1\text{L}/\text{s}$ ) [20].

### 2.5.1. Deposición de particulado en región pulmonar

En las regiones del pulmón, ver figura 2.7, la región extratorácica que actúa principalmente como un filtro para proteger los pulmones, la región traqueo-bronquial es la que distribuye el aire inhalado a la región de intercambio de gases, y la región alveolar-intersticial, donde se da el intercambio de gases entre el pulmón y la sangre [22].

Para determinar en qué región se depositan las partículas, se toman en cuenta factores como el tamaño de las partículas inhaladas, el patrón de respiración y la geometría del tracto respiratorio.

La deposición de los aerosoles en las regiones de los pulmones depende del tamaño del aerosol, para ello es necesarios conocer los mecanismos de deposición, estos son tres:

- La sedimentación gravitacional es cuando cae por acción de la fuerza gravitatoria; pero si la fuerza ejercida por las corrientes de convección en el están en sentido opuesto y son equivalentes a ésta, puede estimarse que caen con velocidad constante. En general este mecanismo se da para partículas con diámetro mayor a  $0,5 \mu\text{m}$ .
- La impactación inercial se da cuando el aire que lleva la partícula se encuentra con un obstáculo y depende de su velocidad si se deposita en el obstáculo o cambia de dirección. En las vías respiratorias estos obstáculos son los conductos nasales, la faringe y en la vía aérea central, bifurcaciones y se produce para partículas de diámetro mayor a  $2 \mu\text{m}$ .
- La difusión de partículas con movimiento aleatorio o browniano, que puede provocar la deposición o contacto con la superficie de las vías res-

piratorias. Este mecanismo es predominante para partículas de diámetro menor a  $0.5 \mu\text{m}$ , por lo tanto de importancia para aerosoles que adhieren progenie del radón.

En la figura 2.11 se muestra la región de deposición en las regiones del pulmón, como una función del diámetro calculada con el (HRTM) Modelo de Tracto Respiratorio Humano (ICRP 1994) para un trabajador estándar [22].

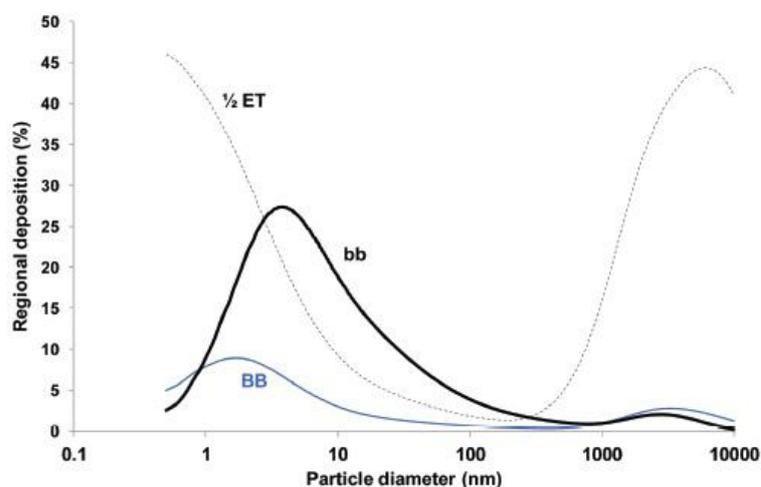


Figura 2.11: Porcentajes de deposición vs diámetro de partículas. [22]

### 2.5.2. Partículas inhalables y respirables

El material particulado PM, es la mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire, y se clasifican de acuerdo a su tamaño; las de diámetro menor a  $10 \mu\text{m}$  (PM10), las de diámetro menor a  $2,5 \mu\text{m}$  (PM2.5) y las de menor a  $1 \mu\text{m}$ . La mayor parte de las partículas, se encuentran entre los llamados particulados finos (de  $100 \text{ nm}$  a  $2,5 \mu\text{m}$ ), pero hay otro porcentaje importante que están como ultrafinos (menores a  $100 \text{ nm}=0,1 \mu\text{m}$ ) [1].

La ciudad de Lima es la segunda más contaminada de América Latina según reporte de la OMS con  $\text{PM}_{10}= 88 \mu\text{g} /\text{m}^3$  y  $\text{PM}_{2.5} = 48 \mu\text{g} /\text{m}^3$ , datos pertenecientes al año 2013 [33].

Según un estudio realizado, se encuentra que la cantidad de particulado PM10 en la ciudad de Lima y Callao son distribuidos por distritos [39], como se muestra en la figura 2.12.

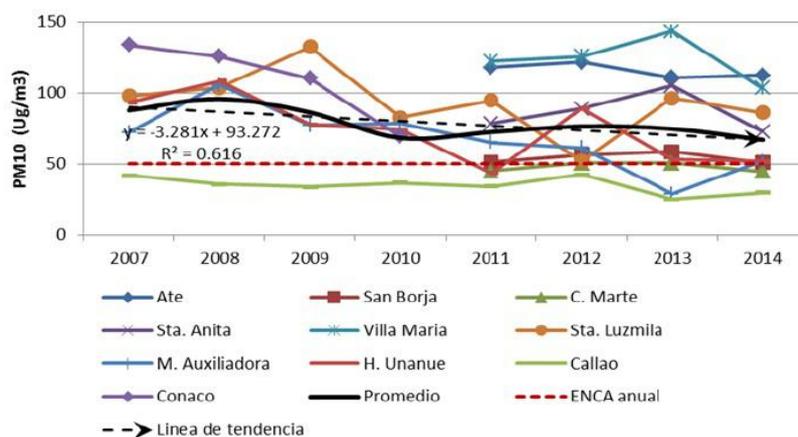


Figura 2.12: Variación del promedio anual del PM10 en Lima y Callao durante 2007- 2014 [29]

Según una evaluación durante los meses de noviembre y diciembre del 2010, tomando 45 puntos de medición dentro de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) se halló que en promedio el nivel de contaminación de PM10 esta en un índice de 4 que corresponde al rango de 255 – 354  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , considerado dañino [29].

Tabla 2.6: Índice de calidad del aire para PM10 [29]

PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24 horas	Valores del índice	Subíndice
0-54	0-50	1
55-154	51-100	2
155-254	101-150	3
255-354	151-200	4
355-424	201-300	5
425-604	301-500	6

Tabla 2.7: Categorías de riesgo y significado [14]

Niveles de índice de calidad del aire concerniente a la salud	Valores del índice	Significado
Bueno	0 a 50	La calidad de aire es satisfactorio, y la contaminación de aire es poco o sin riesgo
Moderado	51 a 100	La calidad de aire es aceptable; sin embargo, algunos contaminantes pueden ser de riesgo para un pequeño grupo de personas inusualmente sensibles a la contaminación.
Dañino para grupo sensible	101 a 150	Grupos sensibles podría afecar su salud. El publico general es improbablemente afectado.
Dañino	151 a 200	Todos podrían experimentar efectos en su salud; los grupos sensibles podrían experimentar serios problemas en su salud.
Muy dañino	201 a 300	<b>Alerta de salud, todos podrían experimentar serios problemas de salud.</b>
Crítico	301 a 500	<b>Condiciones de emergencia de advertencias de salud. La población entera es mas probable ser afectada.</b>

El índice de calidad basado en la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) es mostrado en la tabla 2.6 y en la tabla 2.7 se muestra los niveles de índices de calidad de aire y su significado de riesgo en la salud.

En la nota descriptiva de la OMS se menciona que la mortalidad se debe a la exposición a pequeñas partículas de 10 micrones de diámetro (PM10) o menos, que pueden causar cardiopatías, neumopatías y cáncer; debido a estos efectos, los límites de directriz de la OMS para PM2.5 es  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual,  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media en 24 horas y para PM10 es  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media en 24 horas [31].

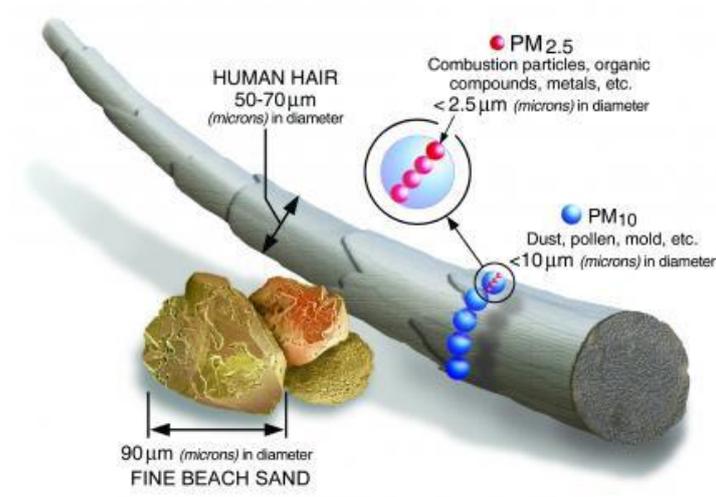


Figura 2.13: Comparación de tamaño con material particulado (PM) [13]

En la figura 2.14 se muestra los tamaños de partículas que con más probabilidad se depositan en las diferentes áreas.

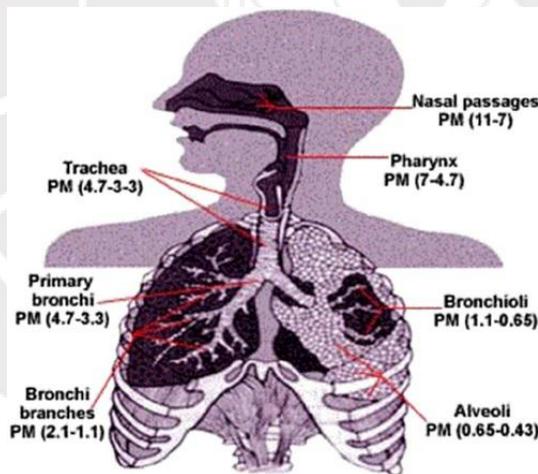


Figura 2.14: Deposición de partículas en el pulmón dependiendo de su tamaño [26]

El tamaño de la partícula es importante debido a que estará relacionado con la región del pulmón en que se depositará; ésta deposición se producirá por impactación, sedimentación (fracción gruesa), sedimentación gravitacional (fracción gruesa o fina) y difusión de movimiento browniano (fracción fina). En

la atmosfera las partículas se encuentran en diferentes tamaños, y éstas son clasificadas como la fracción gruesa (PM10–2.5) depositadas por impactación o proceso de sedimentación; la fracción fina PM2.5 es depositada en el pulmón especialmente en los alveolos a través de sedimentación y proceso de difusión Browniano [16].

La fracción respirable es menor a 10 micrometros y esta penetra hasta las vias respiratorias. Entre 4 micrometros y 10 micrometros se encuentra el 50% del total de fracción respirable segun gráfico 2.15, el diámetro aerodinámico de las partículas en el intervalo de tamaños de interés (fracción inhalable: 1100  $\mu\text{m}$  , fracción torácica: 0,1 a 35  $\mu\text{m}$  y fracción respirable: 0,1 a 15  $\mu\text{m}$  ). En el gráfico 2.15 se muestra también el porcentaje de aerosol total vs el diámetro de las partículas, la curva superior representa la fracción inhalable, la curva intermedia la fracción torácica y la curva inferior la fracción respirable [41].

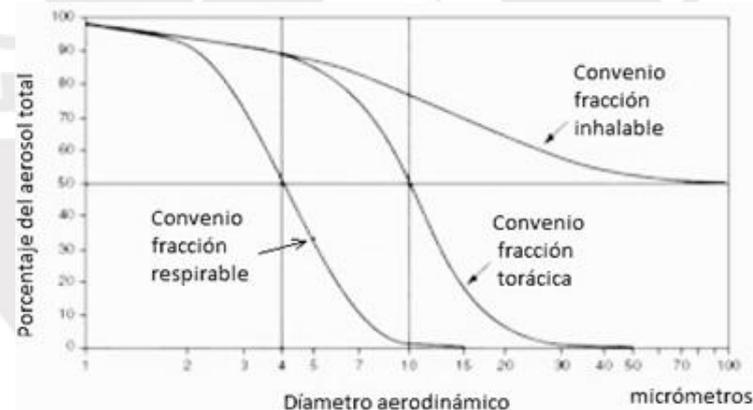


Figura 2.15: Convenios establecidos en la Norma UNE-EN 481 para las fracciones: inhalable, torácica y respirable

## Capítulo 3

# Metodología y materiales usados

### 3.1. Captura de aerosoles con progenie de radón

En la captura de aerosoles se usa una bomba para succionar aire. En este trabajo fue usada con un filtro en la entrada de aire, para succionar y filtrar aire con partículas de polvo o aerosoles.

En el proceso de captura de aerosoles se mide el caudal de aire succionado. El caudal indica la cantidad de volumen de aire que es trasladado en un determinado tiempo, es útil conocer este caudal para saber la cantidad de aire filtrado.

$$Q = V'/t$$

$(m^3/s)$

Donde  $Q$  es el caudal,  $V'$  el volumen de aire y  $t$  el tiempo [40].

También se puede determinar el caudal si se conoce la velocidad de aire ( $v$ ) y el área de la sección transversal ( $S$ ) por donde pasa [25].

$$Q = V'/t = Sv \quad (m^3/s)$$

Distintos autores han trabajado con diferentes caudales, con el fin de recolectar partículas radiactivas en filtros como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Diferentes caudales usados para determinar la radiactividad en filtros

Autor	Caudal(volumen/h)
H.Bem et al. [4]	67 000 l/h
J.Lopez [34]	3 000 l/h
A. Kadir [23]	60 l/h
P. Khandare [24]	600 l/h

En este trabajo se usó una bomba de vacío de alto caudal mostrado en la figura 3.1, donde se mide la velocidad del aire (1 m/s) con un anemómetro y la sección con un vernier; el resultado es el caudal de aproximadamente 1440 L/h para la succión de aire del ambiente a estudiar.



Figura 3.1: Bomba de vacío, marca KARL SUSS MÜNCHEN GARCHING, modelo AL 017 L

Con el fin de obtener la progenie de radón en el filtro, fue necesario conocer si era más útil un caudal alto o bajo, por lo que también se usó una bomba de aire de caudal bajo configurado 1,7 L/ min (100 L/h) como se muestra en la figura.



Figura 3.2: Bomba de muestreo de aire personal marca SKC de flujo constante, modelo AIRCHECK XR5000 configurado a 1,7 L/min 3.2

Los filtros se usan para la retención de polvo. En forma preliminar se usaron filtros de café (papel). Debido a que la porosidad del filtro de café no estaba caracterizada se reemplazó por un filtro de papel whatman N° 42 (ver figura 3.3) con retención de partículas mayores a  $2,5 \mu\text{m}$  para obtener la densidad de huellas debida a la progenie adherida en partículas mayores de esos tamaños.

Como se mencionó en párrafos anteriores las partículas que ingresan al sistema respiratorio son menores de  $10 \mu\text{m}$ , al retener en el filtro partículas desde  $2,5 \mu\text{m}$  se está reteniendo un gran porcentaje de partículas que podrían ser perjudiciales si ingresan a los pulmones de las personas.



Figura 3.3: Filtro whatman N° 42 con tamaño de poro  $2,5 \mu\text{m}$

Para comparar los resultados de las densidades de huellas, provenientes de la progenie del radón adheridas a las las partículas del ambiente, con alto y bajo caudal se usó filtros de cloruro de polivinilo (PVC) con tamaño de poro  $5,0 \mu\text{m}$ .



Figura 3.4: Filtro de PVC de tamaño de poro de  $5 \mu\text{m}$

Estos filtros son colocados con un porta filtro para evitar su deterioro al paso del aire, primero es colocado el portafiltro y sobre éste el filtro dentro de un casete como se muestra en la figura 3.5. Los casetes fueron usados para las pruebas con ingreso de aire continuo.

De acuerdo a la literatura la longitud de difusión  $L=\sqrt{D\tau}$ , donde  $D$  es el coeficiente de difusión, en aire  $D = 1,2 \cdot 10^{-5}$  [3].  $\tau$  es el tiempo de vida media, para el torón es 80,23 segundos y calculando la longitud de difusión del torón en el aire es 3,1 cm. Debido a lo anterior los casetes fueron colocados a un metro de altura con respecto al suelo, para disminuir la influencia del Rn 220 y su progenie.



Figura 3.5: (a) Casete vacío y (b), (c) y (d) casetes con porta-filtro y filtro

### 3.2. Condiciones ambientales

Debido a que el recorrido de las partículas  $\alpha$  en el aire depende de la densidad del medio, se usó un termo-higrómetro para medir la temperatura y humedad relativa en el ambiente durante la exposición del detector. La evaluación de las variaciones de alcance, máxima distancia que pueden recorrer las partículas  $\alpha$ , se realizó con el programa SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). SRIM es una colección de paquetes de software que calcula las características de transporte de los iones en la materia (ver en el apéndice A) [43]. Con SRIM también se puede obtener una curva de alcance versus energía, con la ecuación de la curva se puede obtener una ecuación de energía dependiente de la distancia recorrida por las partículas  $\alpha$ . Útil para conocer la energía de las partículas  $\alpha$  al llegar al detector.

### 3.3. Detectores

El paso de partículas nucleares o iones, a través de algunos materiales dieléctricos, deja daños a los que se les llama "trazas nucleares en sólidos". Éstas trazas, producidas por el paso de las partículas, son huellas estables o latentes que podrían permanecer años hasta que sean reveladas mediante un ataque químico.

Al moverse el ion en el sólido se puede producir colisiones de dos tipos, dependiendo de la velocidad: Para alta velocidad la principal interacción es la fuerza eléctrica entre el ion y los átomos del sólido, este efecto puede causar la excitación o pérdida de electrones del sólido; en los polímeros esta sobre excitación puede producir un rompimiento de los enlaces moleculares y en otros sólidos se genera centros de tensión, formados basicamente por desplazamientos atómicos.

La ionización principal se da cerca a la traza y la secundaria a una distancia mayor del centro de la traza, esta excitación secundaria se produce por los electrones desprendidos que se desplazan, se les conoce como los *rayos delta*, con suficiente energía para producir desplazamiento de otros electrones pero no para formar otra traza, ver figura 3.6.

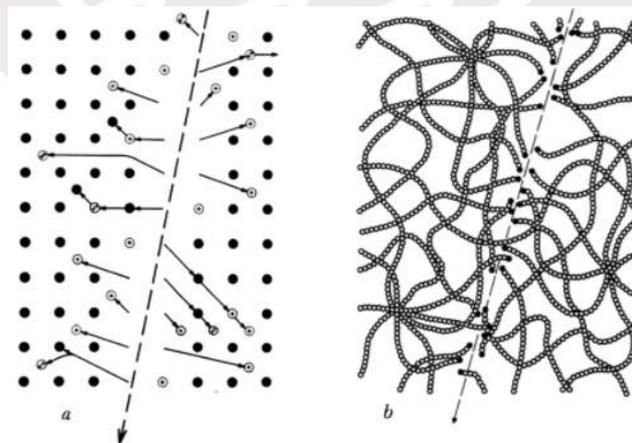


Figura 3.6: (a) Desplazamiento de electrones en un cristal y (b) Rompimiento de cadenas moleculares en un polímero [17]

En el segundo caso para los iones con baja velocidad a través del sólido, ésta velocidad es comparable con la del electrón orbital o menor, donde se consideran como dominante las colisiones atómicas, el que consiste en el desplazamiento del átomo generando vacancia [15].

### 3.3.1. Detectores LR-115

El daño en el sólido depende tanto del material como del tipo de radiación y energía recibida. En polímeros como el LR-115 usado en este trabajo, la radiación ionizante produce división de moléculas, ionización y excitación de moléculas o electrones. Esta energía de excitación puede ser transferida de una molécula a otra. Las moléculas excitadas e iones pueden recibir energía vibracional suficiente para romper enlaces o formar un arreglo complejo de moléculas, radicales libres, moléculas ionizadas e iones radicales. El efecto neto en los plásticos será la producción de cadenas de moléculas rotas, conducidas a una reducción en el promedio de peso molecular de la sustancia.

LR-115 tipo 2 consiste de una película o capa de color rojo de nitrato de celulosa de espesor  $12 \mu\text{m}$  sobre una base de poliéster de  $100 \mu\text{m}$ , sensible a las partículas  $\alpha$  en el rango de energía de  $[0,8 \text{ Mev} - 4,5 \text{ Mev}]$  como se observa en la figura 3.7, es decir en ese rango de energía son detectable estas partículas, por lo que si una partícula  $\alpha$  tiene mayor energía tendría que recorrer un distancia mayor hasta perder su energía y llegar a la superficie del detector con energía dentro de ese rango [27].

Estos detectores al tener un rango de energía limitado pueden ser usado para discriminar la progenie de radón al exponer los detectores a diferentes distancias, por esta razón se utilizó cámaras cilíndricas cerradas de alturas 4,1 cm, 6,0 cm y 8,5 cm.

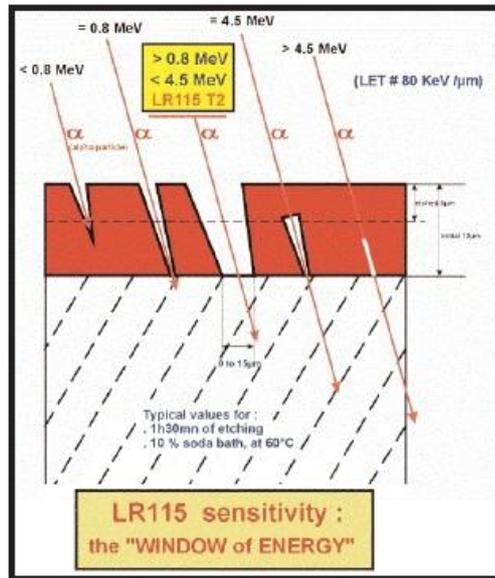


Figura 3.7: Ventana de energía de LR–115

La detección ocurre cuando una partícula  $\alpha$  impacta la capa activa de nitrocelulosa causando daño molecular, el que puede ser aumentado luego de hacer un grabado que consiste en el uso de una solución de NaOH al 10 % o 2,5 normal y a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  dentro de un baño termostático (ver figura 3.8), durante 90 minutos [9].



Figura 3.8: Baño termostático con configuración graduable

Luego los detectores son retirados para ser enjuagados con agua destilada. Se espera 24 horas de secado y se colocan entre porta-muestras de vidrio para ser leídos bajo el microscopio óptico, véase en la figura 3.9, con un aumento

del lente objetivo de 10X.



Figura 3.9: Microscopio óptico

En la figura 3.10 se muestra un ejemplo de huellas en un detector LR-115, expuesto a una fuente de Am 241. Las huellas, vistas bajo microscopio, son los puntos blancos.



Figura 3.10: Detector LR-115 expuesto a una fuente de americio 241

### 3.3.2. Detector CR-39

Estos detectores son de gran sensibilidad, los límites de detección está aproximadamente entre 0.1 Mev y mayor a 20 Mev, las condiciones de grabado común para el plástico CR-39 (carbonato de allyldiglycol) se realiza a condiciones de concentración de 1 molar a 2 molar de NaOH o KOH y temperatura entre 40°C y 70°C [10].

Para el grabado de los detectores se consideró la concentración de NaOH de 6,25 molar y la temperatura fue 70°C con el uso de un baño termostático durante 7 horas.

### 3.4. Lectura de la densidad de huellas en detectores

Los detectores expuestos como los detectores testigos fueron leídos con microscopio óptico de manera uniforme y similar, es decir el mismo número de campos de visión y ubicación de campos de lectura. Para los CR-39 se realizó 42 campos de visión y para LR-115 64, donde el área de cada campo de visión es 0,0106 cm<sup>2</sup>.

La densidad de huellas es definida por  $\rho = \frac{N}{A}$ , N es el número de huellas en el detector y A área [10].

### 3.5. Arreglo experimental

En este trabajo se ha usado principalmente el detector CR-39 porque se obtiene una mejor respuesta que con el detector LR-115, debido a que el CR-39 detecta un rango mucho más amplio de energía, tomando en cuenta que los descendientes del Rn-222 emiten partículas alfa de diferentes energías.

En la base opuesta del filtro, se coloca el detector CR-39 a una distancia de aproximadamente 1 cm, quedando así expuesto a las partículas radiactivas

provenientes de los sólidos radiactivos presentes en el polvo ambiental en el filtro que se fueron acumulando durante la succión de aire. El detector fue expuesto de manera continua durante las 3 horas de ingreso de aire.

Se utiliza un arreglo similar sin filtro como testigo del detector anterior, es decir el aire que pasa por el casete 1 es el mismo aire que pasa por el casete 2. En la figura 3.11 se muestra la sección transversal de los casetes.

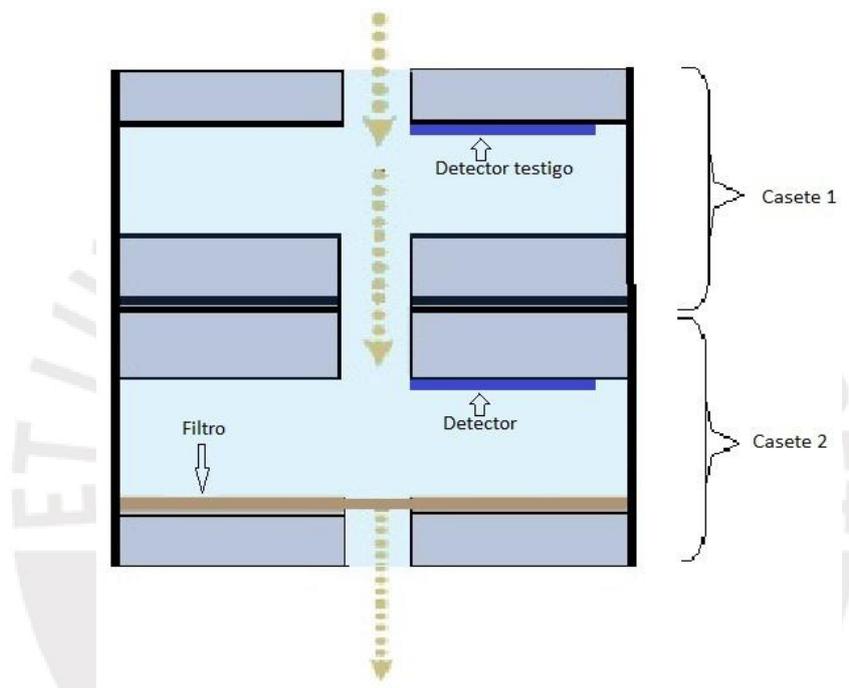


Figura 3.11: Imagen transversal del arreglo de los dos casetes, en el casete 1 contiene el detector testigo y en el casete 2 contiene el detector expuesto frente al filtro con polvo ambiental

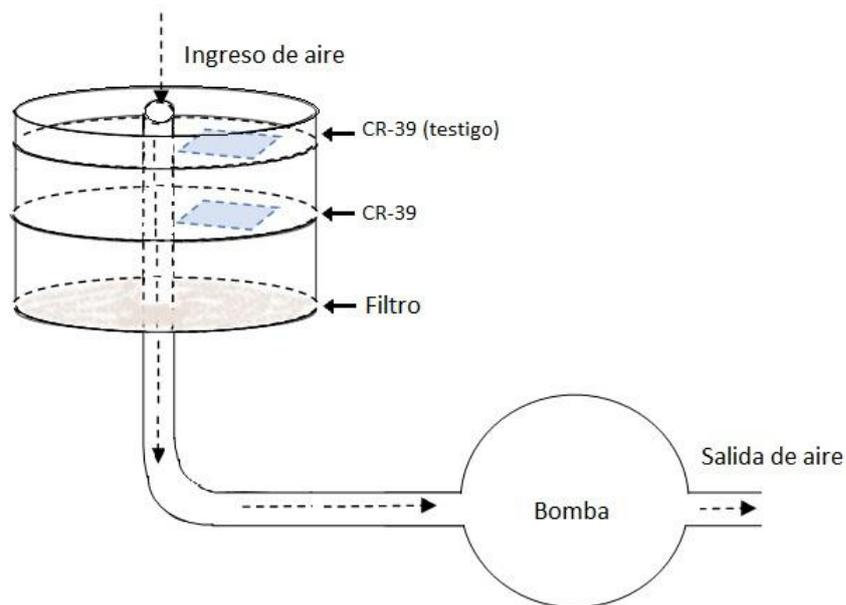


Figura 3.12: Esquema durante la recolección de aerosol y exposición del detector

En la figura 3.12 se muestra el esquema durante la exposición de los detectores CR-39, donde el casete 1 está sobre el casete 2 y en cada uno de ellos se encuentra un detector CR-39, mientras en la base se encuentra el filtro.

Antes de determinar esta metodología se realizaron otras pruebas como se puede mostrar en el apéndice B.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Captura de aerosoles con alto y bajo caudal

#### 4.1.1. Densidad de huella en CR-39 dentro de un casete

Se establece una tabla de comparación de densidades de huellas de partículas  $\alpha$  detectadas al emplear una bomba de vacío de alto caudal (1440 L/h) y otra bomba de muestreo de bajo caudal (100 L/h), se usó filtros de 5  $\mu\text{m}$  PVC durante 3 horas.

Los detectores CR-39 fueron colocados frente al filtro y los testigos colocados en simultaneo sin filtro, cada uno en un casete de 2 cm de altura donde ingresa el aire continuamente.

Se esperaba que los detectores expuestos tengan mayor densidad de huellas que los testigos si el filtro tuviese progenie del radón adherido en aerosoles. Los resultados de la tabla 4.1 muestran, en todos los casos, que las densidades de los detectores CR-39 expuestos (C0032, C0040, C0034 y C0036) son mayores a los detectores testigos (C0033, C0041, C0035 y C0037). Las diferencias de densidades en los detectores posiblemente se deba a la cantidad de aerosoles o por las concentraciones variables de radón y su progenie en el ambiente.

Tabla 4.1: Comparación de densidad de huellas en CR-39 obtenidas con bomba de aire de bajo caudal y alto caudal,  $\rho$  es la densidad de huellas (huellas/cm<sup>2</sup>) en CR-39

Nº	Caudal	Código	$\rho_{total}$	Código ( <i>testigo</i> )	$\rho_{testigo}$	$\rho_{total} - \rho_{testigo}$	T (°C)	H.R. (%)
1	bajo	C0032	116,8 ± 18,1	C0033	31,4 ± 7,7	85,3 ± 19,7	25	69
2	bajo	C0040	51,6 ± 10,8	C0041	31,4 ± 7,7	20,2 ± 13,2	25	67
3	bajo	C0034	56,1 ± 13,7	C0035	24,7 ± 8,5	31,4 ± 16,1	25	71
4	alto	C0036	206,6 ± 19,3	C0037	22,5 ± 6,3	184,1 ± 20,3	25	71

De los resultados se observa que el detector CR-39 es útil para obtener densidad de huellas provenientes de aerosoles radiactivos, pero debido al corto tiempo de exposición (3 horas) comparados con periodos de semi-desintegración grandes (en años) de emisores alfa de la cadena de Uranio 238 y Torio 232 se considera que los emisores alfa más probables son la progenie de vida corta del radón.

#### 4.1.2. Densidad de huellas en LR-115 en una cámara cerrada

Los filtros de PVC con muestras de polvo luego de culminada las tres horas, presentados en la tabla 4.1, son colocados en cámaras cerradas. La distancia entre el detector y el filtro es 5,6 cm, distancia dentro del intervalo de medida detectable por el LR-115 para Po 214 (ver tabla B.1 del apéndice B).

Si los detectores expuestos tuviesen mayor densidad de trazas que sus testigos, podría ser causado por presencia de Po 214. De los resultados en la tabla 4.2 no se puede asegurar que no haya presencia de Po 214, pero podría ser de una baja concentración.

Tabla 4.2: Densidad de huellas de LR-115 expuesto frente al filtro con polvo en cámara cerrada de 5,6 cm

Nº	caudal	Código	$\rho_{total}$	Código ( <i>testigo</i> )	$\rho_{testigo}$	T (°C)	H.R. (%)
1	bajo	D89	$5,9 \pm 2,9$	D90	$17,7 \pm 4,7$	25	69
2	bajo	D93	$4,4 \pm 2,5$	D94	$13,3 \pm 4,2$	25	67
3	bajo	D97	$4,4 \pm 2,5$	D98	$5,9 \pm 2,9$	25	71
4	alto	D115	$10,3 \pm 3,7$	D116	$4,4 \pm 2,6$	25	71

Los detectores CR-39 y LR-115 también podría registrar las partículas alfa del radón dentro de la cámara, pero debido a que el tiempo de exposición es muy corto se desestima ésta influencia.

## 4.2. Captura de aerosoles con una bomba de alto caudal

Al comparar la densidad de huellas de los detectores C0034 y C0056 obtenido con bajo y alto caudal respectivamente, tabla 4.1, la densidad resulta mayor para alto caudal. Por esta razón se realizó más pruebas con alto caudal como se muestra en los siguientes resultados.

### 4.2.1. Densidad de huellas de CR-39 colocados frente al filtro

En el arreglo experimental la distancia entre filtro y detector es 1 cm esperando mayor eficiencia en la detección, ver figura 3.12, se utilizó filtro whatman N°42 de  $2,5 \mu\text{m}$  para retener partículas de menor tamaño a las pruebas anteriores. El detector fue expuesto a un flujo continuo de aire durante 3 horas.

De estos resultados, según la tabla 4.3, las densidades en los detectores

Tabla 4.3: Densidades de huellas en CR-39 colocados frente al filtro, donde  $\rho$  son las densidades (huellas/cm<sup>2</sup>)

Nº	Código	$\rho_{total}$	Código ( <i>testigo</i> )	$\rho_{testigo}$	$\rho_{total} - \rho_{testigo}$	T (°C)	H.R. (%)
5	C0053	128,0 ± 21,5	C0054	31,4 ± 11,4	96,6 ± 24,4	23	67
6	C0060	80,8 ± 12,7	C0061	38,2 ± 9,1	42,7 ± 15,6	25	68
7	C0064	47,2 ± 9,2	C0065	42,7 ± 8,6	4,5 ± 12,6	25	68
8	C0068	80,8 ± 12,7	C0069	26,9 ± 8,1	53,9 ± 15,0	28	68
9	C0071	31,4 ± 8,3	C0077	9 ± 4,3	22,5 ± 9,4	25	68

expuestos son mayores que a los testigos. Esto podría deberse a que al utilizar bomba de alto caudal, filtros de 2,5  $\mu\text{m}$  y detectores CR-39 si sea útil para detectar las partículas alfa emitidas por la progenie del radón, los de mayor probabilidad son el Po 214 y el Po 218.

#### 4.2.2. Detectores CR-39 situados en los laterales del casete

En la captura de aerosoles, en el casete se colocó además de los detectores frente al filtro también en los laterales, para conocer la influencia del lugar al colocar el detector.

Al comparar las densidades de huella en los detectores de cada muestra, 5 al 8, los mayores son los de la tabla 4.3. Por ejemplo, para la muestra nº 5 la densidad de huellas en C0053 es 128,0 y para el detector C0055 es 103,3, la densidad mayor es del detector C0053 puesto frente al filtro.

De estos resultados se puede decir que la mejor posición para detectar la progenie del radón con el Cr-39 es frente al filtro ya que el detector tiene mayor densidad de huellas. Por otra parte, la menor densidad de huellas en los detectores laterales que en los frente del filtro, pudiera deberse a que las partículas alfa son alcanzado a este detector pero con un ángulo diferente.

Tabla 4.4: Densidad de huellas en detectores CR-39 colocados al lado lateral del casete principal,  $\rho$  es la densidad de huellas (huellas/cm<sup>2</sup>)

Nº	Código	$\rho_{total}$	Código ( <i>testigo</i> )	$\rho_{testigo}$	T (°C)	H.R. (%)
5	C0055	103,3 ± 16,6	C0054	31,4 ± 11,4	23	67
6	C0062	31,4 ± 8,9	C0061	38,2 ± 9,1	25	68
7	C0066	20,2 ± 8,2	C0065	42,7 ± 8,6	25	68
8	C0070	58,4 ± 11,6	C0069	26,9 ± 8,1	28	68

#### 4.2.3. Densidad de huellas en CR-39 en cámara cerrada

Los filtros utilizados en las muestras 5, 6 y 7 luego de la succión de aire, son colocados en una cámara herméticamente cerrada, la distancia detector-filtro fue 5,6 cm. Para lograr el equilibrio entre el radón y su progenie, se expuso el detector dentro de la cámara durante 3 horas.

Tabla 4.5: Densidad de huellas en detectores CR-39 puestos dentro de una cámara

Código	$\rho_{total}$ (huellas/cm <sup>2</sup> )	T(°C)	H.R.(%)
C0056	33,7 ± 7,8	24	70
C0063	20,2 ± 6,8	23	68
C0067	15,7 ± 6,4	26	72

Los resultados de la tabla 4.5 muestra que las densidades en los detectores son menores a la de los detectores expuestos mostradas en las tabla 4.1, incluso pueden ser considerados como fondo al compararse con las densidades de los testigos de la tabla 4.3. Es posible que se deba a la baja concentración de Po 214, considerando que el alcance para este descendiente del radón es 7 cm y la

altura de la cámara fue 5,6 cm.

### 4.3. Otros métodos similares para la medición de la progenie del radón

En otras metodologías descritas en la literatura especializada, mostradas en la tabla de la figura 4.1 y la tabla 3.1 , encontramos que nuestra metodología es sencilla y portable, que permite ser usada en cualquier ambiente de estudio, a diferencia de las otras que requieren espectrómetros u otros equipos no manuales que sólo permiten medidas de laboratorio.

	Methods	$SD_{PAEC}$ (%)	Total time (min)	Efficiency index $EI = 1/(SD * Total\ time)$	Sampling time (min)	Counting time (min)
1	Thomas 1972; $\alpha_{1,2}$	18.0	35	0.16	5	(7-10)(11-25)(26-35)
2	Nazaroff 1984; $\alpha_{1,2}$	6.3	60	0.26	5	(6-9)(12-29)(40-60)
		6.9	60	0.24		(7-10)(13-30)(42-60)
3	Kerr 1975; $\alpha_1, \alpha_2$	7.1	40	0.35	10	(12-22)(25-40)
4	$\alpha_{1,2}(8)$	16.2	35	0.18	10	(11-14)...(32-35)
		10.4	41	0.23		(11-14)...(38-41)
5	$\alpha_1, \alpha_2(8)$	8.1	35	0.35	10	(11-14)...(32-35)
		6.1	41	0.40		(11-14)...(38-41)
6	$\alpha_1, \alpha_2, \beta(1)$	9.9	14	0.72	10	(11-14)
7	$\alpha_1, \alpha_2, \beta(8)$	3.4	35	0.84	10	(11-14)...(32-35)
		3.1	41	0.78		(11-14)...(38-41)

Figura 4.1: Comparación de métodos de medida de progenie de radón [23]

En la figura 4.1 se muestran resultados obtenidos con metodologías en las cuales se usa flujo de aire y filtros, pero las medidas de las partículas alfa son hechas con espectrómetros en los cuales se coloca el filtro.

# Capítulo 5

## Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- Se logró establecer una base para una metodología, con equipos portables y económicos para medir la progenie del radón en muestras de polvo con detectores de huellas nucleares CR-39.
- Las pruebas experimentales muestran, que las huellas registradas por el detector CR-39 frente al filtro con aerosoles son debidas a la progenie del radón adherida en las muestras de polvo retenido. Esto se aprecia al compararlo con el detector testigo CR-39.
- Con el uso de CR-39 se obtuvo huellas provenientes de la progenie de radón, con mayor probabilidad Po 218 y Po 214. Pero no están discriminadas unas de otras.
- Se demuestra que es posible medir densidad de huellas de progenie del radón con el detector CR-39, lo que no sucede con el detector LR-115.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar con el estudio para estandarizar el método y hacerlo más efectivo.
- Se aconseja hacer un análisis a profundidad sobre los riesgos en la salud debido al radón y su progenie en dependencia a las concentraciones de polvo en aire.
- Debido a que la progenie del radón se encuentran adheridas a las partículas de aire, detectadas en un ambiente común de trabajo aparentemente sin riesgo de alta concentración de radón es recomendable que el ambiente este en lo posible libre de polvo.
- Se sugiere mantener los ambientes limpios y ventilados, aumentar la frecuencia de limpieza de ser necesario, teniendo en cuenta la población vulnerable frente a la contaminación por polvo alrededor de las zonas de vivienda o de trabajo.
- En particular, se conoce que la ciudad de Lima es la segunda ciudad más contaminada por polvo de América Latina según la OMS, se recomienda implementar otros estudios para reducir este tipo de contaminación ambiental.

# Bibliografía

- [1] Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). Informe nacional de la calidad de aire. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>. Accedido: 15-03-2018.
- [2] Ahmed, S. N. (2007). *Physics and engineering of radiation detection*. Academic Press.
- [3] Baskaran, M. (2016). *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*. Springer.
- [4] Bem, H., Bem, E., Krzemińska, M., and Ostrowska, M. (2002). Determination of radioactivity in air filters by alpha and gamma spectrometry. *Nukleonika*, 47(2):87–91.
- [5] Benés, A. P. (1999). Ntp 533: El radón y sus efectos sobre la salud. *Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Madrid*.
- [6] Burcham, W. (1974). *Física nuclear*. Reverté.
- [7] Centro Nacional de Metrología (CENAM) (2017). Cálculo de la densidad del aire utilizando la formula del cipm-2007. <http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>. Accedido: 2017-10-24.
- [8] Chaki, S., Foutes, E., Ghose, S., Littleton, B., Mackinney, J., Schultheisz, D., Schuknecht, M., Setlow, L., Shroff, B., and Peake, T. (2008). Technical

report on technologically enhanced naturally occurring radioactive materials from uranium mining volume 1: Mining and reclamation background.

- [9] DOSIRAD LABORATORY (2010). LR115 films. <http://www.dosirad.fr/sites/default/files/LR115%20notice-2col-Angl-2013.pdf>. Accedido: 2018-03-12.
- [10] Durrani, S. A. and Bull, R. K. (2013). *Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications*, volume 111. Elsevier.
- [11] Durrani, S. A. et al. (1997). *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. World Scientific.
- [12] Environmental Protection Agency (EPA) (2017). La guía para proteger a su familia y a usted del radón. <https://espanol.epa.gov/cai/manual-informativo-sobre-el-radon>. Accedido: 2018-01-03.
- [13] Environmental Protection Agency (EPA) (2018). Particulate matter (pm) basics. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#effects>. Accedido: 16-03-2018.
- [14] Environmental Protection Agency (EPA) (2018). Conceptos básicos del índice de calidad del aire (aqi). <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>". Accedido: 2018-04-23.
- [15] Espinosa, G. (1994). *Trazas nucleares en sólidos*. Mexico Nat. Auton. Univ.
- [16] Falcon-Rodriguez, C. I., Osornio-Vargas, A. R., Sada-Ovalle, I., and Segura-Medina, P. (2016). Aeroparticles, composition, and lung diseases. *Frontiers in immunology*, 7:3.
- [17] Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R. M. (1975). *Nuclear tracks in solids: principles and applications*. Univ of California Press.

- [18] Fujimori, A. (1997). Decreto supremo n° 009-1997em.
- [19] Goded Echeverría, F. (1958). Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear.
- [20] Hinds, W. C. (1999). Aerosol technology: Properties. *Behavior, and Measurement of airborne Particles (2nd.*
- [21] Hofmann, W. (2011). Modelling inhaled particle deposition in the human lung—a review. *Journal of Aerosol Science*, 42(10):693–724.
- [22] Hofmann, W., Arvela, H., Harley, N., Marsh, J., McLaughlin, J., Röttger, A., and Tokonami, S. (2012). Report 88. *Journal of the ICRU*, 12(2):29–70.
- [23] Kadir, A., Zhang, L., Guo, Q., and Liang, J. (2013). Efficiency analysis and comparison of different radon progeny measurement methods. *The Scientific World Journal*, 2013.
- [24] Khandare, P., Joshi, M., Khan, A., Sapra, B., and Mayya, Y. (2016). Ionizer induced  $^{220}\text{Rn}$  decay product removal in confined environment: Continuous vs. instantaneous source. *Journal of environmental radioactivity*, 164:182–189.
- [25] Khouri, E. A. (2004). *Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales*. Universidad de Oviedo.
- [26] Kim, K.-H., Kabir, E., and Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74:136–143.
- [27] Kodalpha (2018). Kodalpha radon-dosimeters and Lr-155 ssntd specifications. [http://www.gt-analytic.at/downloads\\_en/Kod\\_tech\\_det.pdf](http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf). Accedido: 2018-03-12.
- [28] Lecomte, J.-F., Solomon, S., Takala, J., Jung, T., Strand, P., Murith, C., Kiselev, S., Zhuo, W., Shannoun, F., and Janssens, A. (2014). Icrp

- publication 126: radiological protection against radon exposure. *Annals of the ICRP*.
- [29] Moreano Bohórquez, D. I. and Palmisano Patrón, A. S. (2013). Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas pm10 y co.
- [30] Nazaroff, W. W. and Nero Jr, A. V. (1988). *Radon and its decay products in indoor air*. New York, NY (US); John Wiley and Sons, Incorporated.
- [31] Organización Mundial de la Salud (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. Accedido: 2018-02-02.
- [32] Organización Mundial de la Salud (2016a). Contaminación del aire de interiores y salud. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/>. Accedido: 2018-02-02.
- [33] Organización Mundial de la Salud (2016b). Global Urban Ambient Air Pollution Database. [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/cities/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/). Accedido: 18-03-2018.
- [34] Peñalver, J. J. L. (2006). *Optimización de los métodos de medida en un contador proporcional. Resultados y análisis en un programa de vigilancia radiológica ambiental*. PhD thesis, Universidad de Granada.
- [35] Ruipérez, L. G. (1979). *Radiactividad y medio ambiente*. Universidad de Oviedo.
- [36] Ruipérez, L. G. (1992). *Radón y sus riesgos*. Universidad de Oviedo.
- [37] Sanchez, C., Camapaza, D. F., Choque, N. E., and Catacora, P. (2016). Contaminación con plomo en dientes reciduos y permanentes. *Revista estomatológica del altiplano*, 1(2):20.

- [38] Subils, M. J. B. (1990). Ntp 440: Radón en ambientes interiores.
- [39] Valdivia, S. A. P. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado pm10 y pm2, 5 en lima metropolitana. In *Anales Científicos*, volume 77, pages 273–283. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [40] Valera Negrete, J. P. A. (2005). *Apuntes de física general*. UNAM.
- [41] Veciana, A. M. (2006). Ntp 731: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (i): aspectos generales.
- [42] Zeeb, H., Shannoun, F., et al. (2015). Manual de la oms sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública.
- [43] Ziegler, J. F. (2000). Interactions of ions with matter. <http://www.srim.org/>. Accedido: 2018-05-02.

# Apéndice A

## Cálculos de alcance con SRIM

Se realizó cálculos de alcances con el programa SRIM donde se tomó los porcentajes de elemento con configuración automática y las densidades fueron calculadas según las condiciones ambientales como temperatura, humedad relativa y presión según CENAM [7], los resultados son mostrados en la siguiente tabla.

La presión es un valor aproximado al promedio obtenido de reportes de la estación meteorológica PUCP; 100500 Pascales. Debido a que los resultados obtenidos a diferentes temperaturas son más significativos que a una variación de humedad, se consideró como a una humedad relativa 60%.

De la tabla se puede obtener las distancia mínima y máxima de los emisores  $\alpha$  para ser detectados por el detector LR-115, tomando el valor máximo de  $X_{min}$  y el máximo valor de  $X_{max}$  ; para Rn 222 entre 2,0 cm a 3,8 cm, Po 218 2,7 cm a 4,4 cm y Po 214 de 5,0 cm a 6,6 cm.

Tabla A.1: Alcance, distancia mínima y máxima de detección para el detector LR-115 calculado con el programa SRIM en dependencia de la temperatura.

Temperatura (°C)	Elemento	Energía (Mev)	Alcance (cm)	$X_{min}$ (cm)	$X_{max}$ (cm)
15	Rn-222	5,49	4,1	1,8	3,8
	Po-218	6,00	4,7	2,43	4,4
	Po-214	7,69	7,0	4,7	6,6
17	Rn-222	5,49	4,1	2,0	3,9
	Po-218	6,00	4,7	2,6	4,6
	Po-214	7,69	7,0	5,0	6,9
19	Rn-222	5,49	4,2	1,9	3,8
	Po-218	6,00	4,8	2,5	4,4
	Po-214	7,69	7,1	4,8	6,7
21	Rn-222	5,49	4,2	1,9	3,9
	Po-218	6,00	4,8	2,5	4,5
	Po-214	7,69	7,1	4,9	6,8
23	Rn-222	5,49	4,2	2,0	3,9
	Po-218	6,00	4,8	2,6	4,5
	Po-214	7,69	4,9	4,9	6,8
25	Rn-222	5,49	7,2	2,0	3,9
	Po-218	6,00	4,3	2,6	4,6
	Po-214	7,69	4,9	5,0	6,9
27	Rn-222	5,49	4,3	2,0	4,0
	Po-218	6,00	4,9	2,7	4,6
	Po-214	7,69	7,3	5,0	7,0

## Apéndice B

### Trabajos previos para establecer una posible metodología

1. Con el uso de una bomba de alto caudal y filtro whatman N° 42 (2,5  $\mu\text{m}$ ) se obtiene las muestras de polvo para luego ser colocados en cámaras de difusión. Esta altura fue tomada debido a las distancias mínimas y máximas para la detección de Rn-22, Po-218 Y Po-214. De la tabla con el programa SRIM si se toma el máximo valor de  $X_{min}$  y el valor mínimo de  $X_{max}$  se puede asegurar la detección de de las partículas alfa provenientes de los elementos entre el intervalo de temperatura calculado con el programa SRIM.

Tabla B.1: Distancia mínima y máxima de detección para el detector LR-115 para temperatura entre 15 °C y 27 °C

Elemento	Energía (Mev)	$X_{min}$ (cm)	$X_{max}$ (cm)
Rn-222	5,49	2,0	3,8
Po-218	6,00	2,7	4,4
Po-214	7,69	5,0	6,6

Se puede discriminar el Po-218 del Rn-222 y Po-214 si provienen desde una misma distancia, no es posible hacerlo con el radón por encontrarse en estado gaseoso pero si es posible entre el Po-218,Po-214 y disminuir la

probabilidad de que las partículas alfa provengan del radón, las distancias se muestra en la tabla B.1 . Para evitar la influencia del Po-214 se tomó una distancia promedio entre 3,8 cm y 4,4 cm; altura de la cámara de difusión 4,1 cm.

Una vez dentro el detector LR-115 como el filtro, fueron colocados de manera opuesta; en las bases. El tiempo de grabado fue de 100 minutos. Los detectores D10, D12 y D16 son los detectores expuestos frente al filtro con partículas de polvo , mientras los detectores D11, D12 y D13 son los detectores testigos, es decir detectores en cámaras similares pero con filtros sin polvo. La muestra fue tomado en el taller de preparación del edificio de física, primer piso.

Tabla B.2: Resultados de densidad de huellas de un detector LR-115 luego de ser expuesto frente a un filtro con polvo ambiental

Código	$\rho$ (huellas/cm <sup>2</sup> )	Código	$\rho_{testigo}$ (huellas/cm <sup>2</sup> )	Muestreado (h)	Exposición (h)
D10	47	D11	51	1	2
D12	35	D13	35	1	2
D16	47	D17	144	2	14

Estos resultados muestra que no hay relación directa entre el detector expuesto y el testigo, ni en dependencia de la cantidad de horas expuesto dentro de la cámara.

2. Para conocer la relación entre la cantidad de polvo y la densidad de huellas en el detector LR-115, se usó polvo recolectado por una aspiradora. La muestra de polvo se pesó siguiendo las recomendaciones del manual de la balanza, el filtro fue pesado sin polvo y para el pesado con la muestra fue saturado retirandose lo sobrante, esta diferencia es el peso de la muestra mostrado en la siguiente tabla . Para este trabajo se utilizó un detector LR-115, filtro whatman N° 42,cámara de altura de 4,1 cm, el tiempo en la

cámara fue 3 horas y el tiempo de grabado fue de 100 minutos.

Tabla B.3: Densidad de huellas en detectores LR-115 frente a filtros con polvo recolectado

Muestra	Código	$\rho$ (huellas/ $cm^2$ )	Peso (g)
1	D23	171	0,0005
	D24	148	0,0033
	D25	124	0,0010
	D21(testigo)	109	0,0000
2	D26	62	0,0015
	D27	97	0,0019
	D28	229	0,0018
	D29 (testigo)	19	0,0000
3	D32	509	0,0012
	D33	501	0,0013
	D34	330	0,0007
	D35 (testigo)	315	0,0000

De estos resultados se puede concluir que no existe una relación directa entre la cantidad de polvo recolectado de superficies. Po-218 y

3. Se muestra los resultados de densidades de huellas en detectores LR-115 grabado a 90 minutos, dichos detectores fueron expuestos frente a un filtro para cada uno a diferencias distancias, para discriminar los descendientes emisores  $\alpha$ . Para la cámara de 4,1 se espera obtener la densidad de huellas provenientes de Po-218, para la cámara de 6 cm de Po-214 y para Po-212 descendiente de Rn-220.

Tabla B.4: Densidad de huellas en detectores LR-115 dentro de cámaras de diferentes alturas frente a filtros con polvo

Muestra	Código	Altura de cámara (cm)	$\rho$ (huellas/cm <sup>2</sup> )	Peso (g)
1	D57	6	27	0.0041
	D58(testigo)	6	23	0.0000
	D59	8,5	27	0.0040
	D60(testigo)	8,5	12	0,0000
	D61	4,1	19	0,0005
	D62(testigo)	4,1	12	0,0000
2	D63	6	27	0.0022
	D64(testigo)	6	27	0.0000
	D65	8,5	19	0.0053
	D66(testigo)	8,5	4	0,0000
	D67	4,1	12	0,0013
	D68(testigo)	4,1	12	0,0000
3	D69	6	19	0.0063
	D70(testigo)	6	8	0.0000
	D71	8,5	12	0.0013
	D72(testigo)	8,5	31	0,0000
	D67	4,1	16	0,0011
	D62(testigo)	4,1	4	0,0000