

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Estudio de la contaminación ambiental debido a elementos radiactivos naturales

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

Bertin Andrés Pérez Ancaya

ASESOR: Dra. María Elena López Herrera

Lima, agosto de 2015

Resumen

La presencia de materiales radiactivos en la corteza terrestre y en consecuencia en la superficie, origina la contaminación radiactiva natural en los diferentes materiales sólidos, líquidos, gaseosos; particularmente en el aire que se respira. Entre estos materiales radiactivos contribuyen a la contaminación ambiental el uranio, el radio, el torio y sus respectivas cadenas de desintegración, entre las cuales se encuentra el gas radón (^{222}Rn) que se difunde en el aire; cuya presencia aumenta en zonas donde la actividad sísmica es notoria o debido a otros eventos naturales, caso de la ciudad de Lima-Perú. En este trabajo se muestran las mediciones realizadas durante dos años consecutivos en la azotea del edificio de Física (edificio de tres pisos) en la ciudad de Lima, con la finalidad de establecer las fluctuaciones de este contaminante gaseoso en el aire circundante.

Las mediciones se hicieron usando detectores de nitrocelulosa (LR-115 tipo 2) y aplicando la técnica de huellas nucleares. Los resultados obtenidos nos permiten tener un indicador de la presencia de radón en el aire durante diferentes estaciones del año y también de la presencia de otros posibles contaminantes radiactivos. El uso de esta técnica permite obtener y estudiar las huellas que generan las partículas α que son emitidas durante la desintegración del radón o por sus descendientes o antecesores; y nos permite discriminar entre las trazas de corto alcance o huellas de tipo lineal y otras huellas muy distintas obtenidas durante las mediciones. En este trabajo se muestran los resultados de las mediciones que son analizados de acuerdo a modelos propuestos.

Abstract

The presence of radioactive materials in the earth's crust, i.e. on the earth's surface, causes a natural radioactive contamination in different solids, liquids and gaseous materials, particularly in the air we breathe. Some radioactive materials that contribute to environmental pollution are: uranium, radium, thorium and their decay chains, including radon (Rn222 , gas). The latter diffuses into the air and its presence increases in areas with high seismic activity, as it is the case in the city of Lima, Peru. This paper presents measurements taken during two consecutive years on the roof of a three-story building in the city of Lima. The data served to establish the fluctuations of this pollutant gas in the surrounding air.

The measurements were made with nitrocellulose detectors (LR-115 type 2), by applying the nuclear track detector technique. Our results provided us with an indicator of the presence of Rn222 in the air during different seasons and of other possible radioactive contaminants as well. The use of this technique allows us to obtain and study the tracks generated by alpha particles that are emitted during the decay of Rn222 and their daughters or parents. We can discriminate between short-range tracks, linear tracks and other very different tracks that are obtained from measurements. We have analyzed our measurement results according to some proposed models.



A DIOS.

A mis amados padres, Alberto y Lina.

A mi hermanita Gaby.

A mi abuela María.

A mi amor Alexandra.

Índice general

Resúmen	II
Abstract	III
Introducción	1
1. Fundamentación teórica	2
1.1. ¿Qué es la radiactividad?	2
1.1.1. Radiactividad natural	2
1.1.2. Radiactividad artificial	3
1.2. Radiación ionizante	4
1.2.1. Partículas alfa	4
1.2.2. Decaimiento alfa	4
1.3. Radón ²²²	5
1.3.1. Riesgos por la presencia de radón	5
1.3.2. Detección de radón y aplicaciones	6
1.4. Interacción entre partículas α con la materia	7
1.4.1. Ionización específica	9
1.4.2. Poder de frenado	9
1.4.3. Rango/Alcance	11
1.4.4. Polímeros usados como detectores de huellas y aplicaciones generales	11
2. Técnicas de detección de partículas α	14
2.1. Técnica de trazas o huellas nucleares	14
2.1.1. Principios básicos de la técnica	14
2.1.2. Proceso de grabado	15
2.1.3. Formación de las huellas nucleares	15
2.2. Formas de las huellas de las partículas α	16

3. Detección de partículas en ambientes exteriores	33
3.1. Materiales y metodología	33
3.2. Resultados	37
4. Discusión de resultados	52
5. Conclusiones	54
Bibliografía	56



Índice de figuras

1.1. Desintegraciones	5
1.2. Bragg curve	7
1.3. Parámetros de a en función de Z	10
2.1. Huella Latente	16
2.2. Huella de partículas α formadas con incidencia normal y oblicua.(1)	17
2.3. Huellas de partículas α formadas con una incidencia normal.(1)	17
2.4. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y oblicua.(2)	18
2.5. Huella de partículas α formada con incidencia normal y alta intensidad.(1)	18
2.6. Huella de partículas α formada con incidencia normal y alta intensidad.(2)	19
2.7. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad.(3)	19
2.8. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad.(4)	20
2.9. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad.(5)	20
2.10. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad.(6)	21
2.11. Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad.(7)	21
2.12. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(1)	22
2.13. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(2)	22
2.14. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(3)	22
2.15. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(4)	23
2.16. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(5)	23
2.17. Huella de partículas α formadas con incidencia tangencial.(6)	24
2.18. Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial.(7)	24
2.19. Geometría de la formación de una huella	25

2.20. Evolución del grabado con incidencia normal	26
2.21. Evolución del grabado con incidencia oblicua	27
2.22. V_t variable	28
2.23. Coordenas de los puntos para la huella grabada, según el modelo de Froom et al.	28
2.24. Modelo de Fewes and Henshaw	29
2.25. Modelo de Nikezic and Yu	29
2.26. Modelo de Nikezic and Yu con incidencia normal	30
2.27. Modelo de Nikezic and Yu con incidencia oblicua	31
3.1. EdificioF	33
3.2. Detectores	34
3.3. Croquis	34
3.4. Secado de detectores	35
3.5. Primer método	35
3.6. Segundo método	36
3.7. Poder de Frenado	37
3.8. Contaminación Sur	42
3.9. Contaminación Oeste	43
3.10. Contaminación Norte	43
3.11. Contaminación Este	44
3.12. Contaminación Zenit	44
3.13. Concentración Sur	49
3.14. Concentración Oeste	49
3.15. Concentración Norte	50
3.16. Concentración Este	50
3.17. Concentración Zenit	51

Índice de tablas

3.1. Cálculo del área de visión	36
3.2. Resultados de contaminación desde el 01-06-2011	38
3.3. Resultados de contaminación desde el 14-07-2011	39
3.4. Resultados de contaminación desde el 19-09-2012	40
3.5. Resultados de contaminación desde el 19-12-2012	41
3.6. Períodos	42
3.7. Resultados de concentración desde el 01-06-2011	45
3.8. Resultados de concentración desde el 14-07-2011	46
3.9. Resultados de concentración desde el 19-09-2012	47
3.10. Resultados de concentración desde el 19-12-2012	48

Introducción

El fenómeno de la radiactividad es responsable de la presencia de elementos contaminantes en la naturaleza, debido a la emisión espontánea de partículas y relaciones de los elementos radiactivos que en general poseen un número muy elevado de protones y neutrones. La radiactividad de acuerdo a su origen puede ser natural o artificial; principalmente nos enfocaremos en el tipo de radiación natural; ya que, es debido a las radiaciones terrestres externas e internas donde se producen los porcentajes mayores de contaminantes ambientales. Como radiación externa se considera a la radiación de origen cósmico e interna a la 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. El gas radón entra al ambiente desde el subsuelo proveniente de minas de fosfato y de uranio, de minerales de radio, torio y otros; contaminantes que se adhieren al polvo y a otras partículas en el aire e igualmente puede desplazarse a través de aguas subterráneas. Debido a que la concentración de gas radón puede ser elevada y este gas está siempre presente en el aire que respiramos, se procede a realizar estudios para determinar su concentración en diferentes recintos para luego dar medidas correctivas y así disminuir sus efectos en la salud de la persona. Así mismo los estudios del gas radón se pueden enfocar en posibles pronósticos de terremotos, en el estudio de transporte atmosférico, en la exploración de petróleo y de uranio, y en otras aplicaciones. 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 de origen radiactivo. En la desintegración del gas radón se emiten partículas α . Se determinará y se observará que tipo de huellas nucleares se han obtenido en los lugares previamente determinados y direccionados al igual que medidas de contaminación.

Capítulo 1

Fundamentación teórica

1.1. ¿Qué es la radiactividad?

1.1.1. Radiactividad natural

La radiactividad proviene de la naturaleza sin intervención humana. Su descubridor fue Henri Becquerel¹, en 1896. Los radionúclidos o emisores de radiactividad se encuentran naturalmente en el aire, agua y suelo. Incluso se encuentran en nosotros, como parte de nuestra naturaleza e interacción con nuestro entorno. Diariamente ingerimos y respiramos radionúclidos del aire, agua y alimentos. La radiactividad natural es frecuente en las rocas, en el suelo, en el agua y los océanos, en los materiales de construcción y viviendas. En nuestro universo existen más de 60 radionúclidos, las cuales se clasifican en dos categorías, primordiales y cosmogénicos [2].

Los radionúclidos primordiales son restos de cuando se creó el universo y dentro de nuestro planeta. Por lo general son longevos, con vidas medias a menudo del orden de cientos de millones de años. A continuación se muestran algunos radionúclidos:

1. Uranio 235 (^{235}U), con $7,04 \times 10^8$ años de vida media.
2. Uranio 238 (^{238}U), con $4,47 \times 10^9$ años de vida media, 0.5 a 4.7 ppm de uranio total en los tipos de rocas comunes.
3. Torio 232 (^{232}Th), con $1,41 \times 10^{10}$ años de vida media, 1.6 a 20 ppm en los tipos de rocas comunes con una media de la corteza de 10.7 ppm.
4. Radio 226 (^{226}Ra), con $1,60 \times 10^3$ años de vida media, en piedras caliza y en rocas ígneas.

¹Físico francés descubridor de la radiactividad con el Premio Nobel de Física del año 1903 [1]

5. Radón 222 (^{222}Rn), con 3,82 días de vida media, gas noble en concentraciones en el aire.
6. Potasio 40 (^{40}K), con $1,28 \times 10^9$ años de vida media.

Todos ellos poseen varios miembros en sus cadenas de desintegración.

Por otro lado, la radiación cósmica impregna todo el espacio, su fuente principal está fuera de nuestro sistema solar. En este tipo de radiación se pueden encontrar partículas pesadas de alta velocidad, fotones y muones de alta energía. La atmósfera superior terrestre interactúa con la radiación cósmica y produce núcleos radiactivos. Estos pueden tener una vida media larga, pero la mayoría tienen vidas medias más cortas que las primordiales. A continuación se muestran algunos radionúclidos cosmogénicos comunes:

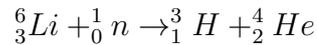
1. Carbono 14 (^{14}C), con 5730 años de vida media, debido a la interacción de rayos cósmicos con N, $^{14}N(n, p) \rightarrow ^{14}C$.
2. Hidrogeno 3 (tritio) (3H), con 12,3 años de vida media, debido a la interacción de rayos cósmicos con N y O, espalación de rayos cósmicos, $^6Li(n, \alpha) \rightarrow ^3H$.
3. Berilio 7 (7Be), con 53,28 días de vida media, debido a la interacción de rayos cósmicos con N y O.

1.1.2. Radiactividad artificial

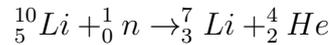
Esta proviene de fuentes creadas por el hombre, generadas por bombardeos de átomos estables con partículas que poseen una gran velocidad; como partículas α , protones, deuterones y neutrones de baja energía. También se generan radioisótopos útiles formados por bombardeo con neutrones en un reactor nuclear (flujo del orden de 10^{12} neutrones/cm² seg). Como ejemplo resaltante tenemos al uranio², el cual cuando se bombardea con neutrones y produce elementos radiactivos; los neutrones hacen que se genere una fisión³ y durante esta fisión se emiten varios neutrones los cuales se pueden usar para romper otros átomos de uranio; aparte del escape de neutrones una consecuencia es el escape de rayos γ desde el núcleo del reactor. Sin embargo, la probabilidad disminuye cuando se habla de emisión o escape de un protón o en el peor de los casos una partícula α ; para aprovechar de manera eficiente la emisión de la partícula menos probable se usa la siguiente reacción:

²El uranio es un metal muy pesado fue descubierto en 1789 por Martin Klaproth y es usado por su abundante capacidad de concentrar energía. [3]

³Cuando un átomo pesado (Uranio, Plutonio) se divide o rompe en dos átomos más ligeros [4]



Esta reacción es utilizada para la producción de tritio (isótopo del hidrogeno de masa 3). Otra reacción (n, α) es:



Estas dos reacciones son muy útiles para la detección de neutrones lentos. Dado que la radiación de estos trae consecuencias en los seres vivos, como protección se usa una construcción que bordea al núcleo hecho de hormigón de cerca de 2 m de espesor [5].

1.2. Radiación ionizante

La radiación es un proceso de propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. Un tipo de radiación que permite la propagación de partículas subatómicas es la radiación ionizante, aquella que es producida por átomos inestables que tienen un exceso de energía o masa o ambas. Los átomos inestables son radiactivos, estos al interactuar con la materia la ionizan, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo [6]. En este trabajo estudiaremos átomos radiactivos que emiten partículas α .

1.2.1. Partículas alfa

Las partículas alfa como tipo de radiación ionizante se generan de la emisión de algunos átomos naturales inestables. Esta partícula fue descubierta por Ernest Rutherford, un científico Inglés, en 1899 mientras trabajaba con el uranio. Esta partícula es idéntica a un núcleo de helio que tiene dos protones y dos neutrones. Es relativamente pesada y posee alta energía, con una carga positiva de 2 de sus dos protones. Su velocidad en el aire es de aproximadamente una vigésima parte de la velocidad de la luz en el vacío⁴.

1.2.2. Decaimiento alfa

La radiación alfa se puede obtener en diferentes cadenas de átomos radiactivos naturales, como es el caso de las cadenas de desintegración del uranio (${}^{238}\text{U}$), (${}^{235}\text{U}$)

⁴299 792 458 m/s [7]

o del Torio (^{232}Th). Se puede encontrar que presentan en común isótopos del gas radón (emisor de partículas α) que se encuentra en gran cantidad en nuestro suelo y por lo tanto en el medio ambiente. A continuación se muestran sus cadenas de desintegración y se observa que hay varios elementos de las cadenas que emiten partículas α , además del radón.

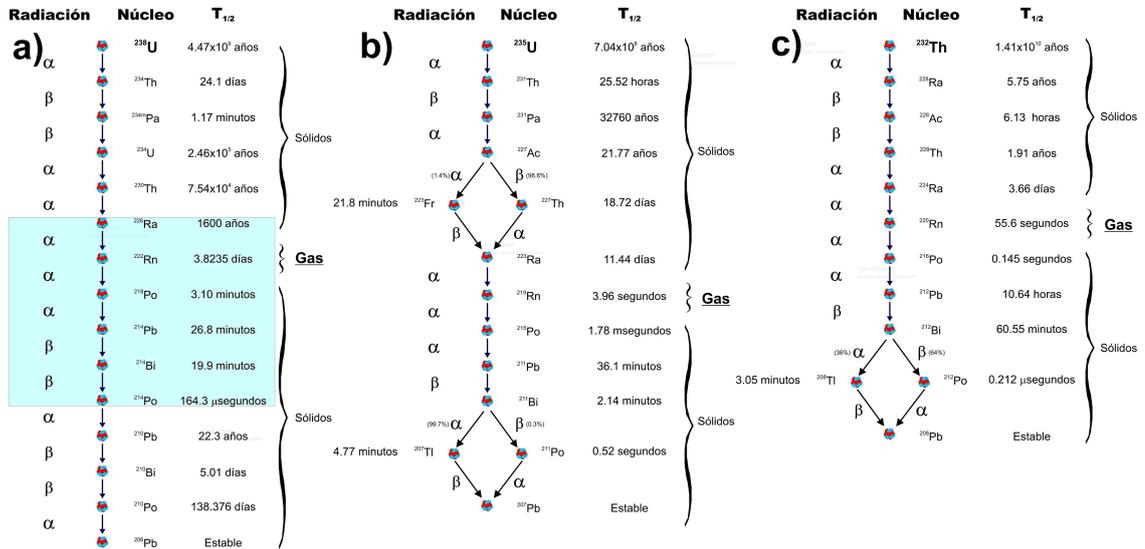


Figura 1.1: Cadenas de desintegración del a) ^{238}U , b) ^{235}U , c) ^{232}Th [8].

1.3. Radón 222

El radón 222 es un gas noble que posee una extremada movilidad y gran solubilidad en agua, es incoloro, inodoro e insípido. Posee un período de vida media o tiempo necesario para que la mitad de los átomos del radón desaparezcan de una muestra, de 3,8 días. Este proviene de la desintegración del radio 226, que a su vez se origina de la desintegración primaria del uranio 238, elemento que forma parte de diferentes tipos de suelos y rocas. El radón sufre un decaimiento radiactivo y cuando decae se divide en dos partes: una parte se llama radiación α y la otra se llama progenie. La progenie, al igual que el radón, es inestable, y también se divide en radiación y en otra progenie. Esta división continúa hasta que se forme una progenie estable, no radiactiva. Durante ese proceso se liberan partículas α , las cuales son detectables mediante técnicas de estado sólido.

1.3.1. Riesgos por la presencia de radón

Debido al carácter gaseoso del radón, porosidad y la permeabilidad de ciertos tipos de suelo y a la diferencia de presión entre el interior del suelo y el aire exterior,

éste puede escapar hacia la superficie y diluirse fácilmente en la atmósfera. Debido a esto es recomendable evaluar posibles riesgos derivados de la inhalación del gas radón y de sus descendientes. Los efectos de este gas pueden ser somáticos inmediatos, los cuales son deterministas (no estocásticos); mientras que los somáticos tardíos suelen ser probabilísticos (estocásticos). Los primeros se producen por irradiaciones intensas recibidas durante un tiempo breve, generalmente inferior a una hora, apareciendo los síntomas después de haber transcurrido un tiempo de unas horas o semanas. Con dosis altas puede presentarse lo siguiente: alopecia, náuseas, vómitos y en casos extremos fallecimientos. En el segundo caso, se puede producir la inducción a largo plazo de diversos tipos de cáncer. Recordemos que el cáncer consiste básicamente en la división incontrolada de células de un tejido u órgano del cuerpo. Este efecto puede ser heredado y provocar finalmente la aparición de un tumor en el tejido u órgano afectado. Otro efecto muy importante es la liberación de las partículas α , las cuales al ser inhaladas pueden alcanzar con facilidad las células de los epitelios y causar en ellas un deterioro importante. Dado esto, la concentración de radón en interiores debe ser controlada y se debe especificar la cantidad máxima de radiación permisible para los seres vivos.

1.3.2. Detección de radón y aplicaciones

En el estudio del radón podemos considerar aplicaciones tecnológicas, desarrolladas o en vías de desarrollo. Se muestran algunas de las aplicaciones más comunes relacionadas con las mediciones de radón [9–17]:

1. Mediciones de Radón en agua de caño, agua natural y subsuelo. Este tipo de medidas son útiles para la prospección de uranio y torio [18, 19].
2. Emanación de radón y exhalación de los materiales del suelo y construcción. En las diferentes áreas de la construcción es importante estudiar e identificar los niveles de radón que provienen del suelo y de los materiales [20, 21]. Con estas medidas se puede caracterizar a los materiales de construcción y suelos con relación al radón [22].
3. Monitoreo de radón en minas u otros lugares subterráneos. Cuando se habla de protección radiológica de los mineros, estas medidas son muy importantes, así también como en estudios epidemiológicos [23, 24].
4. Separación de torón proveniente del radón. Esta separación puede ser realizada; ya que, el torón no puede difundirse muy lejos del lugar de origen y posee un tiempo de vida media muy corto [25, 26].

5. Aplicación en ciencias de la tierra y las mediciones de radón en las cuevas [27,28].
6. Posible pronóstico de terremotos. Se ha observado que las concentraciones de radón en el agua subterránea y en los pozos profundos aumentan significativamente antes de la posibilidad de un evento sísmico [29,30].
7. Estudios volcánicos. El flujo de radón aumenta antes de la erupción volcánica [31].

1.4. Interacción entre partículas α con la materia

Esencialmente la radiación corpuscular y la electromagnética proveniente de los núcleos, como es el caso de las partículas α , interactúan con la materia transmitiendo energía a los átomos y elevando los electrones a un nivel de energía mayor (excitación) o eliminando la totalidad de electrones (ionización). Eventualmente toda la energía dada en eventos de ionización se disipa en la excitación atómica o molecular. La interacción de partículas α puede ser mejor estudiada en gases, mientras que los métodos de estudio de interacciones de la radiación electromagnética dependerá de la energía del fotón. Cuando los gases son ionizados, una corriente eléctrica puede crear un flujo a través del gas. A su vez, la corriente eléctrica puede, bajo condiciones apropiadas, servir como una medida de la intensidad de la radiación. Las partículas α tienen energía homogénea en rangos discretos e ionizan al gas como se ejemplifica en las curvas de Bragg.

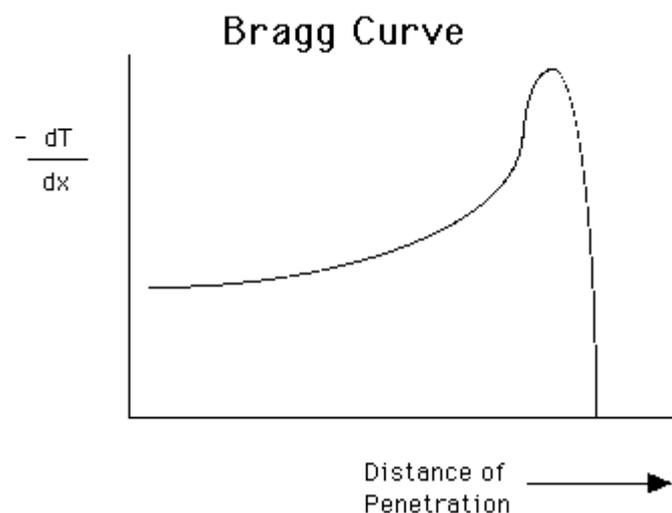


Figura 1.2: Ionización específica (Sec. 1.4.1) en función de la distancia que viaja una partícula cargada [32].

La partícula alfa remueve un electrón de los átomos sin sufrir ninguna desviación de su movimiento rectilíneo siempre y cuando se aproxime al núcleo del átomo. Por otra parte, las partículas α dan la suficiente energía para estos electrones que a su vez pueden ionizar el gas. Ocasionalmente las partículas α penetran cerca del campo del núcleo y luego se dispersan.

La ionización causada por una partícula α en “air at NTP”⁵ es relativamente intensa, con $5,5MeV$ la partícula α pierde toda su energía aproximadamente en $4cm$ de su trayectoria.

Considerando la relación de la velocidad de una partícula α con su alcance residual, se tiene la ley empírica de Geiger,

$$V^3 = a(R - x) \quad (1.1)$$

Donde vemos que

$$\frac{1}{2}MV^2 \propto (R - x)^{\frac{2}{3}} \quad (1.2)$$

La energía cinética de las partículas α , denominada T_α , decrece con la distancia x de acuerdo a la relación.

$$\frac{dT_\alpha}{dx} \propto -(R - x)^{-\frac{1}{3}}; \quad (1.3)$$

o, usando la ecuación 1.1

$$\frac{dT_\alpha}{dx} \propto \frac{1}{V} \quad (1.4)$$

Así como V decrece, la pérdida de la energía cinética por unidad de longitud de su camino debido a la ionización del aire o de otro gas aumenta. Experimentalmente para la fórmula de Geiger los rangos que se mantienen aproximadamente en el “air at NTP” son de $3cm$ y $7cm$. Otro factor importante en la interacción de partículas α con la materia son que estas no poseen doble ionización primaria. Así, cuando las partículas α se transmiten a través de una fina capa de un material homogéneo, éstas reducen su energía en forma definida que se muestra en el material como un camino generado por las partículas [34].

⁵English(aire a temperatura y presión normal): $20^\circ C(293,15K, 68^\circ F)$ y $1 atm$ ($101,325kN/m^2$, $101,325kPa$, $14,7psia$, $0psig$, $30inHg$, $760torr$) [33].

1.4.1. Ionización específica

Uno de los más importantes efectos observados en un medio absorbente penetrado por una partícula cargada eléctricamente con energías de alrededor de MeV es la ionización. Este término designa a la vez un proceso y resultados. El proceso consiste en la colisión de una partícula de alta energía en el que los electrones del medio absorbente se retroalimentan con las energías que les permiten moverse libremente en el medio. En medios gaseosos, aparecen los electrones e iones libres. La ionización específica de una partícula es el número de pares de ion-electrón por g/cm^2 o por cm de penetración al material, medido a lo largo de la huella o traza de la partícula. Esta es una cantidad que se puede determinar fácilmente y con precisión con los métodos de gran sensibilidad. Esto es cierto para medios gaseosos, en cuyo caso los métodos eléctricos directos producen resultados valiosos. Como comparación, se muestra en la bibliografía otros métodos que determinan la pérdida de energía total de partículas, que son, ya sea directo (método calorimétrico) o indirecto (determinación de alcance) [35].

1.4.2. Poder de frenado

El estudio del poder de frenado de las partículas α están determinados por una combinación de ajustes teóricos y experimentales. Recientemente, datos experimentales precisos y teóricos, condujeron a una precisión de alrededor del 1% (para $E > 4MeV$), comparadas con una precisión de alrededor de 10% conforme a teorías más antiguas [36].

Consideremos la pérdida de energía de partículas α con energías $< 10MeV$.

1. La pérdida de energía en efecto *bremmsstrahlung*⁶ es despreciable, debido a que la partícula α posee una gran masa.
2. La pérdida de energía en colisiones con núcleos también es despreciable. Dado que si $E < 0,5MeV \ll 10MeV$, la pérdida de energía en colisiones con el núcleo es 500 veces más pequeño que la pérdida de energía en ionización y excitación.
3. Para energías de $1 - 2MeV$, las partículas α capturan y expulsan electrones constantemente, así que la carga efectiva es menor que $Z = 2$. Pero teóricamente no se obtienen resultados satisfactorios; sin embargo, con la ayuda de

⁶(Alemán: “braking radiation”), es una radiación electromagnética producida por la desaceleración de una partícula cargada. [37]

la parte experimental se puede determinar el poder de frenado en este rango de energía.

4. Para energías mayores que $2MeV$, el poder de frenado es debido solo a la pérdida de energía en colisiones inelásticas con electrones, en la parte teórica las formulas se mantienen.

Para la región de $2 - 10MeV$, la fórmula teórica para la pérdida de energía de las partículas alfa es la denominada "Bethe-Bloch Formula"⁷

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N Z_2 Z_1^2 e^4}{m_0 v^2} \left(\ln \frac{2m_0 v^2}{I^2} + \ln \frac{1}{1 - \beta^2} - \beta^2 - \frac{C}{Z} \right) \quad (1.5)$$

El factor de corrección C/Z el cual constituye la "no participación" de los electrones. La fórmula básica para pérdida de energía es calculada asumiendo que la velocidad de las partículas son mucho mayores que la de los electrones. Para una partícula α que puede ionizar K electrones, este debe tener una energía considerable mayor que $0,025Z^2 MeV$. Aproximadamente, los valores teóricos de las correcciones correspondientes, contribuyen menos que 1% de incertidumbre en $-dE/dx$, calculada recientemente [36].

Para una estimación aproximada, la siguiente fórmula, dada por Whalling [39], a menudo es suficiente:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{0,96 Z_2 N}{E} \left[\ln \left(\frac{E}{Z_2} + a + 1,38 \right) \right] \quad eV cm^2, \quad (1.6)$$

Donde Z_2 es el número de átomos del absorbente (en este caso el detector), N es el número de átomos por centímetro cúbico, y E es la energía de la partícula α , expresados en MeV . La constante a se consigue en condiciones experimentales, como se muestra en la Fig. (1.3).

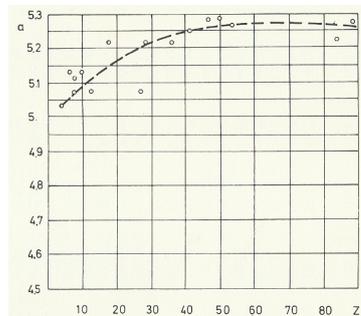


Figura 1.3: Parámetros de a en función de Z [39].

⁷Esta fórmula describe la pérdida de energía por distancia recorrida de partículas cargadas sobre un material de desplazamiento [38]

La incertidumbre probable en esta fórmula es $\pm 10\%$. Esto incrementa para energías menores que $Z_2/5MeV$, y la fórmula no puede ser usada para energías menores que $2MeV$ [40].

1.4.3. Rango/Alcance

Una partícula cargada que se mueve a lo largo de un medio neutral interactúa electromagnéticamente con los electrones y los núcleos de la materia. La interacción electromagnética que se produce con cada núcleo causa una dispersión de Rutherford y se observa un pequeño cambio despreciable en su dirección. La interacción con los electrones son mucho más frecuente y origina que pierda su energía cinética.

El rango de una partícula se puede determinar integrando $\frac{dE}{dx}$ ⁸ a lo largo de la energía de la partícula.

$$R(E) = \int_0^E \frac{dE'}{-\frac{dE'}{dx}} \quad (1.7)$$

1.4.4. Polímeros usados como detectores de huellas y aplicaciones generales

El término polímero engloba a una gran cantidad de materiales naturales como sintéticos. La molécula del polímero está formada por la unión, mediante enlaces covalentes, de moléculas más pequeñas denominadas monómeros. La transformación monómero/polímero se lleva a cabo mediante las reacciones de polimerización.

Dentro de este término genérico se pueden incluir sustancias conocidas como la celulosa, el almidón, las proteínas, las pieles, la lana, el algodón, fibras sintéticas basadas en poliésteres y poliamidas, los popularmente conocidos como plásticos (polietilenos, poliestirenos, polipropilenos, PVC, etc.), los cauchos (elastómeros), las pinturas, los adhesivos, etc [41].

La celulosa, es el polisacárido principal en las paredes celulares de las plantas, es químicamente poli $\beta(1 \rightarrow 4)$ D-glucosa, cuya estructura molecular consiste en unidades repetitivas de celobiosa. Los tres hidroxilos que se encuentran en su estructura, dan lugar a una red estable de enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares que determina el comportamiento físico y químico del polímero. El derivado más antiguo de la celulosa es el nitrato de celulosa el cual es el éster inorgánico más importante a escala industrial (industria del celuloide), se preparó por primera vez en 1833 con aplicación como explosivo militar [42].

⁸Ecuación de Bethe Bloch (Sec. 1.4.2)

Como detectores de huellas nucleares se usan películas delgadas de un nitrato de celulosa especial, de color rojo, revestido sobre un poliéster base de espesor 100micras , este poliéster tiene propiedades de resistencia a diferentes efectos externos, por esto se usa como base. Solo uno de los lados de estas películas es sensible. Se debe tener en cuenta que esta parte sensible puede sufrir deformaciones por arañazos u otro elementos punzo cortantes. Está película se puede encontrar con el nombre de KODAK LR-115 tipo I o II, en donde el tipo dependería del grosor de la nitrocelulosa; ya que este detector está compuesto por dos polímeros la nitrocelulosa como superficie y el poliéster como base. Estas son muy sensibles a las partículas α demostrados en otros estudios o experiencias [43]. Debido a esto se usan principalmente en dosimetría de pequeñas cantidades de partículas ionizantes como la α [44]. Para este trabajo se usarán detectores LR-115 tipo II, en otras palabras $12\mu\text{m}$ de nitrocelulosa y $100\mu\text{m}$ de poliéster base.

En general se tienen aplicaciones relacionadas con el uso de detectores de estado sólido, tenemos:

1. En muchas áreas de la física nuclear para la identificación de los productos de algunas de las reacciones en bajas y altas energías.
2. Producción de microfiltros. Filtros a escalas menores al nanómetro aprovechando las huellas nucleares [45].
3. Dosimetría de neutrones y física de reactores. Después de la colisión de un neutrón con un protón en un detector de materiales, se forma un protón de retroceso que puede dejar una huella latente en el detector. Esta es la base para mediciones de neutrones con los detectores de trazas [46, 47].
4. Mediciones de neutrinos. Estas son partículas neutras con masa muy pequeña creados en desintegraciones beta y muy difíciles de detectar. Los neutrinos solares y otros neutrinos son fácilmente medidos por detectores de gran magnitud [48].
5. Mediciones de dosis radiactivas en el espacio y aviones.
6. Huellas de fisión. La fisión espontánea de ^{238}U se produce con una pequeña probabilidad. Algunos minerales naturales contienen cierta cantidad de ^{238}U y pueden almacenar huellas que producen fisiones. Como el número de huellas crece con la edad de los minerales, después esto puede ser determinado en base al conocimiento de las concentraciones de ^{238}U [49, 50].

7. Física de altas energías y rayos cósmicos. Los rayos cósmicos pueden producir huellas en minerales naturales con orientaciones dominantes. Las huellas pueden ser utilizadas para la identificación de partículas y estudio de los rayos cósmicos. Las huellas de los rayos cósmicos también pueden observarse en los meteoritos [51].
8. Medicina y biología. Nuevas aplicaciones de los detectores de trazas se han encontrado en investigaciones sobre efectos de las partículas α sobre las células vivas que se cultivan en los propios detectores [52, 53].



Capítulo 2

Técnicas de detección de partículas α

Entre los métodos o técnicas de detección de partículas α se clasifican algunos de acuerdo al tipo de respuesta del material usando como detector:

1. Espectrómetros, aquellos que miden la energía de las partículas, mostrando el espectro completo del haz de radiación.
2. Dosímetros, los que permiten medir la dosis de radiación que producen las radiaciones ionizantes.
3. Detector de trazas o huellas nucleares. Pueden ser de estado sólido, líquido y gaseoso. Los de estado sólido pueden ser cristalinos, vidrios, micas, polímeros, etc.

En este trabajo se usan como detectores de huellas nucleares a la nitrocelulosa LR-115 por su sensibilidad y bajo costo.

2.1. Técnica de trazas o huellas nucleares

2.1.1. Principios básicos de la técnica

En principio una técnica de huellas nucleares permite observar las trazas o huellas que dejan a su paso las partículas cargadas en una radiación ionizante. En los detectores de estado sólido, en este caso el polímero LR-115 actúa como materiales dieléctrico de estado sólido, similarmente a cómo se comportan algunos cristales, donde se registraron las huellas de las partículas α .

Aunque los efectos de las huellas pueden ser registrados en muchos materiales, en este polímero debido a su alto peso molecular, se manifiestan como una característica pronunciada. En esta técnica en comparación con otras, se pueden obtener los datos de manera perenne. Igualmente mediante una adecuada relación de parámetros se pueden indentificar algunas características de las partículas incidentes.

Para determinar la formación de estas huellas se usan algunos parámetros relacionados con este proceso, los cuales se explicarán con más detalle a continuación.

2.1.2. Proceso de grabado

Como vimos anteriormente, el proceso de grabado es indispensable para la formación de las huellas en los detectores de huellas nucleares de estado sólido, particularmente en el caso de los polímeros.

Las películas irradiadas son grabadas en condiciones estándares. Para el polímero LR-115 se aplica una solución de $NaOH$ 2,5N a una temperatura de 60° hasta que el material pierda una cierta cantidad de espesor, estas características fueron obtenidas en un trabajo de investigación de la PUCP y otros estudios anteriores [54,55]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la velocidad de grabado varía con la agitación manual, lo que significa que el proceso de grabado debe ser controlado con la temperatura, la concentración de la solución, duración de grabado y agitación uniforme de la solución [56].

2.1.3. Formación de las huellas nucleares

En la formación de las trazas nucleares de las partículas α en el polímero LR-115 se sigue un procedimiento explicado muy detallado en cada etapa de la aplicación de la técnica [57].

1. Primero se elige el lugar de estudio donde se colocarán los detectores de estado sólido (LR-115). Una vez ubicados, permanecerán registrando la radiación α durante un cierto período de tiempo. Durante este período, las partículas α interaccionan con la materia, ionizandola (Sec.1.4.1). En esta parte del proceso se produce la ionización primaria y/o secundaria; en esta primera etapa se forma la huella llamada *huella latente*, como se muestra en la Fig. (2.1) [58].

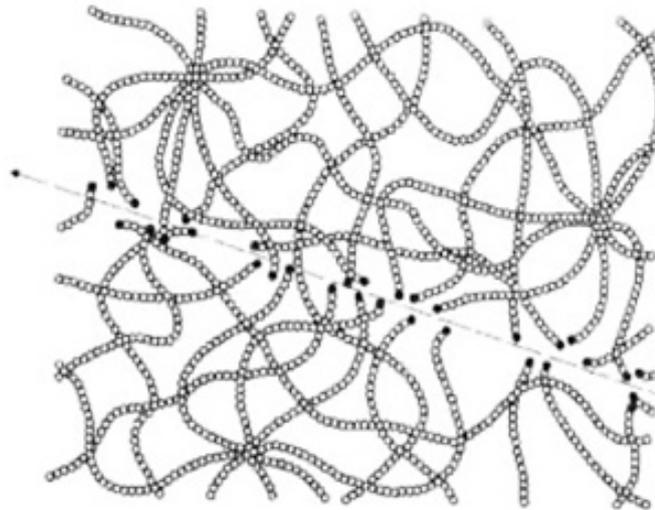


Figura 2.1: Huella latente formada por una partícula α en un detector polimérico [9].

2. En la segunda parte del proceso, se realiza el baño químico (*etching*) con las condiciones especificadas en la Sec.2.1.2. La acción de la solución química es ensanchar las huellas para una posterior observación en un microscopio óptico (lectura de los detectores).

2.2. Formas de las huellas de las partículas α

En la bibliografía se han reportado huellas o trazas nucleares de diferentes formas, dependiendo del tipo de detectores usados, energías de las α detectadas, sitios de la detección, etc.

A continuación, se muestran diferentes huellas o trazas nucleares obtenidas en el laboratorio de Física Experimental de la PUCP, en algunos casos se ha usado fuentes de luz de diferente color para la imagen:

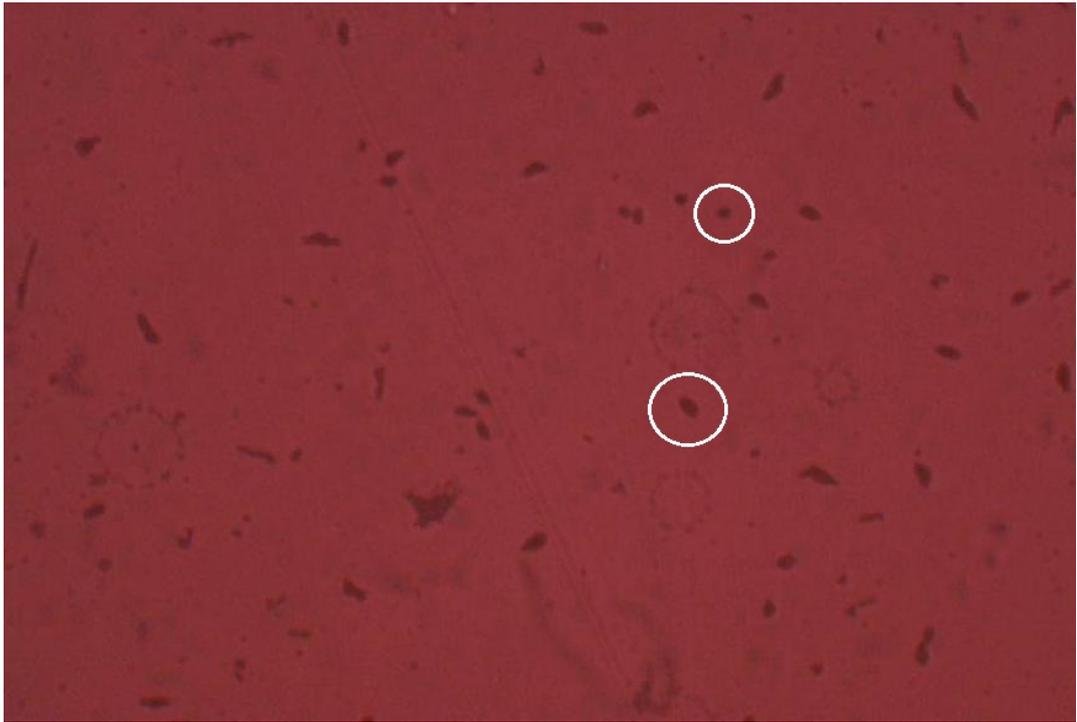


Figura 2.2: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y oblicua. (Microscopio con alcance 10x)

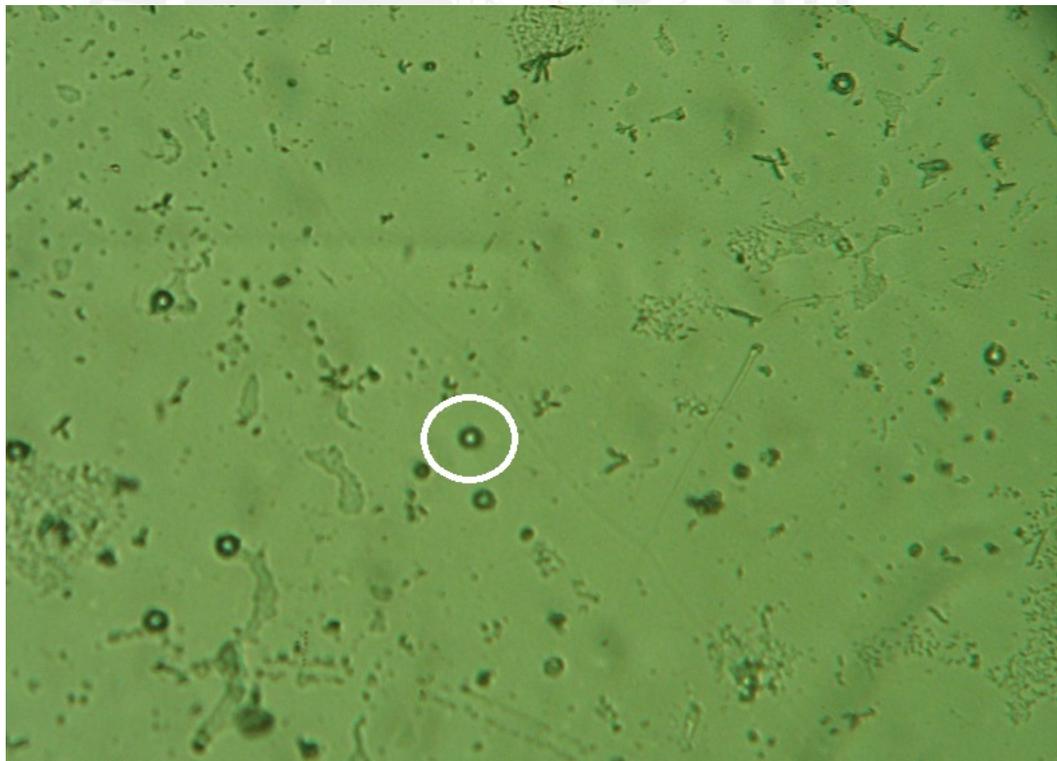


Figura 2.3: Huellas de partículas α formadas con una incidencia normal. (Microscopio con alcance 10x)

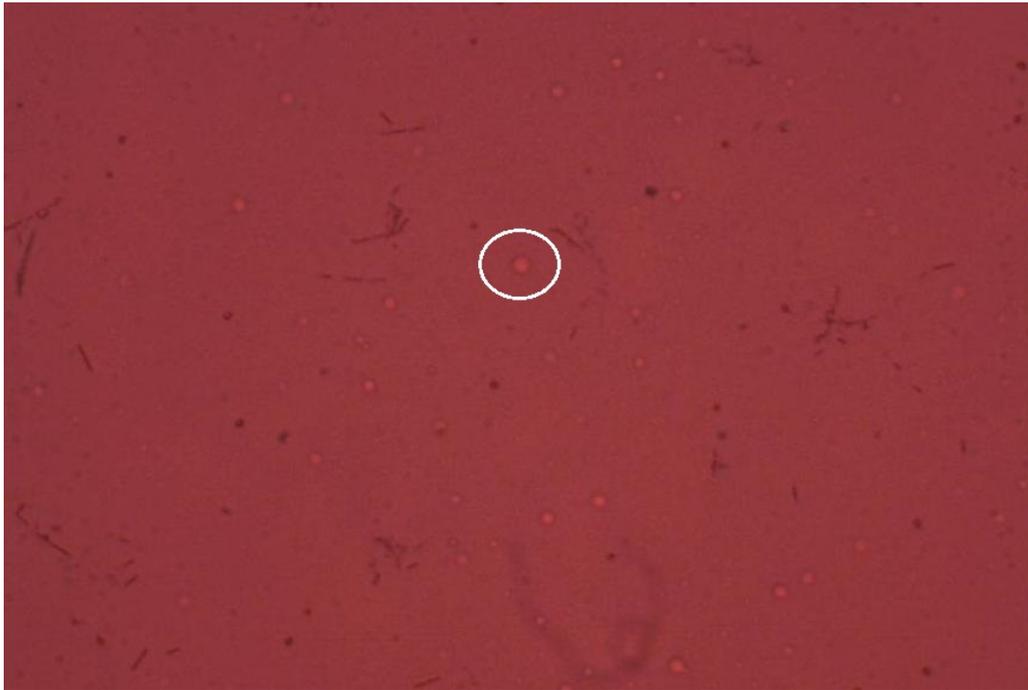


Figura 2.4: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y oblicua. (Microscopio con alcance 10x)

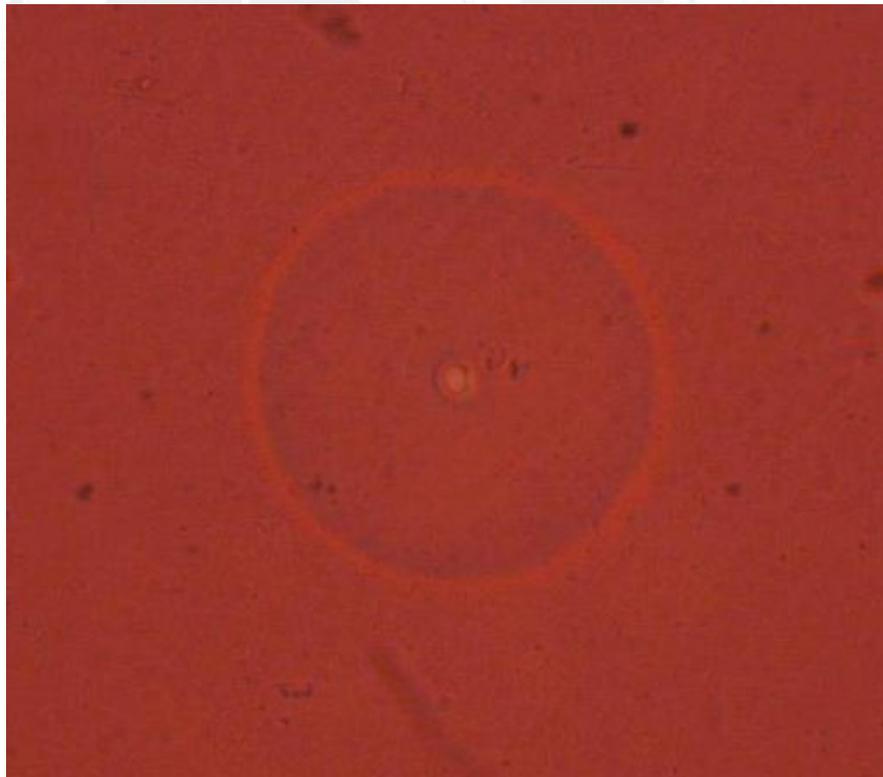


Figura 2.5: Huella de partículas α formada con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

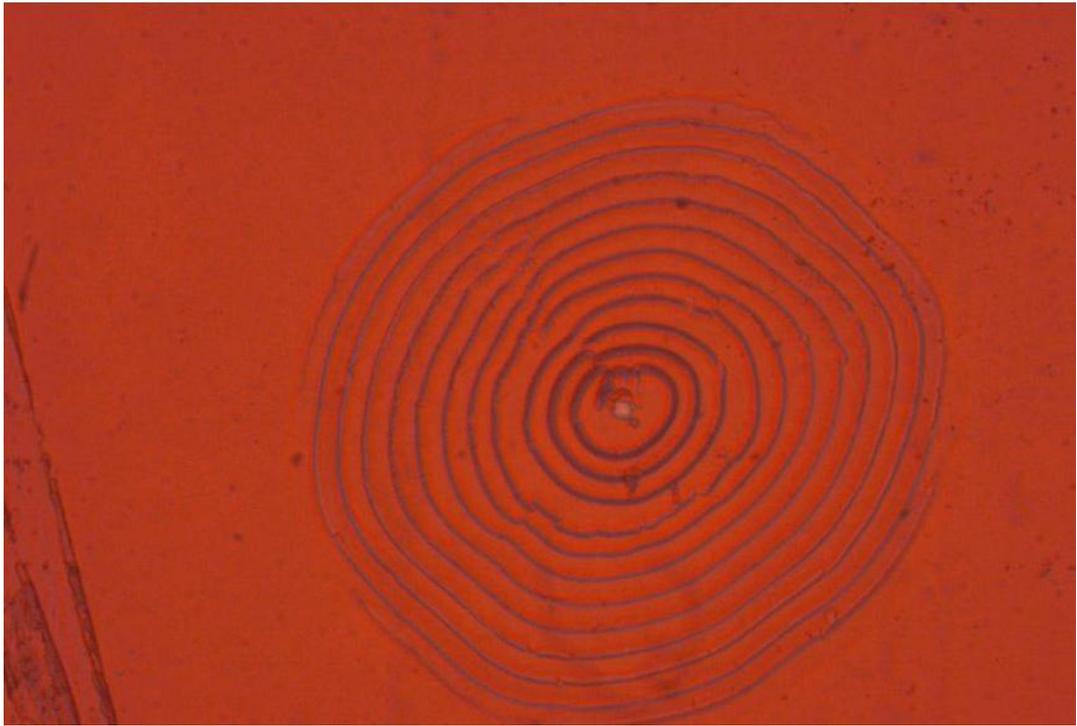


Figura 2.6: Huella de partículas α formada con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

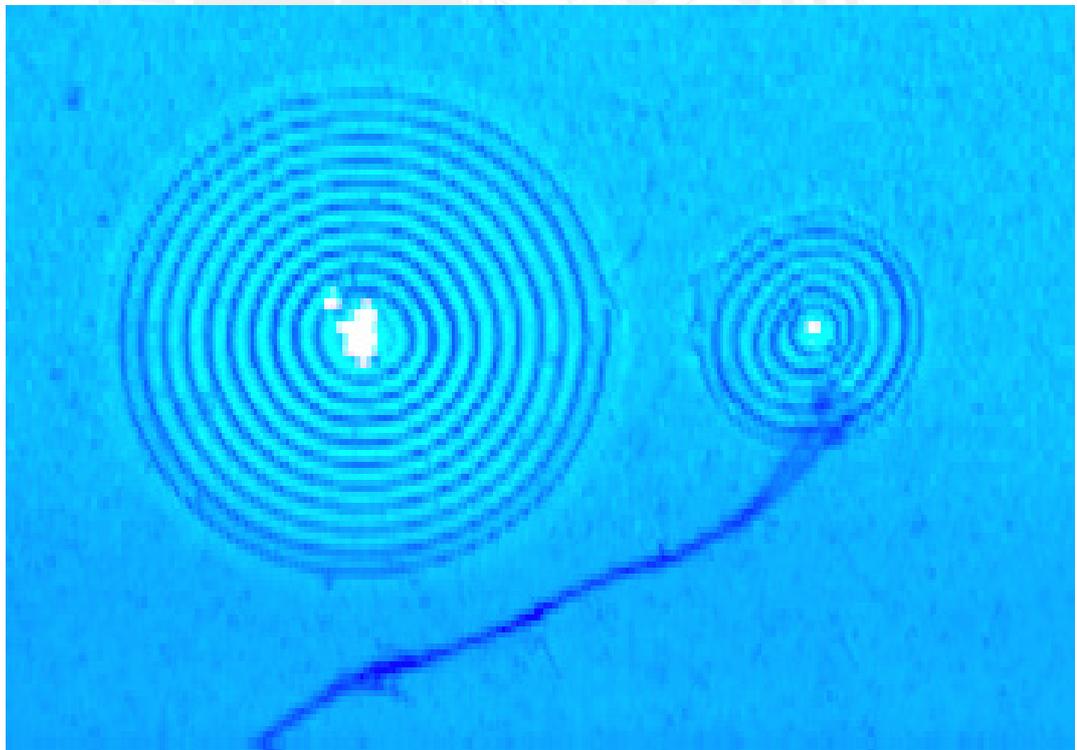


Figura 2.7: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

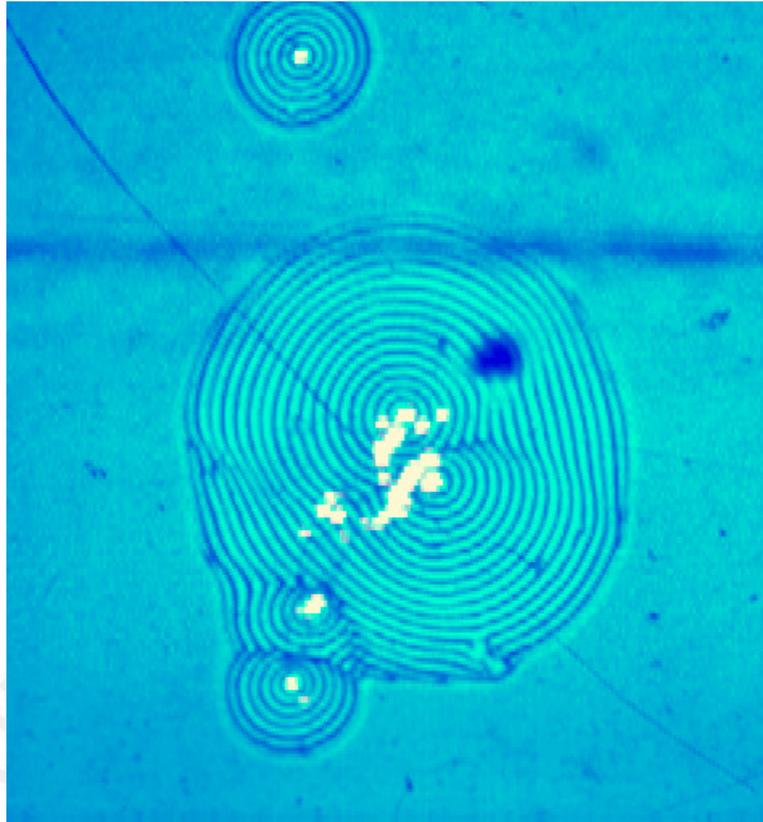


Figura 2.8: Huella de partículas α formada con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

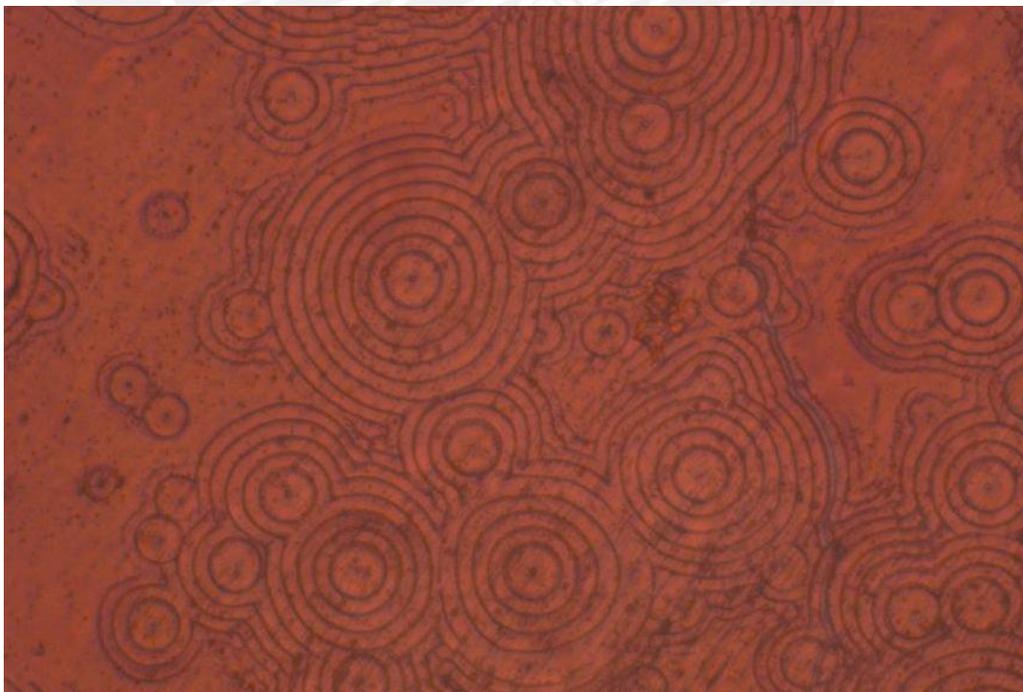


Figura 2.9: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

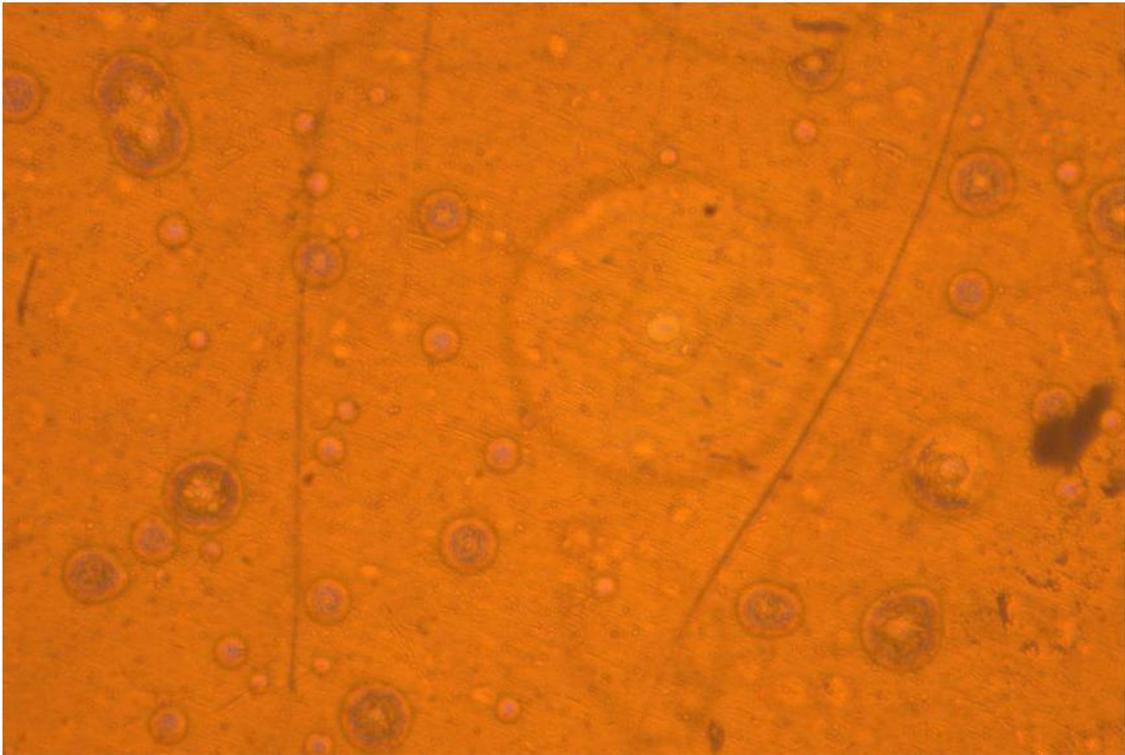


Figura 2.10: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)

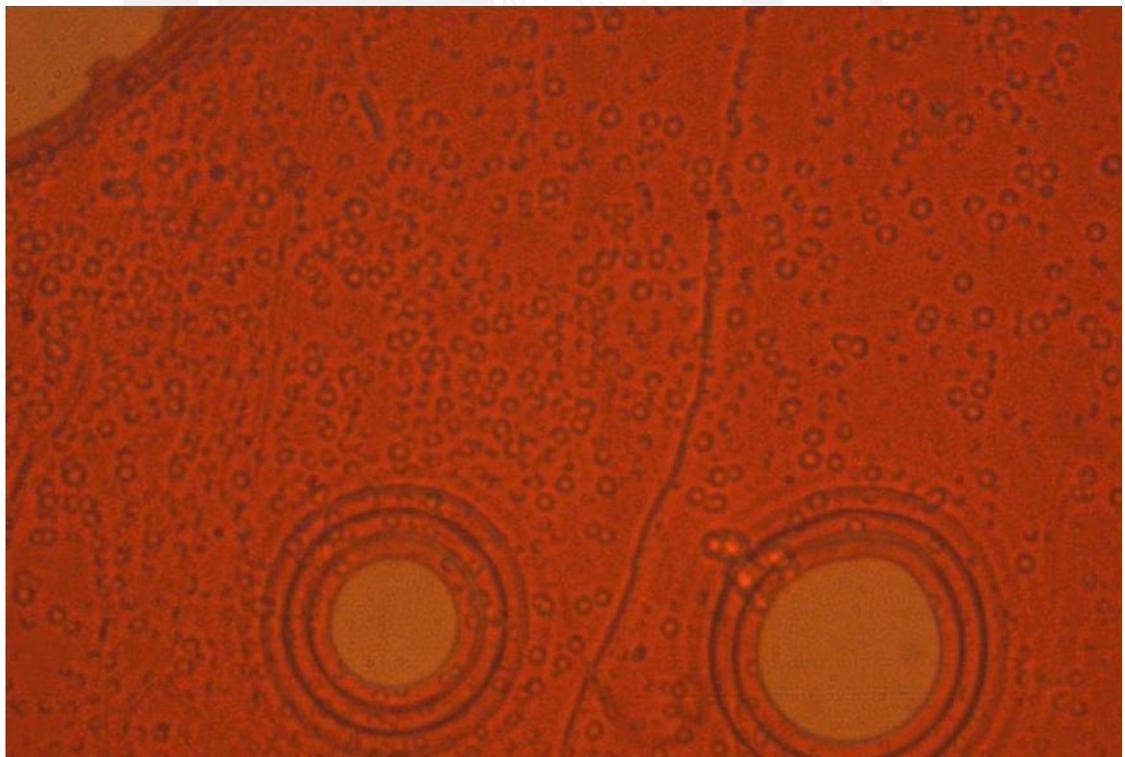


Figura 2.11: Huellas de partículas α formadas con incidencia normal y alta intensidad. (Microscopio con alcance 10x)



Figura 2.12: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. Se aprecian los frentes de ondas generados por el paso del haz primario. (Microscopio con alcance 20x)

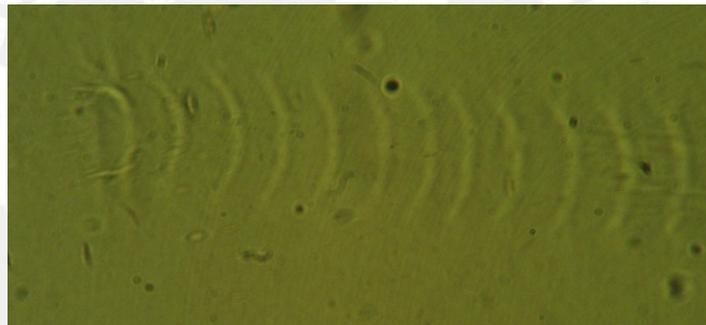


Figura 2.13: Huella de partículas α formada con incidencia tangencial. Se aprecian los frentes de ondas generados por el paso del haz primario. (Microscopio con alcance 20x)



Figura 2.14: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. Se aprecian los frentes de ondas generados por el paso del haz primario y secundario. (Microscopio con alcance 20x)

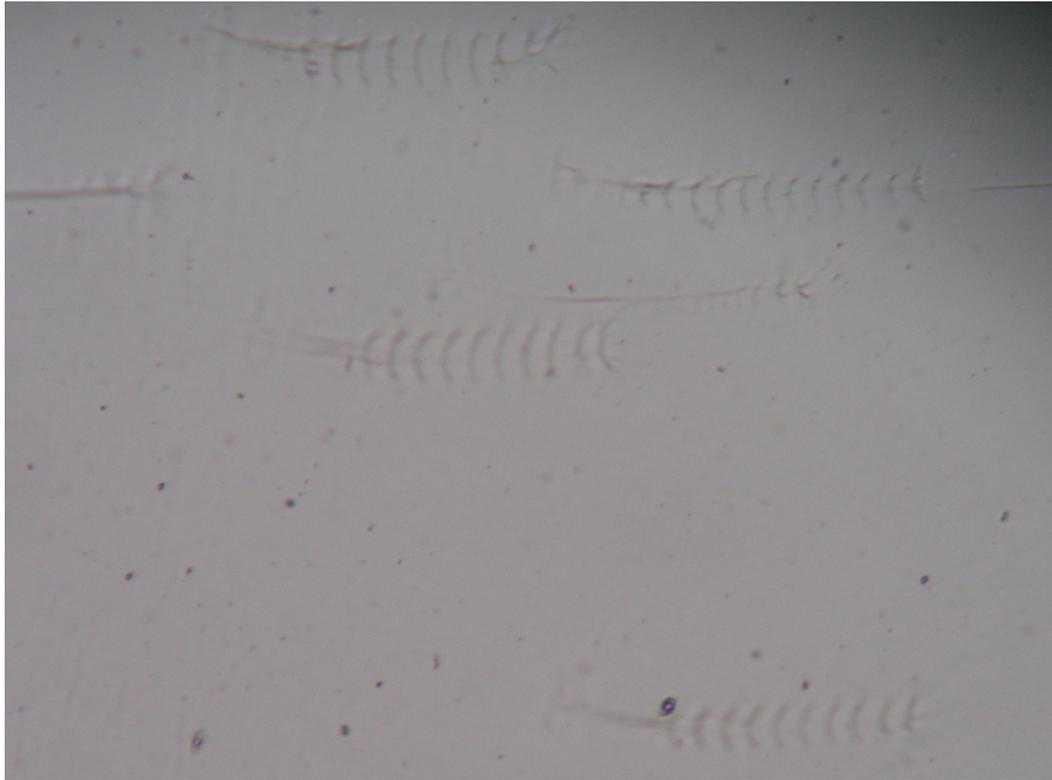


Figura 2.15: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. Se aprecian los frentes de ondas generadas por el paso del haz primario y secundario. (Microscopio con alcance 20x)

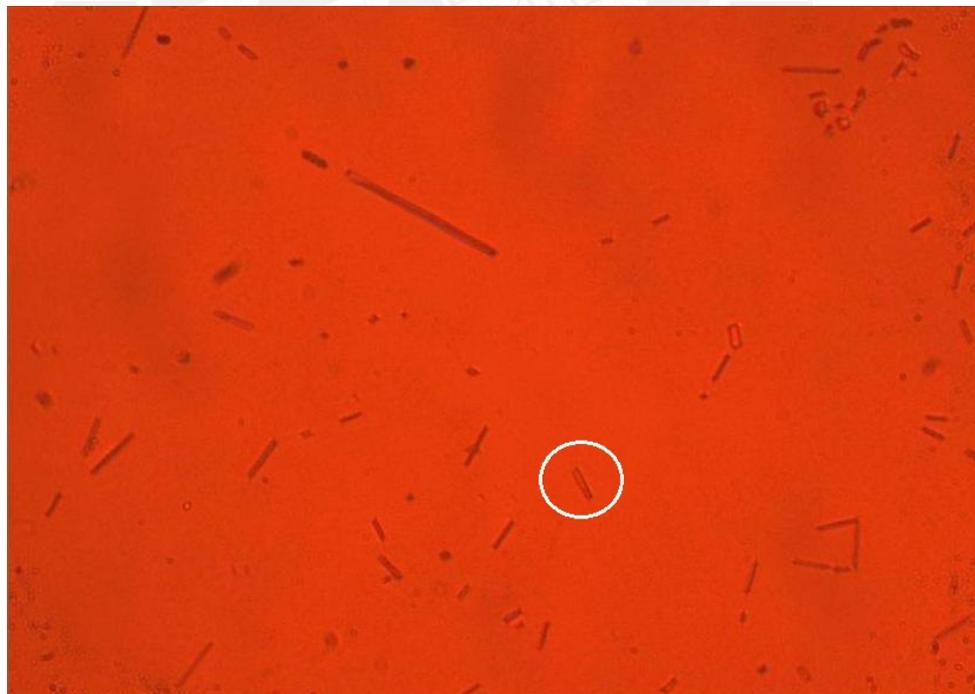


Figura 2.16: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. (Microscopio con alcance 20x)



Figura 2.17: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. (Microscopio con alcance 10x)



Figura 2.18: Huellas de partículas α formadas con incidencia tangencial. Se aprecian los frentes de ondas generadas por el paso del haz primario y secundario. (Microscopio con alcance 20x)

En el caso simple de una huella formada por partículas α con incidencia normal sobre la superficie del detector (LR-115) y con velocidad constante V_t , como se muestra en el diagrama de la Fig. (2.19) se pueden definir varios parámetros de interés que permiten describir el contorno de la huella y algunas características de

las partículas α relacionadas con el detector.

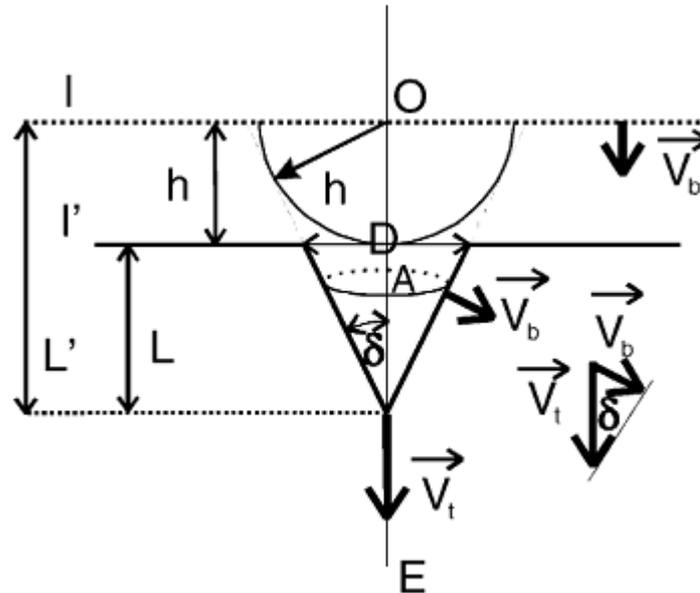


Figura 2.19: Geometría de la formación de una huella. Con una incidencia normal y un V_t constante [57].

En esta figura, I es la superficie inicial del detector, I' es la superficie luego del baño o grabado (*etching*), V_t es la velocidad de grabado a lo largo de la trayectoria de la partícula (*track etch rate*), V_b es la velocidad de grabado de la región dañada por la partícula (*bulk etch rate*), O es la entrada de la partícula y E es el punto final de la trayectoria de la partícula en el detector, y $OE = R$ es 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.

La formación de la huella durante el ataque químico puede ser simulado análogamente a la propagación de ondas. Se considera frentes de onda propagándose por un objeto que se mueve con una velocidad de V_t , de acuerdo al principio de Huygen's [59]. En el caso de las huellas grabadas en el polímero se puede considerar a un hemisferio de radio $h = V_b t$ (t es el tiempo de grabado) formado por cada punto de la superficie del detector, excepto en la dirección del camino de la partícula donde el grabado avanza con la velocidad V_t .

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 forma o no, en otras palabras, la huella se forma solo cuando se cumple la condición $V > 1$. También se tiene como parámetro al ángulo δ del cono que se forma luego del grabado. Se

obtiene la siguiente relación entre estos dos parámetros [60]:

$$\sin \delta = \frac{1}{V} \tag{2.1}$$

Con la definición de estos parámetros se puede distinguir en la formación de las huellas de las partículas α , entre aquellas formadas con velocidad V_t constante e incidencia normal u oblicua, de las formadas con velocidad V_t variable e incidencia normal u oblicua.

Geometría de la huella para V_t constante:

- V_t constante e incidencia normal

Según la Fig. (2.19) se puede establecer la siguiente relación:

$$L = (V_t - V_b) t, \tag{2.2}$$

También se puede relacionar mediante semejanza de triángulos:

$$\tan \delta = \frac{\frac{D}{2}}{L} = \frac{h}{\sqrt{L^2 - h^2}} \tag{2.3}$$

Combinamos la Ec. (2.2) y Ec. (2.3), se puede encontrar el diámetro de la abertura de la huella:

$$D = 2h \sqrt{\frac{V_t - V_b}{V_t + V_b}} \tag{2.4}$$

Como se ve, el diámetro depende del tiempo como se muestra en la Fig. (2.20).

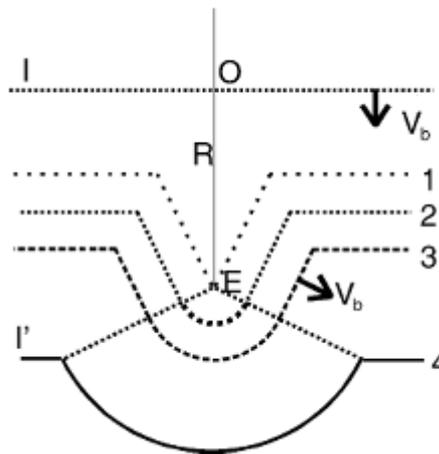


Figura 2.20: Evolución del grabado de una huella formada por una partícula con incidencia normal y V_t [57].

Se observa que las distintas fases evolucionan con la velocidad V_b , la primera fase tiene una forma cónica regular y mientras llegamos a un sobregrabado se puede llegar a una forma semi-esférica como se muestra en la fase 4 de la Fig. (2.20).

- V_t constante e incidencia oblicua

Este problema fue desarrollado por Somogyi y Szalay [61]. La abertura de la huella luego del grabado es de forma elíptica. Esta elipse está caracterizada por dos parámetros importantes, el eje mayor D y el eje menor d . Igualmente que la incidencia anterior, luego de un sobregrabado, la forma de la huella se puede convertir en semi-esférica. En la Fig. (2.21) se puede observar tres fases en el proceso de grabado.

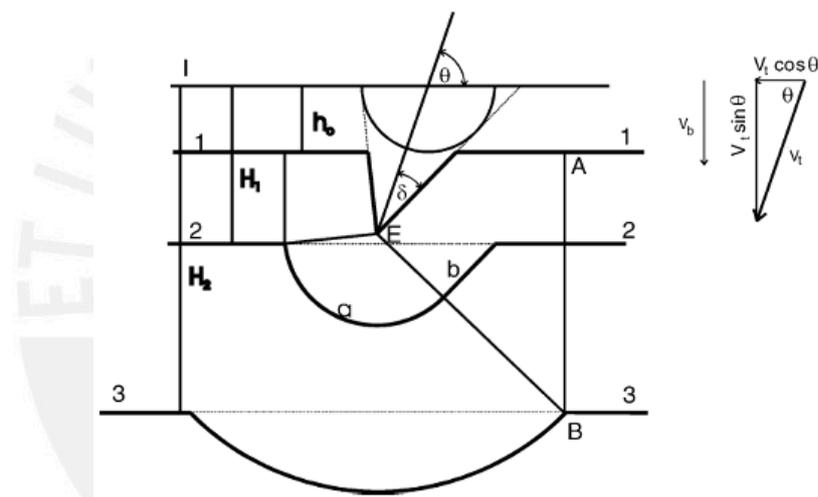


Figura 2.21: Evolución del grabado de una huella formada por una partícula con incidencia oblicua y V_t [57].

Mediante relaciones sencillas se pueden obtener los ejes en cada fase como se muestran en el trabajo de Somogyi y Szalay [61].

Geometría de la huella para V_t variable.

Para casos más realistas no se puede considerar la velocidad V_t constante, por lo que el valor de esta velocidad se considerará variable. Muchos autores han desarrollado modelos y métodos que permiten describir la formación de la huella en estos casos. Una diferencia entre las formadas con V_t variable, es que las huellas no tiene una forma cónica regular, ahora es una forma semi-cónica con una abertura muy diferente a una elipse (*egg curve*).

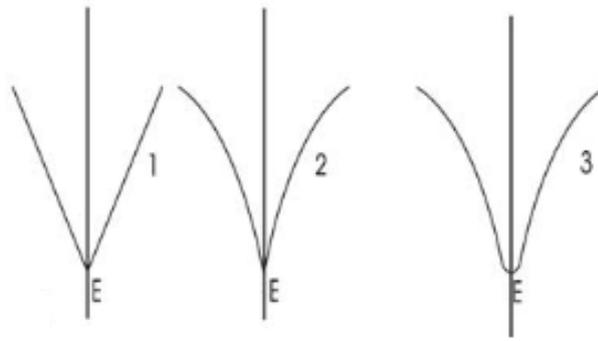


Figura 2.22: Formas de la huella: 1 para V_t constante, 2 para V_t variable con un valor máximo en la parte final del camino de la partícula, 3 para V_t variable con un valor máximo antes de la parte final del camino de la partícula [57].

Esta diferencia mostrada en la Fig. (2.22), donde 1 muestra una huella con V_t constante, 2 y 3 son distintos modelos para una V_t variable.

Para este parámetro V_t variable se puede considerar algunos modelos referidos en la literatura correspondiente:

Modelo de Somogyi Szalay [61], en este modelo las ecuaciones que gobiernan la transición de fase son las ecuaciones del V_t constante modificadas, esta solución requiere el método de iteración.

Modelo de Fromm et al. [62], este modelo ya fue presentado en publicaciones anteriores [63]. Este modelo también es en 2 dimensiones y bi-paramétrica, el esquema o diagrama del modelo se presenta en la Fig. (2.23).

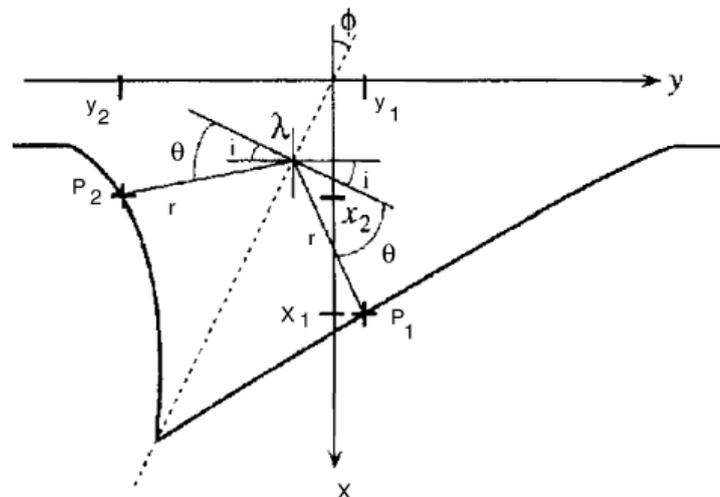


Figura 2.23: Coordenadas de los puntos que constituyen las paredes de la huella grabada en sección planar [57].

De la figura anterior se puede encontrar cada punto y describir las paredes de la huella grabada mediante relaciones geométricas.

Modelo de Fewes and Henshaw [64], en este modelo se hicieron hincapié en que una huella puede ser analizado por cinco parámetros, la profundidad del camino Z , el eje mayor D , el eje menor d , longitud total de la huella X , diámetro de la parte final de la huella grabada m . Las características de la huella de las partículas α y los parámetros utilizados se muestran en la Fig. (2.24).

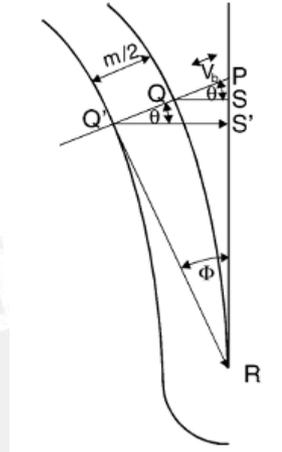


Figura 2.24: Parte de la sección vertical de la huella de la partícula α sobregrabada [64]. R es el final de la trayectoria, se estima que la partícula tiene un alcance residual $PR = r$ en el punto P.

Modelo de Nikezic and Yu 1 [65], este modelo se basó en el supuesto de las ecuaciones conocidas para la pared de las huellas para el caso de dos dimensiones, como se aprecia en la Fig. (2.25).

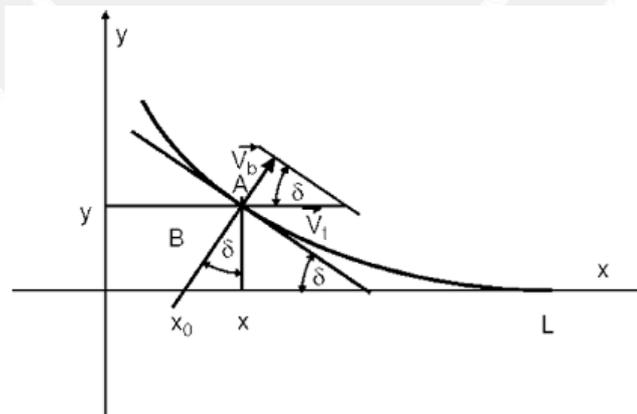


Figura 2.25: Geometría de la pared de la huella en dos dimensiones [65]. El camino de la partícula a lo largo del eje x .

En este caso se puede obtener mediante relaciones geométricas, la ecuación bidimensional del contorno de la abertura de la huella y de la pared de esta Ec. (2.5).

$$\sqrt{x^2 + y^2} = F(z, L) \tag{2.5}$$

Donde la función F esta expresada para 3 dimensiones. Si nos referimos a esta función en 2 dimensiones y usando la Fig. (2.25) se puede obtener que:

$$y = \int_x^L \frac{dx}{\sqrt{V^2(x) - 1}} \approx F(x, L) \tag{2.6}$$

Y se pueden distinguir dos casos de este modelo (Nikezic and Yu):

- Incidencia normal: El modelo esquemático para este caso se muestra en la Fig. (2.26).

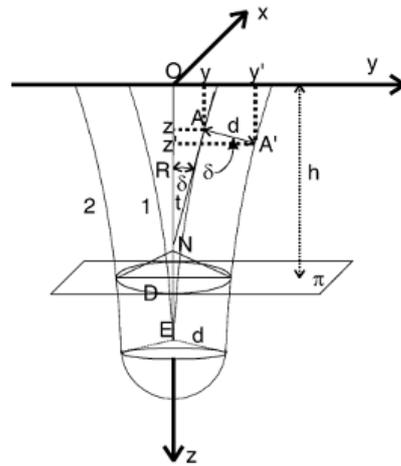


Figura 2.26: Una huella grabada donde O y E son la entrada y parte final del camino de la partícula, $R = OE$ es el rango de las partícula [65].

Para encontrar el diámetro del contorno y la ecuación de la pared de la huella, se usa la Fig. (2.25) mediante relaciones apropiadas se obtiene la ecuación del contorno de la abertura de la huella como se muestra en la Ec. (2.7).

$$\sqrt{x^2 + y^2} = F(z - d \sin \delta, R) + d \cos \delta \tag{2.7}$$

Donde F es la función explicada anteriormente (Ec. (2.6)), se observa también la ecuación del diámetro en la parte izquierda de la Ec. (2.7).

- Incidencia oblicua: Esta situación es más complicada que la anterior. Sin embargo, si se aplican dos transformaciones del sistema de coordenadas, el problema se puede simplificar de manera significativa. En este caso se forma una abertura semi-elíptica, la nomenclatura es similar a las anteriores figuras pero en este caso hay un nuevo parámetro, θ , que es el ángulo de incidencia. Esta geometría se presenta en la Fig. (2.27).

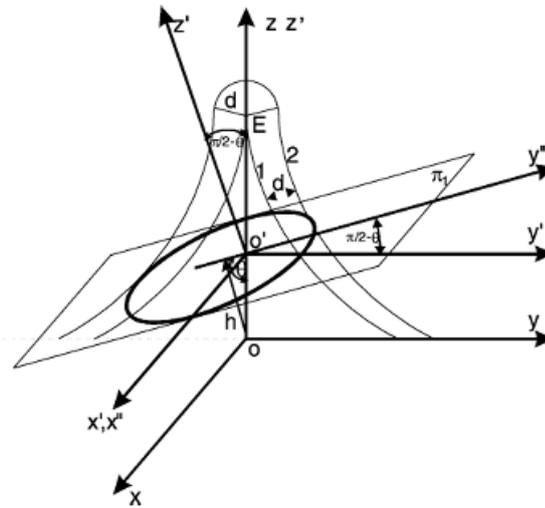


Figura 2.27: Abertura de la huella en la fase semi-elíptica [65].

En esta figura se observa que el plano π_1 representa la superficie después del grabado y h es el grosor removido por el grabado. Similarmente, mediante relaciones geométricas se puede obtener la ecuación de la pared de la huella grabada para tres dimensiones en incidencia oblicua, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sqrt{x''^2 + y''^2 \sin^2 \theta} = F(y'' \cos \theta + z_o - d \sin \delta, R) + d \cos \delta \quad (2.8)$$

Donde F es la función anterior (Ec. (2.6)) pero para tres dimensiones. Para calcular los ejes se usan las siguientes condiciones, para obtener el eje mayor hacemos $x'' = 0$ en la Ec. (2.8); para el eje menor, sustituimos el valor máximo de y para encontrar el x_{max} y reemplazarlo en $d = 2x_{max}$.

Discusión sobre la velocidad V_b (*bulk etch rate*)

Este es uno de los dos parámetros importantes introducidos por Fleischer et al. [9]. Se ha establecido que este parámetro se incrementa con la temperatura del grabado [9], como se muestra en la Ec. (2.9).

$$V = V_o \exp \frac{-\varepsilon_o}{kT}, \quad (2.9)$$

Donde T es la temperatura en *Kelvin*, ε_o es la activación de la energía en *eV*, k es la constante de Boltzmann y V_o es la constante proporcional.

Dado esto, se considera a esta velocidad como constante por lo que se puede calcular de manera directa o indirecta, como se muestran en algunos trabajos [66–68].

Por otro lado, una de las funciones conocidas para los parámetro V_t y V_b es la formulada por Durrani-Green [10], quien resume todos los modelos anteriores y el cual muestra una expresion de V :

$$V = 1 + \left(100 \exp^{-0,446R'} + 5 \exp^{-0,107R'} \right) \left(1 - \exp^{-R'} \right), \quad (2.10)$$

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



Capítulo 3

Detección de partículas en ambientes exteriores

3.1. Materiales y metodología

Para este trabajo se seleccionó el área ubicada en la azotea del edificio de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú¹.



Figura 3.1: Edificio de Física de la PUCP

Se utilizaron 30 detectores, los que fueron expuestos en una cantidad constante de aire; para lo cual se usó 30 vasos descartables de polietileno transparentes de 7oz., se cortaron rendijas lineales laterales para poder colocar lengüetas de cartón o de

¹Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 32, Perú

PVC, cada una de $3\text{cm} \times 9\text{cm}$. Sobre cada lengüeta se colocó un detector de trazas nucleares (LR-115, tipoII de la Kodak-Pathe), de dimensiones $2,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$.



Figura 3.2: Montaje de detectores LR-115 tipoII

Los detectores así preparados se colocaron en la azotea del edificio elegido, como se muestra en la Fig. (3.3) y se expusieron durante 20 días en promedio.

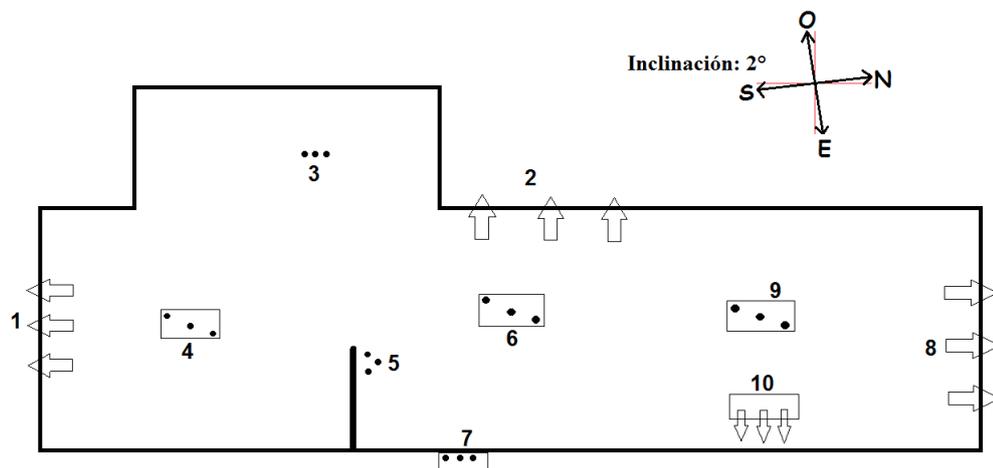


Figura 3.3: Ubicación de los detectores en la azotea del edificio de Física de la PUCP.

Pasado el tiempo de exposición los detectores fueron retirados y sometidos al tratamiento químico (*proceso de grabado o etching*) explicado en la Sec.2.1.2. Este proceso se llevó a cabo siguiendo las instrucciones del proveedor y de acuerdo a las condiciones determinadas en un trabajo de investigación anterior de la PUCP [54]. Los detectores fueron sometidos a un baño de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 2.5 N (100g/L) a 60°C durante 30 minutos.

Al realizar el revelado de manera adecuada, el aspecto y características de los detectores no varían, a excepción de algunas zonas en las cuales la nitro celulosa es removida durante el baño. Para poder realizar una buena lectura, se enjuagan con agua destilada para así remover totalmente la solución química, después se dejan reposar y secar durante aproximadamente 24 horas como se muestra en la Fig. (3.4).

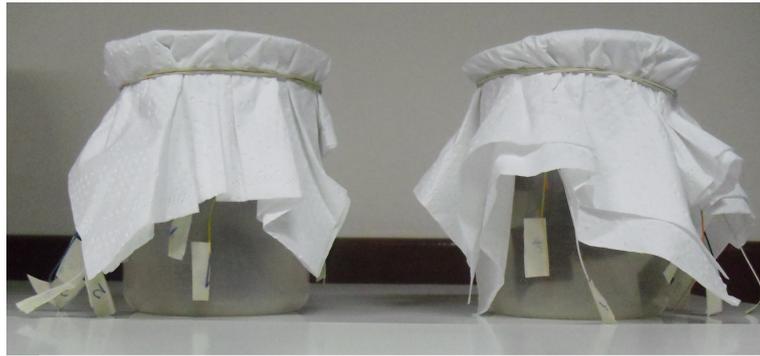


Figura 3.4: Secado de los detectores durante 24 horas para su posterior lectura

Para la lectura o conteo se utilizó un microscopio óptico (marca Leica DM LM) de alcances $5x$, $10x$, $20x$. La lectura óptica permite realizar conteos por áreas estandarizadas en el detector (densidad de huellas).

Las áreas fueron determinadas siguiendo dos procedimientos:

- El primero, se usó un micrómetro digital y una rejilla como se muestra en la Fig. (3.5), donde la diagonal de cada cuadrado de la cuadrícula coincide con el diámetro del área de visión.

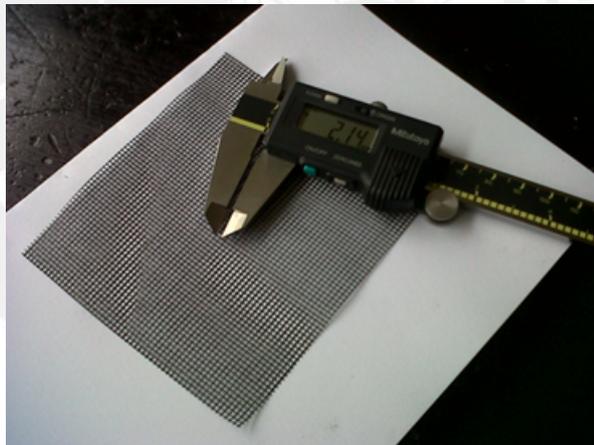


Figura 3.5: Micrómetro digital y rejilla

- En el segundo, se usó un micrómetro simple incluido en el microscopio óptico, como se indica en la Fig. (3.6), donde se pudo medir el diámetro del área de visión.



Figura 3.6: Micrómetro del microscopio óptico Leica DM LM

A continuación se muestra los resultados de los procedimientos en la Tabla (3.1):

	Primer procedimiento (mm)	Segundo procedimiento (mm)
Valores del diámetro de visión	2.19 ± 0.01	2.20 ± 0.05
	2.24 ± 0.01	2.20 ± 0.05
	2.26 ± 0.01	2.30 ± 0.05
	2.22 ± 0.01	2.20 ± 0.05
	2.23 ± 0.01	2.20 ± 0.05
Promedio	2.23 ± 0.01	2.20 ± 0.05
D.S.	0.03	0.04
Área de visión	3.89 mm^2	

Tabla 3.1: Cálculo del área de visión

Finalmente, la ecuación que permite relacionar la densidad de huellas con la concentración en kBq/m^3 es:

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{K_{Rn} \cdot T} \quad (3.1)$$

Donde, C_{Rn} es la concentración de radón en el ambiente estudiado; ρ es el número de huellas por unidad de área (densidad de huellas); K_{Rn} es el factor de calibración $20,41Bq/m^3$ que corresponde a $1huella/mm^2$, el cual se obtuvo experimentalmente [54].

Con la finalidad de hacer un seguimiento de la fluctuación del radón en el ambiente exterior estudiado, se realizó 4 mediciones distintas en diferentes épocas de los últimos 3 años pasados. La primera se realizó desde el 01-06-2011 al 21-06-2011; la segunda, desde el 14-07-2011 al 03-08-2011; la tercera, desde el 19-09-2012 al 09-10-2012; la cuarta, desde el 19-12-2012 al 08-01-2013.

3.2. Resultados

Al realizar la lectura usando el microscopio óptico en los diferentes detectores, se encuentra que se puede diferenciar claramente dos tipos de huellas que para este análisis se denominan huellas pequeñas (P) como se muestra en la Fig. (2.3) y huellas grandes (G) como se muestra en la Fig. (2.7).

Se pueden encontrar diferencias en las huellas que están determinadas por la intensidad energética del haz de partículas.

Usando la fórmula de Bethe, se puede encontrar parámetros como el rango de incidencia y poder de frenado. Para este cálculo se hace la simulación en el programa SRIM [69].

Tomando el ejemplo de partículas α provenientes del radón, las cuales poseen 5.590 MeV se puede obtener el rango que incide en el material que esta entre $32.31\mu\text{m}$ - $36.87\mu\text{m}$. También se pueden diferenciar los diámetros dependiendo de la energía incidente.

En la Fig. (3.7) se observa la variación de frenado respecto a diferentes energías incidentes de las partículas α (1 - 5MeV).

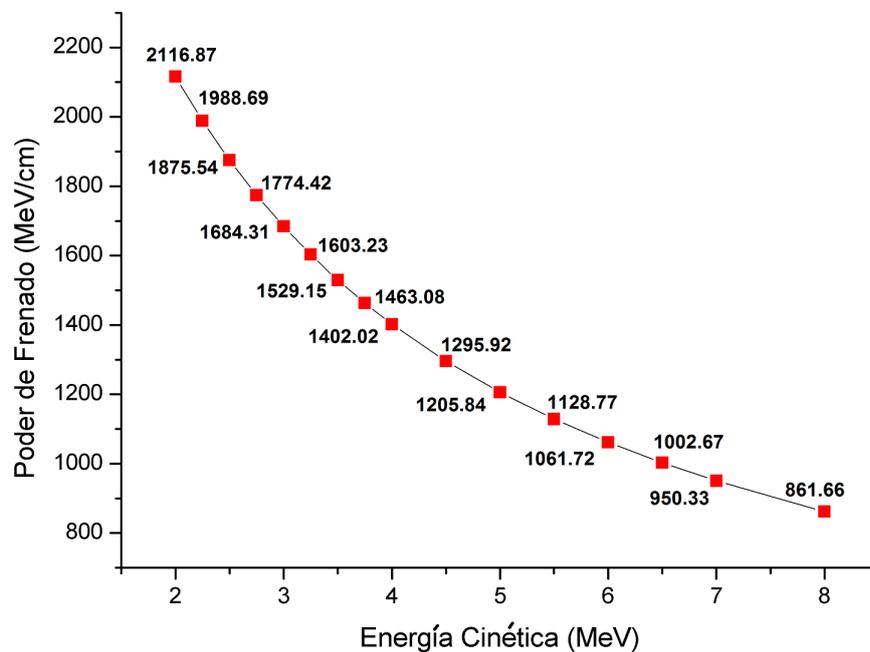


Figura 3.7: Poder de frenado usando la fórmula de Bethe para energías de 2 a 7,5MeV. Obtenido del programa SRIM [69].

Para determinar la concentración total de la contaminación producida por el

radón 222, sus antecesores y descendientes, se considera el número total de huellas que incluyen a ambos tipos P y G. Los resultados de las mediciones se presentan en las siguientes tablas.

Detectores		N° de huellas/mm ²	Contaminación de elementos (Bq/m ³)
Grupo 1 SUR	1	79 ± 03	1610.76 ± 81.53
	2	88 ± 09	1794.40 ± 90.80
	3	82 ± 05	1683.17 ± 85.19
Grupo 2 OESTE	1	1 ± 01	23.09 ± 1.37
	2	1 ± 00	12.59 ± 0.84
	3	32 ± 05	663.19 ± 33.69
Grupo 3 ZENIT	1	1 ± 00	17.84 ± 1.10
	2	1 ± 00	14.69 ± 0.95
	3	1 ± 00	19.94 ± 1.21
Grupo 4 ZENIT	1	19 ± 01	380.92 ± 19.44
	2	1 ± 00	10.49 ± 0.73
	3	19 ± 01	386.16 ± 19.70
Grupo 5 ZENIT	1	19 ± 04	392.46 ± 20.02
	2	6 ± 04	131.17 ± 6.83
	3	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	1 ± 00	18.89 ± 1.16
	2	1 ± 01	26.23 ± 1.53
	3	0	0
Grupo 7 ZENIT	1	1 ± 01	14.69 ± 0.95
	2	1 ± 00	14.69 ± 0.95
	3	1 ± 00	15.74 ± 1.00
Grupo 8 NORTE	1	4 ± 01	91.29 ± 4.81
	2	7 ± 03	134.32 ± 6.99
	3	14 ± 04	292.77 ± 14.99
Grupo 9 ZENIT	1	9 ± 02	180.49 ± 9.32
	2	11 ± 04	225.61 ± 11.60
	3	0	0
Grupo 10 ESTE	1	29 ± 03	600.23 ± 30.51
	2	28 ± 04	564.55 ± 28.71
	3	0	0

Tabla 3.2: Resultados obtenidos desde el 01-06-2011 al 21-06-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas/mm ²	Contaminación de elementos (Bq/m ³)
Grupo 1 SUR	1	49 ± 13	997.94 ± 50.59
	2	47 ± 07	950.72 ± 48.21
	3	18 ± 07	359.93 ± 18.38
Grupo 2 OESTE	1	4 ± 02	73.46 ± 3.91
	2	53 ± 09	1076.64 ± 54.56
	3	8 ± 03	156.35 ± 8.09
Grupo 3 ZENIT	1	5 ± 01	92.34 ± 4.87
	2	12 ± 05	253.94 ± 13.03
	3	4 ± 01	77.65 ± 4.12
Grupo 4 ZENIT	1	10 ± 03	195.18 ± 10.06
	2	9 ± 04	190.98 ± 9.85
	3	12 ± 02	243.45 ± 12.50
Grupo 5 ZENIT	1	8 ± 04	171.05 ± 8.84
	2	7 ± 07	141.66 ± 7.36
	3	19 ± 10	379.87 ± 19.38
Grupo 6 ZENIT	1	76 ± 18	1550.95 ± 78.51
	2	46 ± 22	939.17 ± 47.62
	3	5 ± 01	96.54 ± 5.08
Grupo 7 ZENIT	1	100 ± 15	2049.39 ± 103.68
	2	10 ± 09	194.13 ± 10.01
	3	22 ± 08	444.93 ± 22.67
Grupo 8 NORTE	1	9 ± 05	183.64 ± 9.48
	2	27 ± 07	542.52 ± 27.60
	3	3 ± 03	71.36 ± 3.81
Grupo 9 ZENIT	1	24 ± 06	492.15 ± 25.05
	2	32 ± 10	662.14 ± 33.64
	3	22 ± 05	457.52 ± 23.30
Grupo 10 ESTE	1	8 ± 03	162.65 ± 8.42
	2	11 ± 01	229.81 ± 11.81
	3	4 ± 02	85.00 ± 4.50

Tabla 3.3: Resultados obtenidos desde el 14-07-2011 al 03-08-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas/mm ²	Contaminación de elementos (Bq/m ³)
Grupo 1 SUR	1	10 ± 01	210.92 ± 10.85
	2	2 ± 01	50.37 ± 2.75
	3	3 ± 01	64.01 ± 3.44
Grupo 2 OESTE	1	9 ± 01	176.29 ± 9.11
	2	16 ± 04	320.05 ± 16.36
	3	27 ± 20	547.76 ± 27.86
Grupo 3 ZENIT	1	9 ± 02	182.59 ± 9.42
	2	9 ± 04	193.08 ± 9.95
	3	33 ± 05	665.29 ± 33.79
Grupo 4 ZENIT	1	4 ± 01	82.90 ± 4.39
	2	4 ± 01	89.20 ± 4.71
	3	18 ± 07	374.62 ± 19.12
Grupo 5 ZENIT	1	3 ± 01	60.86 ± 3.28
	2	4 ± 01	85.00 ± 4.50
	3	4 ± 01	80.80 ± 4.28
Grupo 6 ZENIT	1	58 ± 06	1187.87 ± 60.18
	2	54 ± 03	1104.97 ± 55.99
	3	0	0
Grupo 7 ZENIT	1	63 ± 06	1285.46 ± 65.11
	2	11 ± 02	217.22 ± 11.17
	3	14 ± 05	280.18 ± 14.35
Grupo 8 NORTE	1	15 ± 06	296.97 ± 15.20
	2	23 ± 09	469.06 ± 23.89
	3	33 ± 03	664.24 ± 33.74
Grupo 9 ZENIT	1	6 ± 02	128.02 ± 6.67
	2	5 ± 01	103.89 ± 5.45
	3	22 ± 02	453.32 ± 23.09
Grupo 10 ESTE	1	7 ± 02	137.47 ± 7.14
	2	12 ± 05	252.90 ± 12.97
	3	8 ± 04	155.30 ± 8.05

Tabla 3.4: Resultados obtenidos desde el 19-09-2012 al 09-10-2012. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas/mm ²	Contaminación de elementos (Bq/m ³)
Grupo 1 SUR	1	7 ± 04	143.76 ± 7.46
	2	0	0
	3	0	0
Grupo 2 OESTE	1	74 ± 06	1514.22 ± 76.66
	2	12 ± 06	250.80 ± 12.87
	3	8 ± 04	168.95 ± 8.73
Grupo 3 ZENIT	1	15 ± 07	311.66 ± 15.94
	2	6 ± 05	115.43 ± 6.03
	3	0	0
Grupo 4 ZENIT	1	5 ± 02	104.94 ± 5.50
	2	4 ± 01	73.46 ± 3.91
	3	3 ± 02	66.11 ± 3.54
Grupo 5 ZENIT	1	1 ± 00	26.23 ± 1.53
	2	2 ± 01	44.07 ± 2.43
	3	0	0
Grupo 6 ZENIT	1	14 ± 07	285.43 ± 14.62
	2	24 ± 20	490.05 ± 24.95
	3	29 ± 14	584.49 ± 29.72
Grupo 7 ZENIT	1	4 ± 01	74.50 ± 3.97
	2	18 ± 03	360.98 ± 18.43
	3	1 ± 01	24.14 ± 1.42
Grupo 8 NORTE	1	8 ± 06	161.60 ± 8.36
	2	0	0
	3	2 ± 02	34.63 ± 1.95
Grupo 9 ZENIT	1	6 ± 05	114.38 ± 5.98
	2	2 ± 02	34.63 ± 1.95
	3	7 ± 04	135.37 ± 7.04
Grupo 10 ESTE	1	10 ± 09	201.48 ± 10.38
	2	1 ± 01	11.54 ± 0.79
	3	1 ± 00	12.59 ± 0.84

Tabla 3.5: Resultados obtenidos desde el 19-12-2012 al 08-01-2013. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

En forma gráfica se presentan los resultados de las tablas para establecer los cambios de la contaminación ambiental por elementos radiactivos naturales en función del tiempo. Teniendo en cuenta los períodos en los que se hicieron las detecciones ²:

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

Tabla 3.6: Períodos y características de estos.

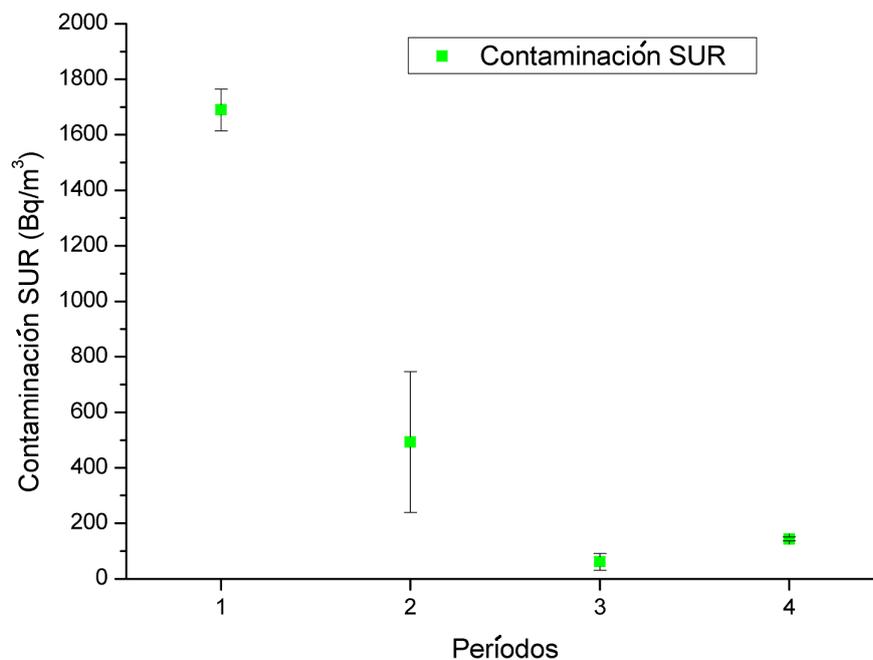


Figura 3.8: Contaminación SUR para los cuatro períodos señalados anteriormente.

²Datos meteorológicos tomados de la data histórica de la Estación Meteorológica “Hipólito Unanue” en la PUCP [70]

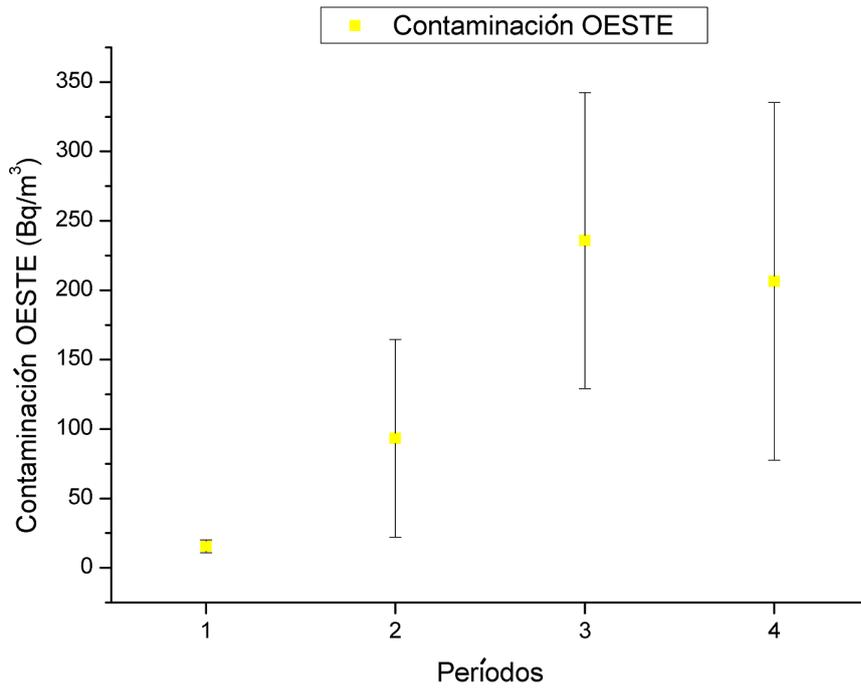


Figura 3.9: Contaminación OESTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

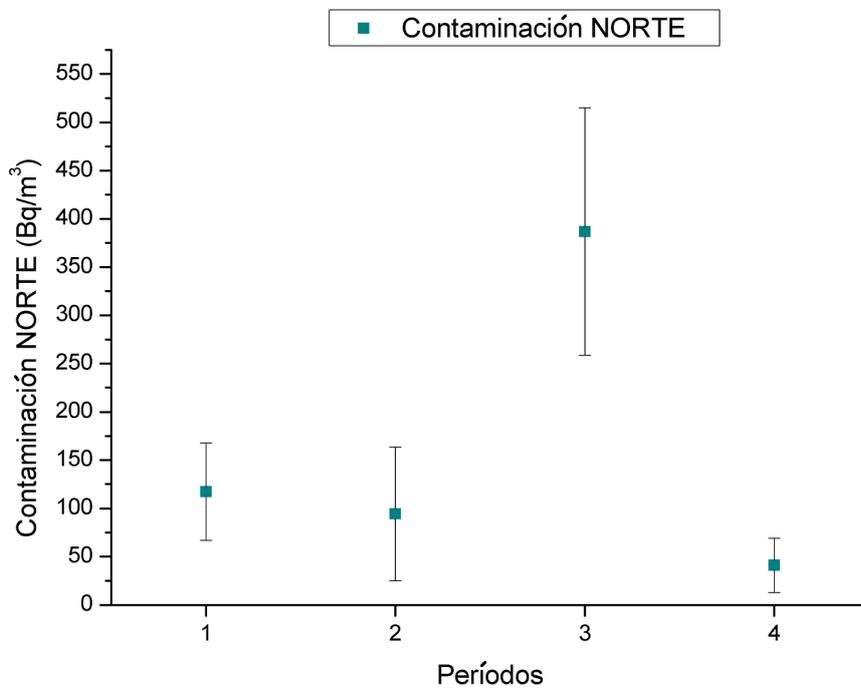


Figura 3.10: Contaminación NORTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

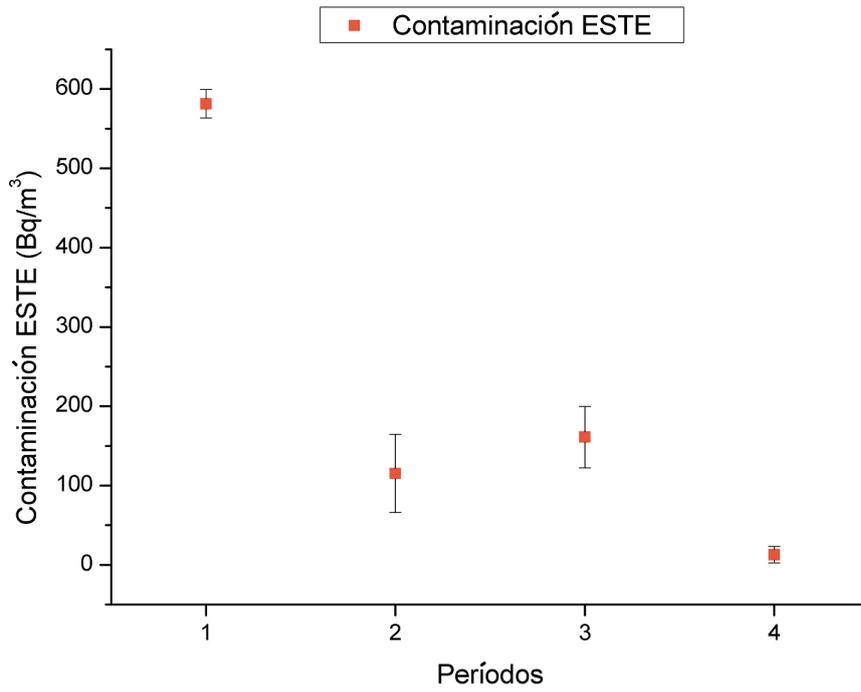


Figura 3.11: Contaminación ESTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

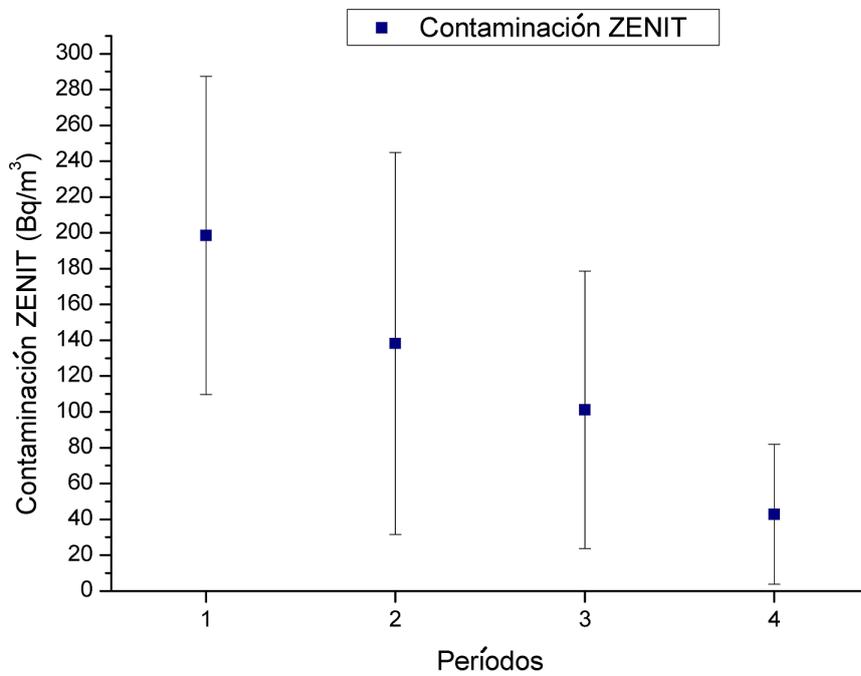


Figura 3.12: Contaminación ZENIT para los cuatro períodos señalados anteriormente.

Para diferenciar la concentración de la contaminación producida por el radón ²²² de la contaminación producida posiblemente por sus antecesores y descendientes, se considera por separado el número de huellas pequeñas P y el número de huellas grandes G. Los resultados de las mediciones se presentan en las siguientes tablas.

Detectores		N° de huellas (P)/mm ²	N° de huellas (G)/mm ²	Concentración de radón (Bq/m ³)
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 3.7: Resultados obtenidos desde el 01-06-2011 al 21-06-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm ²	N° de huellas (G)/mm ²	Concentración de radón (Bq/m ³)
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 3.8: Resultados obtenidos desde el 14-07-2011 al 03-08-2011. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm ²	N° de huellas (G)/mm ²	Concentración de radón (Bq/m ³)
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 3.9: Resultados obtenidos desde el 19-09-2012 al 09-10-2012. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

Detectores		N° de huellas (P)/mm ²	N° de huellas (G)/mm ²	Concentración de radón (Bq/m ³)
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 3.10: Resultados obtenidos desde el 19-12-2012 al 08-01-2013. La dirección de cada grupo de detectores está indicada en la Fig. (3.3).

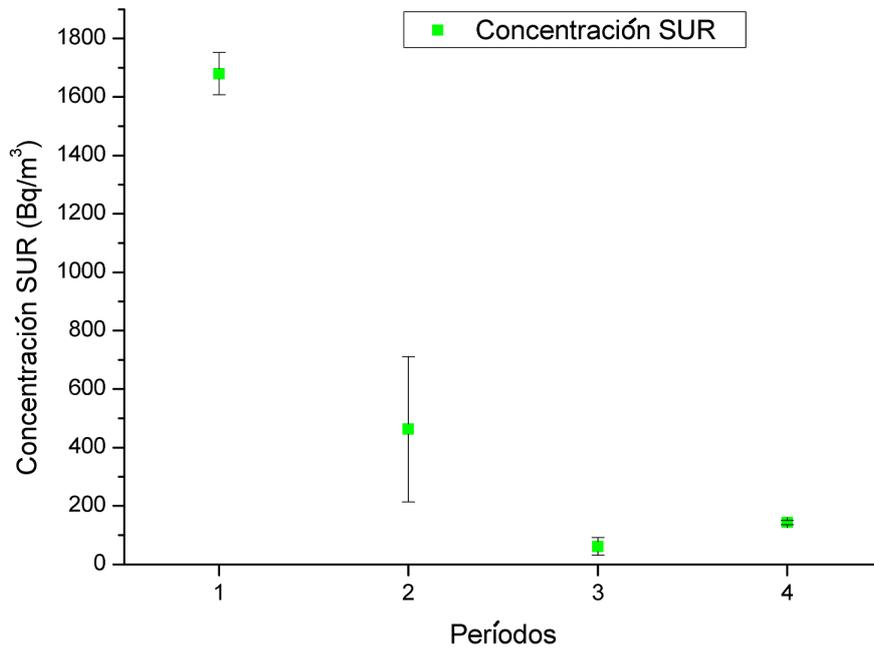


Figura 3.13: Concentración SUR para los cuatro períodos señalados anteriormente.

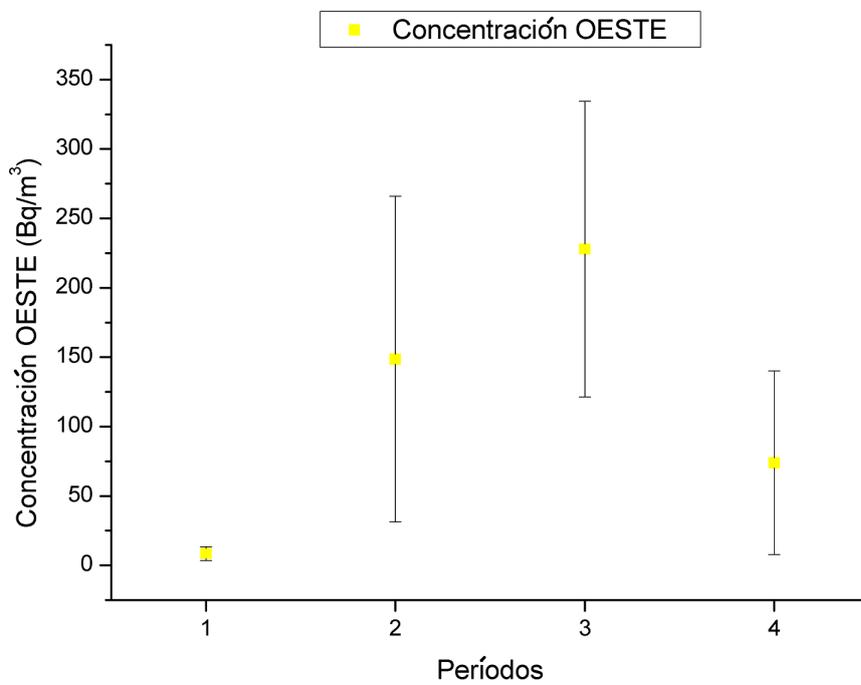


Figura 3.14: Concentración OESTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

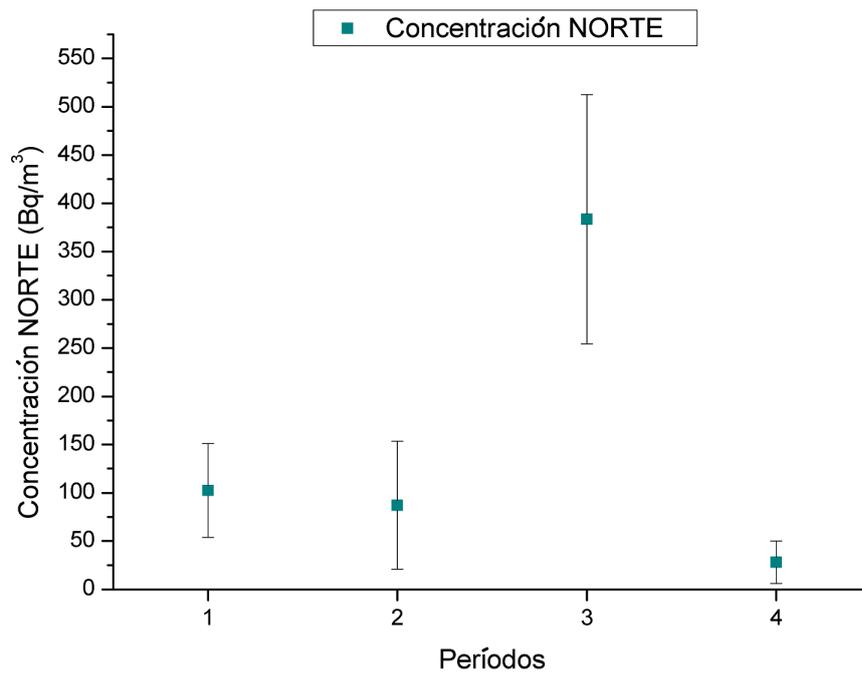


Figura 3.15: Concentración NORTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

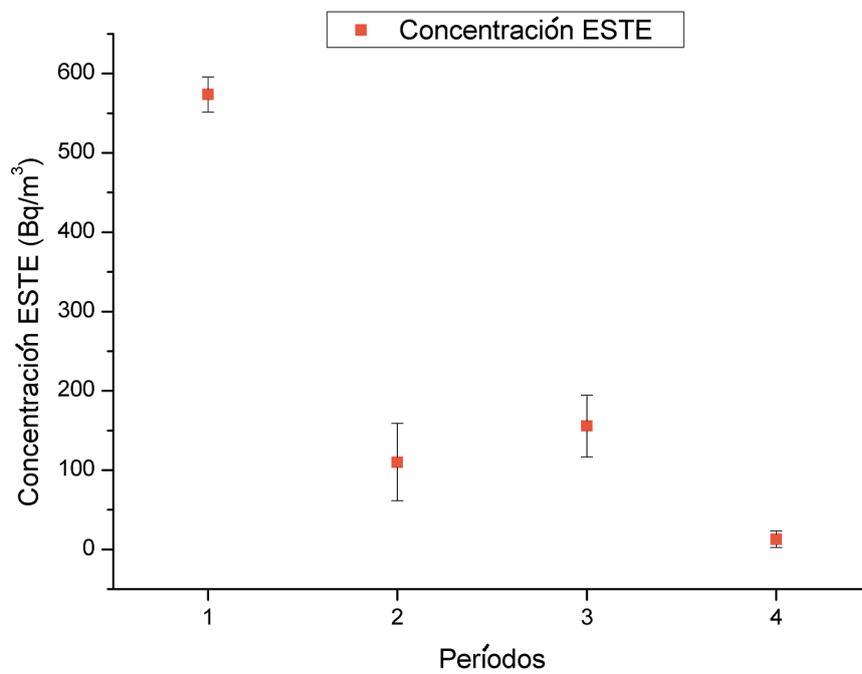


Figura 3.16: Concentración ESTE para los cuatro períodos señalados anteriormente.

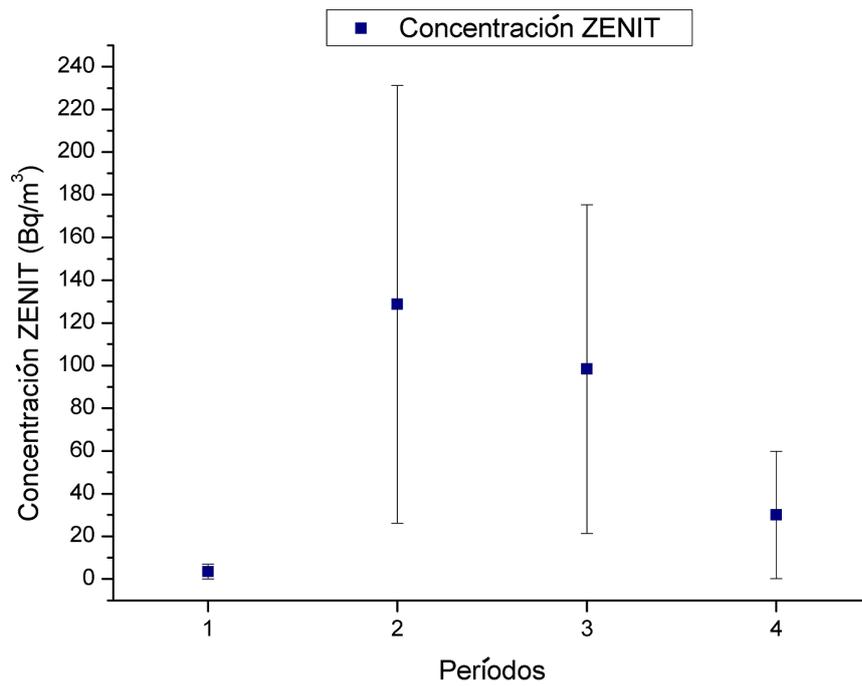


Figura 3.17: Concentración ZENIT para los cuatro períodos señalados anteriormente.

Capítulo 4

Discusión de resultados

De acuerdo a los resultados presentados en las diferentes tablas, las mediciones permitieron evidenciar la presencia significativa de radón 222 y otros posibles contaminantes de origen radiactivo durante los cuatro períodos, sobre todo el primer período posee mayor porcentaje de contaminantes en promedio respecto de los demás en la ciudad de Lima, como dato relevante esta medición fue realizada tres meses después del desastre de Fukushima. Sin embargo, la contaminación total y/o la concentración de este gas disminuyen durante el período de verano (período 4), como se aprecia en los resultados. En estas últimas mediciones, también influyó la alta radiación UV ambiental que se registró en esa época y que en algunos casos causó el deterioro de algunos detectores impidiendo sus lecturas. Este será un factor a tomar en cuenta para futuras mediciones.

En las Graf. (3.12) y Graf. (3.17) se aprecian barras de error mayores a las demás gráficas o en este caso direcciones. La causa de esto fue el factor de radiación UV ya que son los más expuestos al sol directamente y que por lo tanto parte del detector se degrade y que la proporción de huellas por unidad de área sea muy dispareja en diferentes secciones del detector.

En los gráficos de contaminación en donde se tomaron en cuenta todas las huellas en conjunto (P y G) se observa que en las posiciones SUR (Graf. (3.8)), ESTE (Graf. (3.11)) y ZENIT (Graf. (3.12)) hay un decremento respecto de los períodos; sin embargo, en las posiciones OESTE (Graf. (3.9)) y NORTE (Graf. (3.10)), no se cumple lo anterior sino que el único período que muestra un valor mayor respecto a los demás períodos es el 3 y además la “contaminación” es menor respecto a las direcciones anteriores. Por lo que se podría suponer que en esa dirección (Oeste y Norte) el viento no influyó en el posible desplazamiento del gas radiactivo.

En los gráficos de concentración de radón en donde solo se tomaron en cuenta las huellas tipo P (método que se usa formalmente para obtener concentración de

radón). El decremento se mantiene en las posiciones anteriores, solo que en el gráfico de la posición Zenit se ve influenciado por el factor de degradación y la pérdida parcial de datos en el polímero, tomando en cuenta que en la Graf. (3.12) comparada con Graf. (3.12) en el período 1 la concentración de huellas G es mucho mayor que en los demás períodos en esta posición. Igualmente el valor mayor respecto a los demás periodos es el 3. Comparando los períodos 1 y 2 (debido a la aproximación de UV), podemos observar que la cantidad de días de lluvia se vio influenciada en la dirección que apuntaba el detector; ya que en algunos aumenta la concentración y en otros disminuye.

La presencia de las huellas grandes G se encontró en todos los polímeros colocados durante los cuatro periodos. En los detectores orientados hacia el Zenit se observa que hay un cambio significativo entre la contaminación total y la concentración de radón (sobre todo en el período 1); ya que, la presencia de huellas G es notoria respecto a las demás direcciones. Y el mayor porcentaje de estas se encuentra en el primer período sobre todo en los detectores que apuntan hacia el Zenit, este tipo de huellas se discute que puede deberse a la influencia de la radiación ambiental producida por el desastre de Fukushima. También, se observa un cambio significativo de huellas G en la dirección Oeste del período 4.

Próximamente se realizará trabajos complementarios para determinar si estas son las causas y/o puede deberse a la presencia de otros contaminantes radiactivos ambientales relacionados con las cadenas de desintegración del U, Th, Ra y otros.

Capítulo 5

Conclusiones

Usando la técnica de huellas nucleares en detectores de LR-115 se ha podido determinar la presencia de contaminantes radiactivos ambientales. La implementación de esta técnica en el laboratorio de Física Experimental se realizó con éxito debido a los datos obtenidos; sin embargo, la precisión de los datos se pudo mejorar, realizando o planteando mejores métodos de conteo y grabado.

Es posible perfeccionar la precisión de los datos, grabando de tal manera que cada detector sufra las mismas condiciones y no permanezcan en contacto una con la otra o simplemente disminuir el tiempo de detección. En el conteo seleccionar una mayor cantidad de secciones para realizar una mejor estadística o implementar un método que permita contar en totalidad al detector y no por secciones.

A pesar de algunas imprecisiones este trabajo ha permitido determinar la concentración fluctuante del radón 222 en el ambiente y otros contaminantes posibles. Se le llamó hipotéticamente otros contaminantes; ya que, se encontró una geometría nueva y distinta de huellas que normalmente se generan en la interacción con este polímero.

Algunos detalles resaltantes pero no catastróficos son la presencia alta de radiación UV en la ciudad de Lima que evidencia en los detectores un daño superficial, tomando en cuenta la Tabla. (3.6) se observó en el periodo 4 una medida alta de UV donde los Gráf. (3.12) y Gráf. (3.17) en dirección ZENIT se observa una baja de concentración de huellas respecto de los demás períodos y direcciones, debido a este fenómeno de radiación UV.

Por lo tanto, en lo sucesivo se tendrá en cuenta este factor que resulta determinante al usar este tipo de detectores. Las diferentes formas, tamaños de las huellas encontradas durante estas mediciones serán analizadas posteriormente en otro trabajo para el cual se están recopilando más datos, a fin de poder determinar cual es la relación que existe en la formación de estas nuevas huellas con sus energías

asociadas, fuente de emisión y/o demás características.

Pero como información adicional sobre estas huellas tipo G, si regresamos a la parte de discusión de resultados y nos enfocamos en el período 1 en dirección Zenit, podemos observar un salto notorio de huellas tipo G; ya que si tomamos en cuenta la degradación por UV, se pudo observar que parte de la data de huellas G se perdió como se observa en el período 1 de la dirección Zenit. Debido a esto y observando que la presencia de UV degrada la superficie y la pierde parcialmente incluyendo el baño químico, podemos asumir de que estas huellas G solo se forman en la superficie de nuestro detector (nitrocelulosa de $12\mu m$), pero tomando en cuenta que aún las huellas G en su centro poseen una huella tipo P que traspasa esta superficie y llega al poliéster de $100\mu m$.

Finalmente, en los próximos trabajos se mejorará el método en general para el procedimiento de lectura de detectores y demás factores. Pero a pesar de aspectos que podrían deducir que los datos son incorrectos, estos datos obtenidos son correctos y muestra el éxito en la técnica y la ampliación del estudio de las nuevas huellas obtenidas.

Bibliografía

- [1] Nobel Prize http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/ becquerel-bio.html, Set. 2013.
- [2] Idaho State University <http://www.physics.isu.edu/radinf/natural.htm>, Set. 2013.
- [3] World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/education/uran.htm>, Feb. 2013.
- [4] HyperPhysics <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fission.html>, Feb. 2013.
- [5] J. S. Strettan, *Radiaciones ionizantes*, Primera edición española, Editorial ALHAMBRA, S.A., 1967, pp. 128–152.
- [6] Oak Ridge Institute for Science and Education <http://orise.orau.gov/reacts/guide/define.htm>, Oct. 2013.
- [7] Physical Reference Data <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>, Sep. 2013.
- [8] Universidad de Santiago de Compostela <http://fpsalmon.usc.es/lar/esp/servicios/servicioradon/inforadon.php>, Oct. 2013.
- [9] R. L. Fleischer, P. B. Price, and R. M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids*, University of California Press, Berkeley, 1975.
- [10] S. A. Durrani and R. K. Bull, *Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications*, Pergamon Press, 1987.
- [11] 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.
- [12] R. L. Fleischer, *Tracks to Innovation: Nuclear Tracks in Science and Technology*, Springer, 1988.

- [13] K. K. Dwivedi, R. Ilic, and P. Vater, *Radiat. Meas.*, 36 (2003).
- [14] R. Ilic, I. Jencic, and P. Vater, *Radiat. Meas.*, 34 (2001).
- [15] A. Chambaudet, M. Fromm, R. Ilic, P. Vater, C. Dubois, and M. Rebetez, *Radiat. Meas.*, 31 (1999).
- [16] R. Ilic, P. Vater, and M. A. Kenawy, *Radiat. Meas.*, 28 (1997).
- [17] V. P. Perehygin, P. Vater, R. Ilic, and S. A. Durrani, *Radiat. Meas.*, 25 (1995).
- [18] K. Kristiansson and L. Malmqvist, *Geoexploration*, 22 (1984) 17.
- [19] C. Papastefanou, *J. Environ. Radioact.*, 63 (2002) 271.
- [20] S. Farid, *J. Environ. Radioact.*, 34 (1997) 29.
- [21] G. Jonsson, *Radiat. Meas.*, 34 (2001) 415.
- [22] 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.
- [23] K. Wiegand, S. P. Dunne, and Ann, *Occup. Hyg.*, 40 (1996) 569.
- [24] L. Tomásek, T. Müller, E. Kunz, A. Heribanová, J. Matzner, V. Placek, I. Burian, and J. Holecek, *Int. Cong. Ser.*, 1225 (2002) 239.
- [25] J. Porstendörfer, *J. Aerosol Sci.*, 25 (1994) 219.
- [26] P. C. Deka, S. Sakar, B. Bhattacharjee, T. D. Goswami, B. K. Sarma, and T. V. Ramachandran, *Radiat. Meas.*, 36 (2003) 431.
- [27] J. Hakl, I. Hunyadi, I. Csige, G. Geczy, L. Lenart, and A. Varhegyi, *Radiat. Meas.*, 28 (1997) 675.
- [28] L. S. Bohus, E. D. Greaves, J. Palfalvi, F. Urbani, and G. Merlo, *Radiat. Meas.*, 28 (1997) 725.
- [29] V. I. Ulumov, A. I. Zakharova, and N. V. Ulomova, *Akad. Nauk SSSR Geophys.*, 177 (1967) 567.
- [30] K. Ioannides, C. Papachristodoulou, K. Stamoulis, D. Karamanis, S. Pavlides, A. Chatzipetros, and E. Karakala, *Appl. Radiat. Isot.*, 59 (2003) 205.

- [31] N. Segovia, M. Mena, P. Peña, E. Tamez, J. L. Seidel, M. Monnin, and C. Valdes, *Radiat. Meas.*, 31 (1999) 307.
- [32] 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, Set. 2013.
- [33] Teknopoli <http://www.teknopoli.com/PDF/Gas%20Density%20Table.pdf>, Set. 2013.
- [34] B. Mann and S. B. Garfinkel, *Radioactivity and its measurement*, Publisher for The Commission on College Physics, 1966, pp. 41–76.
- [35] E. Fenyves and O. Haiman, *The physical principles of nuclear radiation measurements*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996, pp. 65–66.
- [36] *Studies in penetration of charged particles in matter*, NAS-NRC Rep. 1133, Washington, D.C., 1964.
- [37] Nondestructive Testing Resource Center http://www.ndt-ed.org/EducationResources/HighSchool/Radiography/bremsstrahlung_popup.html, Set. 2013.
- [38] W. Frass, *Passage of particles through matter*, Oxford Physics, 2009.
- [39] W. Whaling, *Energy loss of charged particles in matter*, in Encyclopedia of Physics, Vol. XXXIV. Springer-Verlag, Berlin and New York, 1958.
- [40] M. MLADJENOVIC, *Radioisotope and radiation physics an introduction*, United Kingdom Edition, ACADEMIC PRESS, INC. (LONDON) LTD., 1973, pp. 102–103.
- [41] J. Areizaga, M. M. Cortázar, J. M. Elorza, and J. J. Iruin, *Polímeros*, Editorial Síntesis, S.A., 2002, pp. 14–17.
- [42] L. Garrido, L. Ibarra, and C. Marco, *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos*, Vol.II, Impreso en : P. G. M., 2004, pp. 167–171.
- [43] 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.
- [44] Dosirad <http://dosirad.pagespro-orange.fr/Notice%20LR115-A.htm>, Set. 2013.

- [45] R. L. Fleischer, P. B. Price, and R. M. Walker, *Rev. Sci. Instrum.*, 34 (1963) 510.
- [46] D. Hermsdorf, R. Bretschneider, B. Dorschel, and J. Henniger, *Radiat. Meas.*, 31 (1999) 431.
- [47] R. Ilic, J. Skvarc, and A. N. Golovchenko, *Radiat. Meas.*, 36 (2003) 83.
- [48] J. Ahrens and et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, 522 (2004) 347.
- [49] P. B. Price and R. M. Walker, *Nature*, 196 (1962) 732.
- [50] P. Price and R. M. Walker, *J. Geophys. Res.*, 68 (1963) 4847.
- [51] M. Maurette, P. Pellas, and R. M. Walker, *Nature*, 204 (1964) 821.
- [52] C. Soyland and S. P. Hassfjell, *Radiat. Environ. Biophys.*, 39 (2000) 125.
- [53] B. Dorschel, D. Hermsdorf, S. Pieck, S. Starke, H. Thiele, and F. Weickert, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 207 (2003) 154.
- [54] 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.
- [55] D. Nikezic and K. Yu, *Nucl. Instr. Meth. B*, 196 (2002) 105.
- [56] C. W. Y. Yip, J. P. Y. Ho, V. S. Y. Koo, D. Nikezic, and K. N. Yu, *Radiat. Meas.*, 37 (2003) 197.
- [57] 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.
- [58] B. E. Fischer and R. Spohr, *Production and use of nuclear tracks: imprinting structure on solids. Reviews of Modern Physics*, Vol. 55, No. 4, October 1963.
- [59] Fleischer, R. L., P. B. Price, and R. T. Woods, *Nuclear Particle Track Identification in Inorganic Solids*, *Phys. Rev.* 188, 563, (1969).
- [60] p. p. y. G. Somogyi, title=Nuclear Instrum. Methods.
- [61] G. Somogyi and A. S. Szalay, *Nucl. Instrum. Methods*, 109 (1973) 211.
- [62] M. Fromm, P. Meyer, and A. Chambaudet, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 107 (1996) 337.

- [63] R. Barillon, M. Fromm, A. Chambaudet, H. Marah, and A. Sabir, *Radiat. Meas.*, 28 (1997) 619.
- [64] A. P. Fews and D. L. Henshaw, *Nucl. Instrum. Methods*, 197 (1982) 517.
- [65] D. Nikezic and K. N. Yu, *Radiat. Meas.*, 37 (2003) 39.
- [66] C. W. Y. Yip, J. P. Y. Ho, D. Nikezic, and K. N. Yu, *Radiat. Meas.*, 36 (2003) 161.
- [67] K. N. Yu and F. M. F. Ng, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, in prees.
- [68] P. H. Fowler, S. Amin, V. M. Clapham, and D. L. Henshaw, in: *Proceedings of the 10th Conference on SSNTD, Lyon, 2-6 July 1979*, p. 239.
- [69] Particle interactions with matter <http://www.srim.org>, Mayo. 2014.
- [70] PUCP <http://meteorologia.pucp.edu.pe>, Mayo. 2014.