

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**Fluctuaciones en la presencia de Radón 222  
ambiental en la ciudad de Lima (Zona San  
Miguel)**

Tesis para optar el Título Magister en Física, que presenta el Licenciado:

**Bertin Andrés Pérez Ancaya**

**ASESOR: Dra. María Elena López Herrera**

Lima, enero de 2016

## Resumen

La presencia de contaminantes radiactivos en forma natural es y será un problema medio ambiental. Existen elementos radiactivos que sobreviven en la Tierra desde su formación inicial, como el Uranio 238, Torio 232, Actinio 227 y por intervenciones humanas el Neptunio 235. Particularmente, en la cadena de desintegración del Uranio 238 encontramos un elemento gaseoso radiactivo que puede difundirse en el agua o en el aire que respiramos llamado Radón 222. Este gas radiactivo se encuentra en porcentajes importantes en la atmósfera de nuestro planeta Tierra. En este trabajo se muestran mediciones de Radón 222 realizadas desde la zotea del edificio de Física (edificio de tres pisos) de la Pontificia Universidad Católica del Perú situado en el distrito de San Miguel, realizadas durante cuatro años, con la finalidad de establecer fluctuaciones de este contaminante en el aire circundante.

Las mediciones se hicieron aplicando la técnica de huellas nucleares y usando un detector de estado sólido, el polímero LR-115 tipo 2. Esta técnica permite captar las partículas subatómicas que emiten los elementos al desintegrarse y que al interaccionar con el detector polimérico dejan sus huellas o trazas; en este trabajo se demuestra que no solo se forman las trazas ocasionadas por las partículas alfa asociadas al Radón 222 sino también se forman otro tipo de trazas que son analizadas teniendo en cuenta las diferentes fases del procedimiento de medición. Los resultados muestran las trazas asociadas a la presencia del contaminante gaseoso radiactivo Radón 222 en el aire y la formación de las otras trazas son analizadas teniendo en cuenta la metodología usada y suponiendo que pueden ser asociadas a otros eventos de origen nuclear.

## **Abstract**

The presence of radioactive contaminants naturally is and will be an environmental problem. There radioactive elements that survive on Earth since its formation, like Uranium 238, Thorium 232, Actinium 227 and Neptunium 235 human interventions. Particularly in the decay chain of Uranium 238, we found Radon 222 a gaseous radioactive element that can diffuse into the water or the air we breathe. This radioactive gas found in significant percentages in the atmosphere of our planet Earth. In this work, measurements made four years in the roof of a three-story Physics building of the Pontificia Universidad Católica del Perú in the district of San Miguel, the data served to establish the fluctuations of this pollutant gas in the surrounding air.

The measurements were made using the technique of nuclear tracks detectors and using a solid state detector, the polymer LR-115 type 2. The use of this technique allows us to capture subatomic particle emitted by radioactive elements when it desintegrates and the particles interact with our polymer detector and leave their tracks; so in this work not only alpha tracks associated with Radon are obtain, but also other tracks are analyzed taking into account the different phases of the measurement procedure. Our results provided us with an indicator of the presence of Radon 222 in the air and the presence of other tracks are analyzed considering the methodology used and assuming that they can be associated with other events of nuclear origin.

*A DIOS.*

*A mis amados padres, Alberto y Lina.*

*A mi hermanita Gaby.*

*A mi abuela María.*

*A mi amor Alexandra.*

*Agradecimientos a CIENCIACTIVA-CONCYTEC*

# Índice general

Resúmen	II
Abstract	III
Introducción	1
<b>1. Fundamentos teóricos afines al estudio</b>	<b>2</b>
1.1. Radiación Ionizante . . . . .	2
1.1.1. Decaimiento $\alpha$ . . . . .	4
1.1.2. Emisores $\alpha$ . . . . .	5
1.2. Interacción de las partículas $\alpha$ con la materia . . . . .	8
1.2.1. Ionización . . . . .	8
1.2.2. Poder de frenado . . . . .	10
1.2.3. Rango o alcance . . . . .	12
1.3. Técnicas de detección . . . . .	13
1.3.1. Células de centelleo . . . . .	13
1.3.2. Método de lectura instantánea o continua (AlphaGUARD) . . . . .	15
1.3.3. Detectores sólidos de huellas nucleares (SSNTD's) . . . . .	18
<b>2. Descripción experimental de la detección de partículas en el medio ambiente usando SSNTD's</b>	<b>23</b>
2.1. Metodología en la detección de Radón 222 . . . . .	23
2.1.1. Resultados . . . . .	26
2.2. Metodología en la detección y formación de otras huellas (huellas G) . . . . .	36
2.2.1. Resultados . . . . .	40
<b>3. Discusión de resultados</b>	<b>48</b>
<b>4. Conclusiones</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>

<b>Apéndices</b>	<b>59</b>
<b>A. Proceso de Calibración del detector LR-115 tipo 2</b>	<b>60</b>
<b>B. Otras aplicaciones del LR-115 tipo 2 en la detección de contaminantes medio ambientales</b>	<b>67</b>
<b>C. Comparaciones de medidas en el interior como en el exterior</b>	<b>72</b>

# Índice de figuras

1.1. Cadenas de desintegración del $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ y $^{232}\text{Th}$ . . . . .	7
1.2. Curva de Bragg . . . . .	9
1.3. Diagrama de detector de centelleo. . . . .	13
1.4. Detector de centelleo . . . . .	14
1.5. Cámara de Lucas y Calibrador de cuentas . . . . .	14
1.6. Detector AlphaGUARD . . . . .	16
1.7. Mediciones con el detector AlphaGUARD obtenidas en la Universidad de Extremadura, España . . . . .	17
1.8. Detector LR-115 tipo 2 y vista de perfil del detector . . . . .	18
1.9. Geometría de la formación de una huella . . . . .	20
1.10. Evolución del grabado con incidencia oblicua . . . . .	21
2.1. EdificioF . . . . .	23
2.2. Detectores . . . . .	24
2.3. Croquis . . . . .	25
2.4. Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el SUR. . . . .	34
2.5. Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el OESTE. . . . .	34
2.6. Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el NORTE. . . . .	35
2.7. Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el ESTE. . . . .	35
2.8. Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el ZENIT. . . . .	36
2.9. Seis diferentes montajes experimentales para la detección de las hue- llas concéntricas. . . . .	39
2.10. Detectores colocados en Chaclacayo en la pared de un segundo piso. . . . .	40
2.11. Resultados de un campo del detector ubicado en Chaclacayo con código A2. . . . .	41
2.12. Resultados de un campo del detector ubicado en Miraflores con código B1. . . . .	42
2.13. Resultados de un campo del detector ubicado en San Miguel con código B. . . . .	42

2.14. Resultados de un campo del detector ubicado en Miraflores con código A1. . . . .	43
2.15. Huellas concéntricas con mayor cantidad de anillos. . . . .	43
2.16. Huella concéntrica con mayor cantidad de anillos. . . . .	44
2.17. Detector degradado por UV ubicado en el techo de las 3 zonas. . . . .	44
2.18. Detectores expuesto con la parte A expuesta a la lámpara UV (UVA) y la parte B (UVB). . . . .	45
2.19. Nitrocelulosa vista desde un microscopio electrónico. . . . .	46
3.1. Promedio de concentración de Radón 222 en todas las direcciones en cada período . . . . .	49
A.1. Esquema de la cámara y antecámara . . . . .	63
A.2. Comportamiento lineal entre cantidad de huellas promedio y horas. . . . .	65
A.3. Cinco campos seleccionados para la lectura del detector LR-115 tipo 2. . . . .	65
B.1. Montaje experimental de la “técnica de la lata”. . . . .	68
B.2. Esquema de un desecho de Uranio 238 con dos tubos que facilitan la difusión de Radón 222. . . . .	69
B.3. Detectores colocado encima de desechos de Uranio 238. . . . .	69
B.4. Campo de $126,96\mu m^2$ del detector LR-115 tipo en mediciones de desechos de Uranio 238. . . . .	70
B.5. Campo de $126,96\mu m^2$ del detector LR-115 tipo en mediciones de desechos de Uranio 238. . . . .	70
B.6. Cantidad de huellas en las 12 posiciones seleccionadas para dos tubos de diferente dimensión. . . . .	71
C.1. 7 diferentes montajes experimentales para la detección de las huellas concéntricas. . . . .	73
C.2. Detector sin huellas concéntricas con el montaje IA2. . . . .	74
C.3. Detector con huellas concéntricas con el montaje E. . . . .	74
C.4. Detector con huellas concéntricas con el montaje EB2. . . . .	75

# Índice de tablas

1.1. Emisores de partículas $\alpha$ y sus tiempos de vida media ( $T_{1/2}$ ) . . . . .	6
1.2. Ionización específica de las partículas $\alpha$ en el aire a condiciones normales	9
1.3. Rango o alcance de partículas $\alpha$ en el aire y tejido biológico. . . . .	12
2.1. Períodos y característica de estos. . . . .	26
2.2. Resultados de concentración desde el 01-06-2011 . . . . .	27
2.3. Resultados de concentración desde el 14-07-2011 . . . . .	28
2.4. Resultados de concentración desde el 19-09-2012 . . . . .	29
2.5. Resultados de concentración desde el 19-12-2012 . . . . .	30
2.6. Resultados de concentración desde el 10-06-2015 . . . . .	31
2.7. Resultados de concentración desde el 08-07-2015 . . . . .	32
2.8. Resultados de concentración desde el 26-11-2015 . . . . .	33
2.9. Partículas $\alpha$ al interaccionar con el aire . . . . .	37
2.10. Partículas $\alpha$ al interaccionar con el polímero LR-115 tipo 2 . . . . .	38
2.11. Presencia de huellas concéntricas (tipo G) en cada montaje experi- mental para 3 zonas distintas. . . . .	41
C.1. Respuesta de la presencia de huellas concéntricas de cada montaje experimental . . . . .	73

# Introducción

En la naturaleza se presenta siempre el fenómeno de la radiactividad, esto se debe a la existencia de elementos radiactivos naturales que coexisten con la tierra desde su origen; estos elementos generan emisiones espontánea de partículas debido al número muy elevado de protones y neutrones presentes en sus núcleos.

La radiactividad además de ser natural puede ser artificial; como radiación natural en la tierra se presentan las de tipo externo e interno. Como radiación externa se considera a la radiación de origen cósmico y la radiación interna es la que produce los porcentajes mayores de contaminantes ambientales. La radiación interna es emitida por la corteza terrestre principalmente en forma de gas; se tiene conocimiento que la mayor concentración de gas radiactivo existente se debe al gas Radón, el cual contribuye con las tres cuartas partes de la dosis efectiva anual recibida por el hombre [1].

Debido a que el gas Radón emitido desde la corteza terrestre está presente en el aire que respiramos y puede estar en una concentración relativamente elevada, se procede a realizar estudios para determinar su concentración y sus fuentes en diferentes ambientes exteriores y recintos habitados. Posteriormente, se busca establecer posibles medidas correctivas y disminuir sus efectos en la salud de las personas.

En la detección del gas Radón se usan distintas técnicas; para este trabajo en particular se usa la técnica de huellas nucleares usando polímeros. Por lo común se usan polímeros de alto peso molecular para el registro de partículas altamente energéticas, estos detectores permiten observar las trazas o huellas que dejan a su paso las partículas que son emitidas durante una desintegración radiactiva. En la desintegración del gas Radón se emiten principalmente partículas  $\alpha$ . En este trabajo se estudiará que tipo de huellas nucleares se han obtenido en las posiciones previamente determinadas y direccionadas sobre la azotea del edificio elegido.

# Capítulo 1

## Fundamentos teóricos afines al estudio

La materia está constituida por componentes llamados átomos, los cuales poseen electrones y un núcleo. El núcleo a su vez está formado principalmente por protones y neutrones. La cantidad o proporción de protones y neutrones puede generar una clasificación en dos tipos de núcleos: los estables y los inestables.

Un núcleo es estable cuando las fuerzas atractivas son mayores que las repulsivas, por lo que existe un equilibrio; un núcleo es inestable cuando en cierto período de tiempo cambian su configuración, a este cambio se le llama desintegración radiactiva. El tema de la radiactividad fue descubierto por Becquerel en 1896 [2], iniciando así el estudio de los núcleos atómicos.

Algunos años después, se encontró que la llamada desintegración radiactiva era el fenómeno por el cual el núcleo emitía ciertas partículas de forma natural, como es el caso de partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y más adelante posiblemente otras partículas. Esta emisión de partículas pueden agruparse en la denominada radiación ionizante y la no ionizante al interactuar con la materia.

### 1.1. Radiación Ionizante

Es la radiación que permite a su vez la emisión de partículas subatómicas como las mencionadas anteriormente, en aquellos núcleos que son inestables y están presentes en la materia donde incide. El nombre radiación se debe a que cuando un núcleo es inestable se dice que es radiactivo. Durante la emisión ionizante se extrae los electrones ligados al átomo del material al impactarlo [3].

Entre las principales radiaciones ionizantes emitidas por los radionucleidos se encuentran a las partículas  $\alpha$ , partículas  $\beta$ , positrones, fotones gamma, rayos x,

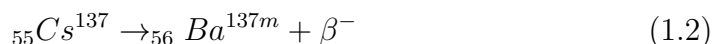
electrones de conversión y aniquilamiento de fotones. Las partículas  $\alpha$  se detallarán en la sección (1.1.1).

- Las **partículas beta** ( $\beta$ ) son electrones con alta energía originadas en el núcleo de un átomo. Estas son emitidas a partir de un neutrón según la siguiente ecuación:



La masa de la partícula beta es la misma que la de un electrón o aproximadamente  $1/1836$  que la de un neutrón o protón. Estas partículas poseen una carga negativa asociada; sin embargo, puede tener carga positiva a los cuales se le llama positrones, asociando estas partículas con la naturaleza radioactiva espontánea. Las emisiones beta no poseen una energía específica, por lo que hablar de espectroscopía beta no tiene mucho sentido, la razón de esto es que la partícula beta siempre es emitida con un anti-neutrino y el positron con un neutrino por lo cual la predicción de la proporción entre energías es impredecible [4].

Un ejemplo de un radionucleido que decae por emisión de partículas beta es el Cesio 137 [5].



Esta ecuación muestra el decaimiento del átomo de Cs137 al Ba-137m, la m indica que el átomo ha sido formado en un estado metaestable. A este proceso se le denomina decaimiento beta en donde podremos diferenciar dos tipos, el decaimiento beta menos resulta cuando un neutrón decae en un protón y un electrón, por lo tanto el número atómico aumenta en uno, como se muestra en la siguiente ecuación:



Y el decaimiento beta más que resulta cuando un protón decae en un neutrón y un positrón, por lo tanto el número atómico disminuye en uno como se muestra en la siguiente ecuación:



- Los **fotones gamma** ( $\gamma$ ) son radiaciones electromagnéticas constituidas por fotones como la luz visible, luz ultravioleta, rayos x, ondas de radio, etc. En el decaimiento de un núcleo debido al decaimiento  $\alpha$  o  $\beta$  se genera también una energía excedente la cual es la emisión de un fotón gamma [6].

Un ejemplo de emisión gamma es la transición isomérica [7].



Después del decaimiento beta del Cs137, el Ba 137m metaestable decae en un Ba 137 estable emitiendo fotones gamma con energía de 661 keV.

- **Electrones de conversión** ( $e^-$ ). Cuando un fotón gamma es emitido por un núcleo, este interactúa con uno de los orbitales electrónicos y usualmente el nivel orbital K es expulsado del átomo en lugar del fotón gamma. A este proceso se le llama conversión interna. La energía del electrón de conversión es igual a la energía del fotón gamma menos la energía de enlace del electrón. La distribución de energía es discreta igual que una emisión gamma [8].
- **Fotón de rayos X** ( $h\nu$ ). Cuando un electrón es expulsado debido al proceso antes mencionado de conversión interna o por otro proceso, otros electrones ocupan el lugar de este simultáneamente emitiendo fotones de rayos X. Estos poseen energías características discretas dependiendo del nivel del orbital de los electrones. Una diferencia importante entre rayos gamma y rayos x es que los rayos x se originan debido a electrones alrededor de un átomo, mientras que los rayos gamma se originan en el interior del núcleo. Generalmente la energía son generalmente menores que 100keV [9].
- **Radiación de aniquilamiento** ( $h\nu$ ). Cuando los positrones interactúan con sus alrededores, eventualmente capturan un electrón y la resultante de esto es la aniquilación del par electrón-positrón en donde se emiten dos fotones con energías de 511keV y viajan en direcciones opuestas desde la aniquilación [10].

### 1.1.1. Decaimiento $\alpha$

Como se detalló anteriormente, existen diferentes tipos de emisiones nucleares. En esta sección el decaimiento de partículas  $\alpha$  será nuestro tema principal.

La partícula  $\alpha$  es un núcleo de helio y su decaimiento está asociado a elementos pesados. Esta partícula es relativamente pesada y posee alta energía discreta con una carga positiva de 2 de sus dos protones. La velocidad que posee en el aire es de

aproximadamente una vigésima parte de la velocidad de la luz en el vacío [11]. En el proceso de decaimiento  $\alpha$  el elemento padre A decae perdiendo dos neutrones y dos protones y finalmente se convierte en el elemento hijo B [12].



La masa relativamente alta de esta partícula juega un rol importante en la interacción con la materia, este tema se discutirá más adelante en la sección (1.2).

### 1.1.2. Emisores $\alpha$

Las partículas  $\alpha$  provienen de diferentes emisores radiactivos, las energías de estas oscilan de forma discreta entre 4 y 9 MeV. En la tabla (1.1) se muestran los isótopos emisores  $\alpha$  más comunes.

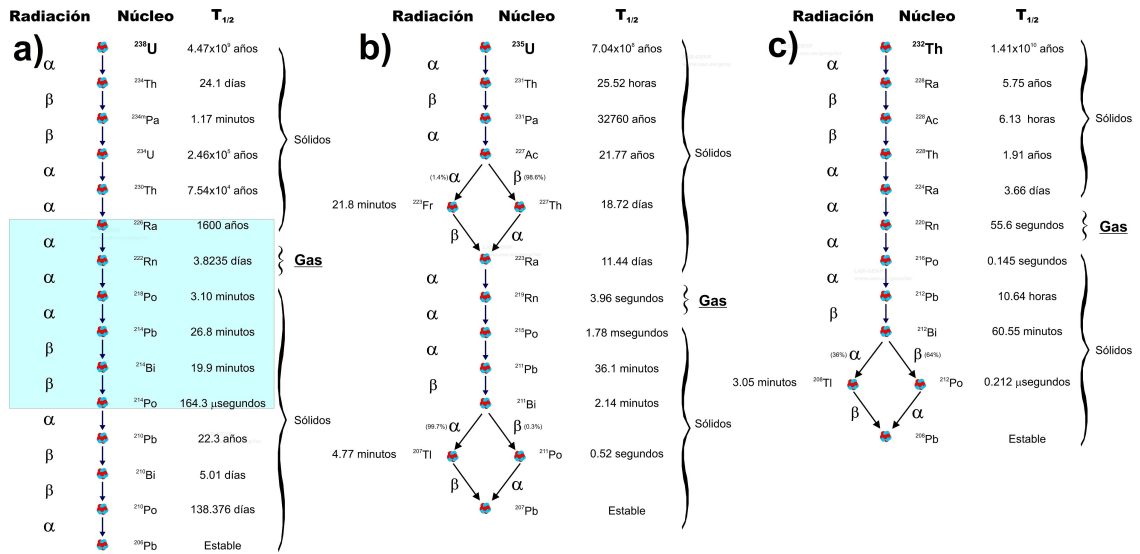
Como se observa poseen energías discretas definidas y que dependiendo de su interacción con algún medio o materia, pierden gradualmente su energía.

Los isótopos fuente de  $\alpha$  provienen de cadenas radiactivas naturales como lo son el Uranio 238, Uranio 235 o Torio 232, como se muestra en la figura (1.1), entre estas cadenas podemos encontrar un emisor de partícula  $\alpha$  muy particular; ya que, es el único elemento gaseoso entre los demás, este gas natural se origina en el seno de la corteza terrestre en grandes cantidades, desde donde emigra hacia su superficie, desprendiéndose e incorporándose al aire circundante que respiramos.

De los emisores de la cadena radiactiva Uranio 238, encontramos al Radio 226 el cual por su desintegración no solo emite partículas  $\alpha$  sino también se convierte en el Radón 222 y así sucesivamente; ya que, este gas se desintegra en sus descendientes los cuales son radiactivos que se adhieren en el aire circundante en forma de pequeñas partículas denominado aerosol atmosférico.

**Tabla 1.1:** Emisores de partículas  $\alpha$  y sus tiempos de vida media ( $T_{1/2}$ ) [9].

Isótopos	$T_{1/2}$	Energía (MeV)
<i>U</i> – 233	$1,62 \times 10^5$ años	4,816 (83,5 %)
		4,773 (14,9 %)
		4,717 (1,6 %)
<i>U</i> – 234	$2,48 \times 10^5$ años	4,768 (72,0 %)
		4,717 (28,0 %)
<i>U</i> – 235	$7,10 \times 10^8$ años	4,559 (6,7 %)
		4,520 (2,7 %)
		4,370 (25,0 %)
		4,354 (35,0 %)
		4,333 (14,0 %)
		4,318 (8,0 %)
<i>U</i> – 238	$4,51 \times 10^9$ años	4,117 (5,8 %)
		4,195 (77,0 %)
<i>Th</i> – 226	30,9 min	4,147 (23,0 %)
		6,33 (79,0 %)
		6,22 (19,0 %)
		6,10 (1,7 %)
<i>Rn</i> – 220	51,5 seg	6,03 (0,6 %)
		6,28 (100 %)
<i>Rn</i> – 222	3,8 días	5,59 (100 %)
<i>Ra</i> – 224	3,6 días	5,68 (95,0 %)
		5,44 (5,0 %)
<i>Po</i> – 210	138 días	5,30 (100 %)
<i>Po</i> – 212	$3 \times 10^{-5}$ seg	8,78 (100 %)
<i>Pu</i> – 239	24360 años	5,15 (72,0 %)
		5,13 (17,0 %)
		5,10 (11,0 %)
<i>Am</i> – 241	461 años	5,48 (85,0 %)
		5,43 (13,0 %)
		5,38 (1,7 %)



**Figura 1.1:** Cadenas de desintegración del a)  $^{238}\text{U}$ , b)  $^{235}\text{U}$ , c)  $^{232}\text{Th}$  [13].

Cuando respiramos, en la inhalación, una parte de estos descendientes radiactivos se adhieren en diversos tramos del tracto respiratorio, y como emiten partículas  $\alpha$ , estas pueden bombardear y ocasionalmente lesionar las células de sus epitelios, lo que a la larga puede ocasionar cáncer pulmonar, las probabilidades de esta enfermedad aumentan mientras mayor concentración de Radón 222 inhala la persona [14]. Es importante entonces, medir y conocer la concentración del Radón en el aire que respiramos por ser un emisor  $\alpha$ .

En el estudio de este gas radiactivo además del interés en la salud ambiental se pueden considerar una gran cantidad de aplicaciones como las siguientes [15–23]:

- Mediciones de Radón 222 en agua de subsuelo, en agua natural y en agua potable. Con estas aplicaciones se pueden hacer exploración de terrenos y hacer posible descubrimientos de yacimientos de Uranio y Torio [24, 25].
- Exhalación y emanación de Radón 222 en subsuelos y materiales de construcción que permite caracterizar materiales de construcción y suelos que nos ayudarán a controlar las concentraciones relativas de Radón 222 [26].
- Monitoreo de Radón 222 en minas o cuevas [27–30].
- Posibilidad en el pronóstico de terremotos. Existen algunos estudios que demuestran la posibilidad de predecir terremotos debido a que la concentración del Radón 222 aumenta significativamente en subsuelos sometidos a vibraciones [31, 32].
- Estudio sobre erupciones de volcanes; ya que, el flujo del Radón 222 aumenta antes de producirse estos sucesos [33].

## 1.2. Interacción de las partículas $\alpha$ con la materia

Una de las características importantes de las radiaciones ionizantes es su capacidad de penetrar un medio o la materia interaccionando con los átomos constituyentes de la misma. En estas interacciones, las radiaciones pierden una fracción o toda su energía dependiendo de las características del medio o materia. Debido a esto hay distintos mecanismos de interacción que dependen de la radiación ionizante.

Como sabemos las partículas  $\alpha$  son partículas cargadas y a partir de información empírica se pueden predecir los efectos cuantitativos producidos por estas partículas. Existen diferentes mecanismos como la ionización, excitación y radiación de frenado que son los principales mecanismos producidos por las partículas cargadas que atraviesan un medio o materia. A continuación se estudiará los mecanismos de interacción de las partículas  $\alpha$ .

### 1.2.1. Ionización

La energía que transmite una partícula  $\alpha$  a un átomo permite expulsar un electrón creando un par ion, a este efecto en particular se le llama ionización. La ionización total ( $I_t$ ) que produce una partícula  $\alpha$  con una energía de  $E$  en el aire en condiciones normales (CN [34]) antes de neutralizarse para dar forma a un átomo de helio-4 puede estimarse con la siguiente ecuación [35]:

$$I_t = 2,88 \times 10^4 \cdot E(MeV) \quad (1.7)$$

Por lo que esta ecuación nos dará como resultado la cantidad de pares de iones creados por la partícula  $\alpha$  al interaccionar con los componentes del aire.

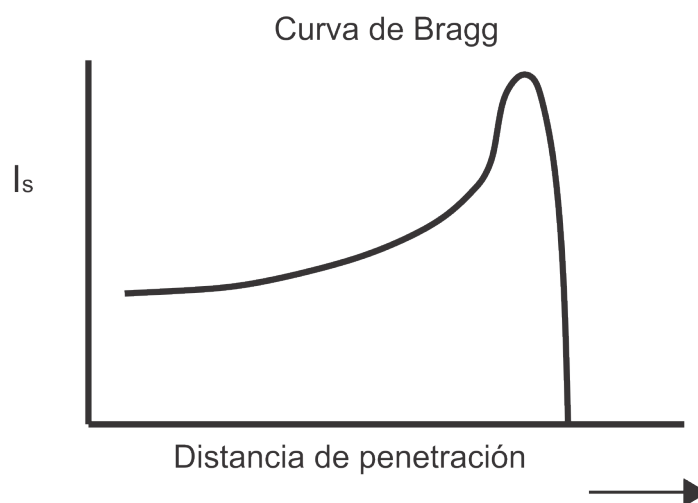
Cuando hablamos de ionización, también podemos hablar de tres conceptos importantes, como son la ionización primaria, la ionización secundaria y la ionización específica [36].

La radiación primaria posee la misma definición que ionización, donde igualmente el electrón abandona el átomo creando así un par de iones, quedando el átomo ionizado. La ionización secundaria ocurre cuando la gran cantidad de electrones expulsados de los átomos en el proceso de ionización primaria tienen energía suficiente para volver a ionizar otro átomo. Finalmente, la ionización específica ( $I_s$ ) es la cantidad de pares de iones creados por la partícula que incidente por unidad de recorrido.

Para el caso de partículas  $\alpha$  la ionización primaria representa aproximadamente el 80 % de la ionización total, teniendo en cuenta que la ionización total es la suma de la ionización primaria más la ionización secundaria. De esta forma se puede

decir que la ionización es el principal mecanismo de interacción y así pierden una gran cantidad de energía ionizando al medio o materia, debido a esto la energía restante (muy poca) la usan para recorrer o penetrar muy cortas distancias en el medio o materia y, por lo tanto, producen una ionización específica muy elevada (produciendo una alta densidad de pares de iones).

En el caso de las partículas  $\alpha$  la ionización específica va aumentando a medida que la partícula penetra en el medio o materia, alcanzando un valor máximo poco antes de finalizar el recorrido, esta variación viene dada gráficamente por la llamada curva de Bragg, como se muestra en la figura (1.2) [35].



**Figura 1.2:** Curva de Bragg para partículas  $\alpha$  en función de la distancia de penetración [37].

**Tabla 1.2:** Ionización específica de las partículas  $\alpha$  en el aire a CN [35].

Energía (MeV)	$I_s/cm$ ( $10^4$ )
0.4	6.2
0.6	6.9
0.8	7.2
1.0	7.2
1.5	6.3
2.0	5.3
3.0	4.0
4.0	3.3
5.0	2.9
6.0	2.5
7.0	2.3

Como ejemplo, si tenemos como medio al aire en CN, en la tabla (2.9) se puede observar como varía la ionización específica dependiendo de la energía de la partícula

$\alpha$  y el valor máximo de ionización específica corresponde a energías entre 0.8 y 1.0 Mev.

### 1.2.2. Poder de frenado

Dado que las partículas  $\alpha$  son partículas cargadas pesadas, la fórmula para calcular el poder de frenado es la fórmula de Bethe [38]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z}{mv^2} \left( \ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{1}{2}\delta \right) \quad (1.8)$$

Donde,  $-e$  es la carga del electrón;  $m$ , masa del electrón;  $ze$  y  $v$ , carga y velocidad de la partícula cargada;  $\beta$ , velocidad de la partícula respecto a la velocidad de la luz;  $Z$ ,  $N$ ,  $I$ , número atómico, número de átomos por unidad de volumen, y energía promedio de excitación del medio o materia, respectivamente; y  $C/Z$  y  $\delta$  corrección de nivel electrónico y corrección del efecto de densidad. Esta ecuación es aplicable a medios o materiales que consisten en  $N$  átomos por unidad de volumen donde su número atómico es  $Z$ , pero si el medio o materia es un compuesto simplemente se calcula el poder de frenado para cada componente y cada uno de estos representa un porcentaje de la suma para el poder de frenado total. A continuación se detallará como se aplica esta ecuación.

- Primero se substituye los valores numéricos de las constantes universales que conocemos y así la ecuación queda como:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{5,10 \times 10^{-25} z^2 N Z}{\beta^2} \left( \ln \frac{1,022 \times 10^6 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{1}{2}\delta \right) \text{MeV/cm} \quad (1.9)$$

Donde  $N$  es el número de átomos por centímetro cúbico del medio o materia.

- Para el cálculo de  $\beta^2$  usamos las relaciones entre energía cinética  $T$  y la masa en reposo de la partícula incidente  $M$ :

$$\beta^2 = \frac{T(T + 2Mc^2)}{(T + Mc^2)} \quad (1.10)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $Mc^2$  es la energía en reposo de la partícula. Los valores de  $\beta$  para protones, partículas  $\alpha$ , piones, muones y electrones esta entre los valores de  $\beta = 0,032634$  y  $\beta = 0,875028$ , valores obtenidos de tablas proporcionadas por Bichsel [39].

- La energía promedio de excitación ( $I$ ) depende solo del medio o materia. Se tienen cinco modelos de ecuaciones semiempíricas propuestas desde antes de 1967, para el cálculo de  $I$  para medios o materia desconocida:

1. Bloch 1933 [40]

$$I = KZ, \text{ donde } K \text{ es aproximadamente } 15 \text{ eV para } Z \text{ bajos} \quad (1.11)$$

K es aproximadamente 10 eV para Z altos

2. Barkas y Berger 1964, basados en H, Be, Al. [41]

$$\frac{I_{adj}}{Z} = 12 + \frac{7}{Z}, \quad I_{adj} \leq 163eV \quad (1.12)$$

3. Sternheimer, basados en Al, Cu, Pb. [42]

$$\frac{I_{adj}}{Z} = 9,76 + \frac{58,8}{Z^{1,19}}, \quad I_{adj} > 163eV \quad (1.13)$$

4. Dixon 1967, basados en Al, Si, Fe, Pb. [43]

$$\frac{I}{Z} = 9,81 + \frac{35,5}{Z} \quad (1.14)$$

5. Dalton y Turner 1967 [44]

$$I = (10,2 \pm 2,07) + (11,8 \pm 0,55) Z \text{ para } Z \leq 13 \quad (1.15)$$

$$I = (56,1 \pm 8,76) + (8,61 \pm 0,37) Z \text{ para } Z > 13$$

- La corrección de nivel electrónico no es necesario cuando la velocidad de la partícula incidente es mucho mayor que la de los electrones ligados a los niveles de energía del átomo del medio o materia. Estas correcciones son despreciables en materiales ligeros y normalmente no son necesarias al trabajar en dosimetría de radiación. Por otro lado, la magnitud de la corrección de nivel electrónico aumentan con el incremento del número atómico. Los detalles del cálculo de las correcciones para las capas K y L fueron hechas por Walke [13, 15], Fano [45] y Bichsel [39].
- El término de efectos de densidad describe la reducción del poder de frenado debido a la polarización del medio. Este factor es importante solo para altas energías ( $\sim 1000MeV$ ), este efecto fue descrito por Crispin y Fowler [46] y Sternheimer [47, 48] que posee fórmulas numéricas para el cálculo de la corrección de densidades para diferentes medios o materia.

### 1.2.3. Rango o alcance

Debido a las características de las partículas  $\alpha$  podemos obtener algunas propiedades para el rango o alcance de penetración. Dado que las partículas son pesadas poseen una trayectoria prácticamente rectilínea. Tomando como medio al aire en condiciones normales (CN), podemos calcular el rango de las partículas  $\alpha$  en el aire de la siguiente manera:

$$R_{aire}(cm) = 0,309 \cdot [E(MeV)]^{3/2} \quad (1.16)$$

Donde esta relación es valida para partículas  $\alpha$  con energías entre 4 y 7 MeV.

Si queremos generalizar el rango para cualquier medio, entonces podemos hacer uso de la fórmula de Bragg-Kleeman [49]:

$$R'_x(cm) = R_{aire} \cdot 3,2 \times 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{A_{ef}}}{\rho} \quad (1.17)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio o materia en  $g/cm^3$  y  $A_{ef}$  es el número másico efectivo del medio o materia que se calcula de la siguiente manera:

$$\sqrt{A_{ef}} = \frac{n_1 A_1 + n_2 A_2 + \dots}{n_1 \sqrt{A_1} + n_2 \sqrt{A_2} + \dots} \quad (1.18)$$

Donde  $n_i$  son las fracciones atómicas y  $A_i$  son los números másicos de los diversos átomos que componen el material compuesto. A continuación se muestra una tabla (1.3) en donde se muestran valores de rango o alcance de las partículas  $\alpha$  en el aire y en tejidos biológicos en función de la energía.

**Tabla 1.3:** Rango o alcance de partículas  $\alpha$  en el aire y tejido biológico [35]

Energía (MeV)	Aire (cm)	Tejido biológico (cm) $10^{-3}$
0.4	0.26	
0.6	0.38	
0.8	0.43	0.72
1	0.52	0.79
1.5	1.01	1.4
2.0	1.67	2.2
3.0	2.50	3.1
4.0	3.00	3.6
5.0	3.52	4.4
6.0	4.67	5.5
7.0	5.96	7.0

### 1.3. Técnicas de detección

Hasta la actualidad existen muchas técnicas de detección de radiación, principalmente de radiación ionizante, algunos de estas técnicas se van a describir a continuación. Se describirán tres técnicas las cuales se usarón en el contexto de este trabajo de investigación (práctica de entrenamiento realizada en el IPEN (Instituto Peruano de Energía Nuclear) y en la Universidad de Extremadura, España). Nos enfocaremos principalmente en técnicas de detección de partículas  $\alpha$  como son: células de centelleo, métodos instantáneos de lectura y detectores sólidos de trazas. Detallaremos particularmente la técnica de detectores sólidos de huellas o trazas nucleares (SSNTD's); ya que, en este trabajo se usará solo dicha técnica.

#### 1.3.1. Células de centelleo

El principal material que sirve como detector para la técnica de centelleo es el centellador el cual es un material que produce luminiscencia cuando interacciona con la radiación ionizante. Este material emite luminiscencia debido a que absorbe parte de la energía de la partícula incidente, la longitud de onda del corto destello de luz depende del material centellador. Existen dos fenómenos que pueden identificar este corto destello, si el destello es muy corto de unos  $10^{-8}s$  el fenómeno se llama fluorescencia; en cambio, si el destello dura de microsegundos a horas el fenómeno se llama fosforescencia [50].

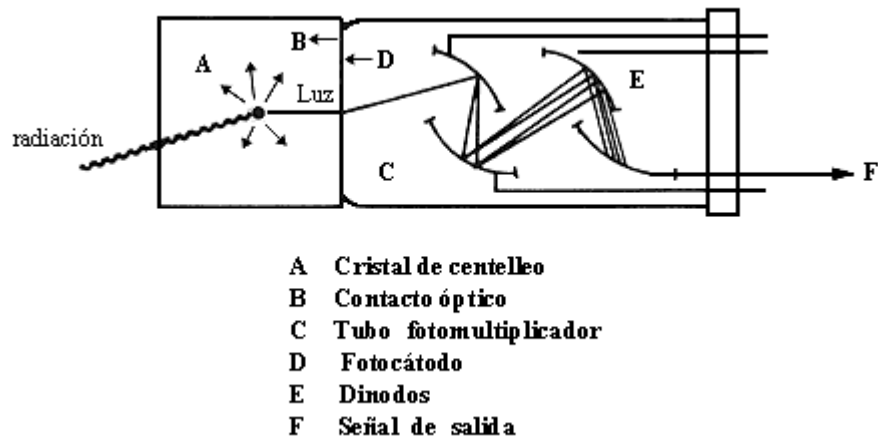


Figura 1.3: Diagrama de detector de centelleo [50].

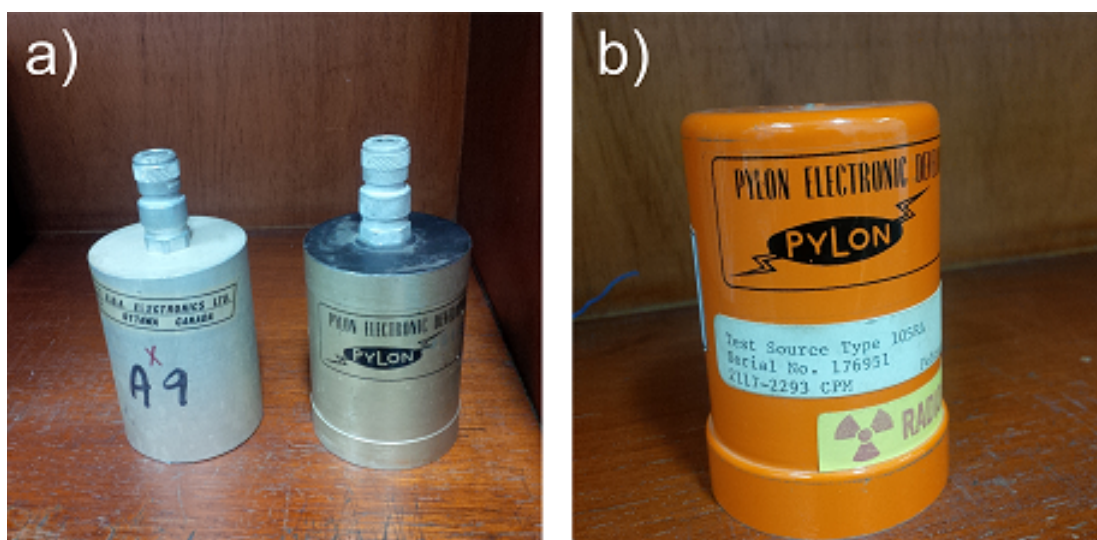
El mecanismo del detector de centelleo se muestra en la figura (1.3). La radiación ingresa al material centellador, luego emite un cierto rango de longitud de onda, esta luz emitida es absorbida por un fotomultiplicador y la re-emite como electrones por

efecto fotoeléctrico, estos electrones se multiplican en una cascada de dinodos a mayor potencial eléctrico (son placas metálicas colocadas a diferencias de potencial donde los electrones colisionan y desaceleran) como se muestra en la figura (1.3) en la parte E y finalmente se genera un pulso eléctrico que es la señal eléctrica de salida [51].



**Figura 1.4:** Detector de centelleo

En la figura (1.4) se muestra el detector usado a modo de práctica en el IPEN. A este detector se le inserta un cámara llamada cámara de Lucas (figura (1.5) parte a) en donde sus paredes están recubiertas de ZnS(Ag) (Sulfuro de Zinc activado con Plata). Este material presenta una luminiscencia intensa azul violeta.



**Figura 1.5:** a) Cámara de Lucas, y b) Calibrador de cuentas

Se ingresa el aire a estudiar en la cámara de Lucas y se coloca en el detector, así se obtienen número de cuentas de las partículas  $\alpha$  en un tiempo determinado.

Para comprobar que el número de cuentas es correcto, se usa un calibrador de cuentas (figura (1.5) parte b), que permite tener confianza de la cantidad de cuentas.

Finalmente, al tener la cantidad de cuentas de la cámara de Lucas se necesita convertir las cuentas en concentración de Radón 222. Se usa entonces la siguiente fórmula [52]:

$$C_{Rn} = \frac{R - B}{CF} \cdot \frac{\frac{\lambda_{Rn}t}{1 - \exp^{-\lambda_{Rn}t}}}{\exp^{-\lambda_{Rn}T}} \quad (1.19)$$

Donde  $R$  es la cantidad total de cuentas medidas con el detector;  $B$ , cantidad de cuentas de fondo;  $\frac{\lambda_{Rn}t}{1 - \exp^{-\lambda_{Rn}t}}$ , corrección debido al decaimiento durante el conteo en el detector;  $\exp^{-\lambda_{Rn}T}$ , corrección debido al decaimiento antes del conteo;  $\lambda_{Rn}$ , constante de decaimiento del Radón 222;  $t$ , tiempo de conteo;  $T$ , tiempo entre la toma de muestra y el conteo en el detector; y principalmente  $CF$ , factor de calibración es aquel término que nos permitira convertir de cuentas a unidades de concentración.

El factor de calibración se obtiene mediante métodos experimentales y al igual que todo detector se busca que de como resultado cuentas. La que la importancia de esta calibración es obtener concentraciones. Para realizar una calibración se debe tener una fuente radiactiva conocida, en este caso como se quiere medir Radón 222, se debería usar Radio 226 o el mismo Radón; ya que, se tiene la fuente y su valor numérico se realiza el mismo procedimiento anterior para medición de Radón y finalmente de la fórmula se despeja la expresión  $CF$  y así se obtiene experimentalmente dicho factor. Los resultados de dos procedimientos distintos para la obtención del factor de calibración del LR-115 tipo 2 se presentan en el apéndice (A).

### 1.3.2. Método de lectura instantánea o continua (Alpha-GUARD)

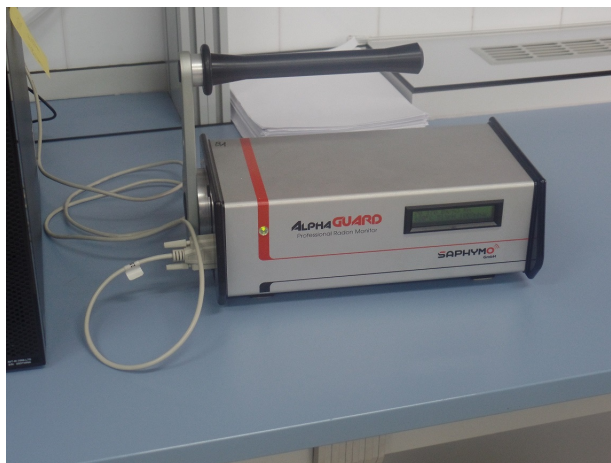
El detector electrónico AlphaGUARD, figura (1.6). Es un equipo portable diseñado para monitoreo continuo o instantáneo del Radón 222, con este equipo podemos detallar la variación del Radón 222 en función del tiempo, durante cada 10 minutos o cada hora.

El AlphaGUARD es una pequeña cámara de ionización de 0,62L de impulsos de conteo (espectroscopia  $\alpha$ ). Este monitor es adecuado para el monitoreo continuo de concentraciones de Radón 222 entre 2 a 2000000Bq/m<sup>3</sup><sup>1</sup>. Este aparato ofrece una eficiencia alta de detección, es libre de mantenimiento con una calibración estable a largo plazo. Se puede realizar mediciones de Radón 222 en aire, subsuelos, agua,

---

<sup>1</sup>Bq= Becquerel representa una razón de decaimiento radiactivo igual a una desintegración por segundo [53]

materiales de construcción y descendientes de dicho gas; para cada medición se debe realizar un esquema específico para aprovechar de la manera más óptima las bondades del equipo.



**Figura 1.6:** Detector AlphaGUARD

Esta técnica de detección se basa en la ionización que producen las partículas  $\alpha$  en un medio. Esta ionización es proporcional a la energía de las partículas  $\alpha$ . Este detector recolecta los iones formados debido a la ionización y se generan impulsos electrónicos los cuales como resultado final dará la concentración de Radón 222 mediante un un cálculo teórico que relaciona y convierte cuentas en concentración.

Además de concentración de Radón 222, dispone de sensores que permiten medir la temperatura, presión y humedad. Dado esta cantidad de información nos permitirá realizar relaciones entre la concentración y los demás parámetros. Podemos observar en la figura (1.7) la línea **gris** es la concentración de Radón 222 durante un cierto período largo de tiempo medido durante 10 minutos; la línea **verde**, la temperatura del recinto en  $^{\circ}C$ ; la línea **azul**, la presión; y la línea **morada**, la humedad. Observamos que la mientras la temperatura aumenta, la humedad disminuye; mientras la temperatura aumenta, la concentración de Radón 222 disminuye; y si la humedad disminuye la concentración disminuye; en ambos casos se cumple de igual forma el proceso inverso. También podemos observar las altas y bajas de la concentración de Radón 222 que puede identificarse según cada hora del día.

Este equipo puede servir cuando uno desea detallar la medición en el recinto que se estudia; ya que, otros detectores mas simples nos dan una información promedio durante un cierto período de tiempo, pero este equipo nos muestra medidas casi instantáneas (mínimo 10 minutos) durante períodos largos.

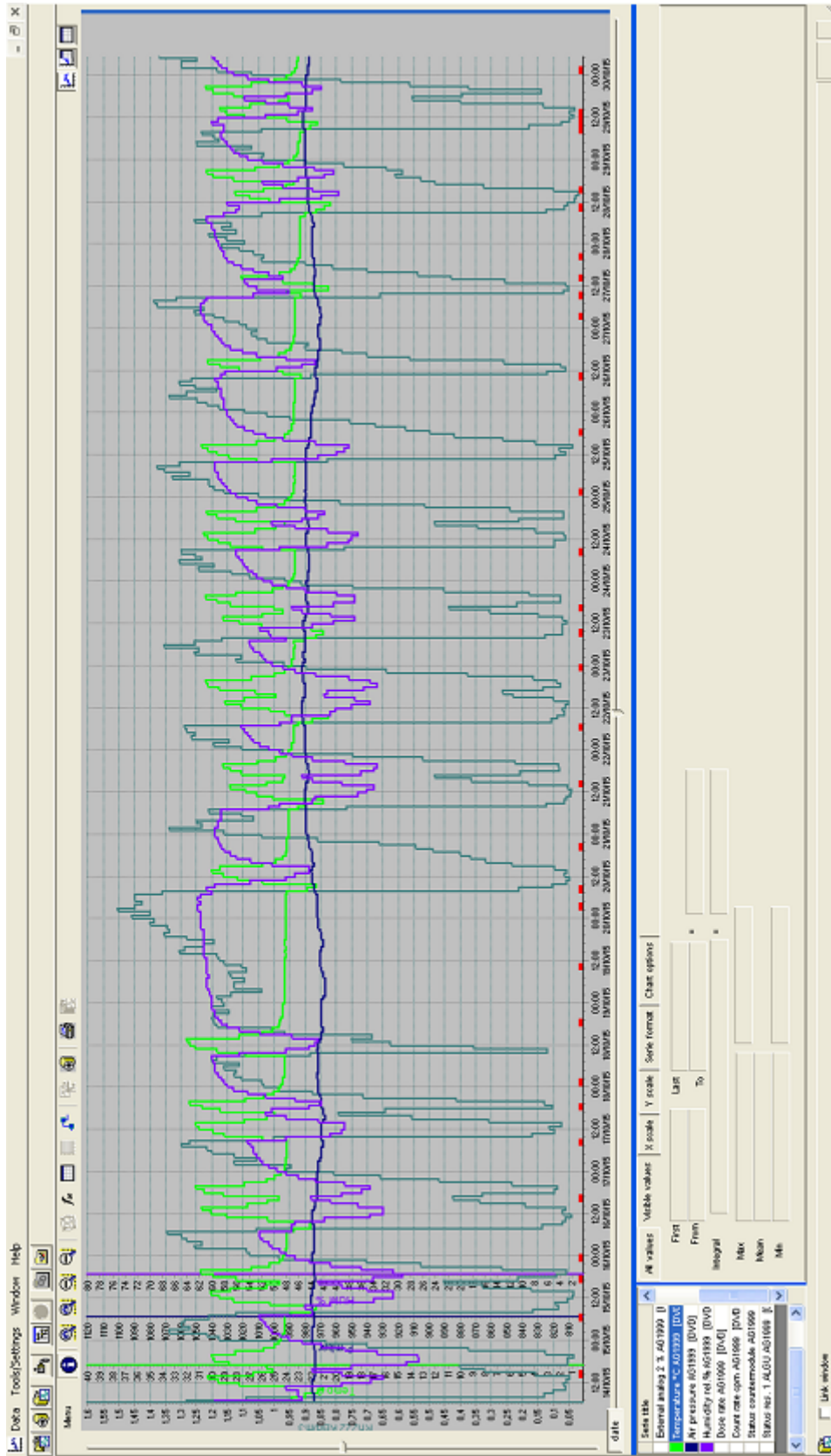
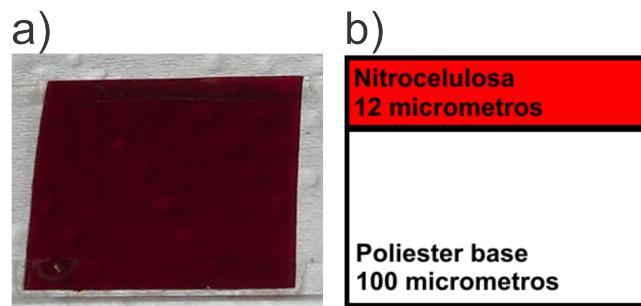


Figura 1.7: Mediciones con el detector AlphaGUARD obtenidas en la Universidad de Extremadura, España

### 1.3.3. Detectores sólidos de huellas nucleares (SSNTD's)

La técnica de huellas nucleares nos permite observar las huellas o trazas que dejan las partículas cargadas al interactuar con el medio o materia. Esta técnica se aplica en cristales, vidrios, polímeros, micas, etc. En este trabajo se usa el polímero LR-115 tipo 2, como se muestra en la figura (1.8) parte a. El LR-115 tipo 2 está compuesto a su vez por dos polímeros, como se observa en la parte b de la figura (1.8). El polímero detector nitrocelulosa es muy sensible a las partículas  $\alpha$  el cual se ha demostrado en otros estudios [54]. Una propiedad importante es su alto peso molecular, el cual permite ser mejor material detector comparado con otros que igualmente pueden registrar algunas huellas de partículas  $\alpha$ .



**Figura 1.8:** a) Detector LR-115 tipo 2, y b) Vista de perfil del detector

Estos materiales poseen un umbral de energía para el cual se imprimen huellas en el detector, en particular para este LR-115 tipo 2 el umbral oscila entre 1.2 y 4.2 MeV. El Radón 222 presenta una energía de desintegración de 5.590 MeV, proceso que sucede en el aire, por lo tanto el LR-115 tipo 2 puede capturar las  $\alpha$  que provienen de este emisor gaseoso. Finalmente, como información adicional al tamaño y forma de las huellas proporcionan información de la masa, la carga, energía y el ángulo de incidencia de la partícula que penetró. A continuación se detallará la metodología experimental general de cómo proceder para obtener las huellas o trazas de Radón 222.

#### **Elección del ambiente donde se realizarán las mediciones**

Como primer paso uno debe elegir un ambiente abierto o cerrado donde se desee conocer cuales son las concentraciones de Radón 222 promedios durante un cierto período de tiempo. Para esta elección se tiene una gran cantidad de posibilidades; ya que, el Radón al provenir de la corteza terrestre puede ser medido en el subsuelo, en minas, en viviendas a diferentes alturas, en exteriores, etc. Esta elección depende del usuario porque teniendo en cuenta estas consideraciones, podemos encontrar Radón 222 en cualquiera de estos lugares. Debido a experiencias previas de algunas

mediciones ya realizadas se debe tomar en cuenta algunos parámetros adicionales para mejorar la detección en cada lugar elegido.

### **Preparación de los detectores**

La elaboración de los detectores igualmente depende del usuario, pero se debe tomar en cuenta que para la detección de Radón 222 sí se usa LR-115 tipo 2, la parte de la nitrocelulosa debe estar expuesta; ya que, es la más sensible a las partículas  $\alpha$  que emite este gas.

### **Colocación de los detectores y tiempo de detección**

La colocación de los detectores igualmente depende del usuario y de las experiencias previas realizadas en la investigación, se debe tener en cuenta principalmente el tiempo de detección; ya que, varía según donde se coloquen. En un ambiente externo, se debe tener en cuenta la sensibilidad de este material a otros factores ambientales como polvo, radiación UV, IR solar y demás poluciones presentes en el aire que pueden degradar el material; por otro lado sí existe una gran cantidad de concentración de Radón 222, los detectores pueden saturarse, las mediciones pueden estropearse y dificultar la lectura de las huellas.

Luego de elegir convenientemente el tiempo de medición se colocan los detectores en los sitios elegidos; durante el tiempo de exposición de los detectores se produce la detección de las partículas  $\alpha$  que penetra el material y al interaccionar con las moléculas y átomos del medio produce ionizaciones primarias y secundarias dejando así una huella la cual se llama huella latente. Esta huella dejada por la partícula no puede ser observada a simple vista porque se le debe realizar un tratamiento químico el cual permitirá el ensanchamiento de las huellas para una posterior lectura.

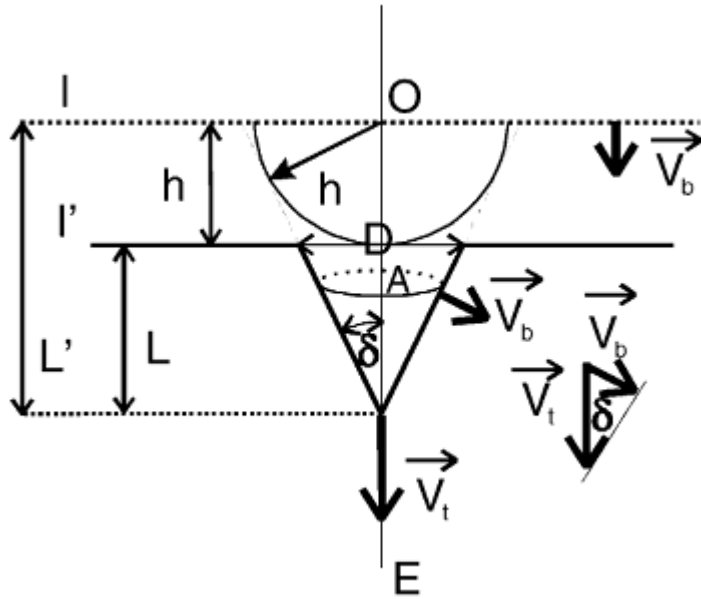
### **Baño químico (Etching)**

En este proceso la huella se ensancha debido al tratamiento químico al que es sometido el polímero detector que en el caso del LR-115 tipo 2 consiste en una solución de  $NaOH$  a 2.5N, estas condiciones se determinaron en un trabajo de investigación anterior en la PUCP [55]. El tiempo de grabado o etching dependerá también de donde se colocan los detectores, ya que un sobregrabado puede estropear las mediciones.

Durante el grabado, la huella se ensancha de la siguiente forma:

**En un caso ideal**, si la partícula tiene una incidencia normal sobre el detector como se muestra en el diagrama de la figura (1.9). Se pueden encontrar una serie de

parámetros que permite indentificar las características de la huella y la partícula de incidencia. En el diagrama se pueden identificar:  $I$  la superficie inicial del detector;  $I'$  es la superficie nueva luego del grabado (*etching*);  $V_t$  la velocidad de grabado a lo largo de la trayectoria de la partícula (*track etch rate*);  $V_b$  la velocidad de grabado de la región dañada por la partícula (*bulk etch rate*);  $O$  la entrada de la partícula;  $E$  el punto final de la trayectoria de la partícula; y  $OE = R$  el rango de la partícula en el detector. La distancia entre  $I$  e  $I'$  es igual a  $h$  que es el espesor removido por el grabado en el detector,  $L'$  es la distancia total que la solución del grabado ingresa a lo largo de la trayectoria de la partícula y  $L$  es la profundidad de la huella después del grabado.



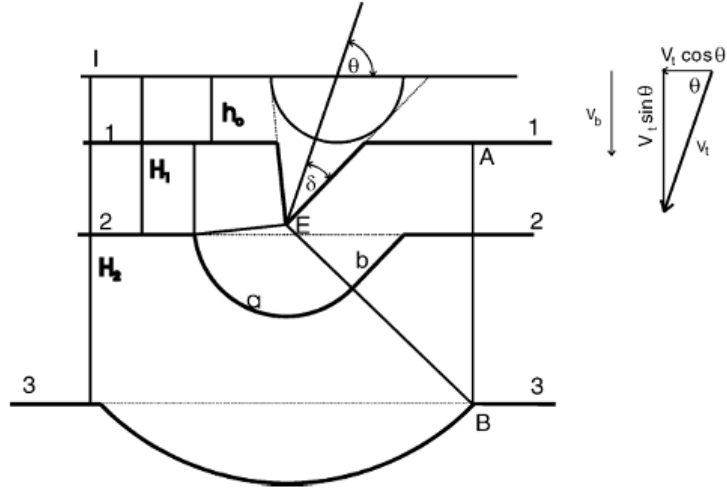
**Figura 1.9:** Geometría de la formación de una huella. Con una incidencia normal y un  $V_t$  constante [56].

Otro de los parámetros importantes es la velocidad de grabado  $V = V_t/V_b$  (*etch rate*), la cual sirve para determinar si es que la huella se puede formar, en otras palabras, la huella se forma solo cuando se cumple la condición  $V > 1$ . También se tiene como parámetro al ángulo  $\delta$  del cono que se forma luego del grabado. Se obtiene la siguiente relación entre estos dos parámetros [57]:

$$\sin \delta = \frac{1}{V} \quad (1.20)$$

Si la incidencia fuera oblicua se tendra que modificar la geometría anterior como se muestra en la figura (1.10). Esta geometría fue desarrollada por Somogyi y Szalay [58]. A diferencia de una incidencia normal, la huella formada por la incidencia oblicua es de forma elíptica. Igualmente en esta figura se puede observar el proceso

de grabado para diferentes tiempos y se observa que la huella se va formando.



**Figura 1.10:** Evolución del grabado de una huella formada por una partícula con incidencia oblicua y  $V_t$  [56].

**En un caso real**, el parámetro  $V_t$  se vuelve variable y para el desarrollo de este se necesitan realizar modelos y métodos que permitan describir la formación de la huella en un caso con incidencia oblicua o normal. Para este caso se tienen modelos planteados por diferentes autores. El **modelo de Somogyi Szalay** [58], el **modelo de Fromm et al.** [59], el **modelo de Fews y Henshaw** [60] y el **modelo de Nikezic y Yu** [61]. Con estos modelos se pueden detallar la geometría de la huella obtenida de forma real.

Como se vio anteriormente, también se tenía el parámetro  $V_b$ , este parámetro para un caso ideal o real siempre es constante; ya que, depende de la temperatura de grabado [15]. Pero cuando uno realiza el etching o grabado se hace a temperatura constante según los estudios anteriores hechos en la PUCP. Este parámetro fue estudiado por Fleischer et al. [15] el cual puede ser medido de manera directa (usando medidores de longitud) o indirecta (usando relaciones geométricas) [62–64].

Finalmente, englobando los dos parámetros de velocidad resume todos los modelos anteriores en una fórmula general formulada por Durrani-Green [65]:

$$V = 1 + \left( 100 \exp^{-0,446R'} + 5 \exp^{-0,107R'} \right) \left( 1 - \exp^{-R'} \right), \quad (1.21)$$

Donde  $V = V_t/V_b$  y  $R'$  es el rango residual ( $R' = \text{rango de la partícula antes del grabado} - V_t \cdot t$ )

## Lectura de los detectores

Luego de obtener la huella grabada se procederá a realizar el conteo de las huellas por unidad de área, encontrando así la densidad de huellas en cada detector. Para la lectura lo más simple es usar un microscopio óptico enfocado en 10X y contar a ojo desnudo cada huella o usar algún sistema más sofisticado de conteo como el sistema Politrack que es un sistema automático para el análisis de las huellas o trazas nucleares del Radón 222 en el detector LR-115. El sistema consiste en un plano cartesiano XY anclado en una base de anti-vibración tipo nido de abeja, a su vez descansa sobre una mesa de metal. El sistema óptico está constituido por un microscopio anclado a un eje motorizado (eje Z), a su vez fijado sobre la base de la vibración a través de un brazo de granito. El ojo y la lente tiene un aumento de zoom de 100x. El ocular se acopla directamente con una cámara CCD monocromo con la resolución 1028x768 con 8-bit ADC. La cámara esté sincronizada con un PC a través de una conexión Firewire. La fuente de luz está constituida por un diodo LED ámbar (longitud de onda de 590 nm). Esta longitud de onda permite estar de acuerdo con el espectro de absorción del LR-115. El sistema es controlado por un PC que ejecuta los ejes de control, el ajuste y la adquisición por parte de la cámara. El software que realiza el reconocimiento de huellas nucleares se escribe con LabVIEW 7.11. Las principales características del software son: sistema de enfoque automático y la determinación de un plano focal en el que escanear; algoritmos de análisis morfológico de detector de trazas; el tamaño y el área de lectura establecido por el operador; lectura o el número de código mediante OCR para identificación automática [66].

## Cálculo de concentración de Radón 222

Finalmente, se usa la ecuación que permite transformar la densidad de huellas en concentración de Radón  $Bq/m^3$ :

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{K_{Rn} \cdot T} \quad (1.22)$$

Donde,  $C_{Rn}$  es la concentración de Radón 222 en el ambiente estudiado;  $\rho$ , el número de huellas por unidad de área (densidad de huellas);  $T$ , tiempo de detección; y  $K_{Rn}$ , el factor de calibración  $20,41Bq/(m^3 \cdot días)$  que corresponde a  $1huella/mm^2$  el cual se obtiene experimentalmente [55]. Otra forma de obtener este factor de calibración en el contexto de este trabajo se presenta en el apéndice A.

# Capítulo 2

## Descripción experimental de la detección de partículas en el medio ambiente usando SSNTD's

En este trabajo de tesis se presentarán dos metodologías experimentales aplicando la técnica de huellas nucleares. Se muestran los procedimientos de las mismas y los resultados obtenidos.

### 2.1. Metodología en la detección de Radón 222

Para esta experiencia se usó el proceso de la sección (1.3.3). En este trabajo se seleccionó la azotea del edificio de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, ubicado en el distrito de San Miguel. Una imagen del edificio, seleccionado por las facilidades de acceso y uso, se muestra en la figura (2.1).



**Figura 2.1:** Edificio de Física de la PUCP

Los detectores se prepararon de la siguiente manera: se utilizaron cada vez 30 detectores, los cuales se recortaron de las láminas originales del LR-115 tipo 2 en dimensiones de  $2,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$  y cada uno fue colocado en una lengüeta de dimensiones  $3\text{cm} \times 9\text{cm}$  que fue insertada a media altura en un vaso descartable de 7oz. ( $207,01\text{cm}^3$ ). Un esquema del detector listo para colocar se encuentra en la figura (2.2).

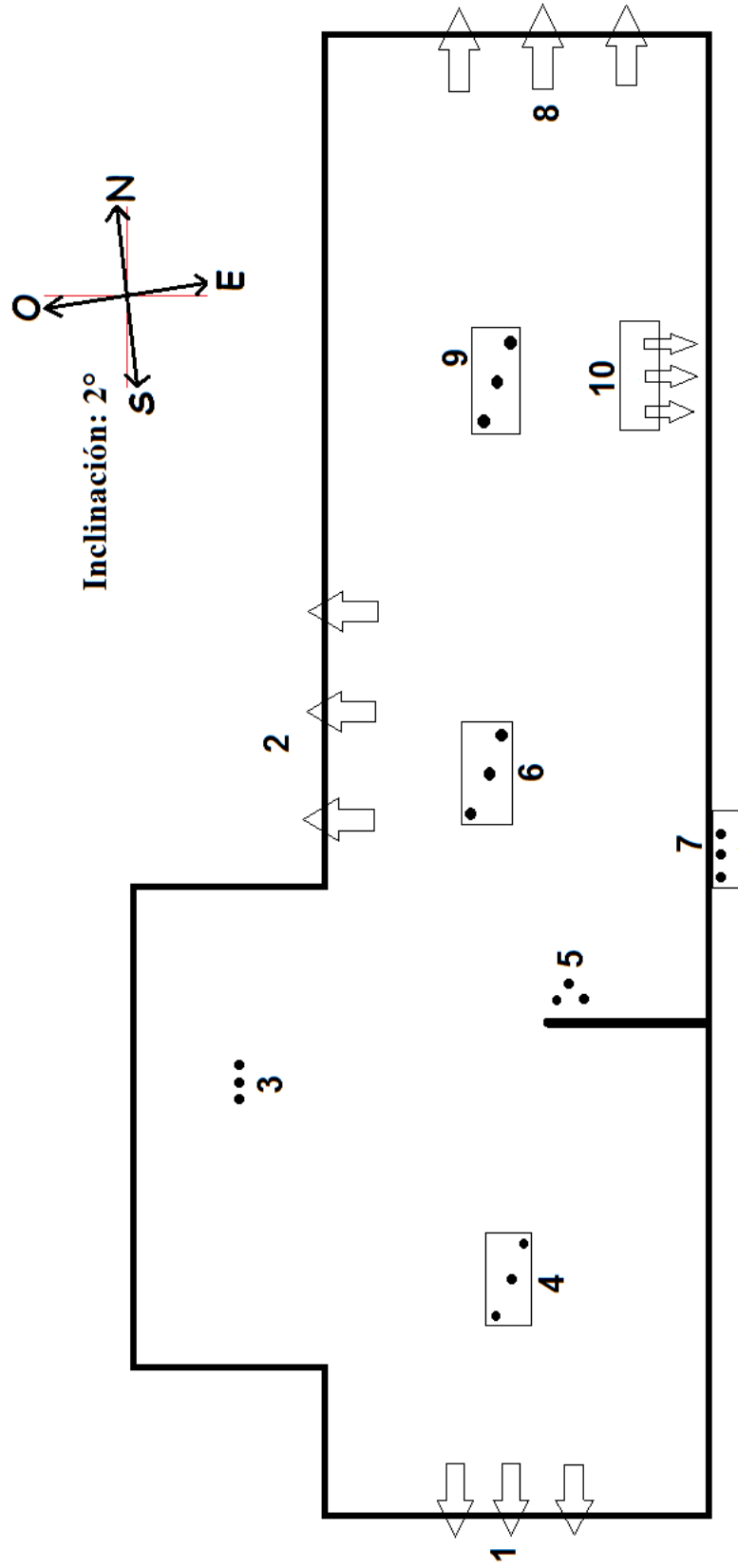


**Figura 2.2:** Montaje de detectores LR-115 tipoII

Se procedió a colocar los 30 detectores con el montaje correspondiente en la azotea antes mencionada, en la figura (2.3) se muestra el esquema de la azotea donde los puntos representan detectores apuntando hacia el zenit y los demás en las direcciones indicadas por el sistema cardinal. El tiempo para esta experiencia fue de 20 días, el tiempo es relativamente corto si lo comparamos con mediciones que se hacen en ambientes interiores pero es necesario para este trabajo; ya que, el detector está expuesto al ambiente exterior el cual es crítico en muchos sentidos.

Después de 20 días de exposición, se retiraron los detectores, en los cuales durante ese tiempo se formaron las huellas latentes no visibles a simple vista. Luego se procedió a realizar el grabado o etching para poder ensanchar las huellas. En esta experiencia se encontró que la radiación UV degradaba este material con el tiempo (decoloración percibida a simple vista), por lo que el tiempo de grabado fue de tan solo 30 minutos con una solución de  $\text{NaOH}$  a 2.5N a  $60^\circ\text{C}$ . Y así terminado este proceso los detectores estaban listos para su lectura o conteo de huellas.

Luego, se procedió a realizar la lectura de los detectores. Para la lectura o conteo se utilizó un microscopio óptico (LEICA DM LM) con un alcance de 10x. Esto nos permitió encontrar la densidad de huellas en cada detector y así poder determinar las concentraciones de Radón en dicho ambiente exterior en cada período de medición. Las huellas típicas de Radón 222 se muestran en las figuras (2.11) y (2.12), solo se tomaran en cuenta las huellas tipo P. Finalmente se aplicó la ecuación (1.22) usando el factor de  $20,41\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{días})$  que corresponde a  $1\text{huella}/\text{mm}^2$  para la obtención de los resultados de las concentraciones de Radón 222 [55].



**Figura 2.3:** Ubicación de los detectores en la azotea del edificio de Física de la PUCP.

### 2.1.1. Resultados

Debido a que se han realizado detecciones de Radón 222 en exteriores desde el 2011 hasta la fecha, se presentan 7 mediciones distintas en diferentes épocas del año con la finalidad de establecer fluctuaciones del Radón 222 en el ambiente exterior estudiado. La primera medición se realizó en otoño desde el 01-06-2011 al 21-06-2011, es importante hacer notar que esta medición se inició tres meses después del desastre de Fukushima (11-03-2011) ; la segunda en invierno, desde el 14-07-2011 al 03-08-2011; la tercera en primavera, desde el 19-09-2012 al 09-10-2012; la cuarta en verano, desde el 19-12-2012 al 08-01-2013; la quinta en otoño, desde el 10-06-2015 al 30-06-2015; la sexta en invierno, desde el 08-07-2015 al 28-07-2015; y la séptima en primavera, desde el 26-11-2015 al 15-12-2015. En el 2014 no se pudieron realizar mediciones porque a los alrededores del edificio elegido se construyeron otras edificaciones y el suelo fue removido constantemente, el exceso de polvo alteraba los datos.

A continuación se presenta los resultados de la concentración de Radón 222 en tablas y en forma gráfica para observar las fluctuaciones en los 7 períodos separados en las direcciones del viento de donde se colocaron (norte, sur, este, oeste y zenit). Para una mejor correlación de los resultados obtenidos se investigó algunos detalles de cada período como se muestra en la tabla (2.1) <sup>1</sup>

**Tabla 2.1:** Períodos y características de estos.

Períodos	Fecha	N° de días	N° días de lluvia	Temperatura promedio (°C)	UV
1	Del 01-06-2011 al 21-06-2011	20	2	19.8	5.8
2	Del 14-07-2011 al 03-08-2011	20	11	17.3	5.7
3	Del 19-09-2012 al 09-10-2012	20	3	17.4	7.7
4	Del 19-12-2012 al 08-01-2013	20	1	21.8	7.9
5	Del 10-06-2015 al 30-06-2015	20	2	21.9	4.0
6	Del 08-07-2015 al 28-07-2015	20	5	19.5	4.0
7	Del 26-11-2015 al 15-12-2015	20	11	23.9	11.0

Las tablas presentadas a continuación indican los resultados de las mediciones de las concentraciones de Radón 222 en cada período y en cada dirección, se diferencian dos tipos de huellas: las huellas P que corresponden a las huellas típicas del Radón 222 y las huellas G que fueron formadas simultáneamente en los mismos detectores, estas tienen forma de anillos concéntricos y son analizadas más adelante.

---

<sup>1</sup>Datos meteorológicos tomados de la data histórica de la Estación Meteorológica “Hipólito Unanue” en la PUCP [79]

**Tabla 2.2:** Resultados obtenidos desde el 01-06-2011 al 21-06-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	79 ± 02	0	1602.37 ± 81.11
	2	87 ± 08	1 ± 01	1780.76 ± 90.11
	3	82 ± 05	0	1673.72 ± 84.71
Grupo 2 OESTE	1	1 ± 00	0	19.94 ± 1.21
	2	0	0	6.30 ± 0.52
	3	32 ± 05	0	659.00 ± 33.48
Grupo 3 ZENIT	1	1 ± 00	0	11.54 ± 0.79
	2	0 ± 01	0	7.35 ± 0.57
	3	0	1 ± 00	9.44 ± 0.68
Grupo 4 ZENIT	1	0	18 ± 01	6.30 ± 0.52
	2	0	0	1.05 ± 0.26
	3	0	19 ± 01	1.05 ± 0.26
Grupo 5 ZENIT	1	0	19 ± 04	3.15 ± 0.36
	2	0	6 ± 04	5.25 ± 0.47
	3	0	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	0	1 ± 00	1.05 ± 0.26
	2	0 ± 01	1 ± 00	9.44 ± 0.68
	3	0	0	0
Grupo 7 ZENIT	1	0	1 ± 00	4.20 ± 0.42
	2	0	1 ± 00	4.20 ± 0.42
	3	0	0	7.35 ± 0.57
Grupo 8 NORTE	1	4 ± 01	1 ± 00	78.70 ± 4.18
	2	6 ± 03	1 ± 00	123.82 ± 6.46
	3	14 ± 04	0	289.62 ± 14.83
Grupo 9 ZENIT	1	1 ± 00	8 ± 02	16.79 ± 1.05
	2	1 ± 01	10 ± 04	17.84 ± 1.10
	3	0	0	0
Grupo 10 ESTE	1	29 ± 03	0	597.08 ± 30.35
	2	27 ± 04	1 ± 00	553.01 ± 28.13
	3	0	0	0

**Tabla 2.3:** Resultados obtenidos desde el 14-07-2011 al 03-08-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	48 ± 12	1 ± 00	982.20 ± 49.80
	2	46 ± 07	1 ± 01	933.93 ± 47.36
	3	17 ± 07	1 ± 00	337.89 ± 17.26
Grupo 2 OESTE	1	2 ± 02	2 ± 01	32.53 ± 1.85
	2	51 ± 09	1 ± 00	1050.41 ± 53.24
	3	7 ± 03	1 ± 01	133.27 ± 6.93
Grupo 3 ZENIT	1	4 ± 01	0	88.15 ± 4.65
	2	12 ± 05	0	247.65 ± 12.71
	3	3 ± 01	0	70.31 ± 3.75
Grupo 4 ZENIT	1	9 ± 03	0	188.88 ± 9.74
	2	9 ± 04	0	185.74 ± 9.58
	3	12 ± 02	0	239.25 ± 12.28
Grupo 5 ZENIT	1	8 ± 04	0	165.80 ± 8.58
	2	7 ± 07	0	136.42 ± 7.09
	3	18 ± 10	0	372.52 ± 19.01
Grupo 6 ZENIT	1	75 ± 18	1 ± 00	1536.26 ± 77.77
	2	46 ± 22	0	933.93 ± 47.36
	3	4 ± 01	0	90.24 ± 4.76
Grupo 7 ZENIT	1	100 ± 15	0	2041.00 ± 103.25
	2	9 ± 09	1 ± 01	179.44 ± 9.26
	3	21 ± 08	1 ± 00	423.94 ± 21.61
Grupo 8 NORTE	1	9 ± 04	0	179.44 ± 9.26
	2	26 ± 07	0	534.12 ± 27.17
	3	3 ± 03	0	66.11 ± 3.54
Grupo 9 ZENIT	1	24 ± 05	0	484.80 ± 24.68
	2	32 ± 10	0	654.80 ± 33.26
	3	22 ± 06	0	448.08 ± 22.83
Grupo 10 ESTE	1	8 ± 03	0	158.45 ± 8.20
	2	11 ± 01	0	226.66 ± 11.65
	3	4 ± 02	0	80.80 ± 4.28

**Tabla 2.4:** Resultados obtenidos desde el 19-09-2012 al 09-10-2012. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	10 ± 01	0	210.92 ± 10.85
	2	2 ± 01	0	50.37 ± 2.75
	3	3 ± 01	0	64.01 ± 3.44
Grupo 2 OESTE	1	8 ± 01	0	170.00 ± 8.79
	2	15 ± 03	0	315.86 ± 16.15
	3	27 ± 20	0	547.76 ± 27.86
Grupo 3 ZENIT	1	9 ± 02	0	182.59 ± 9.42
	2	9 ± 04	0	193.08 ± 9.95
	3	32 ± 05	1 ± 00	645.35 ± 32.79
Grupo 4 ZENIT	1	3 ± 01	1 ± 00	70.31 ± 3.75
	2	4 ± 01	0	89.20 ± 4.71
	3	18 ± 07	0	374.62 ± 19.12
Grupo 5 ZENIT	1	3 ± 01	0	60.86 ± 3.28
	2	4 ± 01	0	85.00 ± 4.50
	3	4 ± 01	0	80.80 ± 4.28
Grupo 6 ZENIT	1	57 ± 06	1 ± 00	1165.84 ± 59.07
	2	53 ± 03	1 ± 01	1175.59 ± 54.51
	3	0	0	0
Grupo 7 ZENIT	1	63 ± 06	0	1285.46 ± 65.11
	2	10 ± 02	0	209.87 ± 10.80
	3	13 ± 05	0	270.73 ± 13.87
Grupo 8 NORTE	1	14 ± 06	0	293.82 ± 15.04
	2	23 ± 09	0	469.06 ± 23.89
	3	33 ± 03	0	664.24 ± 33.74
Grupo 9 ZENIT	1	6 ± 02	0	128.02 ± 6.67
	2	5 ± 01	0	103.89 ± 5.45
	3	21 ± 02	1 ± 00	429.19 ± 21.87
Grupo 10 ESTE	1	6 ± 01	0	131.17 ± 6.83
	2	12 ± 05	0	248.70 ± 12.76
	3	7 ± 04	0	152.16 ± 7.89

**Tabla 2.5:** Resultados obtenidos desde el 19-12-2012 al 08-01-2013. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	7 ± 04	0	143.76 ± 7.46
	2	0	0	0
	3	0	0	0
Grupo 2 OESTE	1	72 ± 07	2 ± 01	1471.20 ± 74.48
	2	3 ± 04	9 ± 08	58.76 ± 3.17
	3	8 ± 04	0	168.95 ± 8.73
Grupo 3 ZENIT	1	0	15 ± 07	1.05 ± 0.26
	2	5 ± 05	0	111.23 ± 5.82
	3	0	0	0
Grupo 4 ZENIT	1	5 ± 02	0	104.94 ± 5.50
	2	4 ± 01	0	73.46 ± 3.91
	3	1 ± 01	2 ± 01	23.09 ± 1.37
Grupo 5 ZENIT	1	1 ± 00	0	26.23 ± 1.53
	2	2 ± 01	0	39.88 ± 2.22
	3	0	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	14 ± 07	0	285.43 ± 14.62
	2	24 ± 20	0	490.05 ± 24.95
	3	23 ± 17	6 ± 04	463.82 ± 23.62
Grupo 7 ZENIT	1	4 ± 01	0	73.46 ± 3.91
	2	18 ± 03	0	360.98 ± 18.43
	3	1 ± 01	0	15.74 ± 1.00
Grupo 8 NORTE	1	7 ± 06	1 ± 01	143.76 ± 7.46
	2	0	0	0
	3	1 ± 01	1 ± 00	24.14 ± 1.42
Grupo 9 ZENIT	1	4 ± 05	2 ± 02	80.80 ± 4.28
	2	1 ± 01	0	26.23 ± 1.53
	3	6 ± 04	0	128.02 ± 6.67
Grupo 10 ESTE	1	10 ± 09	0	201.48 ± 10.38
	2	1 ± 01	0	11.54 ± 0.79
	3	1 ± 00	0	12.59 ± 0.84

**Tabla 2.6:** Resultados obtenidos desde el 10-06-2015 al 30-06-2015. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	8 ± 04	1 ± 00	163.28 ± 8.45
	2	7 ± 07	12 ± 05	142.0 ± 7.42
	3	9 ± 07	10 ± 07	183.69 ± 9.48
Grupo 2 OESTE	1	25 ± 12	11 ± 01	510.25 ± 1.37
	2	17 ± 09	1 ± 00	346.97 ± 17.72
	3	20 ± 03	1 ± 01	408.2 ± 33.48
Grupo 3 ZENIT	1	1 ± 01	2 ± 01	20.41 ± 1.23
	2	2 ± 00	0	40.82 ± 2.27
	3	0	0	0
Grupo 4 ZENIT	1	7 ± 03	0	142.87 ± 7.42
	2	1 ± 01	18 ± 12	20.41 ± 1.23
	3	0	0	0
Grupo 5 ZENIT	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	10 ± 06	1 ± 00	204.1 ± 10.51
	2	7 ± 04	0	61.23 ± 3.30
	3	3 ± 01	0	102.05 ± 5.36
Grupo 7 ZENIT	1	5 ± 01	0	61.23 ± 3.30
	2	3 ± 01	6 ± 03	20.41 ± 1.23
	3	1 ± 00	2 ± 00	142.87 ± 7.42
Grupo 8 NORTE	1	2 ± 01	0	40.82 ± 2.27
	2	4 ± 01	0	81.64 ± 4.33
	3	2 ± 02	0	40.82 ± 2.27
Grupo 9 ZENIT	1	7 ± 05	17 ± 04	142.87 ± 7.42
	2	9 ± 04	4 ± 02	183.69 ± 9.48
	3	4 ± 02	1 ± 01	81.64 ± 4.33
Grupo 10 ESTE	1	7 ± 03	4 ± 01	142.87 ± 244.92
	2	12 ± 01	7 ± 03	244.92 ± 12.57
	3	3 ± 02	9 ± 01	61.23 ± 3.30

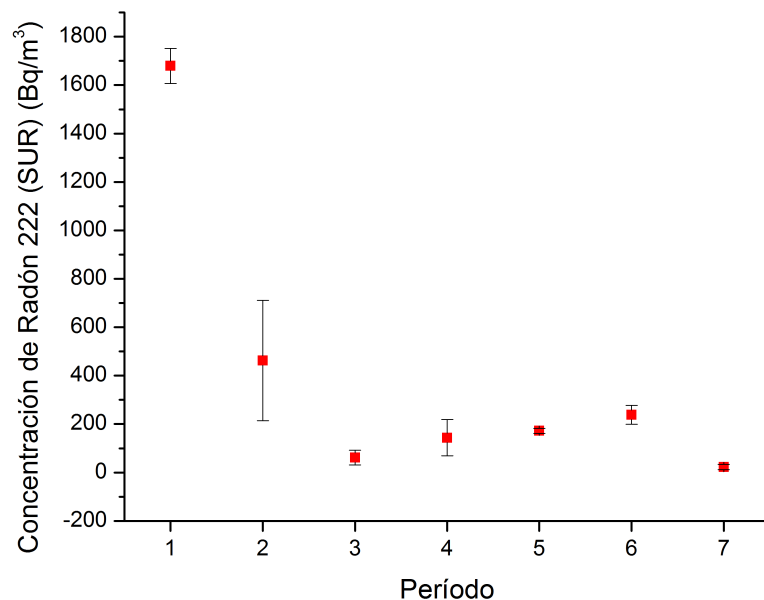
**Tabla 2.7:** Resultados obtenidos desde el 08-07-2015 al 28-07-2015. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	12 ± 05	0	244.92 ± 12.57
	2	15 ± 07	1 ± 00	306.15 ± 15.66
	3	10 ± 03	0	204.1 ± 10.51
Grupo 2 OESTE	1	7 ± 02	0	142.87 ± 7.42
	2	5 ± 01	1 ± 01	102.5 ± 5.36
	3	3 ± 02	1 ± 01	61.23 ± 3.3
Grupo 3 ZENIT	1	0	0	0
	2	3 ± 01	0	61.23 ± 3.3
	3	0	0	0
Grupo 4 ZENIT	1	2 ± 00	1 ± 00	40.82 ± 2.27
	2	4 ± 03	0	81.64 ± 4.33
	3	2 ± 01	0	40.82 ± 2.27
Grupo 5 ZENIT	1	1 ± 01	1 ± 01	20.41 ± 1.23
	2	0	1 ± 01	0
	3	0	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	12 ± 06	0	244.92 ± 12.57
	2	11 ± 07	0	224.51 ± 11.54
	3	9 ± 06	0	183.69 ± 9.48
Grupo 7 ZENIT	1	7 ± 06	0	142.87 ± 7.42
	2	2 ± 02	0	40.82 ± 2.27
	3	12 ± 05	2 ± 01	81.64 ± 4.33
Grupo 8 NORTE	1	7 ± 06	0	142.87 ± 7.42
	2	8 ± 04	0	163.28 ± 8.45
	3	7 ± 03	0	142.87 ± 7.42
Grupo 9 ZENIT	1	4 ± 02	0	40.82 ± 2.27
	2	2 ± 01	0	61.23 ± 3.30
	3	3 ± 02	1 ± 00	179.44 ± 9.26
Grupo 10 ESTE	1	14 ± 05	0	285.74 ± 14.63
	2	1 ± 00	0	20.41 ± 1.23
	3	6 ± 04	1 ± 01	122.46 ± 6.39

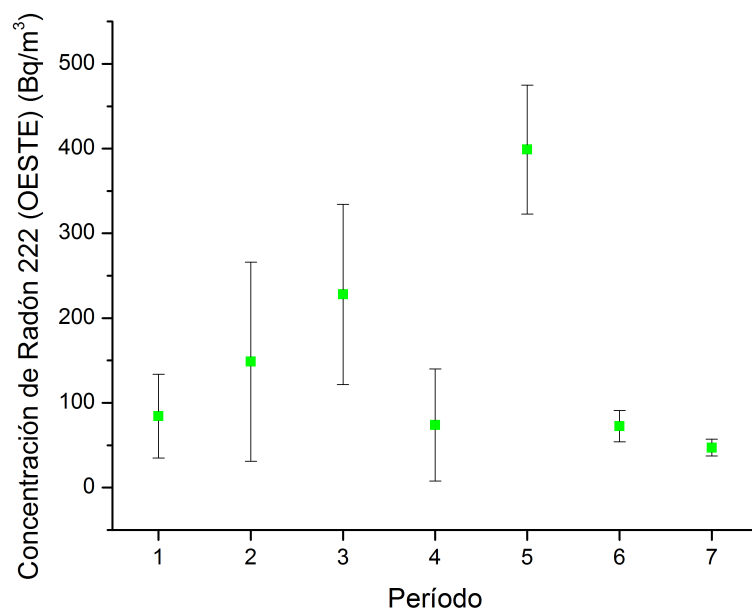
**Tabla 2.8:** Resultados obtenidos desde el 26-11-2015 al 15-12-2015. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la figura (2.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm <sup>2</sup>	N° de huellas (G)/mm <sup>2</sup>	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Grupo 1 SUR	1	2 ± 01	2 ± 01	40.82 ± 2.27
	2	1 ± 01	0	20.41 ± 1.23
	3	0	0	0
Grupo 2 OESTE	1	3 ± 01	0	61.23 ± 3.3
	2	2 ± 00	0	40.82 ± 2.27
	3	0	0	0
Grupo 3 ZENIT	1	2 ± 01	0	40.82 ± 2.27
	2	1 ± 00	0	20.41 ± 1.23
	3	1 ± 01	0	15.74 ± 1.00
Grupo 4 ZENIT	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	1 ± 00	0
Grupo 5 ZENIT	1	1 ± 00	0	12.59 ± 0.84
	2	1 ± 01	0	11.54 ± 0.79
	3	1 ± 01	0	11.54 ± 0.79
Grupo 6 ZENIT	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
Grupo 7 ZENIT	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
Grupo 8 NORTE	1	1 ± 00	1 ± 01	20.41 ± 1.23
	2	0	0	0
	3	0	0	0
Grupo 9 ZENIT	1	1 ± 01	1 ± 01	19.54 ± 1.21
	2	0	0	0
	3	1 ± 01	0	11.54 ± 0.79
Grupo 10 ESTE	1	2 ± 01	0	40.82 ± 2.27
	2	1 ± 01	0	20.41 ± 1.23
	3	0	0	0

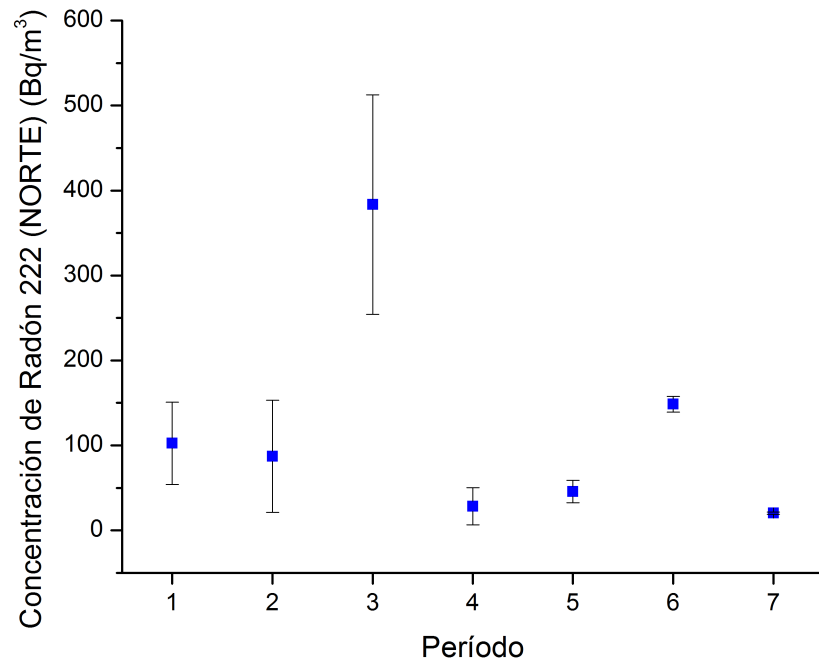
Igualmente a modo de resumen se muestran los gráficos que representan las fluctuaciones del Radón 222 en el ambiente exterior seleccionado para este estudio, los cuales son:



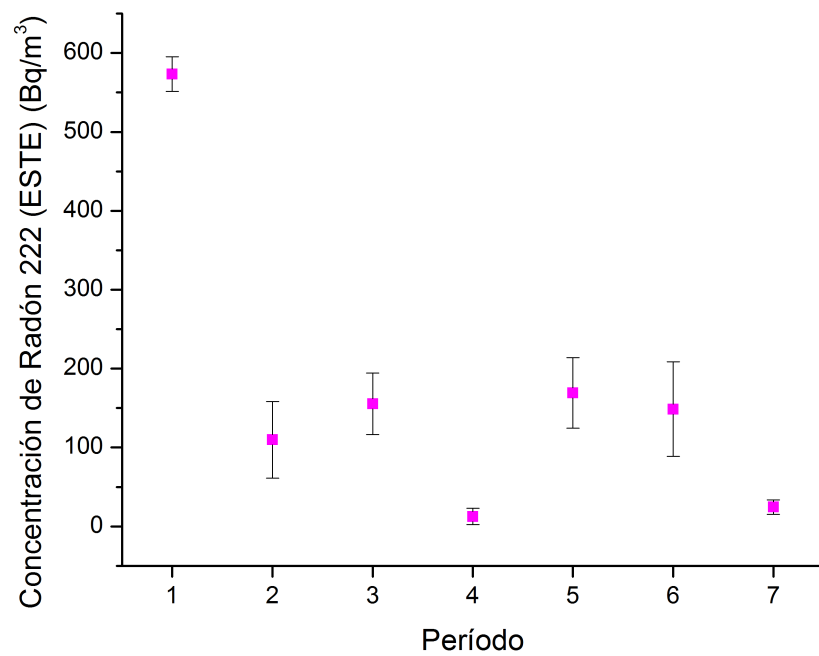
**Figura 2.4:** Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el SUR.



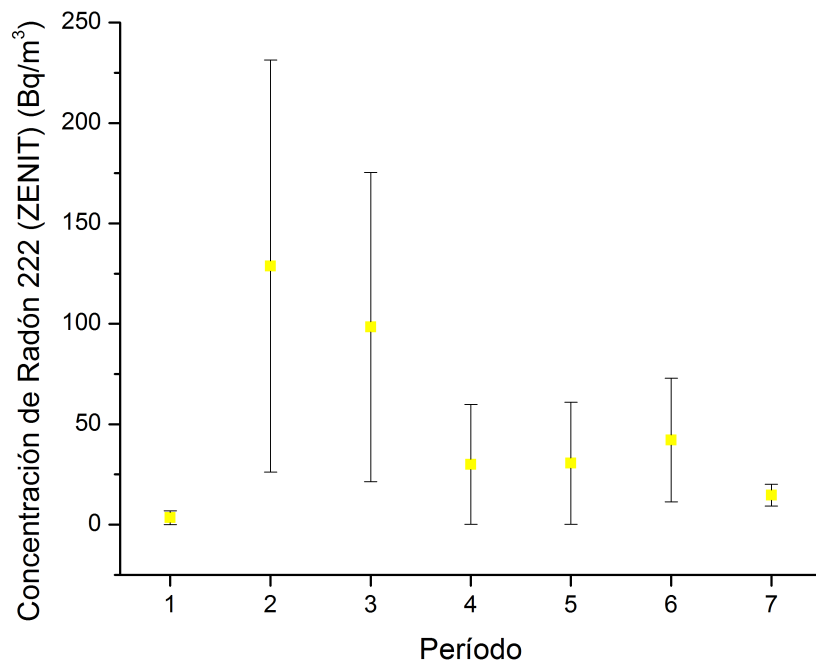
**Figura 2.5:** Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el OESTE.



**Figura 2.6:** Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el NORTE.



**Figura 2.7:** Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el ESTE.



**Figura 2.8:** Fluctuación de la concentración de Radón 222 desde el ZENIT.

## 2.2. Metodología en la detección y formación de otras huellas (huellas G)

Paralelamente a la obtención de las huellas del Radón 222 (indicadas en las tablas como huellas P) se obtuvieron otro tipo de huellas (indicadas en las tablas como huellas G) como las que se presentan en la figura (2.13) y figura (2.14). Estas se presentaron simultáneamente con las huellas del Radón 222, su presencia se acentúa en algunos períodos de medición, particularmente en el primer período cercano al suceso de Fukushima como se aprecia en la tabla (2.2) y también en un período posterior mostradas en la tabla (2.5); en los demás períodos se presentan solo esporádicamente.

Para estudiarlas más detenidamente y determinar el porque de la formación de este tipo de huellas G se usó igualmente el mismo procedimiento de la sección (1.3.3). En la caracterización de estas huellas se tiene en cuenta la energía de la partícula incidente; ya que, con este parámetro se puede calcular cuánto se ha frenado la partícula y a su vez este dato permite obtener el rango de penetración en cualquier material; este cálculo se realiza con la fórmula de Bethe como se muestra en la subsección (1.2.2). En la tabla (2.9) se muestra como varia el rango y el poder de frenado dependiendo de la energía de partícula al impactar con el aire; en la

tabla (2.10) se muestra cuando impacta con el polímero LR-115 tipo 2.

Con estas informaciones podemos saber como se comporta la partícula  $\alpha$  en el aire y en nuestro detector. Posiblemente esta partícula no sea una  $\alpha$  proveniente del Radón 222; ya que, como conocimiento previo sabemos que la energía de la partícula  $\alpha$  de este emisor es de 5.590 MeV como se mostró en la tabla (1.1) y de acuerdo a nuestros resultados corresponden a valores de energías superiores, estas huellas corresponden a valores de energías superiores al presentar una geometría mayor y se encuentra que en la mayoría de los casos logran atravesar toda la nitrocelulosa de espesor 2 micrómetros, siendo el espesor de todo el polímero 112 micrómetros. Podemos observar detalles de estas huellas en las figuras (2.15) y (2.16).

**Tabla 2.9:** Partículas  $\alpha$  al interaccionar con el aire

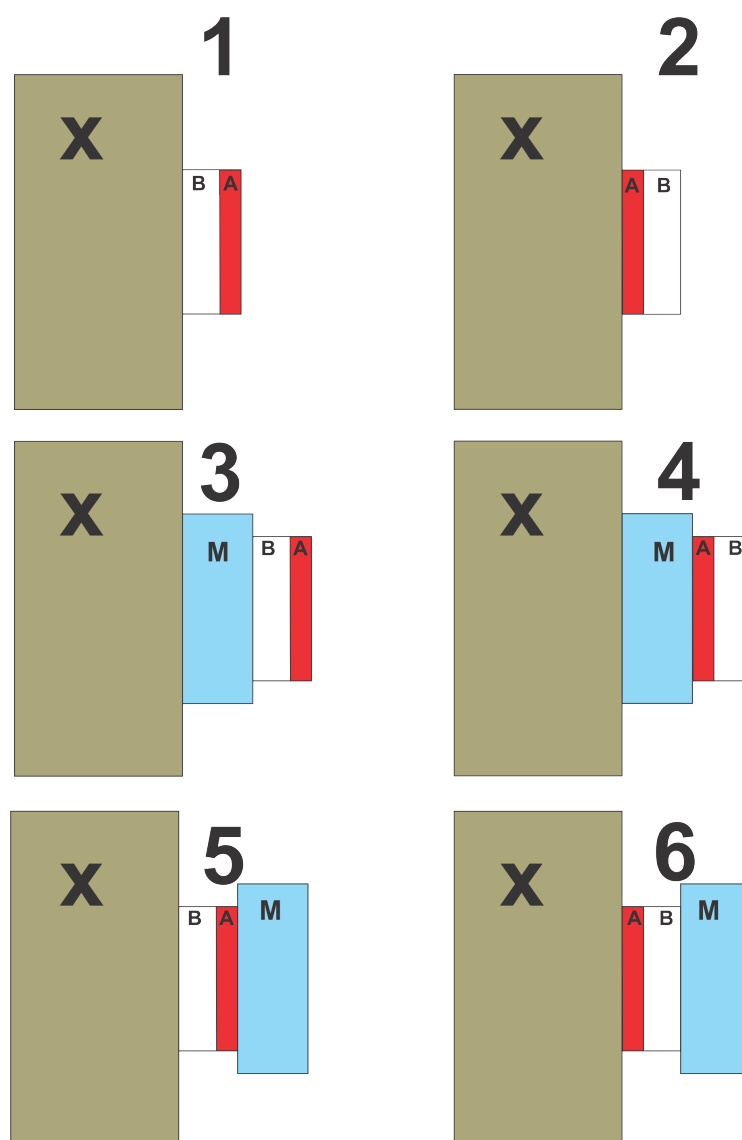
Energía Cinética (MeV)	$dE/dx$ (MeV/m)	Alcance (mm)
1.00	308.83	3.99
1.10	300.21	4.32
1.20	290.99	4.65
1.30	281.67	5.00
1.40	272.45	5.36
1.50	263.44	5.74
1.60	254.92	6.12
1.70	246.81	6.52
1.80	239.20	6.93
2.00	225.18	7.79
2.25	210.07	8.94
2.50	197.05	10.17
2.75	185.74	11.47
3.00	175.83	12.86
3.25	167.02	14.31
3.50	159.21	15.85
3.75	152.21	17.45
4.00	145.90	19.13
4.50	134.79	22.69
5.00	125.38	26.54
5.50	117.28	30.66
6.00	110.27	35.05
6.50	104.07	39.72
7.00	98.59	44.65
8.00	89.25	55.31
9.00	82.46	66.97

**Tabla 2.10:** Partículas  $\alpha$  al interaccionar con el polímero LR-115 tipo 2

Energía Cinética (MeV)	$dE/dx$ (MeV/mm)	Alcance ( $\mu\text{m}$ )
1.00	276.64	4.32
1.10	270.01	4.69
1.20	262.99	5.06
1.30	255.97	5.45
1.40	248.85	5.84
1.50	242.04	6.25
1.60	235.43	6.67
1.70	229.11	7.10
1.80	223.00	7.54
2.00	211.69	8.46
2.25	198.87	9.68
2.50	187.55	10.97
2.75	177.44	12.34
3.00	168.43	13.79
3.25	160.32	15.31
3.50	152.91	16.90
3.75	146.31	18.57
4.00	140.20	20.32
4.50	129.59	24.03
5.00	120.58	28.02
5.50	112.88	32.31
6.00	106.17	36.87
6.50	100.27	41.72
7.00	95.03	46.84
8.00	86.17	57.89
9.00	80.04	69.93

A fin de repetir esta experiencia para identificar el otro tipo de huellas de forma concéntricas, se seleccionaron otros 3 lugares muy distantes para realizar mediciones similares, estas 3 zonas fueron los distritos de Miraflores, San Miguel y Chaclacayo.

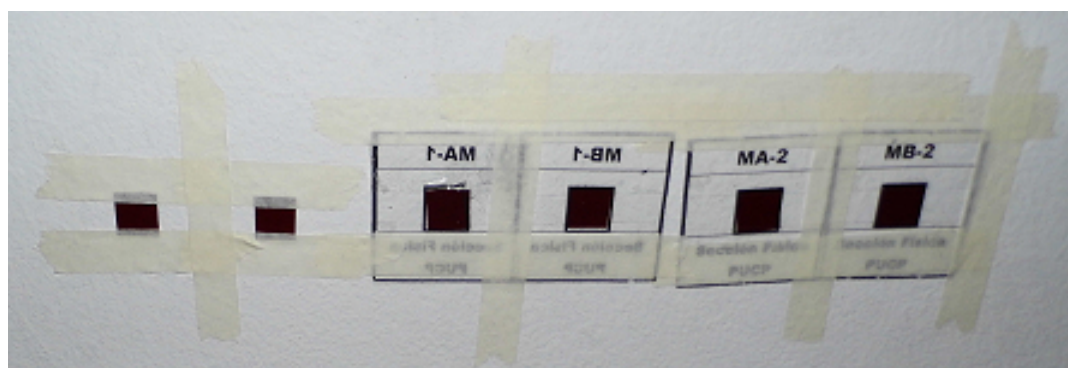
Se colocaron en total 54 detectores sin especificar época o estación del año, en cada zona se colocó 18 detectores y a su vez se seleccionaron 3 distancias (6 detectores colocados en el suelo apuntando al zenit, 6 detectores colocados en la cara exterior de una pared de un segundo piso y 6 últimos detectores en el techo apuntando al zenit). Para la preparación de estos detectores en cada zona se uso los 6 montajes experimentales mostrados en la figura (2.9).



**Figura 2.9:** Seis diferentes montajes experimentales para la detección de las huellas concéntricas. X representa la pared, el piso o el techo exterior (de cemento o ladrillo); M, representa la mica, usado como portadetector simple; A y B partes del detector, nitrocelulosa y poliéster base respectivamente.

En la figura anterior se muestran 6 montajes experimentales diferentes los cuales se detallan de la siguiente forma: **(1)**, con codificación A, detector puesto sobre X donde la parte A está expuesta al exterior; **(2)**, con codificación B, detector puesto sobre X donde la parte B está expuesta al exterior; **(3)**, con codificación A2 puesto sobre una mica simple que esta sobre X donde la parte A está expuesta al exterior; **(4)**, con codificación B2 puesto sobre una mica simple que esta sobre X donde la parte B está expuesta al exterior; **(5)**, con codificación B1 puesto entre X y una mica simple, la parte B está en contacto con X; y **(6)**, con codificación A1 puesto entre X y una mica simple, la parte A está en contacto con X. Tener en cuenta que X representa el piso, la pared de un segundo piso o el techo exterior.

De esta manera se prepararon y colocaron los detectores como se ha especificado anteriormente, un ejemplo de como se colocaron se muestra en la figura (2.10). El tiempo de detección estimada para esta experiencia fue de 20 días.



**Figura 2.10:** Detectores colocados en Chaclacayo en la pared de un segundo piso.

Siguiendo el procedimiento estándar para la técnica de huellas nucleares, se procedió a retirar los detectores, se hizo el grabado o etching a una temperatura de  $60^{\circ}C$  con una solución de  $NaOH$  a  $2,5N$  durante 30 minutos y finalmente se observamos los detectores con un microscopio óptico (marca LEICA DM LM, alcance 10X). En este caso la determinación de la energía asociada ya no se hizo usando la ecuación (1.22) sino se plantearon otras hipótesis que se explican más adelante.

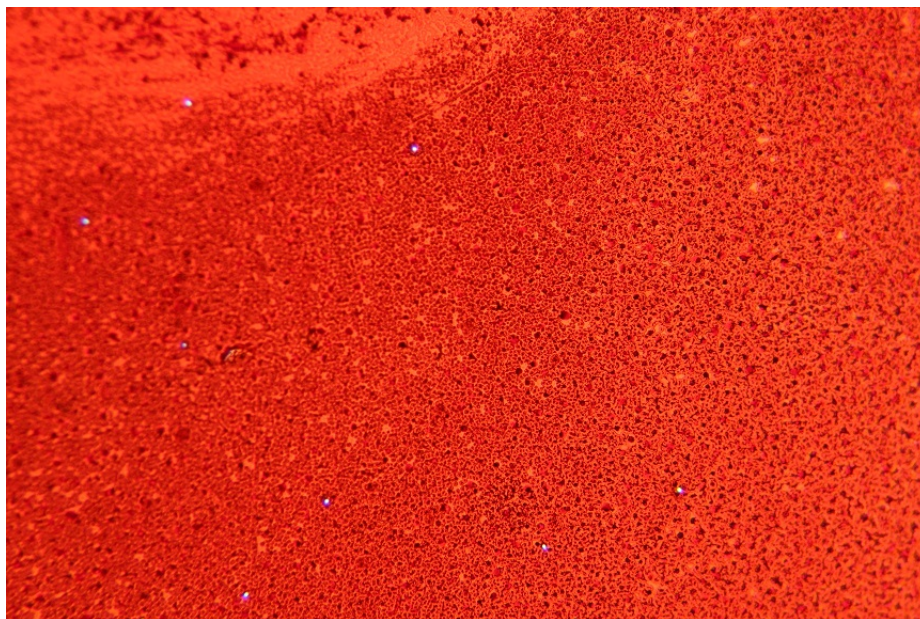
### 2.2.1. Resultados

Se observaron al detalle los 54 detectores, se analizó en cada uno toda su superficie. En la tabla (2.11) se muestra en cual de los montajes experimentales se encontraron huellas concéntricas diferentes a huellas de Radón 222.

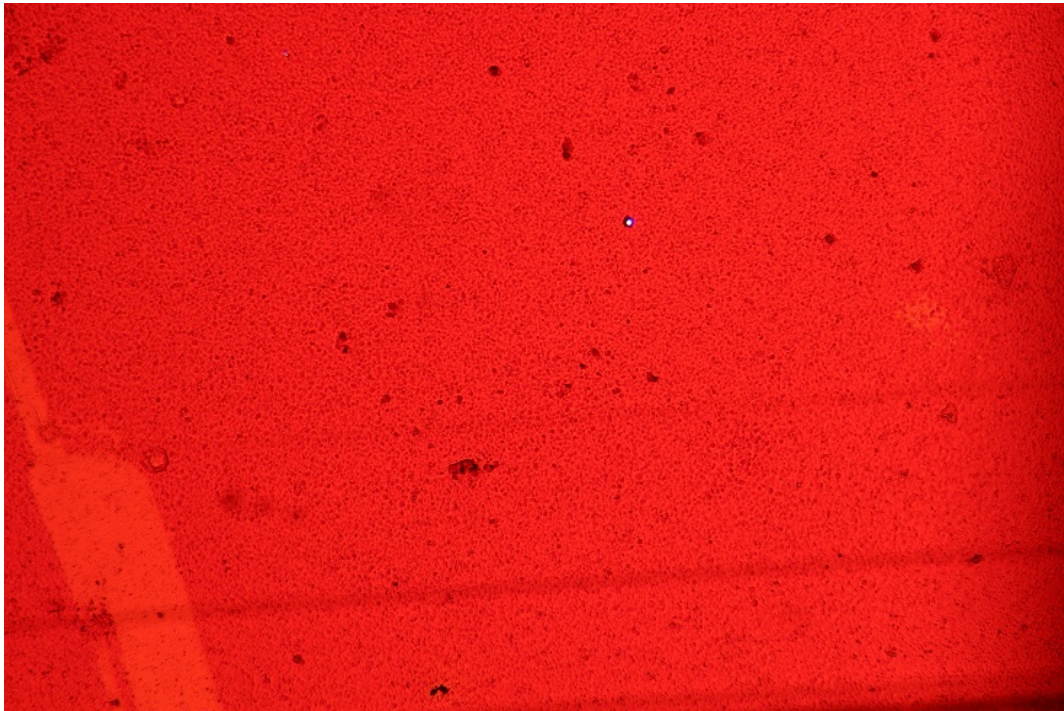
**Tabla 2.11:** Presencia de huellas concéntricas (tipo G) en cada montaje experimental para 3 zonas distintas.

Ubicación	Montaje figura (2.9)	San Miguel		Miraflores		Chaclacayo	
Piso	1	A	no	A	no	A	no
	2	B	si	B	si	B	si
	3	A2	no	A2	no	A2	no
	4	B2	si	B2	si	B2	si
	5	B1	no	B1	no	B1	no
	6	A1	si	A1	si	A1	si
Pared (segundo piso)	1	A	no	A	no	A	no
	2	B	si	B	si	B	si
	3	A2	no	A2	no	A2	no
	4	B2	si	B2	si	B2	si
	5	B1	no	B1	no	B1	no
	6	A1	si	A1	si	A1	si
Techo (parte exterior)	1	A	-	A	-	A	-
	2	B	si	B	si	B	si
	3	A2	-	A2	-	A2	-
	4	B2	si	B2	si	B2	si
	5	B1	no	B1	no	B1	no
	6	A1	si	A1	si	A1	si

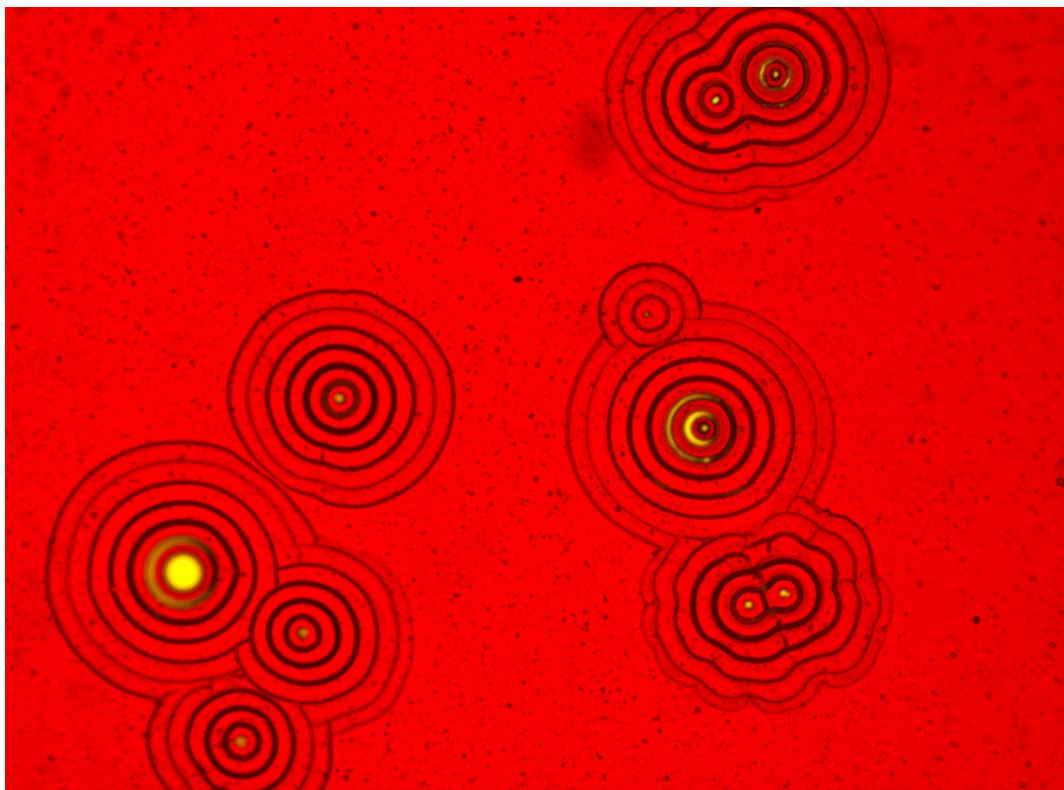
Estos resultados se pueden apreciar en las siguientes figuras, las cuales representan un campo del detector:



**Figura 2.11:** Resultados de un campo del detector ubicado en Chaclacayo con código A2.

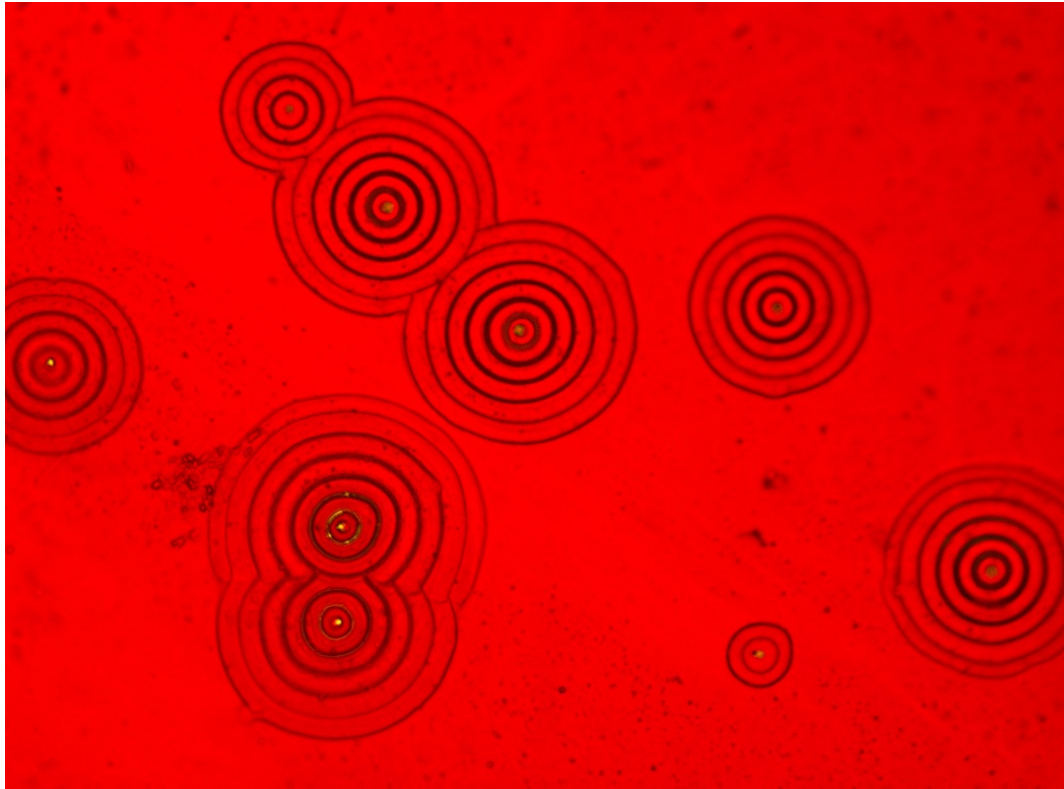


**Figura 2.12:** Resultados de un campo del detector ubicado en Miraflores con código B1.

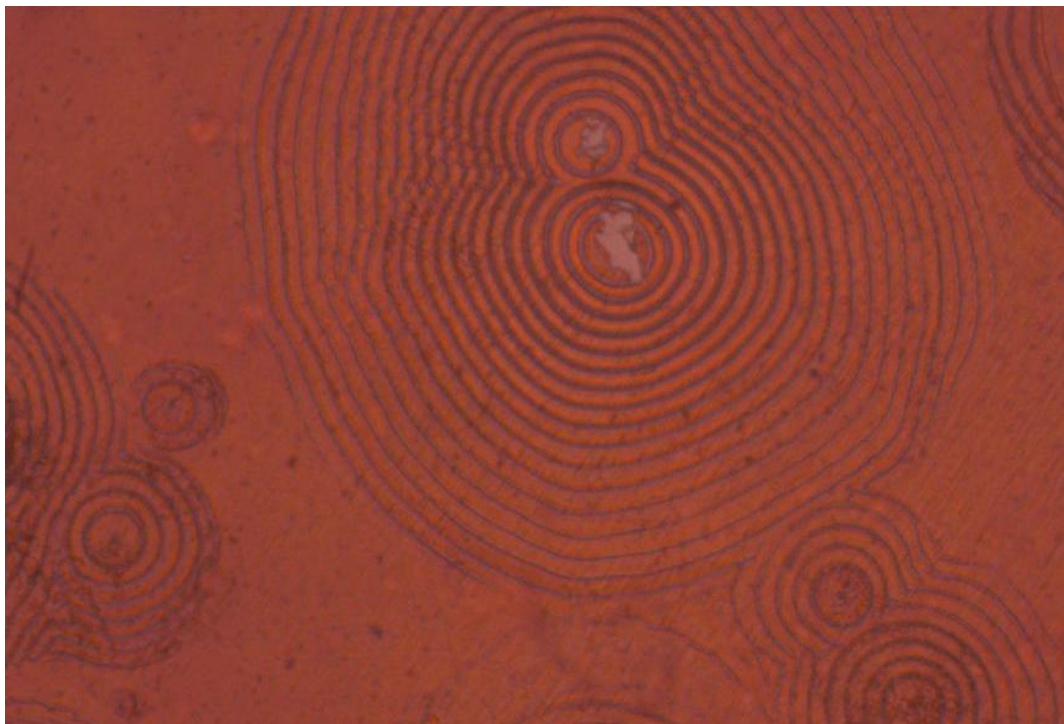


**Figura 2.13:** Resultados de un campo del detector ubicado en San Miguel con código B.

Observamos que hay resultados repetidos sin importar la zona de medición; pero también se observa que en la parte del techo no se observa información alguna,

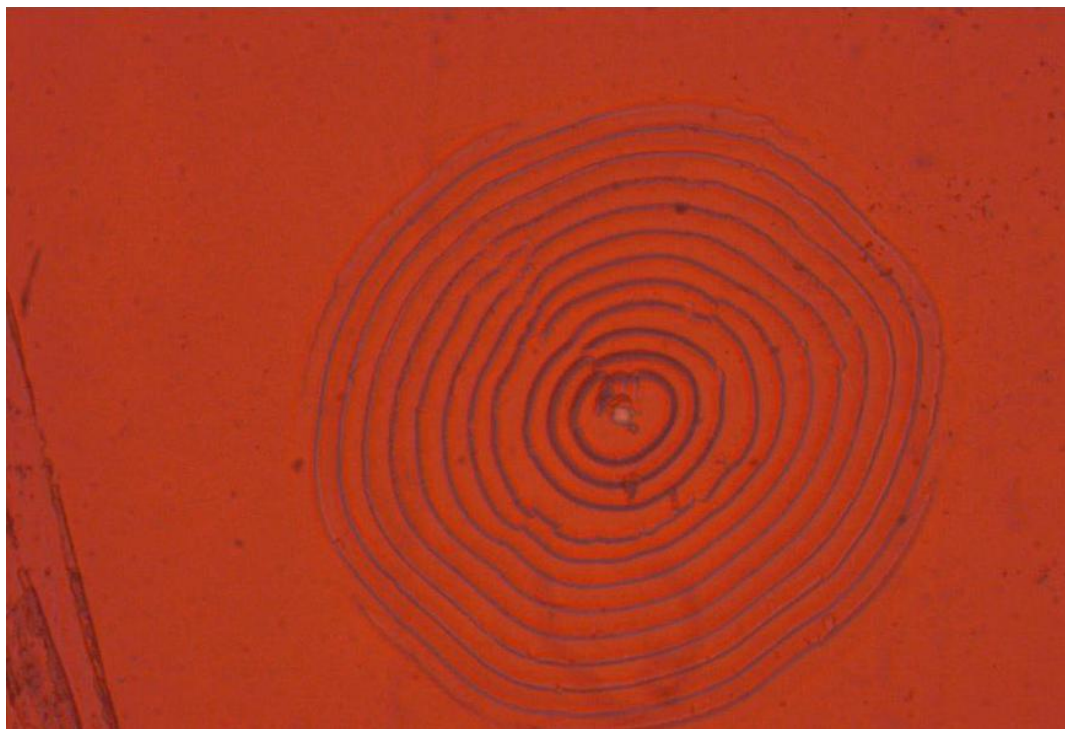


**Figura 2.14:** Resultados de un campo del detector ubicado en Miraflores con código A1.



**Figura 2.15:** Huellas concéntricas con mayor cantidad de anillos.

esto se debe a que estuvo en contacto directo con la radiación UV (en esos días de medición la radiación UV fue muy alta), mostramos un ejemplo de como quedo el



**Figura 2.16:** Huella concéntrica con mayor cantidad de anillos.

detector del cual no se pudo obtener ninguna información.



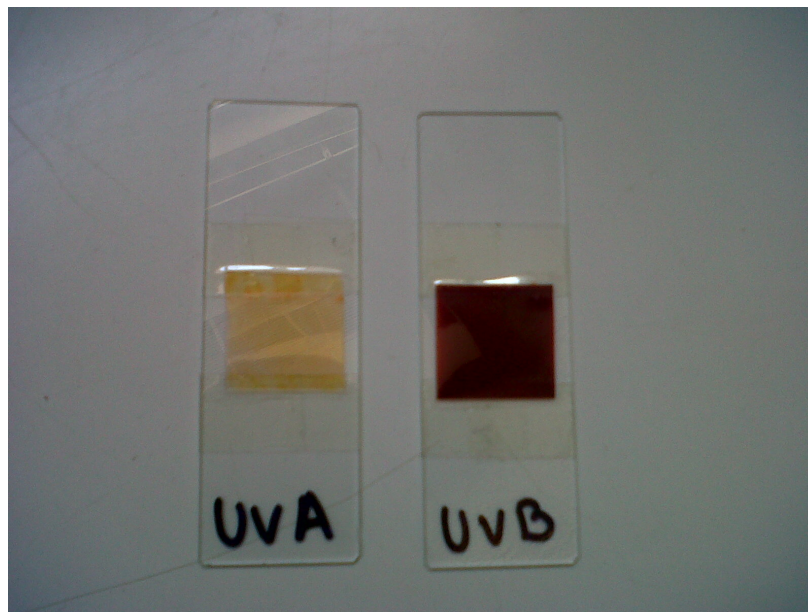
**Figura 2.17:** Detector degradado por UV ubicado en el techo de las 3 zonas.

Para confirmar la influencia de la radiación UV sobre el detector, se realizó la siguiente experiencia que nos permite mostrar que la radiación UV no genera las huellas concéntricas y que solo degrada al material, prácticamente inutilizándolo y sin poder tener resultados que nos permitan hacer un conteo u observar a detalle

las huellas en el detector.

Para esta experiencia se usó una lámpara de UV con una cámara especial para simular la potencia de la radiación UV en los días de exposición. Con la potencia de la lámpara podemos hacer simulaciones hasta de varios meses con tan solo colocar los detectores dentro de la cámara algunas horas.

Se hizo una prueba y se colocaron 2 detectores uno con la parte A expuesta a la lámpara y el otro con la parte B. Los detectores se dejaron durante 1 día (24 horas).



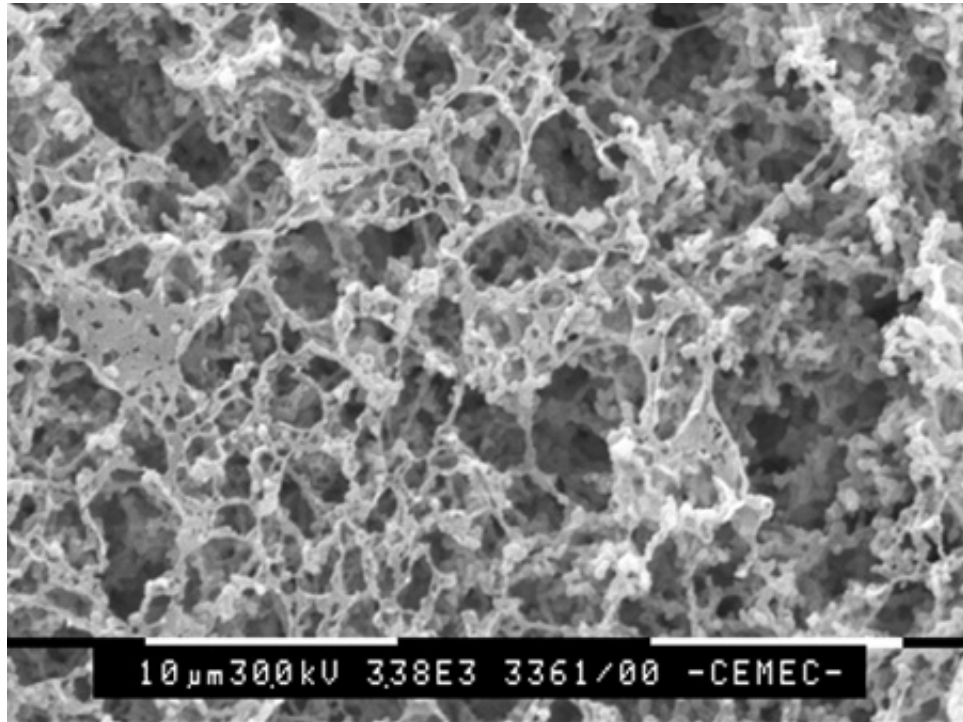
**Figura 2.18:** Detectores expuesto con la parte A expuesta a la lámpara UV (UVA) y la parte B (UVB).

Observamos que la parte A (nitrocelulosa) es la más sensible como hemos especificado anteriormente. Por acción de la radiación UV vemos que nuestro detector pierde respuesta a la lectura. Si se desea realizar mediciones en el exterior sabiendo que el lugar posee alta radiación se debe proteger de manera adecuada el detector y/o disminuir los días de exposición.

Otra forma hipotética de analizar la formación de este tipo de huellas es teniendo en cuenta la posible difracción de la partícula  $\alpha$ . Como se sabe, la difracción es un fenómeno primordial para la ondas, se produce cuando estas encuentran un obstáculo o atraviesan una o varias rendijas, así se curvan, esparcen o simplemente se difractan. Este fenómeno de la difracción ocurre en todo tipo de ondas, en nuestro caso sucedería para las ondas de la radiación  $\alpha$  teniendo en cuenta el principio de dualidad onda materia.

Para este análisis en la formación de las huellas concéntricas se asume que se producen debido a la difracción de las ondas  $\alpha$  en las porosidades del polímero

ocasionadas por el enmarañamiento de las moléculas de la nitrocelulosa como se muestra en la figura (2.19).



**Figura 2.19:** Nitrocelulosa vista desde un microscopio electrónico [67].

Para calcular la energía asociada en la formación de estos anillos se usa la teoría óptica general. Se usa los radios de los anillos, en este caso se midió el radio de los anillos de algunos de los patrones que se obtuvieron mediante un programa que nos proporciona la cámara de microscopio Leica. Tomando uno de los casos se obtuvo un valor del radio del primer anillo oscuro fue de  $9,51\mu m$ , la longitud de onda se obtuvo mediante la fórmula de energía  $E = h\nu$ . Se asumió que la velocidad de incidencia al material es la velocidad máxima que obtiene una partícula  $\alpha v = \frac{c}{20}$ , así se puede obtener el valor de la longitud de onda y así podemos encontrar las relaciones de intensidades mediante la expresión [68]:

$$I = I_o \left( \frac{2J_1(\alpha)}{\alpha} \right)^2 \quad \alpha = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta \quad (2.1)$$

Donde  $J_1$  es la función de Bessel en orden 1,  $a$  es el radio de la abertura circular, para el caso de la partícula incidente en el material se obtuvo el ancho mediante [68]:

$$d = 1,22 \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (2.2)$$

El valor  $\theta$  es el ángulo que se forma desde la fuente hasta el anillo del primer mínimo e  $y$  es la distancia del radio del primer anillo oscuro y así finalmente

podremos obtener la relación de intensidades las cuales se obtuvo un promedio de 0,00133623, lo que en realidad nos muestra la existencia de un mínimo ya que dicha relación tiende a 0, por lo que concuerda con dicha teoría de manera hipotética. Este resultado se obtuvo con energías aproximadas a 6.40 MeV, energía muy superior a las  $\alpha$  del Radón 222. Observando anillos de dimensiones aún más grandes se verifica que las energías necesarias para la formación de estas huellas no corresponden al contaminante gas Radón 222. De acuerdo a la tabla (1.1) podría tratarse de partículas  $\alpha$  asociadas a los descendientes del Torio, sabiendo que en esa cadena se encuentra el isótopo Radón 220 o Torón con vida media de 55.6 segundos que en su decaimiento emite partículas  $\alpha$  con energías superiores a 6.404 MeV [69].

## Capítulo 3

### Discusión de resultados

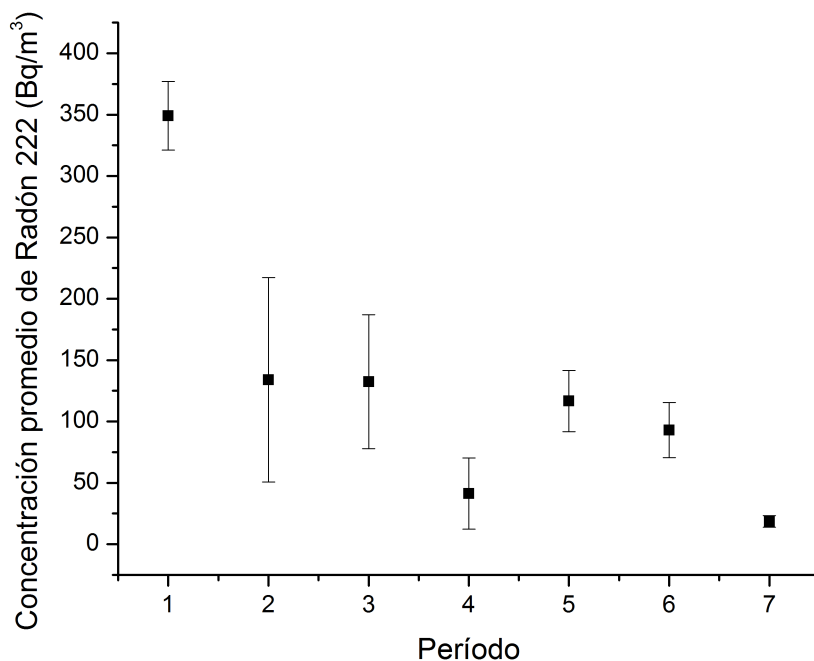
La presencia del contaminante radiactivo Radón 222 se constató en cada una de nuestras mediciones. En la sección (2.1) se observa una fluctuación del contaminante durante los 7 períodos medidos durante 4 años aproximadamente. En esta fluctuación se observa que en promedio la concentración de Radón 222 en el primer período es mayor que los demás períodos como se observa en la figura (3.1), de la misma manera desde la dirección SUR hay una mayor concentración de Radón 222 respectode las demás direcciones. Este resultado es consistente con la contaminación ambiental mayor producida por radiactividad natural y artificial que se produjo después del evento de Fukushima [70].

En el período donde se observa mayor radiación UV (período 7) se encuentra la menor cantidad de concentración esto posiblemente es debido a la radiación UV; ya que, como sabemos el UV degrada nuestro detector, dificulta la lectura de las huellas y observar que no todas las huellas quedaron registradas debido a este factor. Relacionando nuestros resultados con la figura (1.7) podemos corroborar que mientras mayor es la temperatura, la concentración de Radón 222 igualmente disminuye, lo cual es consistente con la naturaleza gaseosa de este contaminante. De todas formas se debe tener siempre en cuenta el factor de radiación UV al realizar mediciones en el exterior con la técnica de huellas nucleares con el detector polímero LR-115 tipo 2.

Un problema de realizar mediciones en el exterior es la amplia gama de particulado que podría dificultar la lectura, esto puede reflejarse en la figura (2.5) y figura (2.8); ya que, esas barras de error representan que el detector ha capturado de forma dispareja las partículas  $\alpha$ , debido a que el particulado estuvo presente, pero igualmente se aprecian barras de error observables en las demás direcciones, solo que estas dos direcciones son las más representativas.

Si hablamos de valores promedios de concentración de Radón 222 en las 5 direc-

ciones seleccionadas observaremos la siguiente fluctuación de Radón 222 promedio en todas las direcciones.



**Figura 3.1:** Promedio de concentración de Radón 222 en todas las direcciones en cada período

Observamos que la concentración de Radón tiende a disminuir durante los 4 años de medición, debido a los factores explicados anteriormente. Como la concentración de Radón es mayor en el SUR, podríamos predecir que la dirección del viento promedio durante los períodos de medición era desde el SUR hacia el NORTE.

Los resultados de la sección (2.2) son totalmente distintos al de la sección anteriormente detallada. Las huellas encontradas en estas mediciones no evidencian el Radón 222, debido a su geometría y a los estudios comparados y explicados en la sección (C), porque si uno puede obtener medidas de Radón en interiores y si tan solo se coloca los detectores en la parte exterior de la misma pared debería encontrarse una cantidad de concentración de Radón menor a esta sin ningún cambio, pero lo que se obtuvo con mayor nitidez fueron huellas concéntricas las cuales poseen anillos perfectos.

Como se observa en la tabla (2.11), no siempre se encuentran este tipo de huellas mediante la técnica de huellas nucleares usando el polimero LR-115 tipo 2 en el exterior, observamos que existen algunos montajes experimentales especiales que permiten obtener estas geometrías en nuestros detectores. En la tabla nos muestra

que hay 3 montajes los cuales captan dichas geometrías, A1, B2 y B (códigos detalladas en las secciones anteriores). La repetibilidad de estos montajes nos da indicios de que solo con estos montajes podemos obtener estas huellas concéntricas.

Se deseaba discriminar los 3 casos restantes (A1, B2 y B) para poder encontrar explicación alguna. Por lo que se hizo un experimento adicional con las mismas condiciones, solo que en A1 y B2 no se colocó mica sino algo más grueso y/o resistente como el cartón y papel de aluminio; por lo que se descartó el caso A1, solo se obtenían huellas en el caso B2 con ambos materiales, esto nos confirma que las partículas que forman las huellas concéntricas provienen del ambiente (exterior) y no de la pared y que también las capta la parte B de nuestro detector (correspondiente al poliéster) y que son tan energéticas que lo atraviesan hasta llegar a la capa de nitrocelulosa donde se produce efectos de difracción. Hay que recordar que en el ambiente exterior existen gran cantidad de partículas subatómicas debido a los rayos cósmicos que poseen más energía de las que captamos en interiores y que pueden impactar e ingresar por el lado B del detector de manera que van rompiendo el detector por niveles formando dichos anillos además de los descendientes del Torio como se indicó antes. Para discriminar fehacientemente este otro tipo de partículas se pueden aplicar las otras técnicas descritas en la sección (1.3) pero exceden los alcances de esta investigación.

# Capítulo 4

## Conclusiones

Como conclusiones de este trabajo de investigación podemos decir lo siguiente:

- Los materiales, equipos, la técnica y demás experiencias implementadas en el Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP hicieron posibles el desarrollo de este trabajo.
- La aplicación de la técnica de huellas nucleares en el polímero LR-115 tipo 2 usado como detector, permite establecer fluctuaciones del contaminante ambiental radiactivo Radón 222 en la zona elegida.
- Al medir la presencia del Radón 222 que es uno de los contaminantes radiactivos ambientales más estudiados por todo el mundo, se pueden obtener también huellas que se deben a otras partículas  $\alpha$  de origen radiactivo no identificadas que al impactar y penetrar en el detector por la parte no sensible (poliester base) forman anillos concéntricos al llegar a la parte sensible nitrocelulosa.
- Al realizar medidas aplicando esta técnica usando el polímero LR-115 tipo 2 se debe tener en cuenta la radiación UV ambiental. Lo que podría hacerse a futuro para obtener mejoras en las mediciones es disminuir el tiempo de detección o colocar protectores o filtros de radiación UV adecuados.
- El factor de radiación UV es uno de los factores ambientales resaltantes en este tipo de mediciones y muy importante a tener en cuenta, dado que en la ciudad de Lima la presencia de radiación UV es alta, con más notoriedad se ha encontrado en el mes de diciembre del 2015 en adelante y se ha pronosticado la presencia de un alto índice de radiación UV en el Perú.
- Las partículas que forman las huellas de forma concéntrica son aquellas provenientes del exterior el cual interaccionan principalmente con la parte no sensible del detector (poliester).

- De acuerdo al cálculo usando la teoría óptica para un proceso de difracción de partículas  $\alpha$  se puede establecer que la energía es mucho mayor a la que pueden generar una partícula  $\alpha$  de Radón 222 igualmente en la tabla (2.9) y tabla (2.10); ya que, estas huellas se forman principalmente cuando atraviesan completamente el material. Igualmente partículas  $\alpha$  con energías mayores a 4.5 MeV no son detectadas por nuestro detector [71] por lo que se asume otro tipo de partícula con una energía mayor.
- La técnica de huellas nucleares no solo permite realizar mediciones de Radón 222 en un ambiente en particular teniendo en cuenta que para cada caso hay factores que pueden afectar los datos, si no que se puede utilizar esta técnica a otro tipo de aplicaciones, debido a que la geometría de las huellas proporciona información de la partícula penetrante.
- Las mediciones de Radón 222 obtenidas con otras técnicas como el del Alpha-GUARD y las del apéndice (B), fueron realizadas en laboratorios externos de apoyo a modo de entrenamiento en las técnicas de huellas nucleares.
- Finalmente, para complementar las mediciones de Radón 222 podemos hacer comparaciones con mediciones obtenidas usando otras técnicas o medidores directos de Radón 222 a mediano plazo; estos también pueden ser usados en la zona seleccionada para este trabajo. Esto podría aumentar confiabilidad en los resultados obtenidos con la técnica de huellas nucleares.

# Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>, Ene. 2016.
- [2] Nuffield Foundation <http://www.nuffieldfoundation.org/practical-physics/henri-becquerel-discovers-radioactivity>, Dic. 2015.
- [3] Oak Ridge Institute for Science and Education <http://orise.orau.gov/reacts/guide/define.htm>, Dic. 2015.
- [4] P. T. Underhill, *Naturally Occurring Radioactive Material: Principles and Practices*, Vol. 18, IOP Publishing, 1998, p. null.
- [5] Laboratoire National Henri Becquerel [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Cs-137\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf), Dic. 2015.
- [6] NDT Resource Center <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/gamma.htm>, Dic. 2015.
- [7] Laboratoire National Henri Becquerel [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Ba-137m\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ba-137m_tables.pdf), Dic. 2015.
- [8] Hyperphysics <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radact2.html#c5>, Dic. 2015.
- [9] D. Miller, *Radioactivity and Radiation Detection*, Gordon and Breach Science Publishers, 1972.
- [10] European Nuclear Society <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/annihilation.htm>, Dic. 2015.
- [11] Physical Reference Data <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>, Dic. 2015.
- [12] Shodor <http://www.shodor.org/unchem/advanced/nuc/>, Dic. 2015.

- [13] Universidad de Santiago de Compostela <http://fpsalmon.usc.es/lar/esp/servicios/servicioradon/inforadon.php>, Dic. 2015.
- [14] L. Garzón, *Radón y sus riesgos*, Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones.
- [15] R. L. Fleischer, P. B. Price, and R. M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids*, University of California Press, Berkeley, 1975.
- [16] S. A. Durrani and R. K. Bull, *Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications*, Pergamon Press, 1987.
- [17] S. A. Durrani and R. Ilic, *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, World Scientific, Singapore, 1997.
- [18] R. L. Fleischer, *Tracks to Innovation: Nuclear Tracks in Science and Technology*, Springer, 1988.
- [19] K. K. Dwivedi, R. Ilic, and P. Vater, *Radiat. Meas.*, 36 (2003).
- [20] R. Ilic, I. Jencic, and P. Vater, *Radiat. Meas.*, 34 (2001).
- [21] A. Chambaudet, M. Fromm, R. Ilic, P. Vater, C. Dubois, and M. Rebetez, *Radiat. Meas.*, 31 (1999).
- [22] R. Ilic, P. Vater, and M. A. Kenawy, *Radiat. Meas.*, 28 (1997).
- [23] V. P. Perehygin, P. Vater, R. Ilic, and S. A. Durrani, *Radiat. Meas.*, 25 (1995).
- [24] K. Kristiansson and L. Malmqvist, *Geoexploration*, 22 (1984) 17.
- [25] C. Papastefanou, *J. Environ. Radioact.*, 63 (2002) 271.
- [26] M. Abd-Elzaher, *And Overview on Studying Rn 222 Exhalation Rates using Technique Solid-State Nuclear Track Detectors. American Journal of Applied Science*, 9(10):(2012), pp. 1653–1659.
- [27] K. Wiegand, S. P. Dunne, and Ann, *Occup. Hyg.*, 40 (1996) 569.
- [28] L. Tomásek, T. Müller, E. Kunz, A. Heribanová, J. Matzner, V. Placek, I. Burian, and J. Holecek, *Int. Cong. Ser.*, 1225 (2002) 239.
- [29] J. Hakl, I. Hunyadi, I. Csige, G. Geczy, L. Lenart, and A. Varhegyi, *Radiat. Meas.*, 28 (1997) 675.

- [30] L. S. Bohus, E. D. Greaves, J. Palfalvi, F. Urbani, and G. Merlo, *Radiat. Meas.*, 28 (1997) 725.
- [31] V. I. Ulumov, A. I. Zakharova, and N. V. Ulomova, *Akad. Nauk SSSR Geophys.*, 177 (1967) 567.
- [32] K. Ioannides, C. Papachristodoulou, K. Stamoulis, D. Karamanis, S. Pavlides, A. Chatzipetros, and E. Karakala, *Appl. Radiat. Isot.*, 59 (2003) 205.
- [33] N. Segovia, M. Mena, P. Peña, E. Tamez, J. L. Seidel, M. Monnin, and C. Valdes, *Radiat. Meas.*, 31 (1999) 307.
- [34] Teknopoli <http://www.teknopoli.com/PDF/Gas%20Density%20Table.pdf>, Dic. 2015.
- [35] X. Ortega and J. Jorba, *Las radiaciones ionizantes: su utilización y riesgos*, Edicions UPC. ISBN: 8483010887.
- [36] Universidad de Córdoba [http://www.uco.es/fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER\\$04IRM.pdf](http://www.uco.es/fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER$04IRM.pdf), Dic. 2015.
- [37] World health organization health and work performance questionnaire <http://www.med.harvard.edu/jpnm/phy//sics/nmltd/radprin/sect7/7.1/7.1.3.html>, Dic. 2015.
- [38] H. Bethe, *Quantenmechanik der Ein-und Zwei-Elektronenprobleme*, Springer, 1933.
- [39] H. Bichsel *Passage of charged particles through matter* Technical report, California Univ., Berkeley (USA). Dept. of Physics, 1969.
- [40] Z. P. F. Bloch, 81,363 (1933).
- [41] W. H. Barkas and M. J. Berger, *NASA*, SP-3013 (1964).
- [42] R. M. Sternheimer, *Phys. Rev.*, 88, 85 (1952); 91, 256 (1953); 93, 351 (1954).
- [43] D. R. Dixon, *Stopping Power Measurements of 185 MeV Protons in Various Metals*, M.S. Thesis, SMU (1967).
- [44] P. Dalton and J. E. Turner, ORNL-1777 (1967).
- [45] U. Fano, *Penetration of protons, alpha particles, and mesons*<sup>12</sup>, *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter* **1133** (1964), 287.

- [46] A. Crispin and G. Fowler, *Density effect in the ionization energy loss of fast charged particles in matter*, Reviews of Modern Physics **42** (1970), 290.
- [47] R. M. Sternheimer, *Density effect for the ionization loss in various materials*, Physical Review **103** (1956), 511.
- [48] R. Sternheimer, *Density effect for the ionization loss of charged particles*, Physical Review **145** (1966), 247.
- [49] A. F. Soria and E. R. Martínez, *Física de partículas y de astropartículas*, Universitat de València, 2011.
- [50] W. R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [51] F. Zubeldia, *Protección en radiología odontológica*, Textos docents / UB, Universitat de Barcelona, Universidad de Barcelona. Publicaciones y Ediciones = Universitat de Barcelona. Publicacions i Edicions, 2012.
- [52] E. L. Sensintaffar and S.T., *Calibration of scintillation cells for radon-222 measurements at the u.s. environmental protection agency*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol **95** (190'), 143.
- [53] U.S. NRC Protecting People and the Environment <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/becquerel-bq.html>, Dic. 2015.
- [54] Bohunice and Czechoslovakia, *Detection of alpha particles in the environment by track detector kodak LR115. Solid State Nuclear Track Detectors*, Pergamon Press Ltd., 1982, pp. 535–538.
- [55] P. Pereyra, *Aplicación de la técnica de huellas nucleares en dosimetría de partículas alfa*, 1991, Tesis de bachiller de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [56] D. Nikezic and K. N. Yu, *Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Materials Science and Engineering*, R 46 (2004), pp. 51–123.
- [57] G. Somogyi, *Nuclear Instrum. Methods*, 173 (1980) 21.
- [58] G. Somogyi and A. S. Szalay, *Nucl. Instrum. Methods*, 109 (1973) 211.
- [59] M. Fromm, P. Meyer, and A. Chambaudet, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 107 (1996) 337.

- [60] A. P. Fews and D. L. Henshaw, *Nucl. Instrum. Methods*, 197 (1982) 517.
- [61] D. Nikezic and K. N. Yu, *Radiat. Meas.*, 37 (2003) 39.
- [62] C. W. Y. Yip, J. P. Y. Ho, V. S. Y. Koo, D. Nikezic, and K. N. Yu, *Radiat. Meas.*, 37 (2003) 197.
- [63] K. N. Yu and F. M. F. Ng, *Nucl. Instrum. Methos Phys. Res. B, in prees.*
- [64] P. H. Fowler, S. Amin, V. M. Clapham, and D. L. Hensahw, *in: Proceedings of the 10th Conference on SSNTD, Lyon, 2-6 July 1979*, p. 239.
- [65] S. A. Durrani and R. K. Bull, *Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Aplications*, Pergamon Press, 1987.
- [66] MI.AM <http://www.miam.it/prodotto.aspx?id=4&idcat=7&azione=o>, Ene. 2016.
- [67] Microclar <http://www.microclar.com/nitpad.php>, Ene. 2016.
- [68] E. Hecht, *Optics, 4th*, International edition, Addison-Wesley, San Francisco.
- [69] Laboratoire National Henri Becquerel [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Rn-220\\_com.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Rn-220_com.pdf), Ene. 2016.
- [70] NRE-IX <http://nre9.com/posters/220.pdf>, Ene. 2016.
- [71] GT-Analytic [http://www.gt-analytic.at/downloads\\_en/Kod\\_tech\\_det.pdf](http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf), Ene. 2016.
- [72] Harvard Medical School <http://www.med.harvard.edu/jpnm/physics/nmltd/radprin/sect2/2.2/2.2.3.html>, Dic. 2015.
- [73] Open Course Ware. Universidad Politécnica de Madrid <http://ocw.upm.es/fisica-aplicada/tecnicas-experimentales/contenidos/LibroClase/TECap0501.pdf>, Dic. 2015.
- [74] L. Garzón Ruipérez *Radón y sus riesgos*, 1992.
- [75] R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, *Transport phenomena. 1960*, Madison, USA.
- [76] A. Mahur, R. Kumar, M. Mishra, S. Ali, R. Sonkawade, B. Singh, V. Bhardwaj, and R. Prasad, *Study of radon exhalation rate and natural radioactivity in soil samples collected from east singhbhum shear zone in jaduguda u-mines area*,

*jharkhand, india and its radiological implications*, Indian Journal of Pure and Applied Physics **48** (2010), 486–492.

- [77] A. Mahur, R. Kumar, D. Sengupta, and R. Prasad, *Estimation of radon exhalation rate, natural radioactivity and radiation doses in fly ash samples from durgapur thermal power plant, west bengal, india*, Journal of environmental radioactivity **99** (2008), 1289–1293.
- [78] A. Mahur, R. Kumar, M. Mishra, D. Sengupta, and R. Prasad, *An investigation of radon exhalation rate and estimation of radiation doses in coal and fly ash samples*, Applied Radiation and Isotopes **66** (2008), 401–406.

# Apéndice

# Apéndice A

## Proceso de Calibración del detector LR-115 tipo 2

Para el proceso de calibración, primero se necesita de fundamentación teórica que permitirá entender la técnica de calibración.

- **Equilibrio secular**

Como primer concepto que se debe tener conocimiento del equilibrio secular [72]. El equilibrio secular se da cuando la actividad del padre es igual a la del hijo en un tiempo determinado, cuando la vida media del padre es muy grande en comparación con la del hijo. Como ejemplo, tenemos que  $N_{Ra}$  es la cantidad de núcleos del padre y  $N_{Rn}$  es la cantidad de núcleos del hijo (se hace uso de estos elementos; ya que, servirán para el proceso de calibración), entonces se tiene las siguientes relaciones de desintegración:

$$\frac{dN_{Ra}}{dt} = -\lambda_{Ra}N_{Ra} \quad \frac{dN_{Rn}}{dt} = \lambda_{Ra}N_{Ra} - \lambda_{Rn}N_{Rn} \quad (\text{A.1})$$

Resolviendo estas ecuaciones diferenciales se puede obtener la actividad de cada elemento ( $N_{Ra}$  y  $N_{Rn}$ ):

Para  $N_{Ra}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{dN_{Ra}}{dt} &= -\lambda_{Ra} N_{Ra} \\
\frac{dN_{Ra}}{N_{Ra}} &= -\lambda_{Ra} dt \\
\int \frac{dN_{Ra}}{N_{Ra}} &= -\lambda_{Ra} \int dt \\
\ln(N_{Ra}) - \ln(N_{Ra}^0) &= -\lambda_{Ra} t \\
\ln\left(\frac{N_{Ra}}{N_{Ra}^0}\right) &= -\lambda_{Ra} t \\
\frac{N_{Ra}}{N_{Ra}^0} &= \exp(-\lambda_{Ra} t) \\
N_{Ra} &= N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t)
\end{aligned} \tag{A.2}$$

Usando lo anterior se puede encontrar la relación de actividad del Radio 226:

$$A_{Ra} = A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t) \tag{A.3}$$

Para  $N_{Rn}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{dN_{Rn}}{dt} &= \lambda_{Ra} N_{Ra} - \lambda_{Rn} N_{Rn} \\
\frac{dN_{Rn}}{dt} &= \lambda_{Ra} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t) - \lambda_{Rn} N_{Rn} \\
\left(\frac{dN_{Rn}}{dt} + \lambda_{Rn} N_{Rn}\right) &= \lambda_{Ra} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t) \\
&\cdot \exp(\lambda_{Rn} t) \\
&- \lambda_{Rn} N_{Rn} \exp(\lambda_{Rn} t) \\
\frac{dN_{Rn}}{dt} \exp(\lambda_{Rn} t) + \lambda_{Rn} N_{Rn} \exp(\lambda_{Rn} t) &= \lambda_{Ra} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t + \lambda_{Rn} t) \\
\frac{dN_{Rn} \exp(\lambda_{Rn} t)}{dt} &= \lambda_{Ra} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t + \lambda_{Rn} t) \\
\int dN_{Rn} \exp(\lambda_{Rn} t) &= \int \lambda_{Ra} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t + \lambda_{Rn} t) dt \\
N_{Rn} \exp(\lambda_{Rn} t) &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t + \lambda_{Rn} t) \\
&+ C \\
N_{Rn} &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} t + \lambda_{Rn} t) \\
&\cdot \exp(-\lambda_{Rn} t) + C \exp(-\lambda_{Rn} t)
\end{aligned} \tag{A.4}$$

Para poder calcular el valor de la constante  $C$ , se hace  $t = 0$ , entonces:

$$\begin{aligned}
N_{Rn}^0 &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra}^0 + \lambda_{Rn}^0) \exp(-\lambda_{Rn}^0) + C \exp(-\lambda_{Rn}^0) \\
N_{Rn}^0 &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 + C \\
C &= N_{Rn}^0 - \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0
\end{aligned} \tag{A.5}$$

Reemplazando el valor de  $C$  en la ecuación (A.4), tenemos:

$$\begin{aligned}
N_{Rn} &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra}t + \lambda_{Rn}t) \exp(-\lambda_{Rn}t) \\
&\quad + \left( N_{Rn}^0 - \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \right) \exp(-\lambda_{Rn}t) \\
N_{Rn} &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} N_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t + N_{Rn}^0 \exp(-\lambda_{Rn}t) \\
A_{Rn} &= \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t + A_{Rn}^0 \exp(-\lambda_{Rn}t)
\end{aligned} \tag{A.6}$$

Para poder obtener el equilibrio secular se tiene que igualar ambas actividades (Rn y Ra):

Para  $A_{Rn}^0 = 0$

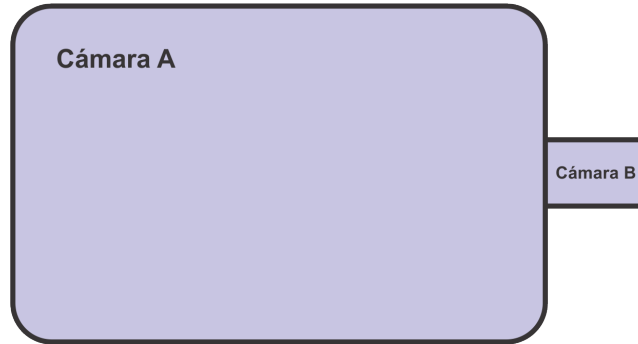
$$\begin{aligned}
A_{Rn} &= A_{Ra} \\
\frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t &= A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra}t) \\
\frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \exp(-\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t &= \exp(-\lambda_{Ra}t) \\
(\exp(-\lambda_{Ra}t) - \exp(-\lambda_{Rn}t)) \exp(\lambda_{Ra}t) &= \frac{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}} \\
1 - \exp(\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t &= \frac{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}} \\
\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}} &= \exp(\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t \\
\ln\left(\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}}\right) &= (\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t \\
t &= \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}}\right)}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}}
\end{aligned} \tag{A.7}$$

Para  $A_{Rn}^0 \neq 0$

$$\begin{aligned}
A_{Rn} &= A_{Ra} \\
\frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn})t + A_{Rn}^0 \exp(-\lambda_{Rn}t) &= A_{Ra}^0 \exp(-\lambda_{Ra}t) \\
\frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} (1 - \exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t)) + \frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} \exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t) &= 1 \\
\frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} \exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t) - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t) &= 1 - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \\
\exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t) \left( \frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \right) &= \frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}} \\
\exp(-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t) &= \frac{\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}}}{\left( \frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \right)} \\
-\lambda_{Rn}t + \lambda_{Ra}t &= \ln \left( \frac{\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}}}{\left( \frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \right)} \right) \\
t &= \frac{\ln \left( \frac{\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}}}{\left( \frac{A_{Rn}^0}{A_{Ra}^0} - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} \right)} \right)}{\lambda_{Ra} - \lambda_{Rn}}
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Con esto se puede saber el tiempo en el que estos dos elementos llegan al equilibrio secular, dependiendo si se tiene concentración de Radón 222 o no.

- Se posee 2 cámaras las cuales nos permitirán realizar la calibración, las dimensiones exactas de estas no son muy importantes, lo más importante a tener en cuenta es que una de estas cámaras sea muchísimo mayor que la otra como se muestra en el siguiente esquema.



**Figura A.1:** Esquema de la cámara y antecámara

Como se observa se tiene la cámara A y la antecámara B. En la cámara A se

coloca la fuente radiactiva de Radio 226 la cual permite tener una concentración de Radón 222 en dicha cámara. Antes de realizar el experimento se debe llegar al equilibrio secular entre ambos elementos, para esto usamos la ecuación (A.7) y así obtenemos  $t = 65,77$  días aproximadamente. Este es el tiempo que se debe esperar para que se cumpla el equilibrio secular y poder tener así una concentración constante en la cámara A. Si se quiere abrir la cámara A para colocar los detectores o retirarlos cada cierto tiempo, se debe esperar dicho tiempo para cada colocación o retiro, por lo que este proceso sería muy ineficiente. Dado esto, se creó la antecámara B la cual es mucho más pequeña, esta servirá para la colocación o retiro rápido de los detectores. El proceso para mejorar la técnica de calibración con la antecámara es la siguiente:

Al tener el equilibrio secular en la cámara A, primero se cierra la puerta entre la cámara A y la antecámara B, luego se abre la cámara B y se colocan los detectores. Finalmente, se cierra la antecámara B y se abre la puerta entre la cámara A y B. Así hemos podido colocar detectores sin cambiar la concentración debido al equilibrio secular en la cámara A, pero hay una pequeña porción de aire (al abrir la antecámara B) que se debe tener en cuenta. El efecto dilución corrige la pequeña porción de aire que entra.

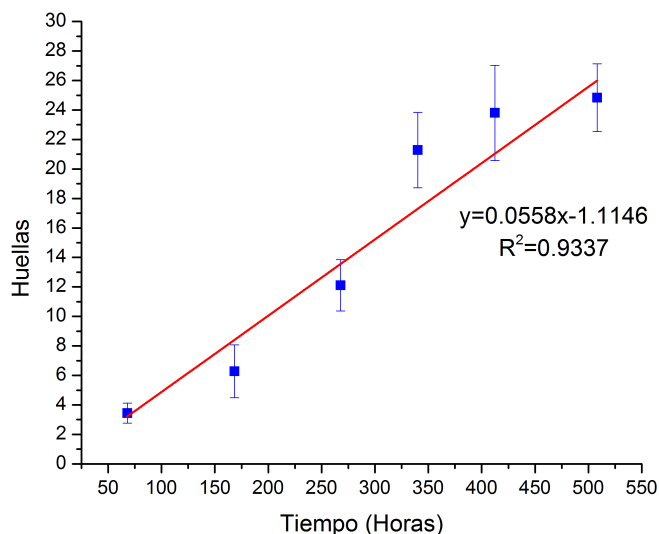
- Mientras los detectores están en detección, se sabe que a mayor tiempo más partículas  $\alpha$  ingresa en el detector, factor a considerar en el proceso de calibración.
- Luego de solucionar el problema del equilibrio secular, ahora se puede colocar y retirar detectores de manera eficiente. Finalmente, se elige cuantos detectores se colocan y cada que tiempo se retiran, de acuerdo a lo anterior.

A modo de ejemplo experimental, se puede colocar 20 detectores y se retirarán 2 detectores cada 3 días. Se retiran 2 para obtener una mejor estadística comparada con solo retirar 1. Después de retirados, se realiza el proceso de grabado y de lectura, lo que se espera es que los datos obtenidos y graficados de huellas vs. tiempo posea un ajuste lineal, de tal manera que los puntos con sus errores esten dentro del ajuste, cumpliendo la estadística del caso; ya que, si uno de los datos se aleja demasiado del comportamiento lineal, debe ser evaluado y, en consecuencia, corregido o desechado [73].

Finalmente, al tener las densidades de huellas, el tiempo de detección y la concentración definida y constante debido al equilibrio secular, se hace uso de la ecuación (1.22) despejando el factor de calibración y reemplazando la información restante conocida para cada par de detectores, igualmente el factor de calibración para

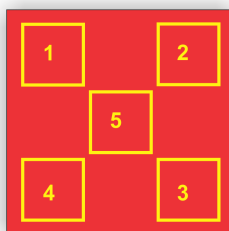
los 10 pares deben ser aproximadamente constantes y así se puede tener un buen factor de calibración. En este proceso la cantidad de detectores se puede aumentar para una mayor precisión.

Como resultado inicial de esta experiencia en la figura (A.2) se muestra el comportamiento lineal entre la cantidad de huellas y la cantidad de horas, es el resultado esperado.



**Figura A.2:** Comportamiento lineal entre cantidad de huellas promedio y horas.

El número de huellas mostradas en la figura (A.2) es una cantidad promedio de cinco campos de lectura de cada detector, como se muestra en la figura (A.3). En cada campo se realizó cinco lecturas para tener una buena estadística, cada campo tiene un área de  $126,96\mu m^2$  y la concentración de Radón 222 dentro de las cámaras fue en promedio de  $472,00Bq/m^3$ . Con esta información y la cantidad de huellas se puede encontrar el factor de calibración despejando  $K_{Rn}$  de la ecuación (1.22).



**Figura A.3:** Cinco campos seleccionados para la lectura del detector LR-115 tipo 2.

Así, se obtuvo en promedio  $20,28Bq/(m^3 \cdot días)$  que corresponde a  $1huella/mm^2$  el cual es comparable con resultados anteriores hechos en la PUCP [55] mediante

otro método.

# Apéndice B

## Otras aplicaciones del LR-115 tipo 2 en la detección de contaminantes medio ambientales

El uso del polímero LR-115 tipo 2 en medidas medio ambientales es amplio, aquí se presentará dos experiencias realizadas en el IPEN de las que pueden surgir futuros trabajos.

- **Medidas de exhalación de Radón 222 en subsuelo.** A pesar que este gas proviene del subsuelo, se puede acumular en el interior de las viviendas o en el medio exterior. Aquí se presentará un adscripción teórica y experimental de la técnica de medidas de exhalación.

El Radón 222 exhala porque es un gas, dado esto sale al exterior dependiendo de su difusión. La difusión del Radón 222 es de gran relevancia en el estudio de su movimiento a través de la corteza terrestre, la capacidad de difusión a través de cualquier medio se puede describir con el coeficiente de difusión, el cual se obtiene a partir de la teoría cinética de los gases, donde sus unidades viene medido en  $cm^2/s$  [74].

Al no conocer el coeficiente de difusión de manera experimenta una correlación satisfactoria que permite el cálculo de esta teóricamente es el de Hirschfelder, Bird y Spotz [75], el cual hace uso de la teoría cinética de los gases.

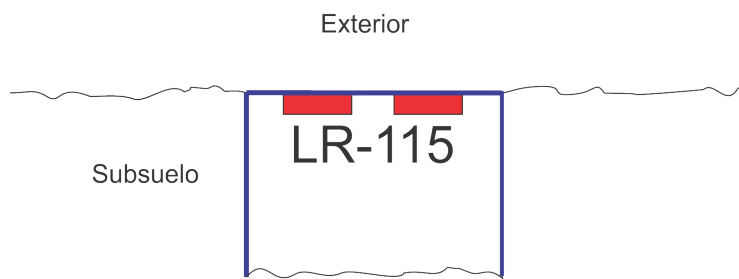
Este término de difusión como las características del material en el cual el Radón 222 se difundirá, como la permeabilidad, porosidad y demás, importarán cuando dicho gas se difunda de un medio a otro y luego exhale hacia el exterior. Aquí por simplicidad se usará un método aplicando la técnica de

huellas nucleares y se usa la siguiente expresión que permite obtener la razón de exhalación de Radón 222 [76–78], la llamaremos la “técnica de la lata”:

$$Ex_{Rn} = \frac{C_{Rn}(V\lambda/A)}{t + (1/\lambda)\exp^{-\lambda t} - (1/\lambda)} \quad (\text{B.1})$$

Donde  $C_{Rn}$  es la concentración de Radón medida por los detectores de estado sólido en nuestro caso el polimero LR-115 tipo 2;  $V$ , volumen de la lata;  $A$ , área de la base de la lata;  $t$ , tiempo de exposición; y  $\lambda$ , constante de decaimiento del Radón.

El montaje experimental para esta medición se muestra en la figura (B.1), en esta figura se observa la “lata” (color azul en la figura) que es enterrada en el subsuelo en la cual se colocan dos detectores LR-115 tipo 2 en su interior.



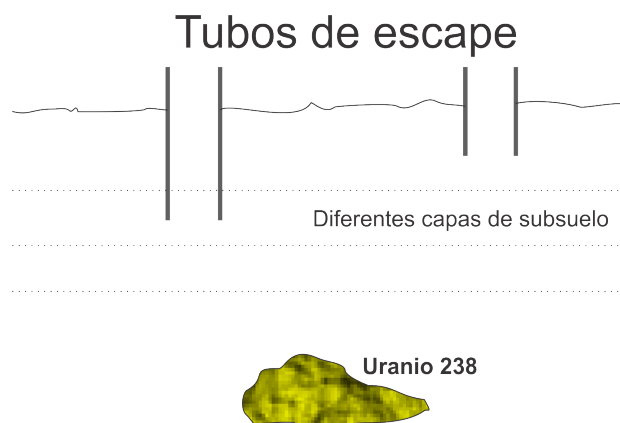
**Figura B.1:** Montaje experimental de la “técnica de la lata”.

Así finalmente, se puede encontrar la exhalación de Radón 222 del suelo en el que se colocó la lata.

- Medición de Radón 222 proveniente de desechos de Uranio 238.** Imaginemos que hay desechos de Uranio 238 enterrados a una cierta profundidad como se muestra en el esquema de la figura (B.2). Como se sabe, el Radón 222 es el único elemento gaseoso de se cadena de desintegración, entonces se tiene la seguridad que en el exterior habrá presencia de Radón 222 identificando la fuente de Uranio 238.

Una forma de poder estudiar el radón que emerge hacia la superficie es colocando detectores en la superficie de los tubos de escape. A modo de experiencia se pueden colocar 12 detectores LR-115 tipo 2, divididos en 4 grupos (los grupos representan el norte, sur, este y oeste) y en cada grupo habían 3 detectores colocados a diferentes distancias como se muestra en la figura (B.3).

Se establece esa configuración al tener la información acerca del viento (dirección, velocidad y demás) en el período de detección (12 días). Luego del



**Figura B.2:** Esquema de un desecho de Uranio 238 con dos tubos que facilitan la difusión de Radón 222.



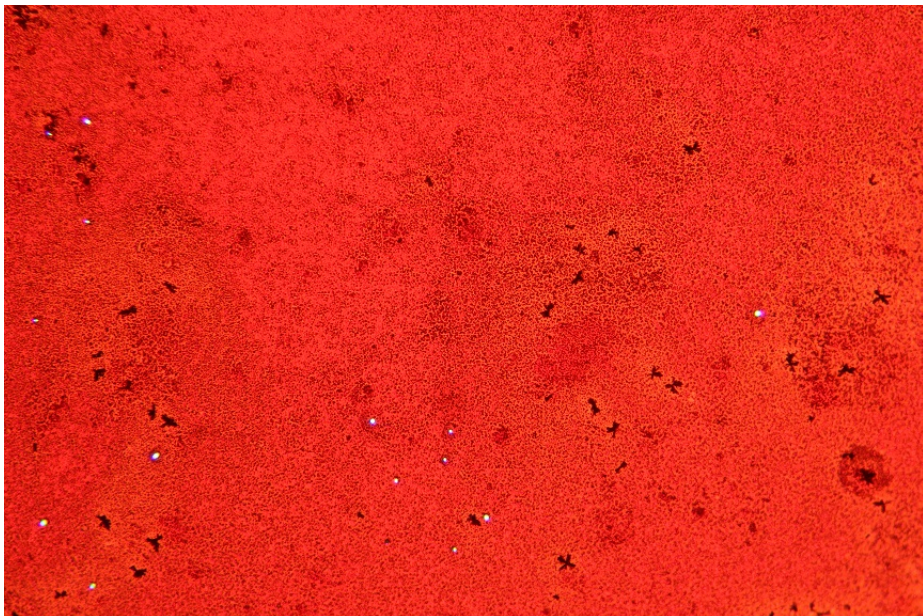
**Figura B.3:** Detectores colocado encima de desechos de Uranio 238.

tiempo estimado y usando la técnica de huellas nucleares se obtuvieron resultados como el que se muestra en la figura (B.4) y figura (B.5), la cual muestra un pequeño campo del detector.

En la figura (B.6) observamos los resultados de las huellas en función de las distancias y direcciones del viento para dos tubos seleccionados. Se observa que no hay correlación con la dirección del viento obtenida (dirección del viento de Norte a Sur), para esto se debe detallar el estudio para entender mejor el comportamiento del Radón que sale hacia el exterior.

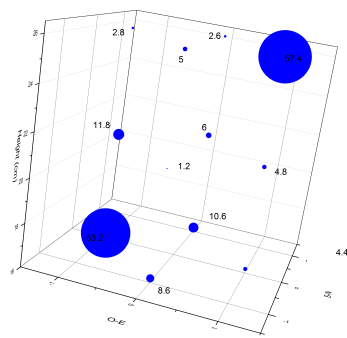


**Figura B.4:** Campo de  $126,96\mu m^2$  del detector LR-115 tipo en mediciones de desechos de Uranio 238.

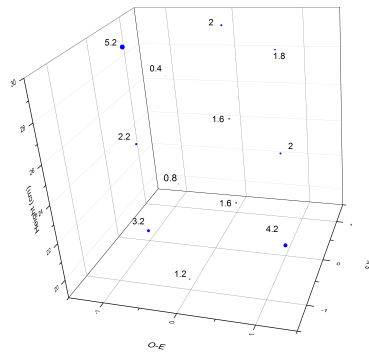


**Figura B.5:** Campo de  $126,96\mu m^2$  del detector LR-115 tipo en mediciones de desechos de Uranio 238.

● Huellas



Tubo A



Tubo B

**Figura B.6:** Cantidad de huellas en las 12 posiciones seleccionadas para dos tubos de diferente dimensión.

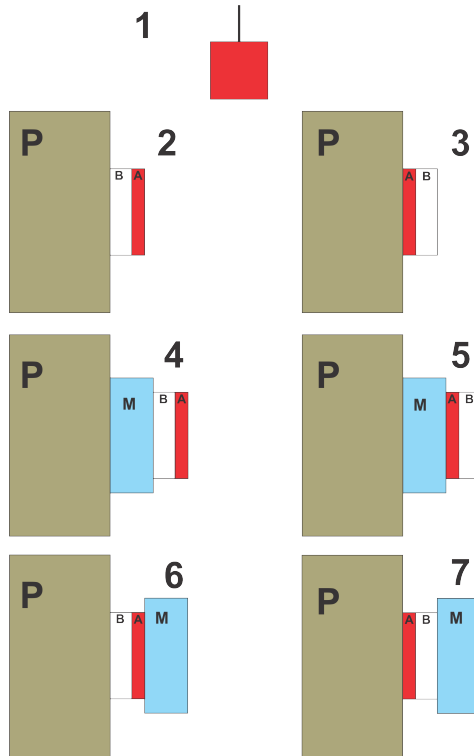
# Apéndice C

## Comparaciones de medidas en el interior como en el exterior

Dado que en la subsección (2.2) se demuestra la presencia de otra geometría de huellas nucleares en los detectores expuestos al ambiente exterior, en esta sección se demuestra que son huellas que se forman cuando las mediciones se hacen en un ambiente exterior. Se realizó el con las 7 posibilidades de colocar el detector como se muestra en la figura (C.1).

Para esta experiencia se colocaron 14 detectores LR-115 tipo 2, los cuales se separaron en dos grupos de 7, se eligió una pared a una altura de 3 pisos, en la cara de la pared exterior del cuarto (E) de esta se colocó el primer grupo de 7 detectores y en la cara de la pared interior del cuarto (I) se colocó el grupo restante de igualmente 7 detectores. Los detectores se colocaron durante 20 días y luego del tiempo de detección se realizó el grabado a una temperatura de  $60^{\circ}$  con  $NaOH$  al  $2,5N$  por un tiempo de 30 minutos.

En la siguiente tabla (C.1) se muestra en cual montaje experimental se obtienen las huellas concéntricas. La codificación de cada detector viene dada de la siguiente manera: **(1)** E e I indican que el detector desnudo sin contacto con objeto u cosa alguna esta en el interior y exterior respectivamente; **(4)** EA2 e IA2, el detector esta con la parte A en contacto con el aire y la parte B en contacto con una mica pegada en la pared en el exterior e interior respectivamente; **(5)** EB2 e IB2, parte B en contacto con el aire y la parte A en contacto con una mica pegada en la pared en el exterior e interior respectivamente; **(7)** EA1 e IA1, detector entre mica y pared con la parte A en contacto con la pared en el exterior e interior respectivamente; **(6)** EB1 e IB1, detector entre mica y pared con la parte B en contacto con la pared en el exterior e interior respectivamente; **(3)** EB e IB, detector desnudo con la parte B en contacto con el aire en el exterior e interior respectivamente; y **(2)** EA e IA,



**Figura C.1:** 7 diferentes montajes experimentales para la detección de las huellas concéntricas. P representa la pared; M, representa la mica, un portadetector simple; A y B partes del detector, nitrocelusosa y poliester base respectivamente.

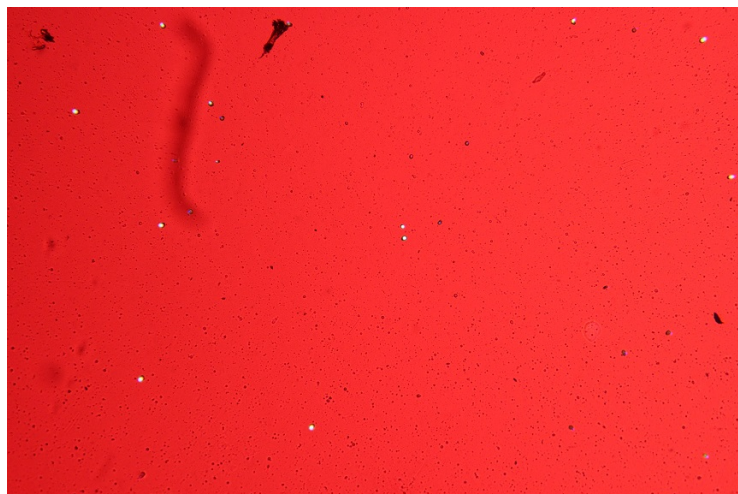
detector desnudo con la parte A en contacto con el aire en el exterior e interior respectivamente. (Los números son los representados en la figura (C.1)).

**Tabla C.1:** Respuesta de la presencia de huellas concéntricas de cada montaje experimental

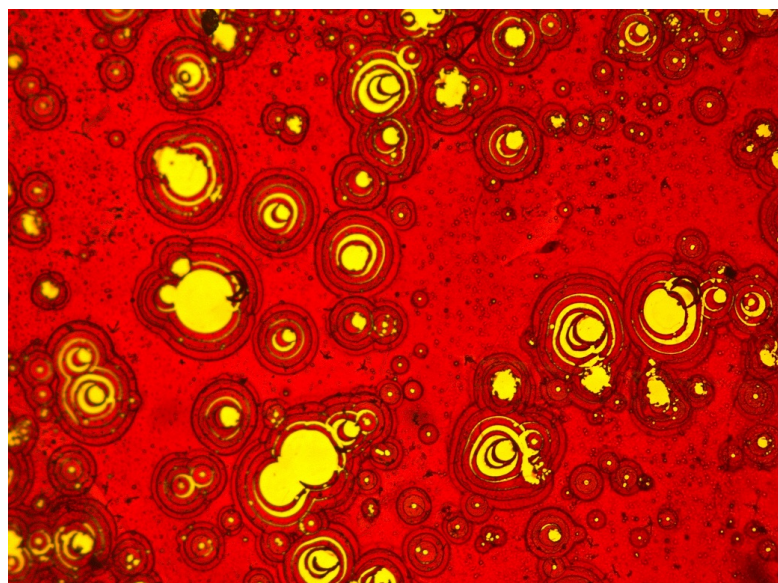
Exterior		Interior	
E	si	I	no
EA	no	IA	no
EB	si	IB	no
EA1	si	IA1	no
EB1	no	IB1	no
EA2	no	IA2	no
EB2	si	IB2	no

Según los resultados obtenidos, ningún detector ubicado en el interior del cuarto presenta huellas concéntricas; sin embargo, en la parte del exterior se observa la presencia de estas huellas con el montaje E, EB, EA1 y EB2.

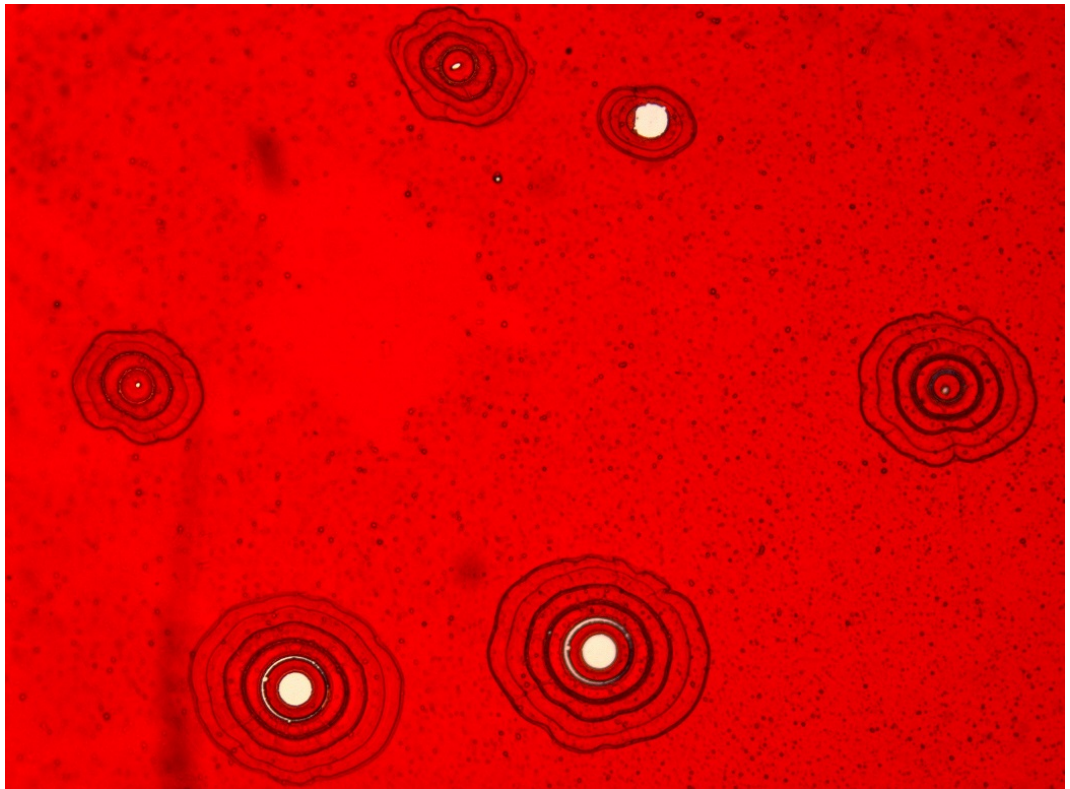
A continuación se muestran los resultados en las siguientes figuras, observamos que el montaje IA2 se observan las huellas que normalmente son las del Radón 222 (figura (C.2)) y en el montaje EB2 se observan las huellas concéntricas y algunas de las huellas del Radón 222 (figura (C.4)).



**Figura C.2:** Detector sin huellas concéntricas con el montaje IA2 según formato de la figura (C.1).



**Figura C.3:** Detector con huellas concéntricas con el montaje E según formato de la figura (C.1).



**Figura C.4:** Detector con huellas concéntricas con el montaje EB2 según formato de la figura (C.1).