



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Cuatro casos de estudio de las radiaciones:
concentración de radón intramuros, simulación de
expansión de partículas alfa, concentración de
neutrones secundarios y detección de partículas
ionizantes a partir de la caracterización de
arborescencias eléctricas

Tesis presentada para obtener el título de:
Doctor en Ciencias (Física Aplicada)

Presenta:

José Abraham Lima Flores

Asesores:

Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses

Puebla, Pue.
Junio de 2018

Título: Cuatro casos de estudio de las radiaciones: concentración de radón intramuros, simulación de expansión de partículas alfa, concentración de neutrones secundarios y detección de partículas ionizantes a partir de la caracterización de arborescencias eléctricas.

Estudiante: José Abraham Lima Flores

COMITÉ

Dr. José Eduardo Espinosa
Rosales
Presidente
(FCFM-BUAP)

Dr. Efraín Rubio Rosas
Secretario
(CUV-BUAP)

Dr. Fernando Rojas Rodríguez
Vocal
(FCFM-BUAP)

Dr. Martín Rodolfo Palomino
Merino
Asesor
(FCFM-BUAP)

Dr. Víctor Manuel Castaño
Meneses
Asesor
(CFATA-UNAM)

Dr. Guillermo C. Espinosa García
Vocal Externo
(IF-UNAM)

Dr. Carlos Vázquez López
Vocal Externo
(CINVESTAV-IPN)

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Suplente
(FCFM-BUAP)

DEDICATORIA

A mi madre y mi hermano. A la memoria de mi abuelita Angelina y mi abuelito Carlos.

Todos sus consejos, cuidados y el amor que han derramado en mí, han sido la fuerza que ha forjado mi espíritu de lucha para alcanzar mis sueños, mi amor por la vida y mi pasión por la búsqueda del conocimiento.

En honor al amor y los valores que me han transmitido, prometo siempre usar mis conocimientos para el beneficio de la humanidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis asesores, al Dr. Rodolfo Palomino y al Dr. Víctor Castaño, primeramente por aceptarme como su estudiante de doctorado, pero también por todas las enseñanzas, consejos y apoyo que siempre me han brindado. Agradezco al Dr. Rodolfo por su amistad y por cada una de las pláticas que compartió conmigo.

Al Dr. Guillermo Espinosa, por que prácticamente esta tesis no hubiera sido posible realizarla sin todas las herramientas, apoyo, recomendaciones y conocimiento que me ha transmitido a lo largo de estos cuatro años. Pero sobre todo, agradezco la amistad y confianza que me ha brindado.

Parte del desarrollo experimental de este trabajo, se llevo a cabo en el laboratorio del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, con apoyo económico parcial del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT número IN-103316 denominado "Determinación de Contenidos Radiológicos en Agua, Suelo, Aire y Alimentos (parte IV)".

Agradezco también a mis amigos, el Dr. Allan Canec Chavarría y a José Ignacio Golzarri por el apoyo técnico y los conocimientos que me brindaron.

Al ingeniero Alejandro Vázquez, por todo el apoyo incondicional que me brindo para la construcción de la fuente de alto voltaje, y por transmitirme todos los conocimientos de electrónica que ahora poseo. Sin embargo, lo que más le agradezco es la amistad y alegrías que me brindó durante nuestras largas horas de trabajo.

Al Centro Universitario de Vinculación, por el préstamo de los múltiples equipos de caracterización, materiales de laboratorio e instalaciones para la realización de esta tesis. A mis amigos, Eric, Mayte, Ricardo, Karla y José, por que siempre me han brindado sus valiosos conocimientos y ayuda de manera incondicional. Pero sobre todo, agradezco la extraordinaria amistad que me han manifestado durante mis 6 años de posgrado.

También agradezco los conocimientos y el apoyo que me brindaron el Dr. Jenaro, el Dr. Gerardo y el Dr. Ignacio.

A mi amigo Jorge Naoki y al Dr. Eduardo Barbosa, gracias por su apoyo brindado para la programación en Geant4. Sin ustedes la realización del capítulo 3 hubiera sido imposible.

A mi amigo Emanuel por su apoyo y recomendaciones brindadas durante la programación en MATLAB.

A la licenciada Liseth Guzmán, por todo el apoyo que me brindó para la realización del capítulo 4. Sin tu ayuda, este capítulo no hubiera podido realizarse.

A mis sinodales, el Dr. Eduardo Espinosa, el Dr. Efraín Rubio, el Dr. Fernando Rojas, el Dr. Eduardo Barbosa y al Dr. Carlos Vázquez. Gracias por todo su apoyo y recomendaciones que me brindaron para la realización de esta tesis.

A mis profesores, tanto de la Maestría como del Doctorado. Gracias por todo el conocimiento que me transmitieron y por su compromiso con la enseñanza y preparación de los futuros investigadores.

A mi familia materna, por todo el apoyo, amor y alegrías que me han entregado. Pero sobre todo, agradezco infinitamente a mi mamá y a mi hermano por todo lo que han hecho por mí; ustedes son los mayores tesoros de mi vida.

A mi amigo, el Dr. Helí Herrera Camacho. Gracias por esa extraordinaria sabiduría que me ha transmitido desde que nos conocimos, sus palabras siempre han sido una fuerza que me ha ayudado a levantarme en momentos difíciles.

A mi amigo Everardo por su extraordinaria amistad y por recomendarme estudiar el posgrado en la Facultad de Física de la BUAP.

A todos mis amigos de la Facultad de Física (Pablo, Jaime, Yadhira, Abraham, Andrea, Samuel, Márquez, Erika y Vero), del Instituto Tecnológico de Puebla (Juan y Alina) y de la preparatoria (Luis, Gerardo, Mateos, Julio, Enrique y Karla). Valoro profundamente cada momento que hemos compartido juntos.

Al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica.

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del programa II. Investigación y posgrado. Aseguramiento de la calidad en el Posgrado ("Indicador establecido e el plan de Desarrollo Institucional 2013-2017").

Finalmente, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me brindó para la realización de mi Maestría y mi Doctorado.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1. La radiación ionizante	1
1.1.1. Interacción de la radiación con la materia	3
1.2. Radiactividad.....	5
1.2.1. Ley de desintegración radiactiva.....	5
1.2.2. Tipos desintegración nuclear	7
1.2.1.1. Desintegración α	7
1.2.1.2. Desintegración β	8
1.2.1.3. Desintegración γ	8
1.2.1.4. Fisión espontánea	9
1.2.1.5. Emisión de nucleones	9
1.2.3. Unidades de medición de la radiactividad	9
1.2.3.1. Actividad (\mathcal{A})	9
1.2.3.2. Exposición (X).....	10
1.2.3.3. Kerma (K).....	11
1.2.3.4. Dosis absorbida (D).....	11
1.2.3.5. Dosis equivalente (H).....	11
1.2.3.6. Resumen de las magnitudes de la medición de la radiactividad.....	12
1.2.4. Detectores de radiactividad.....	13
1.2.4.1. Detectores de partículas cargadas	14
1.2.4.2. Detectores de partículas neutras	14
1.3. Detectores de trazas de estado sólido.....	15
1.3.1. Efectos de la radiación en sólidos que permiten la formación de trazas.....	16
1.3.2. Mecanismo de formación de las trazas	16
1.3.3. Revelado de la traza	17

1.3.3.1. Pre-grabado químico.....	18
1.3.4. Formación geométrica de la traza.....	19
1.3.5. Caracterización de la trazas	22
1.3.6. Grabado electroquímico.....	26
1.3.7. Materiales utilizados para la detección de trazas nucleares.....	30
1.3.7.1. El detector CR-39	31
2. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN INTRAMUROS EN LOS TÚNELES DE LA PIRÁMIDE DE CHOLULA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES	35
2.1. El gas radón.....	39
2.2. Objetivo del proyecto.....	43
2.3. Metodología y experimentación.....	44
2.4. Resultados y discusión	50
3. SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE LA EXPANSIÓN Y DEPÓSITO DE DOSIS DE ENERGÍA DE PARTÍCULAS ALFA EMITIDAS POR RADÓN-222 CONTENIDO EN EL AGUA DE UN MANANTIAL MEDIANTE EL PROGRAMA GEANT4	55
3.1. El programa Geant4	57
3.1.1. Los parámetros en Geant4	57
3.2. Objetivo del proyecto.....	61
3.3. Metodología y experimentación.....	62
3.3.1. Medición de los niveles de concentración de radón en el agua del manantial	62
3.3.2. Análisis del espectro de energía de la radiación gamma emitida por el agua	68
3.3.3. Desarrollo de las simulaciones en el programa Geant4.....	71
3.4. Resultados y discusión	74
4. ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE NEUTRONES SECUNDARIOS EN UN CUARTO DE TRATAMIENTOS DONDE OPERA UN ACELERADOR LINEAL (LINAC) MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES	89
4.1. El neutrón	92
4.1.1. El fotoneutrón y los efectos de su interacción con la materia	93
4.1.1.1. Absorción.....	93
4.1.1.2. Dispersión.....	94
4.2. Objetivo del proyecto.....	95

4.3. Metodología y experimentación.....	96
4.3.1. Calibración del dispositivo	101
4.4. Resultados y discusión	104
5. ANÁLISIS DE UNA POSIBLE CORRELACIÓN ENTRE LAS TRAZAS FORMADAS EN DETECTORES CR-39 Y LAS ARBORESCENCIAS ELÉCTRICAS QUE SE GENERAN EN EL POLICARBONATO MEDIANTE EL GRABADO ELECTROQUÍMICO	111
5.1. Los fractales y el concepto de dimensión fractal	112
5.2. Objetivo del proyecto.....	117
5.3. Metodología y experimentación.....	118
5.3.1. Diseño y construcción de la cámara electroquímica.....	124
5.3.2. Construcción de la fuente de alto voltaje de corriente alterna (CA).....	128
5.3.3. Generación y caracterización de las arborescencias eléctricas	134
5.4. Resultados y discusión	140
CONCLUSIONES	151
REFERENCIAS	159
BIBLIOGRAFÍA	169
ANEXO 1	173
ANEXO 2	177
ANEXO 3	181
ANEXO 4	183

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. El espectro electromagnético.....	1
Figura 1.2. A los círculos negros que se observan en la imagen se les denominan trazas. En realidad estos círculos son cavidades cónicas vistas de frente, el punto blanco de en medio de cada círculo es el vértice.....	15
Figura 1.3. Superficie de un policarbonato antes de ser pre-grabado químicamente	18
Figura 1.4. Geometría de una traza producida por una partícula ionizante que incide verticalmente al material.....	19
Figura 1.5. Geometría que adquiere la traza para una variable	21
Figura 1.6. Trazas en un policarbonato observadas en un microscopio SEM. En la imagen puede observarse el daño producido por el haz de energía que genera el equipo	22
Figura 1.7. Las trazas se observan como círculos negros de diferentes tamaños cuando las partículas inciden en un ángulo de 90° al plano del material.....	23
Figura 1.8. Las trazas se observan como gotas negras de diferentes tamaños cuando las partículas inciden en un ángulo diferente de 90° al plano del material.....	24
Figura 1.9. Ejemplos de calibración para un detector de policarbonato con 5 diferentes tipos de fuentes radiactivas.....	25
Figura 1.10. Arborescencias eléctricas que se generan por el rompimiento dieléctrico que presenta el material después de realizar el grabado electroquímico	27
Figura 1.11. Figura de Lichtenberg desarrollada dentro de un bloque de acrílico (PMMA) ...	28
Figura 1.12. Cámara electroquímica diseñada y manufacturada de Polimetilmetacrilato en el IFUNAM.....	29
Figura 1.13. Estructura del monómero que conforma al policarbonato CR-39.....	31
Figura 2.1. La Gran Pirámide de Cholula.....	36
Figura 2.2. Maqueta que muestra las diferentes etapas constructivas que conforman a la Gran Pirámide	36
Figura 2.3. Santuario de “Nuestra Señora de los Remedios” construido sobre la Gran Pirámide	37
Figura 2.4. Túnel con techo angular excavado para explorar a la Gran Pirámide	38
Figura 2.5. Cadena de desintegración del uranio-238.....	40
Figura 2.6. CR-39 producido por la compañía Lantrack	44
Figura 2.7. Dispositivo medidor de radón desarrollado por el PAD-IFUNAM	45
Figura 2.8. Mapa del levantamiento de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula (escala 1:750)	46

Figura 2.9. Posiciones exactas dónde fueron colocados los 20 dispositivos y su código numérico de identificación.....	47
Figura 2.10. Baño María eléctrico de laboratorio donde se realizó el grabado químico de los CR-39.....	48
Figura 2.11. Microscopio óptico Carl Zeiss donde fueron observados los CR-39 y cámara Canon dónde fueron digitalizadas las imágenes observadas	49
Figura 2.12. Imagen a) campo fotografiado en el detector 8, imagen b) campo fotografiado en el detector 16.....	51
Figura 3.1. Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México	60
Figura 3.2. a) Sistema de medición dinámico utilizado para medir el radón en el agua del manantial, b) esquema de las partes que conforman al sistema dinámico.....	64
Figura 3.3. Gráfica de la concentración de Rn ²²² cuantificada por el detector AlphaGUARD en una de las muestras de agua analizadas	67
Figura 3.4. Laboratorio en el IFUNAM dónde fue realizado el análisis de espectrometría de radiación gamma.....	70
Figura 3.5. Gráfica del espectro de energía gamma de la radiación de fondo y del agua del manantial.....	70
Figura 3.6. Construcción en Geant4 de diferentes parámetros antes de ejecutar la primera simulación. En la imagen se puede observar: el mundo, el detector, la fuente de radiación y la geometría.....	72
Figura 3.7. La fuente de radiación y la geometría construida en Genat4 para la primera simulación.....	73
Figura 3.9. Gráficas donde se muestra el área de expansión de la radiación generada por partículas y partículas secundarias a diferentes alturas.....	80
Figura 3.10. Fluencia de las partículas conforme se incrementa la altura	82
Figura 3.11. Área de propagación de las partículas conforme se incrementa la altura.....	82
Figura 3.12. Histograma de la dosis de energía depositada por la radiación al interactuar con el aire.....	83
Figura 3.10. Gráficas de la dosis de energía depositada por la radiación al interactuar con el aire desde 2 perspectivas diferentes; a) ejes x, z y b) ejes x, y	84
Figura 4.1. Algunas de las diferentes partes que conforman un acelerador lineal para aplicaciones médicas.....	91
Figura 4.2. Acelerador lineal utilizado en el cuarto donde se realizó la medición	96
Figura 4.3. a) Imagen del dispositivo detector y de los elementos que lo conforman, b) esquema de las interacciones n, p que ocurren dentro del dispositivo detector.....	98
Figura 4.4. Esquemas dónde se observan las dimensiones de la habitación, la localización del LINAC y de la camilla dentro del cuarto y las posiciones de los 16 dispositivos colocados.....	100

Figura 4.5. Gráfico que muestra el número de trazas registradas en cada CR-39 en función del tiempo de exposición	102
Figura 4.6. Concentraciones de neutrones secundarios registrados en la superficie frontal de cada CR-39.....	104
Figura 4.7. Histograma de la distribución del número de trazas contabilizadas en la superficie frontal de cada CR-39 en función de la distancia que tuvo cada detector con respecto a la fuente de emisión de energía de radiación	106
Figura 4.8. Histograma de la distribución del número de trazas contabilizadas en la superficie posterior de cada CR-39 en función de la distancia que tuvo cada detector con respecto a la fuente de emisión de energía de radiación	107
Figura 4.9. Fotografías tomadas al dispositivo 8. a) Trazas observadas en la superficie frontal del CR-39 y b) trazas observadas en la superficie posterior del CR-39	108
Figura 5.1. Diferentes monstruos matemáticos y la forma de construirlos: a) conjunto de Cantor, b) curva de Koch, c) alfombra de Sierpinski, d) curva de Hilbert y e) esponja de Menger .	113
Figura 5.2. Ejemplos de estructuras fractales generadas por computadora	114
Figura 5.3. Ejemplos de estructuras fractales en la naturaleza	115
Figura 5.4. CR-39 manufacturado por la compañía Track Analysis System Ltd	118
Figura 5.5. Fuente de uranio utilizada para irradiar el CR-39	119
Figura 5.6. Baño María eléctrico de laboratorio utilizado para el grabado químico de los detectores	120
Figura 5.7. Microscopio óptico y cámara Carl Zeiss utilizados para caracterizar las trazas de uranio	120
Figura 5.8. Trazas generadas al exponer el CR-39 a la fuente de uranio a diferentes tiempos: a) 50 segundos, b) 2 minutos, c) 5 minutos y d) 20 minutos	122
Figura 5.9. Histograma de la caracterización de las trazas obtenidas en el CR-39 irradiado durante 2 minutos.....	123
Figura 5.10. Impresión de la cámara electroquímica.....	125
Figura 5.11. a) CNC HAAS VF-2SS. b) Maquinado de la cámara electroquímica	126
Figura 5.12. Esquema completo de la cámara electroquímica elaborado en el programa AUTODESK Inventor	127
Figura 5.13. Cámara electroquímica maquinada armada y desarmada	127
Figura 5.14. Diagrama de bloques de los diferentes dispositivos que constituyen la fuente de alto voltaje de CA	128
Figura 5.15. Diagrama del circuito electrónico del oscilador de señal senoidal.....	130
Figura 5.16. Diagrama del circuito electrónico del preamplificador	131
Figura 5.17. Diagrama del circuito electrónico del amplificador de potencia.....	131
Figura 5.18. Diagrama del circuito electrónico de las 2 fuentes de potencia	132

Figura 5.19. Diagrama de la conexión del transformador a la cámara electroquímica y al divisor de voltaje.....	134
Figura 5.20. Trazas formadas en el CR-39 después de ser irradiado con la fuente de uranio durante 5 segundos; ampliación de: a) 50 aumentos, b) 200 aumentos	135
Figura 5.21. Triángulo de Sierpinski	137
Figura 5.22. a) Imagen original, b) conversión de la imagen a escala de grises y c) bordes de la figura que el programa pudo identificar	138
Figura 5.23. a) Imagen con el fondo eliminado, b) conversión de la imagen a escala de grises y c) bordes de la figura que el programa pudo identificar.....	138
Figura 5.24. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 5 horas; a) traza y b) inicio del rompimiento dieléctrico de esta traza.....	140
Figura 5.25. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 10 horas; ampliación de: a) 200 aumentos y b) 500 aumentos.....	141
Figura 5.26. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 20 horas; ampliación de: a) 200 aumentos y b) 500 aumentos.....	142
Figura 5.27. Número de campos que son necesarios fotografiar para poder observar nítidamente todas las ramificaciones que conforman una arborescencia eléctrica	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de transformaciones que tienen lugar en los núclidos que producen una desintegración	8
Tabla 1.2. Factores de peso Q para distintos tipos de radiación	12
Tabla 1.3. Unidades para cada magnitud de medición que permite caracterizar cuantitativamente a una fuente de emisión de energía radiactiva.....	13
Tabla 2.1. Partículas emitidas durante el proceso de desintegración que generan diferentes isotopos de radón, así como su periodo, energía y la cadena de la que proviene	39
Tabla 2.2. Comparación entre los diferentes tipos de radiación que recibe el ser humano al año con respecto al radón-222 en condiciones normales.....	41
Tabla 2.3. Valor de concentración de radón recomendado por diversas organizaciones para la población en general tanto en viviendas como en lugares de trabajo	41
Tabla 2.4. Promedio de la actividad del radón que registró cada CR-39 colocado dentro de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula.....	50
Tabla 3.1. Valor de concentración de radón contenido en agua para el consumo humano recomendado por dos organizaciones	55
Tabla 3.2. Características principales del equipo AlphaGUARD.....	63
Tabla 3.3. Resultados de los niveles de concentración de radón promedios obtenidos para cada una de las cuatro mediciones realizadas	67
Tabla 4.1. Clasificación de los neutrones de acuerdo a su energía o temperatura.....	92
Tabla 4.2. Posibles resultados que se pueden generar después de la interacción de un neutrón con la materia.....	93
Tabla 4.3 Densidad de trazas obtenidas en cada CR-39 según el tiempo que se dejó expuesto a la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$	101
Tabla 4.4. Flujo total de neutrones calculado para cada uno de los cuatro CR-39 expuesto a radiación.....	103
Tabla 5.1. Comparación entre el valor del diámetro de las 7 trazas seleccionadas y la dimensión de Hausdorff obtenida de las arborescencias eléctricas generadas	146

RESUMEN

En la presente tesis se realizaron cuatro trabajos de estudio de las radiaciones en el campo de la detección y cuantificación de partículas alfas y neutrones. Para su desarrollo, se empleó principalmente la denominada Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos y el detector CR-39, así como de diversos recursos informáticos como los programas Geant4, MATLAB® y AUTODESK Inventor®. El primero de estos trabajos presenta mediciones realizadas en algunos túneles de la Gran Pirámide de Cholula con la finalidad de conocer los niveles de concentración del gas radiactivo radón en su interior, estas mediciones fueron realizadas mediante el uso de un dispositivo desarrollado por el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría en el Instituto de Física de la UNAM (PAD-IFUNAM). Los resultados de estas mediciones revelaron un nivel de concentración de radón por encima de los límites recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. El segundo trabajo presenta dos simulaciones computacionales para determinar el alcance teórico de la expansión y el depósito de dosis de energía de las partículas alfa que son emitidas por isótopos de radón, estos isótopos se encuentran contenidos, de manera natural, en el agua de un manantial. Los resultados de las simulaciones muestran que la mayor parte de la concentración de la radiación que genera las partículas alfa se mantiene, hasta los 20 metros de altura, dentro de los límites del área superficial que abarca el manantial; mientras que la dosis de energía se deposita entre los 7 y los 8 metros de altura, también dentro de estos límites superficiales. En el tercer trabajo se cuantificó y analizó la concentración de neutrones secundarios en diferentes zonas dentro de un cuarto de tratamientos médicos donde opera un acelerador lineal (LINAC). Estas mediciones se realizaron con otro dispositivo detector, también desarrollado por el PAD-IFUNAM. Los resultados mostraron que existe una elevada concentración de neutrones secundarios dentro del cuarto, en especial en la zona donde se encuentra el cabezal del equipo y en la cabecera de la camilla. El último trabajo se enfocó en analizar si existe una manera de correlacionar los diámetros de las trazas que producen ciertas partículas ionizantes al interactuar con el policarbonato CR-39 y las arborescencias eléctricas que se forman en este material después de someterlo a un proceso denominado grabado electroquímico, con la finalidad de desarrollar, en futuros trabajos, una metodología que permita determinar la energía o el tipo de partícula ionizante a partir de la caracterización de estas arborescencias eléctricas. Los resultados de los primeros experimentos realizados muestran que es posible correlacionar el diámetro de la traza con la dimensión fractal de Hausdorff-Besicovitch de la arborescencia debido a que se observó que, entre mayor es el diámetro de la traza mayor es la dimensión de Hausdorff de la arborescencia, por lo que resulta factible el desarrollo de este método a partir de esta premisa.

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición en la tierra, hace aproximadamente 195 000 años [1], el ser humano ha estado expuesto a diversas radiaciones ionizantes y continuará haciéndolo por el resto de su existencia. Radiaciones ionizantes generadas por algunos elementos que se encuentran en la corteza terrestre (como el uranio-238, el uranio-235, el torio-232 y el potasio-40) [2], en el aire (como el radón-222) [3], en los alimentos (como el potasio-40) [4] e incluso dentro del propio cuerpo humano (todos los organismos vivos contienen potasio-40, carbono-14, sodio-32, uranio-238 y torio-232), así como de todas aquellas que provienen de los rayos cósmicos [5]. A todo el conjunto de las radiaciones ionizantes que recibe el ser humano y que proviene de fuentes naturales se le denominan radiación de fondo. Es evidente que las dosis de energía ionizante por radiación de fondo que un ser humano recibirá dependerá de diversos factores como: su posición geográfica [6] y la altitud a la que se encuentre, la actividad solar [7] o la actividad geológica [8]; por ejemplo, la energía ionizante por radiación cósmica que recibirá un piloto de aviación será mucho mayor que la que reciba una persona que trabaje en una oficina [9]. Indudablemente, la tolerancia del cuerpo humano a los efectos negativos de las dosis de energía ionizante que recibe del entorno es el resultado de un proceso de adaptación y cambios en su ADN que se han venido desarrollando a lo largo de mucho tiempo [10]. Existe incluso una teoría, no aceptada por toda la comunidad científica, que se denomina "Hormesis de radiación" [11-13], que postula que los seres humanos que son expuestos a determinados niveles de radiación ionizante (a parte de la propia radiación de fondo) obtienen como resultado efectos beneficiosos en su salud, como el fortalecimiento de su sistema inmunológico o la eliminación de ciertos tipos de virus y bacterias. Un ejemplo de esta actividad sería el sumergir al cuerpo humano al agua de un manantial natural que contenga determinadas concentraciones de radón. La Republica Mexicana tiene diversos manantiales que presentan esta característica, incluso los propios administradores de estos lugares los consideran como "manantiales minero-medicinales"; como por ejemplo, en la ciudad de Cuautla (en el estado de Morelos) el balneario de Agua Hedionda.

Sin embargo, con el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el ámbito de la física nuclear y de partículas, los seres humanos comenzaron a exponerse a radiaciones ionizantes artificiales, es decir, toda aquella energía ionizante que se genera producto de la manipulación de la materia por el hombre para conseguir diversos objetivos. Algunos ejemplos de estas fuentes de radiación ionizante artificial son los aparatos de Rayos-X [14], los radioisótopos producidos artificialmente [15] o los aceleradores lineales (*linear accelerator* o LINAC por sus siglas en inglés) [16]. Si bien es cierto que el desarrollo de estas tecnologías han generado grandes beneficios para el progreso de la humanidad (principalmente en las áreas de la industria energética, la industria agroalimentaria, la industria aeroespacial y en la medicina), también es cierto que estas tecnologías someten a múltiples riesgos a las personas que, directa o indirectamente, se encuentran relacionadas con la manipulación de estas tecnologías. En las centrales nucleares dónde se genera energía eléctrica, los trabajadores no son los únicos que se encuentran expuestos a las radiaciones ionizantes derivadas del uso de materiales como el uranio o el plutonio, también la población que se beneficia de la producción de la electricidad

puede someterse a esta energía cuando, por diversas razones, se producen fallos en los sistemas de refrigeración de los reactores nucleares, produciéndose explosiones en el reactor que libera elevadas dosis de materiales radiactivos a la atmósfera; como en los accidentes ocurridos en las centrales de Chernóbil (1986), Three Mile Island (1979) o en Fukushima I (2011). En los hospitales y en los laboratorios clínicos donde se utilizan equipos de Rayos-X, los pacientes no son los únicos que son sometidos de manera directa a la radiación ionizante que generan estos aparatos, también los técnicos que operan los equipos se encuentran sometidos de manera indirecta a sus efectos negativos [17].

Indudablemente el descubrimiento de la radiación ionizante fue uno de los eventos más importantes en la historia de la ciencia, no sólo por los posteriores avances tecnológicos que se produjeron, sino también porque permitió entender que existían determinados tipos de energías que podían generar cambios en los procesos biológicos de los seres vivos al interactuar con ella [18]. Fue lamentable que los primeros investigadores de la radiactividad y la radiación ionizante desconocieran sus efectos negativos pues algunos de ellos comprometerían gravemente su salud, como la celebre Marie Curie, descubridora del elemento radio, o Elizabeth Fleischman, investigadora que junto con su marido realizaría diversos experimentos con una máquina de Rayos-X. Después de que los científicos aprendieron a detectar y cuantificar los diferentes tipos de energías ionizantes que existían fue necesario desarrollar tecnologías, procedimientos y normas que permitieran proteger a la población y a los propios investigadores de sus efectos nocivos. Con este objetivo, la Sociedad Internacional de Radiología fundó en 1928 un organismo internacional no gubernamental denominado “Comisión Internacional de Protección contra los rayos X y el Radium”, cuyo objetivo fue reunir a un grupo de profesionales relacionados con estos temas para la elaboración de normas de protección radiológica. La protección radiológica puede definirse como una actividad multidisciplinar de carácter científico y técnico que tiene como finalidad la protección de las personas, sus descendientes y del medio ambiente contra los riesgos que puedan resultar de las actividades humanas que impliquen el uso de materiales y equipos generadores de radiación ionizante. Mas tarde en 1950, la Comisión cambio su nombre a *International Committee for Radiation Protection (ICRP)* y hoy en día continua siendo el principal organismo encargado de establecer las recomendaciones, legislaciones y programas que forman la base de los estándares de protección radiológica y de la práctica de sus actividades en todo el mundo [19]. Por ejemplo, cuando fue redactado el manual de las “normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación” por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Internacional del Trabajo (OIT por sus siglas en inglés), se utilizaron muchas de las recomendaciones contenidas en la publicación "Annals" de la ICRP [20]. Además de la propia OIEA, existen otros organismos no internacionales que crean normas y recomendaciones de protección radiológica en sus respectivos países de origen, sin embargo, gracias a la importancia e impacto de sus investigaciones y por el respeto de la trayectoria que se han forjado desde su formación, sus normas y recomendaciones se ha convertido en referencias para otros países. Como por ejemplo, la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC por sus siglas en inglés) encargada de la supervisión de los asuntos relacionados con la energía eléctrica y la seguridad nuclear en ese país, la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM) organismo europeo encargado de coordinar los programas de investigación de la energía nuclear, por citar sólo algunos organismos. Mención especial para los asuntos relacionados con esta tesis merece la

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés) encargada de proteger la salud y el medio ambiente en ese país. La US-EPA ha sido un organismo comprometido principalmente en el estudio del gas radiactivo radón [21], desde sus efectos nocivos en la salud de las personas [22] hasta el análisis de los niveles seguros y peligrosos de su concentración en el agua de consumo humano [23] y en el aire en lugares cerrados donde habitan o trabajan las personas [24], desde los métodos y equipos para su medición y su mitigación [25] (atenuación de los daños potenciales sobre las personas), hasta la elaboración de mapas de su distribución en el territorio de los Estados Unidos [26]. Aunque los estándares de recomendación sobre los niveles seguros y peligrosos de la concentración de radón en el agua y en el aire varían dependiendo de cada país su información ha servido como una referencia general para otros países, incluyendo a México.

Cuando se desean implementar métodos y tecnologías para la protección de las personas de las radiaciones ionizantes, resulta más sencillo la mayoría de las veces, realizarlo en entornos donde se generan radiaciones artificiales a realizarlo donde se generan naturales, básicamente, porque en todos aquellos lugares donde existe una fuente de emisión artificial se conocen tres factores fundamentales que permiten proteger a las personas de una manera más eficaz: la localización de la fuente de emisión, su naturaleza (características) y su actividad radiactiva (medida en Becquerelios) o la unidad de la energía de las partículas que emite (medida en electronvoltios o eV). Por el contrario, la localización y características de las diferentes fuentes de emisión natural que existen alrededor del mundo se desconocen [27] y, lamentablemente, a veces son localizadas hasta que se observan sus efectos negativos en la población [28]. Por esta razón es muy importante que los científicos y técnicos detecten y cuantifiquen los niveles de radiación ionizante que existen en el aire de las casas y de los lugares de trabajo, en el agua y en los alimentos que los gobiernos y compañías privadas suministran a la población, en los suelos de los terrenos utilizados para cultivar, en el agua de manantiales y pozos y en todos aquellos lugares confinados que son utilizados con fines turísticos, de exploración o para la extracción de minerales (como por ejemplo túneles o cavernas), sin olvidar el monitoreo constante que se debe realizar al agua y al aire que se encuentran cerca de las centrales nucleares.

Sin embargo, es importante también que los científicos e ingenieros realicen investigaciones que tengan por objetivo desarrollar nuevas tecnologías de detección y cuantificación de la radiación ionizante o de mejorar la eficiencia de las ya existentes. Hay que señalar que, en la medida en que los países generen sus propios equipos de detección y cuantificación y eviten la dependencia de la tecnología extranjera, será más fácil establecer los procedimientos de protección radiológica en todas las áreas que así lo requieran. De esta manera, los recursos económicos que destine el gobierno de un país a esta cuestión podrán ser utilizados para contratar y capacitar personal técnico para la realización de esta trabajo y no para la compra de los medidores que se requieren para la detección y cuantificación de los diferentes tipos de energía ionizante que existen. No obstante, resulta trascendental que las investigaciones también se centren en la comprensión del propio fenómeno de la radiación, sólo de esta manera los seres humanos aprenderemos no sólo a aprovecharla de una manera más eficiente, como los novedosas estudios que se realizan actualmente para generar energía eléctrica a partir de la fusión nuclear [29, 30], sino también para entender como proteger, de una manera más adecuada, el ambiente y a la población de sus efectos nocivos.

Finalmente, la protección radiológica no estaría completa sin una correcta concientización de la población sobre el hecho de que los seres humanos podemos estar expuestos innecesariamente, a dosis elevadas de radiación ionizante. Existen campañas para disminuir la exposición de la población a los químicos industriales [31], incluso se ha hecho un llamado a la necesidad de limitar la exposición de la población a la radiación electromagnética generada por transformadores y torres de alta tensión [32], pero se ha dicho muy poco de la necesidad de medir la actividad radiactiva del agua y de los alimentos que consumimos, así como del aire que respiramos en nuestro casa y en nuestros lugares de trabajo. Y aunque existen algunos países como Estados Unidos o Canadá que vigilan muy de cerca esta cuestión, la gran mayoría de los denominados países subdesarrollados no le otorgan la importancia que merece este tema. Por esta razón los científicos de cada país deben promover que los gobiernos, en conjunto con sus centros de investigación y las empresas privadas que les concierna, inviertan en el desarrollo de mediciones periódicas de la actividad radiactiva del agua y del aire en diferentes entornos, así como de todos aquellos alimentos que se importen y exporten del país.

La tesis que a continuación se presenta tiene como objetivo principal la medición de la radiación ionizante en diferentes entornos con la finalidad de proteger a las personas que pueden estar sometidos a sus efectos. Sin embargo, esta tesis también ha sido desarrollada pretendiendo cubrir los otros dos aspectos señalados anteriormente. Por una parte se ha buscado mejorar la eficiencia de la detección de las partículas ionizantes en una de las múltiples metodologías que existen para su cuantificación, la de la denominada Metodología de Trazas Nucleares, y por otra parte se ha buscado mostrar a la comunidad científica de Puebla y a la población, en general, la importancia que tiene la medición de la radiación ionizante en diferentes entornos; en total se desarrollaron cuatro diferentes trabajos de investigación. Adicionalmente, se ha pretendido establecer las bases para crear un grupo de investigación, en la ciudad de Puebla, que tenga por objetivo el estudio y la medición de la radiación ionizante. Este grupo se encuentra conformado por científicos de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas y del Centro Universitario de Vinculación de la BUAP, del Instituto de Física de la UNAM y del Departamento de Física del CINVESTAV-IPN.

El primero de estos trabajos consistió en medir la concentración del gas radón dentro de los túneles excavados para la exploración de la Gran Pirámide de Cholula, esta medición se realizó utilizando un dispositivo que fue desarrollado en base a los fundamentos científico-técnicos de la Metodología de Trazas Nucleares.

En el segundo trabajo se realizaron dos simulaciones computacionales, la primera permitió determinar el alcance teórico de la expansión de las partículas alfa emitidas por el gas radón contenido en el agua de un manantial y la segunda simulación permitió determinar el área y la altura en dónde la radiación generada por estas partículas deposita su dosis de energía, ambas simulaciones fueron desarrolladas en el programa informático Geant4.

El tercer trabajo tuvo por objetivo medir y analizar la concentración de neutrones secundarios en diferentes zonas dentro de un cuarto dónde se dan tratamientos para combatir el cáncer con un acelerador lineal, para realizar estas mediciones se hizo uso de un dispositivo detector que se desarrolló, nuevamente, bajo los fundamentos de la Metodología de Trazas Nucleares.

El último trabajo tuvo por objetivo analizar la posibilidad de correlacionar las dimensiones geométricas del daño por radiación (trazas nucleares) producido por el paso de ciertas partículas ionizantes a través del policarbonato CR-39 y la dimensión fractal de Hausdorff-Besicovitch de unas estructuras conocidas como arborescencias eléctricas que se forman en el policarbonato (debajo del daño por radiación) después de someterlo a un proceso conocido como grabado electroquímico; con la finalidad de desarrollar, en futuros trabajos, un método que permita determinar la energía o el tipo de partícula ionizante que incidió en el CR-39 a partir del cálculo de la dimensión de Hausdorff de las arborescencias generadas y así disminuir el tiempo de exposición a la radiación ionizante que requiere un detector CR-39 para poder cuantificarla eficientemente.

Esta tesis ha sido dividida de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presenta el fundamento teórico. En el capítulo 2 se presenta el objetivo, la metodología y experimentación y los resultados obtenidos de la medición del radón en los túneles de la Gran Pirámide de Cholula. El capítulo 3 presenta el objetivo, la metodología y experimentación y los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales realizadas en Geant4. El capítulo 4 presenta el objetivo, la metodología y experimentación y los resultados obtenidos de la medición de la concentración de los neutrones secundarios en diferentes zonas dentro del cuarto de tratamientos. El capítulo 5 presenta el objetivo, la metodología y experimentación y los resultados obtenidos del análisis de la correlación entre el diámetro de las trazas nucleares y la dimensión fractal de Hausdorff de las arborescencias eléctricas.

Posteriormente se presentan las conclusiones que se desglosan de la realización de estos 4 trabajos de investigación.

Después se presentan las referencias a los artículos científicos, páginas de internet y libros utilizados para la redacción, tanto del fundamento teórico como para la realización de los cuatro trabajos de investigación. Luego se presenta la bibliografía empleada para la escritura del fundamento teórico. Es importante mencionar que los libros no fueron enumerados en orden alfabético, sino en base a la importancia que tuvieron para la escritura de este capítulo. Tanto las referencias como la bibliografía fueron colocadas siguiendo el formato de estilo de la *American Psychological Association (APA)*.

Finalmente se presenta un apartado de Anexos, en dónde se muestran los cuatro códigos compilados en los dos lenguajes de programación utilizados para el desarrollo de esta tesis: C++ (Geant4) y MATLAB®.

"La vida es un misterio extraordinario. No el misterio que hay en los libros, no el misterio del que habla la gente, sino un misterio que uno ha de descubrir por sí mismo; y por eso es tan importante para ustedes comprender lo pequeño, lo limitado, lo trivial, e ir más allá de todo eso".

Jiddu Krishnamurti

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. La radiación ionizante.

La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía por cualquier medio material y puede ocurrir en forma de ondas electromagnéticas o en forma de partículas. A la energía en forma de ondas electromagnéticas también se le denomina radiación electromagnética y puede manifestarse de diferentes maneras: rayos gamma, rayos-X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja, ondas microondas u ondas de radio (figura 1.1). A la energía en forma de partículas también se le denomina radiación corpuscular, algunos ejemplos son: partículas α , partículas β , neutrones y protones. Las principales áreas de la ciencia que se encargan del estudio de la radiación son la física de radiaciones y la física nuclear. Aunque existen otras áreas que requieren de su conocimiento para la explicación de otros fenómenos físicos como: la astrofísica, la física de rayos cósmicos, la física de altas energías, la física de plasmas y la física de la materia condensada, por nombrar solo algunas.

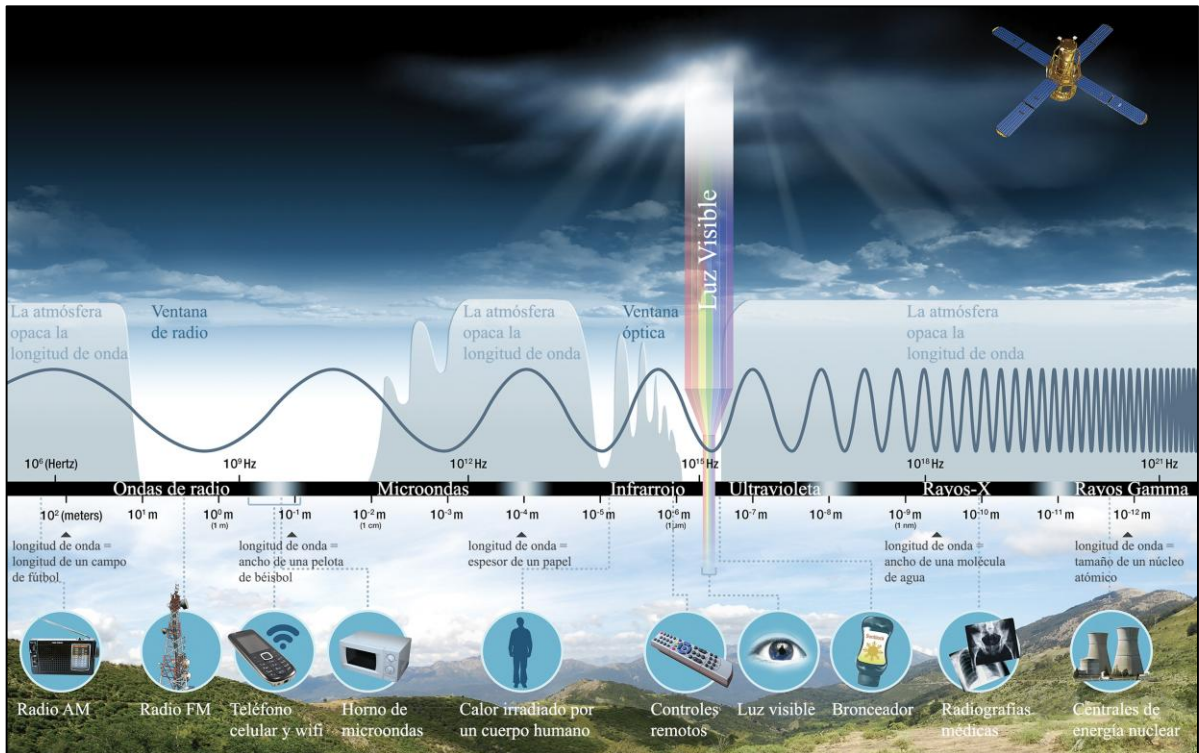


Figura 1.1. El espectro electromagnético. [33]

Las partículas, por su parte, se clasifican en partículas cargadas y partículas neutras. Las partículas cargadas son aquellas que poseen una propiedad física denominada carga eléctrica, lo que significa que manifiestan fuerzas de atracción y repulsión entre ellas a través de campos electromagnéticos, algunos ejemplos de partículas cargadas son: el electrón, el positrón, el protón, el muon y el tauón. Por el contrario, las partículas neutras no manifiestan fuerzas de atracción o repulsión, algunos ejemplos de partículas neutras son: el neutrón, el fotón, el neutrino y el gluon. Esta clasificación permite determinar, de una mejor manera, los fenómenos que se generan cuando las partículas interactúan con la materia.

Uno de los fenómenos más comunes que se producen durante la interacción de las partículas cargadas con la materia es el de la ionización. Las partículas neutras, particularmente, no producen ionización. La radiación ionizante ocurre cuando las partículas cargadas pierden energía al interactuar con los átomos o moléculas de la materia, esta energía se transfiere a los átomos generando como consecuencia pérdidas de sus electrones durante el proceso; se dice entonces que el átomo ha sido ionizado. Por el contrario, en la radiación no ionizante las interacciones de las partículas con la materia no generan pérdidas de electrones en los átomos. Existen tres tipos de fuentes de radiación ionizante:

- la radiactividad (natural o artificial).
- la radiación cósmica (natural).
- los aceleradores de partículas (artificial).

Si se tomara como referencia el espectro electromagnético, los tipos de radiación electromagnética que tienen la capacidad de ionizar la materia son aquellos que poseen una frecuencia mayor aproximada a los 10×10^{16} Hertz (Hz) y una energía mayor aproximada a los 10×10^2 electronvoltios (eV). Analizando la figura 1.1, se observa que estas características pertenecen a los rayos gamma, los rayos X y a una fracción de la radiación ultravioleta. El resto de las radiaciones electromagnéticas del espectro (incluyendo la otra fracción de la radiación ultravioleta) no tienen la capacidad de ionizar la materia, aunque existen algunas excepciones artificiales como los láseres ultra intensos.

Si se tomara como referencia la radiación corpuscular, las partículas que, en general, tienen la capacidad de ionizar la materia son aquellas que son emitidas durante el proceso conocido como desintegración radiactiva (también conocido como decaimiento radiactivo o simplemente radiactividad). La desintegración radiactiva es un fenómeno que ocurre en ciertos elementos naturales y artificiales, en estos elementos el núcleo atómico es inestable y emite espontáneamente una o varias partículas produciendo una desexcitación a un estado de menor energía, transformándose en un núcleo más estable. Además de emitir partículas estos elementos también pueden emitir radiación electromagnética (fotones) o desintegrarse en varios núcleos más pequeños modificando su identidad.

1.1.1. Interacción de la radiación con la materia.

Cuando las partículas cargadas interactúan con la materia se generan colisiones, estas colisiones pueden ocurrir con electrones, con núcleos atómicos o con cargas libres y pueden ser de tipo elástico o inelástico. El primer caso ocurre cuando la energía cinética total del sistema se mantiene constante y el segundo caso ocurre cuando la energía no se conserva y se transforma en otro tipo de energía. La interacción electromagnética es la más probable de las interacciones en partículas cargadas, pero no es la más intensa. Los fenómenos que se pueden producir por el paso de las partículas cargadas se pueden dividir según la masa del proyectil en: partículas cargadas masivas y partículas cargadas ligeras (e^\pm). Los fenómenos de interacción que se producen en las partículas cargadas masivas se subdividen en:

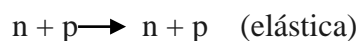
- colisiones con electrones (e^-): pérdida de energía.
- colisiones con núcleos: cambio de dirección.

y los fenómenos que pueden ocurrir en las partículas cargadas ligeras (e^\pm) se subdividen en:

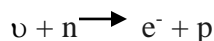
- colisiones con electrones (e^-): pérdida de energía.
- colisiones con núcleos: cambio de dirección.
- radiación de frenado (Bremsstrahlung): emisión de radiación X o gamma.

En partículas neutras no existe la interacción electromagnética, por lo que se producen otro tipo de interacciones según el tipo de partícula neutra.

Para el caso de los neutrones (n) se produce la interacción fuerte, por ejemplo:



Para el caso de los neutrinos (ν) se produce la interacción débil, por ejemplo:



Para el caso del fotón (γ), se produce la interacción electromagnética a partir de los siguientes fenómenos:

1. **Efecto fotoeléctrico.** Ocurre cuando un fotón interactúa con un átomo, transfiriendo en el evento toda su energía al átomo, posteriormente el átomo al desexcitarse emite un electrón. En esta interacción el fotón no colisiona con un electrón libre, sino con el átomo como un conjunto. Para rayos gamma con elevada energía, el origen del electrón eyectado proviene

de una de las capas más fuertemente ligadas al átomo.

2. **Efecto Compton.** Ocurre cuando un fotón colisiona con un electrón libre, transfiriendo una parte de su energía al electrón. Como resultado de esta interacción el electrón es expulsado fuera de su orbital, mientras que el fotón será dispersado un ángulo θ (por esta razón se le denomina fotón dispersado), aumentando su longitud de onda.

3. **Creación de pares.** Ocurre cuando un fotón de alta energía se acerca a un campo eléctrico intenso (como por ejemplo al núcleo de un átomo). En este proceso el fotón se transformará en un par electrón-positrón. Este proceso sólo puede ocurrir en fotones que tengan una energía de 1.02 MeV, porque esta energía representa el doble de la energía de la masa del electrón en reposo. Si la energía del fotón es mayor a esta cantidad, el exceso de energía se repartirá entre el electrón y el positrón en forma de energía cinética. Luego de desacelerarse en el medio, el positrón se aniquilará y, normalmente, se crearán dos fotones como producto secundario de la interacción.

4. **Difusión coherente (difusión Rayleigh).** Es el esparcimiento de la radiación electromagnética con los electrones del material sin llegar a excitarlos.

5. **Absorción fotonuclear.** Proceso en el cual la interacción del fotón con el átomo genera como consecuencia la expulsión de un neutrón del núcleo. Este proceso se genera en energías que van desde los 10 hasta los 25 MeV.

1.2. Radiactividad.

La radiactividad o desintegración nuclear es un fenómeno natural que ocurre cuando el núcleo de un isótopo (elementos que poseen el mismo número atómico pero distinta masa atómica) se encuentra en un estado excitado producto de un balance no equilibrado de protones y neutrones en su núcleo. Como consecuencia de este desequilibrio, se produce una liberación de energía mediante la desintegración de su núcleo, generando de esta manera un estado energético más estable. Existen unos 40 elementos radiactivos en la corteza terrestre, los más abundantes son el uranio-238, el uranio-235, el torio-232 y el potasio-40, y se han sintetizado cerca de 2500 núclidos radiactivos artificiales (se le denomina núclido a una especie atómica caracterizada por su número másico, su número atómico y su estado de energía nuclear, siempre que la vida media de este estado sea lo suficientemente larga para ser observable).

1.2.1. Ley de desintegración radiactiva.

En una sustancia radiactiva el número de átomos desintegrados (dN) en un tiempo determinado (dt) es proporcional al número total de átomos; si definimos a λ como una constante que represente la desintegración de una sustancia radiactiva y N el número de átomos de este isótopo, podemos entonces definir la siguiente relación:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

A la relación dN/dt se le denomina como actividad (\mathcal{A}). Integrando ambas partes de la igualdad obtenemos el número de átomos que no se desintegraron en el isótopo después de un tiempo t y la anterior relación quedaría como:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

donde N_0 es el número total de átomos que hay en el isótopo antes de la desintegración. A esta relación se le denomina como ley de desintegración radiactiva. Esta expresión también puede escribirse de manera análoga como:

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

donde \mathcal{A}_0 representa la actividad inicial para un $t = 0$. Es un hecho que, independientemente del momento en el que comience a observarse la desintegración de la sustancia radiactiva, su actividad \mathcal{A} valdrá la mitad de su valor, obteniendo un tiempo $T_{1/2}$ que se denomina como periodo de semidesintegración; el valor del periodo dependerá del tipo de sustancia radiactiva. Por tanto si desde un inicio la actividad inicial vale la mitad ($\mathcal{A}_0/2$), entonces la relación entre el

periodo y la constante de desintegración puede establecerse de la siguiente manera:

$$\frac{A_0}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = 2$$

Ahora, si se aplican logaritmos neperianos a ambos lados de la igualdad anterior obtenemos la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

y λ puede ser determinada a partir de la observación de la vida media de la sustancia radiactiva. Para obtener la vida de la sustancia desintegrada con un número de átomos N en un tiempo determinado de años dt , se multiplica por el tiempo t en el que se ha desintegrado cada uno de sus átomos:

$$t = \int_0^1 \lambda N t dt = \int_0^1 N_0 e^{-\lambda t} (\lambda t) dt$$

Para un tiempo infinito se puede obtener la vida total de la sustancia radiactiva:

$$t_T = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} d(\lambda t) = \frac{N_0}{\lambda}$$

Pero como al observar la sustancia su actividad vale la mitad, entonces para el valor medio de la vida \bar{t} de uno de los átomos que existían anteriormente será:

$$\bar{t} = \frac{t_T}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

Como se puede observar, esta última expresión relaciona el valor medio de la vida de los átomos y la constante de desintegración de la sustancia radiactiva. Para determinar el valor medio de la sustancia se debe realizar una medición experimental para cada isótopo radiactivo. Ahora se puede calcular la proporción entre núcleos radiactivos (NR) y núcleos estables (NE) de una determinada sustancia radiactiva, es decir:

$$N_0 = NR + NE$$

Y la proporción entre el número total de núcleos y el de núcleos radiactivos $N_t = NR$ para un tiempo t es:

$$\frac{N_0}{N_t} = \frac{NR + NE}{NR} = 1 + \frac{NE}{NR}$$

Al ser una sustancia radiactiva suponemos que fue inestable desde el principio, por lo tanto, al principio todos sus átomos eran radiactivos ($t = 0$, $N_0 = NR$). El tiempo t que se requiere para obtener una proporción dada entre núcleos estables y núcleos radiactivos se produce si se sustituye N_0 / N_t en la expresión $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$, y aplicando nuevamente logaritmos se obtiene la siguiente expresión:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{NE}{NR} \right)$$

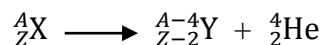
Si suponemos que todos los núcleos estables de la sustancia radiactiva se generan por desintegración radiactiva y si se obtiene experimentalmente el valor de la constante de desintegración, se tiene la posibilidad de obtener la vida de la sustancia radiactiva [34].

1.2.2. Tipos desintegración nuclear.

Los tipos de desintegración nuclear más frecuentes son las desintegraciones alfa (α), beta (β), gamma (γ), la fisión espontánea y la emisión de nucleones (un nucleón es el nombre colectivo que se le da al neutrón y al protón).

1.2.2.1. Desintegración alfa (α).

También denominada como decaimiento α , se produce cuando un núcleo pesado emite una partícula α . Las partículas α son núcleos formados por 2 protones y 2 neutrones. Al carecer de electrones presentan una carga eléctrica positiva de 3.2×10^{-19} coulombs y una masa atómica de 4 uma o 6.68×10^{-27} Kg. Por las características antes descritas las partículas α son, literalmente núcleos de Helio: ${}^4_2\text{He}$. Las partículas α poseen una gran capacidad de ionización pero carecen de una gran capacidad de penetración. En el decaimiento α , el número másico (A) y el número atómico (Z) de los elementos que se encuentran en la desintegración cumplirán la siguiente reacción:



Desintegración beta (β).

También denominada como decaimiento β o desintegración de Fermi, se produce cuando un núclido inestable emite una partícula β . Las partículas β son básicamente electrones o positrones dependiendo del desequilibrio que se presente en el núclido. Existen tres diferentes tipos de desintegración beta: desintegración beta inverso β^- , desintegración beta β^+ y captura electrónica (CE). La fuerza que origina la desintegración β es la interacción débil y se produce cuando el núclido tiene un exceso de nucleones (puede ser exceso de neutrones o de protones). Esta condición provoca que el nucleón que se encuentra en exceso se transforme en el otro (cambio de carga $n - p$), emitiendo en este proceso un electrón (e^-) o un positrón (e^+), de manera que se conserve la carga eléctrica. La tabla 1.1 presenta las transformaciones que tienen lugar entre los núclidos constituyentes:

Tabla 1.1. Tipos de transformaciones que tienen lugar en los núclidos que producen una desintegración β .

	Tipo	Proceso
1.	(β^-)	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
2.	(β^+)	$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
3.	(CE)	$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

En el caso número 3, como consecuencia de la captura de uno de los electrones de las capas internas por un protón se produce la emisión de un rayo-X, dejando un hueco en la estructura atómica. En la mayoría de los casos, los núclidos inestables que produjeron una desintegración β quedan en un estado excitado, dando lugar a una desintegración γ . Sin embargo, existen isótopos que no producen este resultado y se le conocen como emisores β puros. Las partículas β tienen una mayor capacidad de penetración en comparación con las partículas α , pero pueden ser fácilmente frenadas por muchos materiales con unos pocos milímetros de espesor; como por ejemplo, por madera o por aluminio.

1.2.2.3. Desintegración gamma (γ).

La desintegración γ se produce por la desexcitación de un núclido mediante la emisión de un fotón. Su capacidad de penetración es mucho mayor con respecto a las dos anteriores. La fuerza que origina la desintegración γ es la interacción electromagnética. Frecuentemente es un proceso rápido ($t_{1/2} = 1 \times 10^{-9}$ s). Si $t_{1/2} \geq 0.1$ s, se dice entonces que se tiene un isómero nuclear. Los isómeros nucleares presentan estados metaestables en su núcleo atómico por la excitación de uno o más de sus nucleones. Es posible que el núclido, al generar la desintegración γ , emita un electrón en lugar de un fotón. Este electrón será monoenergético y el valor de su energía dependerá de la capa electrónica de la que proceda. La desintegración γ es la fuente de producción de los denominados rayos gamma.

1.2.2.4. Fisión espontánea.

La fisión espontánea es un proceso de fragmentación de un núcleo pesado en dos núcleos más ligeros y con emisión de varios neutrones. La fisión espontánea difiere de la fisión nuclear en el origen que desencadena la desintegración nuclear. La fisión nuclear se produce por la colisión de una partícula, como por ejemplo un neutrón, con el núcleo de un isótopo y la fisión espontánea se produce porque un núcleo atómico alcanza su masa crítica, generándose una deformación nuclear creada por las enormes fuerzas de repulsión eléctricas en el núcleo. Este proceso se presenta en núcleos muy pesados que contienen una gran cantidad de neutrones.

1.2.2.5. Emisión de nucleones.

La emisión de nucleones se presenta en núcleos que aparecen como producto de procesos de fisión (tanto nuclear como espontánea). En general son núcleos que se encuentran lejos del valle de la estabilidad. Una fuente de nucleones, en este caso de neutrones, se presenta cuando se monta una configuración tipo sándwich de dos elementos: una fuente emisora de partículas α y un material denominado blanco o moderador. Este montaje permite que las partículas α emitidas interactúen con el material moderador, generando una reacción nuclear que produce que el blanco emita neutrones. Por ejemplo, se utiliza como emisor de partículas α un isótopo de ^{241}Am y como blanco un isótopo de ^9Be , la reacción obtenida será: $\alpha + ^9\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{n}$.

1.2.3. Unidades de medición de la radiactividad.

Como todos los fenómenos que ocurren en la naturaleza, los científicos han tenido la necesidad de definir magnitudes y unidades que permitan caracterizar cuantitativamente a las fuentes de emisión de energía radiactiva. Existen en general dos enfoques que permiten su caracterización:

- **Radiactividad:** Determina el nivel de actividad que presenta la fuente de radiación.
- **Dosimetría:** Determina el nivel de interacción (exposición, kerma, dosis absorbida y dosis equivalente) de la fuente de radiación con el medio material.

1.2.3.1. Actividad (\mathcal{A}).

La actividad mide el número de átomos que se desintegran en un isótopo radiactivo por unidad de tiempo. La actividad no depende del tipo de radiación (α , β , γ , etc.) ni de su energía, pero sí de su masa. A mayor masa de sustancia radiactiva, mayor actividad. La unidad de medida de la actividad hasta hace algunos años fue el Curio (Ci), nombrada así en honor de los físicos y químicos Pierre y Marie Curie. Su valor es de $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ desintegraciones nucleares / segundo (s), que es la actividad de 1 gramo de radio. Posteriormente el Curio fue remplazado por una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades (SI): el Becquerel, nombrada así

en honor al descubridor de la radiactividad, el físico Henri Becquerel. Su valor es de $1 \text{ Bq} = 1$ desintegración / s. Por tanto la equivalencia entre ambas unidades es: $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

La actividad es proporcional al número de átomos existentes (N) y puede calcularse utilizando la constante λ :

$$\mathcal{A} = \lambda N$$

La constante λ proporciona la probabilidad de desintegración de un átomo por unidad de tiempo. La masa de una sustancia radiactiva (M) y su actividad también son proporcionales, por lo que la actividad también puede calcularse mediante la relación:

$$\mathcal{A} = \lambda N = \lambda M (N_A / A')$$

dónde N_A es el número de Avogadro y A' el peso atómico de la sustancia. Por otra parte se le denomina actividad específica de un isótopo a la actividad por unidad de masa:

$$\mathcal{A}_{\text{esp}} = (\lambda N / M) = \lambda (N_A / A')$$

y se mide en Bq/Kg.

1.2.3.2. Exposición (X).

La exposición es una magnitud física que mide la cantidad de carga eléctrica liberada por una fuente de radiación en una unidad de masa de aire seco en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atmósfera y 20 °C, según el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología). En el SI su unidad de medida es el coulomb / kilogramo (C/Kg). La exposición cuantifica el efecto de ionización que provocan las partículas radiactivas al interactuar con las sustancias que atraviesan, en este caso aire, produciendo pares de cargas electrón-ion.

Anteriormente al C/Kg existía otra unidad de medida conocida como roentgen (R), establecido en honor al descubridor de los rayos X, Wilhelm Röntgen. El roentgen mide la cantidad de rayos X o gamma necesarios para crear una unidad electrostática de carga liberada en un centímetro cúbico de aire en condiciones estándar de presión y temperatura, es decir, mide el poder de ionización de los rayos X o gamma. La equivalencia del roentgen y el coulombio / kilogramo es: $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$.

1.2.3.3. Kerma (K).

El Kerma (acrónimo en inglés de energía cinética liberada por unidad de masa), se utiliza para determinar la energía depositada por partículas neutras y se obtiene al sumar las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, producidas por partículas incidentes neutras (dE_{tr}) en una masa (dm):

$$K = dE_{tr} / dm$$

Su unidad de medida en el SI es el gray (Gy), nombrada así en honor del físico Louis Gray. El gray equivale a la absorción de un julio de energía por un kilogramo de masa de material irradiado, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$. En electronvoltios su equivalencia sería: $1 \text{ Gy} = 6.24 \times 10^{12} \text{ MeV/Kg}$ de energía depositada.

1.2.3.4. Dosis absorbida (D).

La dosis absorbida es una medida que determina la cantidad de energía que una fuente de radiación ionizante deposita en un material al interactuar con él, es decir, cuantifica la energía que el material absorbe al ser irradiado. La dosis absorbida se obtiene mediante la siguiente relación:

$$D = dE_m / dm$$

dónde dE_m es la energía suministrada por la fuente de radiación ionizante y dm la masa irradiada. La energía suministrada (dE_m) es el resultado de la suma de la energía de irradiación menos la energía saliente, más la suma de las todas las transformaciones nucleares que se producen en los núcleos y partículas dentro del volumen que comprende la masa en reposo. La unidad de medida de la dosis absorbida es el rad (rd). $1 \text{ rad} = 100 \text{ ergios / gramo}$. El ergio (erg) es una unidad de medida que representa la cantidad de trabajo realizado por la fuerza de una dina a lo largo de una distancia de un centímetro y equivale a $1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ joules}$. En electronvoltios su equivalencia sería: $1 \text{ erg} = 6.2415 \times 10^{11} \text{ eV}$. En el SI también se utiliza el Gy como unidad de medida. La equivalencia entre ambos sería de $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$.

Se ha calculado que para el aire, la dosis absorbida correspondiente a 1 roentgen es: $D (1 \text{ R}) = 8.8 \text{ mGy}$.

1.2.3.5. Dosis equivalente (H).

La dosis equivalente cuantifica los efectos que produce la radiación en los seres vivos y viene dada por la siguiente ecuación:

$$H = (Q)(D)$$

dónde Q es un factor conocido como factor de peso de la radiación o factor de calidad y se calcula a partir de la energía depositada por unidad de recorrido. El factor de peso es una cantidad que depende de la energía y representa una aproximación a los denominados factores de efectividad biológica relativa (RBE). La diferencia entre el factor de peso y el factor RBE radica en que el segundo permite determinar de una manera más exacta el efecto que la energía ionizante produce en los seres vivos, sin embargo, para calcular el factor RBE se requiere conocer tanto el tipo de radiación como el tipo de tejido irradiado, mientras que para calcular el primero no es necesario conocer el tipo específico de tejido sino más bien se utiliza una cantidad que pueda ser aplicada para todos los tipos de tejidos. Por tanto, el factor de peso fue introducido por el Comité Internacional de la Protección Radiológica (ICRP) con el objetivo de poder simplificar el cálculo de la dosis equivalente y toma valores comprendidos en un rango entre 1 y 20. La tabla 1.2 presenta diferentes factores de peso para distintos tipos de radiación:

Tabla 1.2. Factores de peso Q para distintos tipos de radiación.

Radiación	Factor de peso (Q)
Cualquier energía de radiación X y γ	1
Cualquier energía de radiación e y μ	1
neutrones térmicos	5
neutrones, protones > 20 MeV	5
neutrones de 2 a 20 MeV	10
neutrones de 10 a 100 KeV	10
neutrones de 100 KeV a 2 MeV	20
partículas α y fragmentos	20

La unidad de medida de la dosis equivalente es el rem (por sus siglas en inglés "*roentgen equivalent man*") y es igual a: $\text{rem} = (Q)(\text{rad})$. En el SI la unidad utilizada es el sievert (Sv) y es igual a: $\text{Sv} = (Q)(\text{Gy})$. La equivalencia entre ambos sería de $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

1.2.3.6. Resumen de las magnitudes de la medición de la radiactividad.

La tabla 1.3 resume las unidades presentadas anteriormente para cada magnitud que se cuantifica, tanto en el SI como las utilizadas tradicionalmente:

Tabla 1.3. Unidades para cada magnitud de medición que permite caracterizar cuantitativamente a una fuente de emisión de energía radiactiva.

Magnitud medida	Definición	Unidad
		SI Tradicional
Actividad (\mathcal{A})	velocidad de desintegración	becquerel (Bq) curio (Ci)
Exposición (X)	ionización del aire	C/kg roentgen (R)
Kerma (K)	energía depositada	gray (Gy)
Dosis absorbida (D)	absorción de energía	gray (Gy) rad (rd)
Dosis equivalente (H)	efectividad biológica	sievert (Sv) rem

1.2.4. Detectores de radiactividad.

Para detectar la radiactividad se utilizan medios que puedan interactuar y registrar las partículas que emiten los núcleos de los radioisótopos. No existe un detector universal que pueda registrar todas las partículas radiactivas, más bien, existen detectores para cada tipo determinado de partículas y rango de energías. Para decidir cual es el detector más conveniente a utilizar es necesario analizar varias magnitudes características de los detectores:

1. Sensibilidad.
2. Respuesta.
3. Función respuesta.
4. Resolución energética.
5. Resolución espacial y temporal.
6. Tiempo de respuesta.
7. Eficiencia.
8. Tiempo muerto.

Existen en general dos clases de detectores: los detectores de partículas cargadas y los detectores de partículas sin carga.

1.2.4.1. Detectores de partículas cargadas.

Estos detectores registran las ionizaciones y posibles excitaciones que resultan de la interacción con partículas cargadas. Después de estas interacciones, los detectores tienden a perder energía y esta pérdida es traducida en una señal que pueda ser registrada y cuantificada. Los detectores de partículas cargadas se pueden clasificar en tres grupos:

1. **Contadores de centelleo, Cherenkov y radiación de transición.** En este tipo de detectores la interacción con partículas cargadas producirá una excitación en los átomos del medio. Posteriormente, cuando los átomos se desexcitan se generan fotones y esta emisión luminosa se convierte en pulsos eléctricos mediante el efecto fotoeléctrico. Los pulsos eléctricos son amplificados en un fotomultiplicador para poder ser registrados. En el caso de la radiación de transición, los fotones tienen energías de 2 a 20 KeV y son detectados en contadores de gas.
2. **Detectores de ionización eléctricos.** En estos detectores la interacción con partículas cargadas produce ionización en el medio. Esta ionización genera electrones que serán posteriormente acelerados por un potencial para producir más ionizaciones, de manera que la señal sea amplificada, registrada y cuantificada. Cuando el medio es un gas, como en el caso de las cámaras de ionización, los contadores proporcionales y los tubos de Geiger-Muller, se registran las descargas que sufre el gas que contiene el detector.
3. **Detectores de trazas.** El paso de las partículas cargadas se hace visible en el medio, como en las cámaras de niebla, las cámaras de Wilson, las cámaras de burbujas, las cámaras de chispas, las emulsiones fotonucleares o en los detectores de trazas de estado sólido.

1.2.4.2. Detectores de partículas sin carga.

Para detectar partículas neutras los detectores se diseñan de manera que al interactuar las partículas neutras con el medio se generen partículas cargadas, para posteriormente analizar las partículas cargadas y mediante la información que proporcionen se pueda comprender las características de las partículas neutras incidentes. Ejemplos de partículas neutras y las interacciones que se utilizan para su detección son:

- **Fotones (γ).** Para detectar estas partículas se utiliza la interacción electromagnética como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton o la creación de pares.
- **Neutrones (n).** Para su detección se utiliza la interacción fuerte como la colisión elástica n p, de manera que el neutrón desplace protones en el medio y estos puedan ser detectados.
- **Neutrinos (ν).** Para su detección se utiliza la interacción débil.

1.3. Detectores de trazas de estado sólido.

Como se mencionó en el apartado 1.2.4.1, los detectores de trazas permiten registrar partículas nucleares e iones pesados mediante la visualización de su trayectoria. En el caso de los detectores de trazas de estado sólido se utilizan ciertos materiales semiconductores y aislantes que, al interactuar con las partículas ionizantes cargadas se crean patrones finos de daño intenso en su interior, a escala atómica; a este patrón de daño intenso se le denomina traza (figura 1.2). Fue a finales de la década de los años 50 y principios de los 60 que se tuvo una comprobación científica de este fenómeno y desde entonces se fue desarrollando una técnica efectiva de detección hasta crear una metodología bien establecida para la cuantificación de partículas cargadas ionizantes. Hoy en día, a esta metodología se le conoce como Metodología de Trazas Nucleares (NTM por sus siglas en inglés "*Nuclear Track Methodology*") [35-37]. Se ha demostrado que este fenómeno no se produce en los materiales que son buenos conductores, también se ha observado que hay materiales que tienen una mejor eficiencia de detección con respecto a otros y se ha constatado que las trazas se forman en los sólidos sólo cuando son irradiados con partículas alfa, protones, iones pesados y fragmentos de fisión, por lo que no se producen trazas al ser irradiados por partículas beta, rayos-X y rayos gamma. Este hecho representa una ventaja si se desea medir partículas alfa en campos intensos de radiación gamma o radiación beta, además hace más sencillo proteger al detector de la radiación de fondo en el momento de transportarlo hasta el lugar que se desea medir. Los detectores de estado sólido pueden ser utilizados para medir radiación ionizante en condiciones específicas como, por ejemplo, para efectos de calibración, medición de contaminantes ambientales (como el radón intramuros) y para evaluación de parámetros. Otras ventajas adicionales de esta metodología es su facilidad de manejo y el bajo costo que tiene al no necesitar de sofisticadas tecnologías para realizar las mediciones, además de que pueden ser utilizados en lugares poco accesibles.

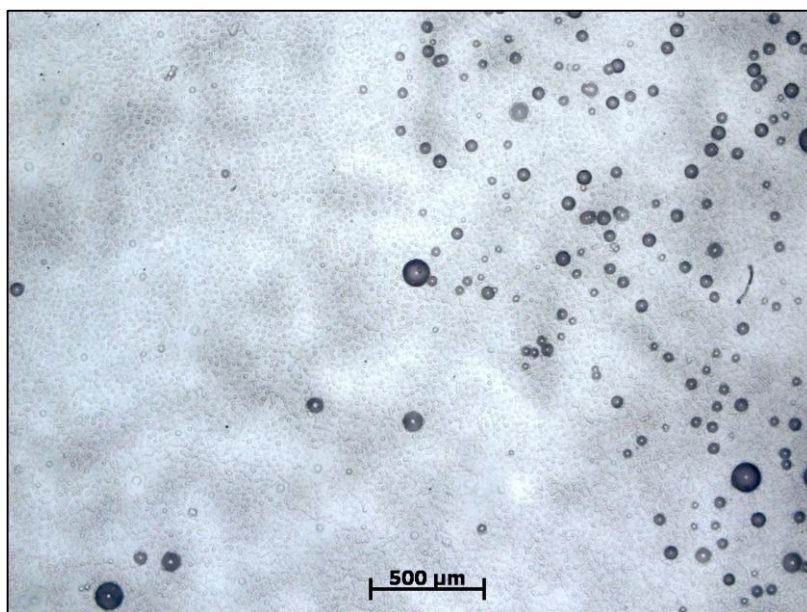


Figura 1.2. A los círculos negros que se observan en la imagen se les denominan trazas. En realidad estos círculos son cavidades cónicas vistas de frente, el punto blanco de en medio de cada círculo es el vértice.

Los patrones de daño intenso en los sólidos no pueden observarse inmediatamente después del proceso de irradiación, para hacerlos visibles es necesario atacar químicamente el material. Debido a las dimensiones que presentan las trazas (entre 10 y 100 μm), es necesario utilizar microscopios ópticos para poder observarlas y posteriormente cuantificarlas o microscopios de fuerza atómica si solo se desea estudiar la morfología. Posiblemente, la principal ventaja que presenta esta metodología es el hecho de que las trazas pueden permanecer en el material latentes por mucho tiempo hasta que sean reveladas.

1.3.1. Efectos de la radiación en sólidos que permiten la formación de trazas.

El daño que se produce en los sólidos se genera gracias al depósito de energía que proporcionan las partículas ionizantes cargadas al interactuar con el medio. Cuando un átomo se desplaza a través de un sólido será despojado de algunos o de todos sus electrones, convirtiéndose en un ion (con carga positiva). El ion generará colisiones con los electrones de los átomos del sólido y, dependiendo de la velocidad estas colisiones, podrán generarse dos tipos de efectos:

1. Para altas velocidades, el efecto de la colisión puede provocar la excitación de los electrones a niveles de energía mayor o la expulsión de ellos. En ambos casos la interacción dominante es la fuerza eléctrica. A los electrones expulsados fuera del átomo se les denominan “rayos delta”; estos electrones a su vez pueden producir más excitaciones e ionizaciones si tienen la suficiente energía.
2. Para bajas velocidades, la velocidad del ion es comparable a la velocidad de los electrones orbitales. Aquí las colisiones atómicas son dominantes por lo que los efectos que puede producir el ion no son de gran importancia.

Por tanto, el daño en el sólido se generará por el efecto de la ionización primaria y excitación debido a la partícula cargada, o por efecto tanto de la ionización primaria como de la secundaria (los rayos delta); esto dependerá de las características del sólido. En los polímeros, por ejemplo, se ha observado que la distancia del daño producido puede ser desde los 96 Å hasta los 200 Å, por lo que se debe considerar tanto la radiación primaria como la secundaria, incluso se ha comprobado que la excitación puede generar el rompimiento de las macromoléculas que conforman a los polímeros, reduciendo su peso molecular y generando radicales libres, sin embargo, la estructura de los monómeros se conserva.

1.3.2. Mecanismo de formación de las trazas.

Debido a la enorme cantidad y características variables de los sólidos en los que se pueden formar trazas no se ha podido desarrollar una única teoría que permita explicar el mecanismo de formación de las trazas en todos los materiales. Por tanto, se han desarrollado diferentes modelos que describen su formación dependiendo de las características del sólido y de la energía de las

partículas. Algunos modelos que predicen la formación de las trazas son:

- Ionización primaria.
- Pérdida de energía total.
- Pérdida de energía restringida.
- Pérdida de energía de radio restringido.
- Segunda pérdida de energía del electrón.
- Densidad de eventos lineales.
- Punta térmica.
- Punta de explosión iónica.

Por ejemplo, en sólidos inorgánicos el modelo que mejor describe el proceso de formación de las trazas es la punta de explosión iónica, pero para el caso de los polímeros son varios los modelos que intentan describir el mecanismo de formación de las trazas en función de la energía del ion. Para algunos investigadores la pérdida de energía por electrones secundarios en la cercanía de la trayectoria de la partícula es crítica para la formación de la traza, estos investigadores identificaron que, para ciertos polímeros, existe una “dosis crítica” (se le denomina dosis crítica a la energía por unidad de volumen de un cierto material y se mide en electronvoltios) que altera significativamente las propiedades del sólido al ser irradiado. Otros autores propusieron el modelo de “pérdida de energía restringida” que considera que sólo parte de la energía cedida producirá rayos delta, señalando incluso que la energía cedida que produciría un desplazamiento suficiente de los electrones, pero sin llegar a formar una traza, debía ser menor a los 100 eV. Más adelante otros autores modificaron este valor y propusieron 350 eV. Por el momento no existe un modelo único que permita explicar el mecanismo de formación de las trazas en los polímeros.

1.3.3. Revelado de la traza.

Se le denomina revelado de la traza o grabado químico (CE por sus siglas en inglés "*chemical etching*") al proceso de poner en contacto la superficie del sólido irradiado en una solución química con alta concentración molar, con el objetivo de que la solución ataque y desgaste al material, presentándose un ataque preferencial en las zonas donde incidió la partícula ionizante. En esencia, el grabado químico revela las trazas latentes para que sean visibles al ojo humano. Para determinar las características técnicas del grabado químico es necesario considerar los siguientes factores:

- Características del material detector.
- Tipo de solución química de grabado.
- Concentración de la solución química.
- Temperatura de la solución.
- Tiempo de grabado químico.

Para realizar este proceso es muy recomendable utilizar el método denominado Baño María, que consiste en colocar en un vaso de precipitados la solución química de desgaste para después sumergir el sólido detector dentro del vaso. Posteriormente, el vaso de precipitados se coloca dentro de otro recipiente que contenga una sustancia cuyo punto de ebullición sea mayor al de la solución química (como por ejemplo aceite de silicona), de esta manera si es necesario elevar la temperatura de la solución por arriba de su punto de ebullición la otra sustancia no se evaporará. Este método permite transferir un calentamiento más uniforme a la solución química por lo que es posible elevar gradualmente su temperatura, así como controlarla y mantenerla de una manera más eficiente. Por último se debe colocar un termómetro en el vaso de precipitados para poder medir la temperatura de la solución y tapar el vaso para evitar la evaporación de la solución química. También existen equipos electrónicos comerciales que permiten realizar este método de manera automática.

1.3.3.1. Pre-grabado químico.

Si se desea mejorar la sensibilidad del detector hasta 10 veces y eliminar las trazas producidas por la radiación de fondo (conteo de fondo), se debe de grabar químicamente el material antes de ser irradiado. A este proceso se le denomina pre-grabado químico. El desgaste por acción de la sustancia química permite eliminar las primeras micras de espesor del material que generalmente contienen impurezas, marcas, rasgaduras y el conteo de fondo.

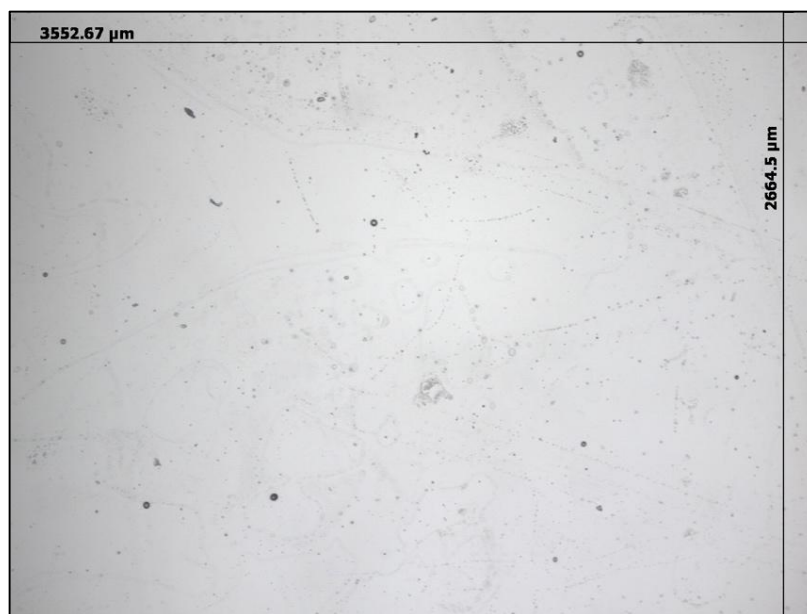


Figura 1.3. Superficie de un policarbonato antes de ser pre-grabado químicamente.

1.3.4. Formación geométrica de la traza grabada.

La geometría que adquirirán las trazas después del grabado químico está regida por dos factores: la disolución química que presenta el material a lo largo de la trayectoria que dejó la partícula a una velocidad lineal V_T y el ataque químico general que tiene el material y que remueve parte de toda su superficie a menor velocidad V_G , como se muestra en la figura 1.4.

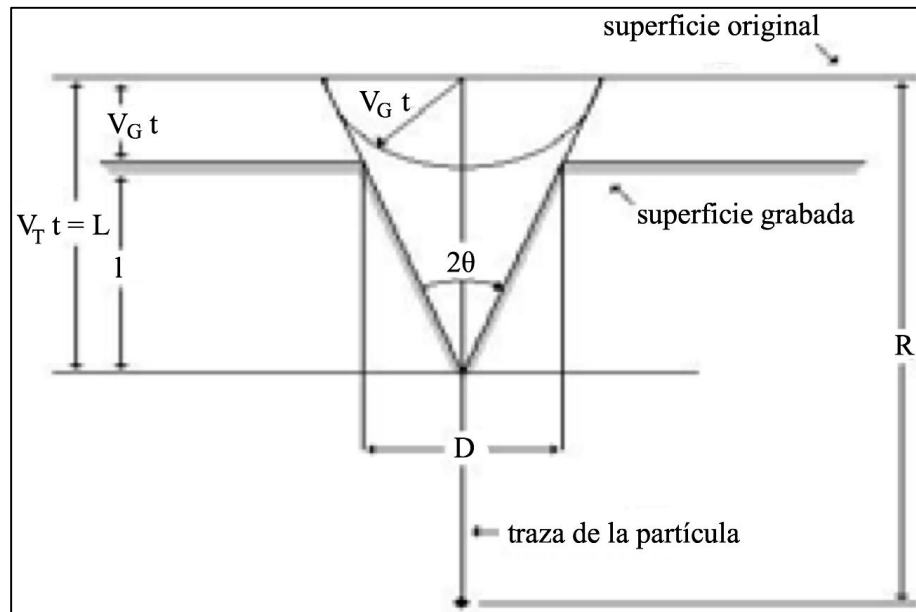


Figura 1.4. Geometría de una traza producida por una partícula ionizante que incide verticalmente al material.

Como se puede observar en la figura 1.4, el ataque químico se realiza preferentemente en la trayectoria que tuvo la partícula y la geometría que adquirirá la traza es la de un cono. En esta figura, D es el diámetro de la traza medido en la superficie, L la longitud de la traza, R la penetración máxima que tuvo la partícula en el material. Si t es el tiempo de grabado químico, entonces L será igual a:

$$L = (V_T - V_G) t$$

En la figura 1.4 también se puede observar que existe un ángulo entre el eje de la trayectoria y la pared del cono, cuyo valor puede ser obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\text{sen } \theta = \frac{\frac{D}{2}}{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (L)^2\right)^{1/2}}$$

Si suponemos que V_G y V_T son constantes y el material detector isotrópico (material cuyas propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas las direcciones), entonces los parámetros de la formación de la traza se encuentran en función de los parámetros medibles en la propia traza y vienen dados por las siguientes relaciones:

$$V_G t = \left(\frac{D}{2}\right) \left(\frac{D}{2L}\right) = \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{L}\right)\right)^{1/2}$$

$$V_G t = \left(\frac{D}{2}\right) (\tan \theta + \sec \theta)$$

$$V_T t = \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + L^2\right)^{1/2} \left(\frac{D}{2L} + \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \frac{L^2}{L}\right)$$

$$V_T t = D \csc \theta \frac{(\tan \theta + \sec \theta)}{2}$$

Sin embargo, las condiciones antes mencionadas generalmente no se cumplen en ninguno de los materiales utilizados como detector, ni tampoco en el proceso del grabado químico. Para el caso de una V_T variable a lo largo de la trayectoria de la partícula, la geometría de la traza es más compleja, aquí el valor de V_T estará en función de la razón de ionización, es decir, para cada tipo y energía de la partícula se generará una geometría específica en la traza. Para estos casos se considerará V_T en función de un parámetro (y) a lo largo de la formación de la traza y el diámetro D se relacionará en función de un parámetro (x); a su vez estos parámetros estarán en función del tiempo de grabado químico. Además, V_T y y permitirá identificar la partícula incidente. El valor de L puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$L = \int_0^1 \frac{dy}{V_T} y$$

La figura 1.5 presenta la geometría que adquiere la traza para una V_T variable.

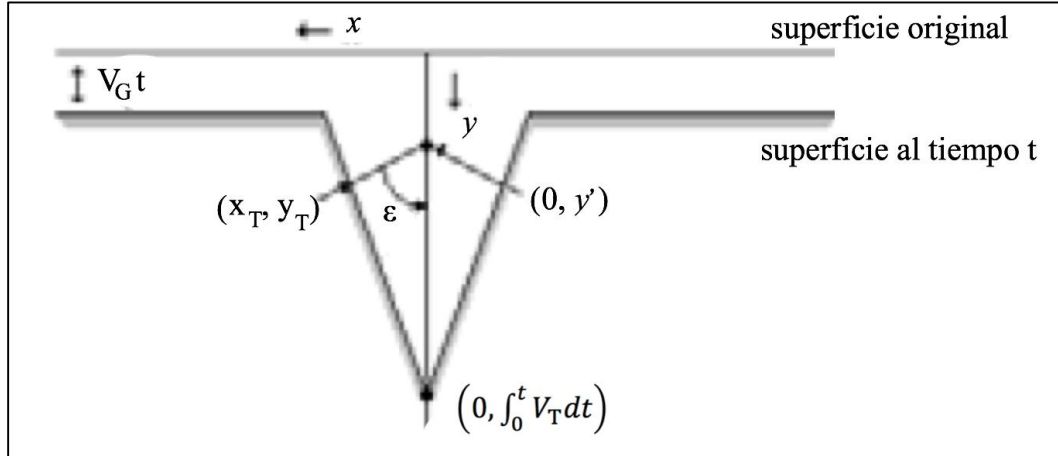


Figura 1.5. Geometría que adquiere la traza para una V_T variable.

El siguiente modelo calcula la mayoría de los puntos del perfil de la traza:

$$L = \int_0^{y'} \frac{dy}{V_T(y)} + \frac{\left((V_t - y')^2 + x_t^2 \right)^{1/2}}{V_G}$$

donde el primer termino proporciona el tiempo para la formación de la traza desde $(0, 0)$ hasta $(0, y')$ y el segundo termino proporciona el modelo de formación, desde $(0, y')$ hasta (x_t, y_t) . La distancia real de $(0, 0)$ a (x_t, y_t) corresponde al menor tiempo de grabado, si se deriva el tiempo con respecto a y' e igualando a cero se obtiene:

$$y' = y_t - x_t \left(\left(\frac{V_T(y')}{V_G} \right)^2 - 1 \right)^{-1/2}$$

En la figura 1.5 se puede observar que el ángulo ε se puede calcular mediante la expresión: $\arctan(x_t / (y_t - y'))$, por lo tanto las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma paramétrica en términos de y' de la siguiente manera:

$$x_t = \left((y_t - y')^2 + x_t^2 \right)^{1/2} \text{sen } \varepsilon$$

$$y_t = y' + \left((y_t - y')^2 + x_t^2 \right)^{1/2} \text{cos } \varepsilon$$

si reescribimos esta expresión podemos obtener:

$$x_t = V_G \left(t - \int_0^{y'} \frac{dy}{V_T(y)} \right) \left(1 - \frac{V_G^2}{V_T^2(y')} \right)^{1/2}$$

$$y_t = y' \frac{V_G^2}{V_T(y')} \left(t - \int_0^{y'} \frac{dy}{V_T(y)} \right)$$

Esta ecuación es válida para cualquier y' o tiempo t .

1.3.5. Caracterización de las trazas.

Después del grabado químico las trazas pueden ser observadas en un microscopio óptico o ser medidas en un microscopio de fuerza atómica (AFM). También es posible observarlas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), sin embargo, el haz de electrones que genera este equipo puede producir daños en algunos materiales construyendo líneas rectas en su superficie.

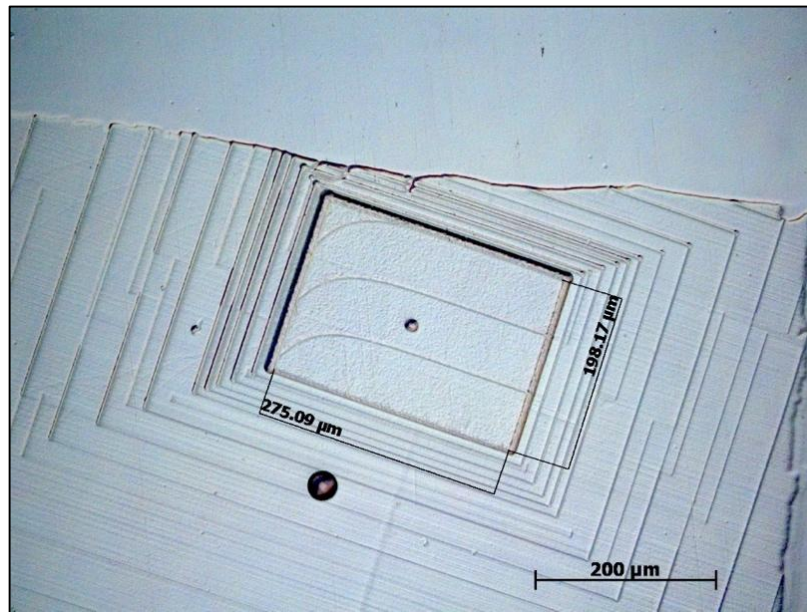


Figura 1.6. Trazas en un policarbonato observadas en un microscopio SEM. En la imagen puede observarse el daño producido por el haz de energía que genera el equipo.

Cuando se observan las trazas por medio del microscopio óptico o por medio del microscopio electrónico, estas se pueden apreciar de dos maneras:

- Como círculos negros de diferentes tamaños, si las partículas incidieron en un ángulo de 90° al plano de la superficie del material (figura 1.7).
- Como gotas negras de diferentes tamaños, si las partículas incidieron en un ángulo diferente de 90° al plano de la superficie del material (figura 1.8).

En la NTM es necesario obtener las trazas como círculos negros por que de otra manera no será posible caracterizarlas. Después de digitalizar las imágenes observadas, es posible caracterizar las trazas de dos maneras: contabilizándolas o midiendo sus diámetros. El proceso del conteo y medición de las trazas proporciona la siguiente información:

- 1. Conteo del número de trazas:** Si se contabiliza el número de trazas por unidad de área, el número resultante proporciona el número de partículas incidentes. Conocer el número de partículas incidentes permite cuantificar la concentración de la radiación en un volumen determinado, es decir, se puede conocer la actividad radiactiva de la fuente.
- 2. Medición del diámetro de las trazas:** Si se miden los diámetros de las trazas se puede conocer la energía de las partículas incidentes. Conocer la energía de las partículas permite determinar el isótopo, masa y número atómico de la partícula.

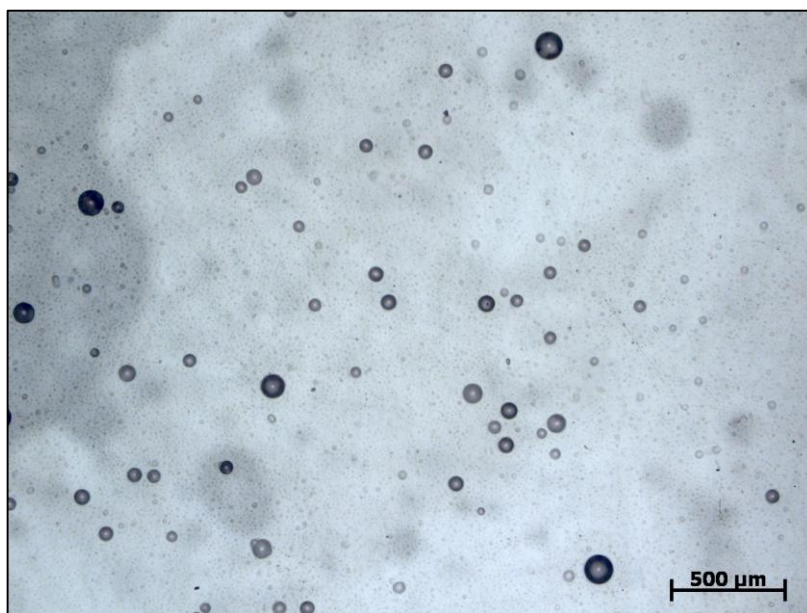


Figura 1.7. Las trazas se observan como círculos negros de diferentes tamaños cuando las partículas inciden en un ángulo de 90° al plano del material.

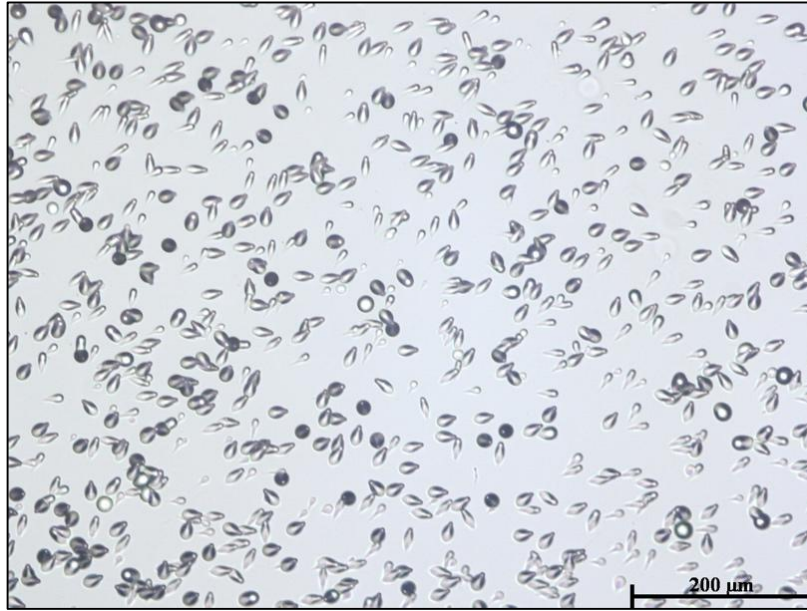


Figura 1.8. Las trazas se observan como gotas negras de diferentes tamaños cuando las partículas inciden en un ángulo diferente de 90° al plano del material.

Por lo tanto, el diámetro de la traza nos permite conocer el tipo de isótopo radiactivo que interactuó con el material. Es evidente que para poder utilizar un material como detector es necesario realizar un proceso previo de calibración, que consistirá en irradiar el material con fuentes de radiación certificadas, es decir, fuentes caracterizadas por una compañía y que sólo emiten un tipo de partícula ionizante a una determinada energía. En general, para desarrollar un procedimiento de calibración de un material se deben realizar los siguientes pasos:

1. Primero se debe seleccionar cuidadosamente el material a calibrar, considerando diferentes factores como su energía de respuesta y sus posibles aplicaciones. Una vez que se ha seleccionado el material se debe elegir la fuente de radiación certificada; es evidente que el isótopo radiactivo o partícula que emita la fuente será el isótopo o partícula que más adelante podrá ser detectada y medida con este material.
2. Después el material debe ser irradiado con la fuente seleccionada un determinado tiempo.
3. Posteriormente, es necesario realizar un estudio exhaustivo para determinar las condiciones óptimas de grabado químico para este material. Estas condiciones deben ser determinadas mediante diversos experimentos de irradiación y posteriores análisis de los resultados mediante herramientas estadísticas, como por ejemplo, ajustes de la distribución de la traza mediante la función de Lorentz y cálculo de la desviación estándar. También se deben realizar gráficas que muestren el desgaste que sufre el material (eliminación de su espesor) conforme se aumenta el tiempo de ataque químico. Una vez que se obtengan las condiciones óptimas de grabado químico, se deberán de utilizar siempre las mismas condiciones.
4. Después se debe irradiar nuevamente el material con la fuente seleccionada y grabarlo químicamente con las condiciones óptimas encontradas. Luego se debe analizar si el

- tiempo de irradiación produjo suficientes trazas en el material y aumentar el tiempo de irradiación o disminuirlo según los resultados obtenidos, hasta encontrar el tiempo óptimo de irradiación.
5. Después se caracterizan los resultados obtenidas, calculando la densidad de trazas observadas y midiendo el diámetro de cada una de ellas.
 6. A partir de la distribución del diámetro de la traza se calcula nuevamente la curva de Lorentz, el valor medio y la desviación estándar. Finalmente es posible realizar una correlación entre la partícula o isótopo radiactivo que emite la fuente y el tamaño del diámetro de la traza que genera en el material.

El proceso se repite por cada nueva fuente de radiación que se desee utilizar. Entre mas fuentes se utilicen para calibrar el detector, mayor número de isótopos o partículas podrán ser detectados y cuantificados con este material. La figura 1.9 presenta un ejemplo de calibración para un policarbonato [38]. En este caso se han utilizado 5 diferentes tipos de fuentes radiactivas: ^{244}Cm , ^{239}Pu , ^{230}Th , ^{238}U y ^{148}Gd .

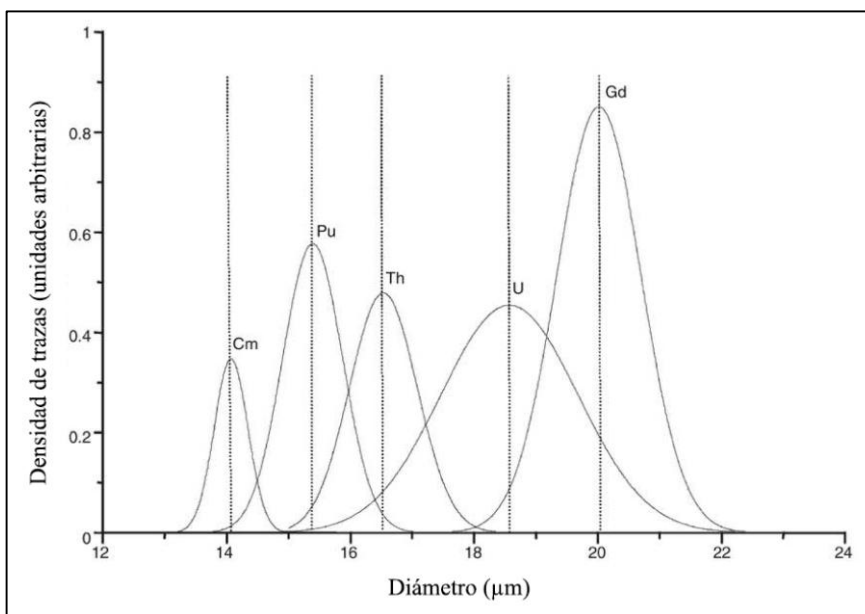


Figura 1.9. Ejemplos de calibración para un detector de policarbonato con 5 diferentes tipos de fuentes radiactivas.

Como se muestra en la figura 1.9, para este caso específico se observa que, para el isótopo ^{244}Cm (5.81 MeV) se obtiene un diámetro de traza de 14 μm , para el ^{239}Pu (5.15 MeV) se obtiene un diámetro de traza de 15.3 μm , para el ^{230}Th (4.68 MeV) 16.5 μm , para el ^{238}U (18.5 MeV) 18.5 μm y para el ^{148}Gd (3.18 MeV) 20 μm .

1.3.6. Grabado electroquímico.

Después del grabado químico es posible someter a cierto tipo de materiales a otro proceso denominado grabado electroquímico (EG por sus siglas en inglés "*electrochemical etching*") con el objetivo de hacer más grande el daño por radiación [39-43]. El grabado electroquímico es un procedimiento por el cual se somete al detector a elevados campos eléctricos (del orden de decenas de kV / cm) con la finalidad de producir rupturas dieléctricas en el material [44, 45], estas rupturas iniciarán exactamente en dónde finalizó la trayectoria de la partícula incidente, es decir, en la punta del cono. Previo a las rupturas dieléctricas, en el material se generarán unas estructuras particulares que reciben el nombre de arborescencias eléctricas "*electrical treeing*" [46-53]. Estas arborescencias se forman debido a un proceso de destrucción progresivo e irreversible como consecuencia de las continuas descargas eléctricas parciales que avanzan sobre el material generando pequeños canales de degradación. Por la naturaleza de este proceso, sólo es posible generar arborescencias en materiales dieléctricos y en algunos materiales semiconductores dopados [54-56]. La figura 1.10 presenta dos ejemplos de las formas que adquieren estas arborescencias eléctricas.

A estas estructuras también se les conocen como figuras de Lichtenberg (figura 1.11), nombre otorgado en honor al físico alemán Georg Christoph Lichtenberg, quien fuera la primera persona en generarlas y estudiarlas.

Las dimensiones que adquirirán las arborescencias no dependerán de la energía de la partícula incidente sino únicamente del tiempo de grabado electroquímico, estas dimensiones podrán variar desde los 10 hasta más de 300 μm . Por otra parte, a diferencia del grabado químico que puede provocar la desaparición de las trazas si se prolonga por mucho tiempo, el grabado electroquímico nunca podrá desaparecer las arborescencias, por el contrario, entre mayor sea el tiempo de desgaste eléctrico mayores serán las dimensiones que adquirirán las arborescencias. Incluso si el tiempo de grabado electroquímico se prolongará indefinidamente, las descargas eléctricas terminarían por perforar al material.

El grabado electroquímico presenta las siguientes ventajas y desventajas frente al grabado químico:

- **Ventajas:** Las arborescencias presentan mayores dimensiones con respecto a las trazas nucleares, lo que permite que sea más sencillo observarlas por medio del microscopio óptico y, por consecuencia, contabilizarlas; además, debido a su forma característica son fácilmente identificables. Otra ventaja es el hecho de que el grabado electroquímico revela daños por radiaciones que no se hicieron visibles en el grabado químico. Estas ventajas permiten disminuir el tiempo necesario de exposición del detector a la radiación ambiental.
- **Desventajas:** Debido a la formación de los múltiples canales de degradación que se generan debajo de la traza, después de un determinado tiempo de grabado electroquímico se volverá prácticamente imposible observar la traza en el microscopio óptico, perdiendo para siempre la información de la energía de la partícula que incidió en el material. Por esta razón, el grabado electroquímico es un método que solo permite cuantificar los niveles de concentración de la radiación en un volumen determinado, pero no permite conocer el tipo de isótopo radiactivo o energía que interactuó con el detector.

Adicionalmente, otra desventaja es el hecho de que los equipos para generar el grabado electroquímico no son convencionales por lo que es necesario diseñarlos y construirlos, aumentando por consiguiente los costos y la dificultad de operación de este método.

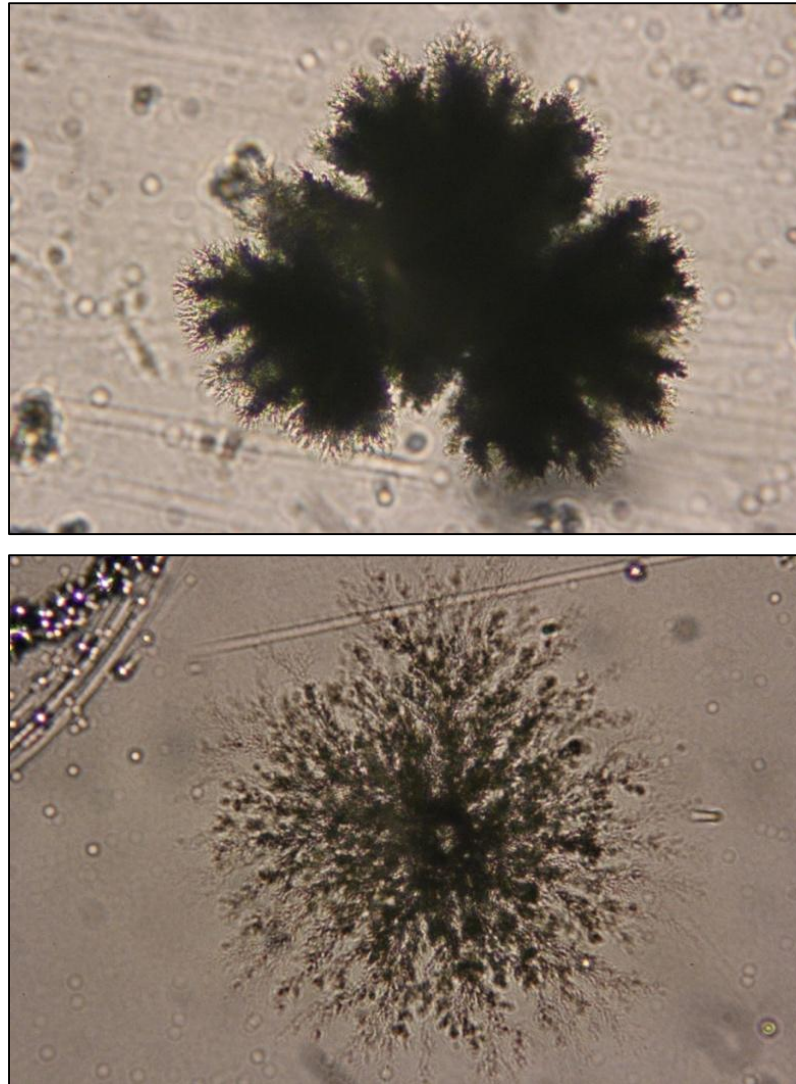


Figura 1.10. Arborescencias eléctricas que se generan por el rompimiento dieléctrico que presenta el material después de realizar el grabado electroquímico.

Para poder realizar el grabado electroquímico se requieren de dos instrumentos: una cámara electroquímica [57] y un generador de alto voltaje de corriente alterna (CA) [58].

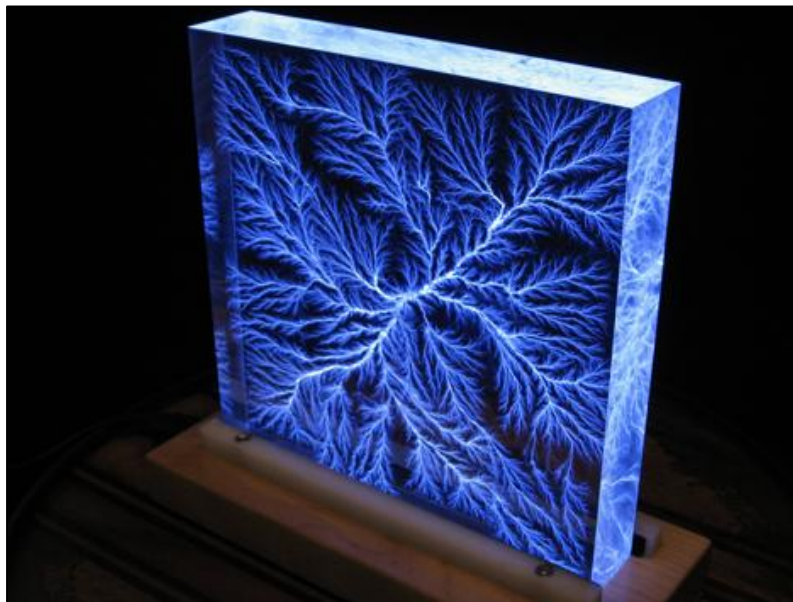


Figura 1.11. Figura de Lichtenberg desarrollada dentro de un bloque de acrílico (PMMA).

La cámara electroquímica es, en esencia, un dispositivo que permite sumergir al detector dentro de dos sustancias electrolíticas (sustancia líquida que contiene iones libres los cuales permiten que se comporte como un conductor eléctrico) para posteriormente conectar un generador de corriente eléctrica a cada electrolito mediante un electrodo y así poder atacar al material con descargas eléctricas. El aspecto que hace de la cámara electroquímica un dispositivo especial, es que su diseño permita que ambas sustancias permanezcan separadas entre si por medio del detector, sólo de esta manera será posible producir el rompimiento dieléctrico en el material. Por esta razón, la manufactura de la cámara deberá realizarse tomando como referencia las dimensiones del detector y su forma geométrica. Si el detector no fuera sumergido en una sustancia electrolítica o si no se utilizará la configuración señalada, no sería posible hacer que la energía eléctrica desgastará al material o que lo hiciera de manera proporcional en toda su superficie.

La eficiencia de los resultados que se obtengan dependerán también de otros factores, como por ejemplo, de los materiales utilizados para manufacturar la cámara electroquímica, del material del que estén fabricados los hules que se utilizarán para sellar la cámara por dentro y de las características que presenten los electrolitos. Para el caso de los materiales utilizados para manufacturar la cámara y los hules, estos deberán presentar una rigidez dieléctrica mayor a la del detector y una resistencia a la corrosión a las sustancias que se vayan a utilizar como electrolitos. Para el caso del electrolito que se vaya a utilizar para generar el ataque eléctrico, es recomendable emplear la misma sustancia, y a la misma concentración molar, utilizada para realizar el grabado químico. El otro electrolito puede ser, simplemente, agua saturada con sal.

Por último, es recomendable que las paredes internas de la cámara presenten un cierto ángulo de inclinación que permita el libre desplazamiento de las burbujas de aire que se pueden llegar a formar en el líquido durante el grabado, de esta manera se evitará que las burbujas se concentren en áreas específicas de la superficie del detector, esto debido a que las burbujas de aire impiden

que la corriente eléctrica desgaste la superficie del material.

La disposición de los elementos que conforman a la cámara (dos sustancias conductoras separadas por un material dieléctrico) convierten a este dispositivo en un condensador eléctrico (capacitor), por lo tanto, para la construcción del generador de corriente alterna se deben contemplar las características del condensador y las dimensiones del detector. La figura 1.12 presenta una cámara electroquímica diseñada y manufacturada de Polimetilmetacrilato en el Instituto de Física de la UNAM.



Figura 1.12. Cámara electroquímica diseñada y manufacturada de Polimetilmetacrilato en el IFUNAM.

El generador de alto voltaje de CA, es un equipo que suministra la corriente eléctrica necesaria para generar el rompimiento dieléctrico en el material. La finalidad de utilizar corriente alterna es evitar que la energía eléctrica ataque un solo punto del material, es decir, la electricidad tendrá la posibilidad de desgastar una parte diferente del material cada vez que se conecte y desconecte el flujo de corriente de manera consecutiva, sin embargo, para conseguir que las descargas eléctricas desgasten correctamente al material es necesario que la corriente presente una elevada frecuencia. Investigaciones experimentales han demostrado que una frecuencia continua con señal senoidal de 2000 Herzios producen de manera eficiente las arborescencias eléctricas. Por otra parte, el objetivo de utilizar alto voltaje es permitir que la corriente eléctrica tenga la suficiente "fuerza" para poder destruir al dieléctrico y así formar los canales de degradación. El valor del voltaje que debe generar el equipo dependerá del grosor del material detector; exhaustivas mediciones experimentales demostraron que se debe suministrar un voltaje de 30,000 voltios por cada centímetro de espesor que tenga el material detector.

1.3.7. Materiales utilizados para la detección de las trazas nucleares.

Existen diversos tipos de materiales que pueden ser utilizados como detectores de trazas nucleares. En general, podemos clasificar a los materiales detectores en orgánicos e inorgánicos. Desde el inicio de la metodología de trazas nucleares la tendencia fue utilizar materiales inorgánicos pero posteriormente se descubrió que los materiales orgánicos presentaban una excelente respuesta a la radiación. En la actualidad los polímeros son los materiales más utilizados debido a su eficiencia, gran sensibilidad y excelente precisión. Entre los materiales inorgánicos que se pueden utilizar como detectores de trazas están los siguientes:

- Mica
- Cuarzo
- Obsidiana
- Vidrio de silicio
- Rubí
- Zafiro
- Apatita
- Olivino

Entre los materiales orgánicos que se pueden utilizar como detectores se encuentran los siguientes:

- Acetato de celulosa
- Nitrato de celulosa
- Butirato de celulosa
- Triacetato de celulosa
- Cormofenol
- Policarbonato
- Nitrato de celulosa
- Acetato M3
- Acetato Xerox
- Mica adhesiva
- Película Kodak

Dentro de los policarbonatos que pueden ser utilizados como detectores de trazas se encuentran el Lexano, el Makrofol, el Kimfol y el CR-39.

1.3.7.1. El detector CR-39.

El detector CR-39, también conocido con el nombre de *allyl diglycol carbonate* (ADC por sus siglas en inglés), es un policarbonato perteneciente a los polímeros plásticos reticulares termoestables. Fue inventado en 1940 por la empresa Columbia-Southern Chemical Corporation, subsidiaria de la compañía Pittsburgh Plate Glass Company. El nombre proviene de la abreviación de "Columbia Resin #39". El CR-39 es un material muy utilizado en el sector de la oftalmología para la construcción de lentes y en la industria aeronáutica. El CR-39 es un material sólido homogéneo, ópticamente transparente y sensible a partículas cargadas, su rango de sensibilidad se encuentra desde los 5 hasta los 1500 KeV / μm . Su composición química es de $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$, en cierta manera, similar a la del tejido humano. La figura 1.13 presenta la cadena polimérica que conforma al CR-39.

En la década de los años 80 se descubrió que el CR-39, por su composición química, era un eficiente detector de partículas α , con una muy amplia respuesta a la energía (entre los 0.3 y 13 MeV). Además de su excelente eficiencia para la detección de partículas α , también se utiliza para la detección de protones (≤ 10 MeV), iones pesados y para la detección y dosimetría de neutrones con el uso de moderadores. Gracias a estas propiedades, el CR-39 se convirtió en el material más utilizado para detectar y medir partículas ionizantes cargadas.

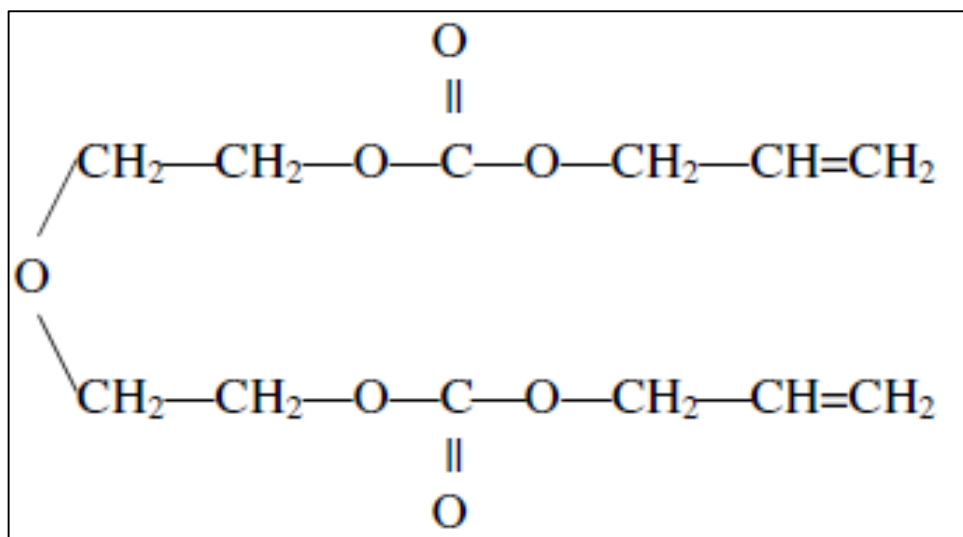


Figura 1.13. Estructura del monómero que conforma al policarbonato CR-39.

"La ciencia no es sino una perversión de sí misma, a menos que tenga como objetivo final el mejoramiento de la humanidad".

Nikola Tesla

CAPÍTULO 2

MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN INTRAMUROS EN LOS TÚNELES DE LA PIRÁMIDE DE CHOLULA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES

La Gran Pirámide de Cholula (figura 2.1) es el edificio principal de la Zona Arqueológica de Cholula, sitio histórico que se ubica en el valle de Puebla-Tlaxcala entre los municipios de San Pedro Cholula y San Andrés Cholula. El valle de Puebla-Tlaxcala está ubicado en la Meseta Central de México, a 2000 metros sobre el nivel del mar y limita al norte con las laderas del bloque Tlaxcala, al oeste con las estribaciones de la Sierra Nevada donde también se encuentra el volcán Popocatepetl, al este por el volcán La Malinche y al sur por el estado de Puebla. Debido a sus características geográficas y a la fertilidad del terreno, propiciado por la presencia de un gran número de ríos, el valle de Puebla-Tlaxcala fue escenario de un importante desarrollo cultural en la historia mesoamericana durante los tres grandes periodos históricos: el Preclásico, el Clásico y el Postclásico. Alrededor de los siglos VI y V A.C., colonos prehispánicos eligieron este valle para establecerse y construir sus casas y edificios rituales luego, con el paso del tiempo y el aumento de la población, los prehispánicos lograrían construir una ciudad prominente. Diversas exploraciones en el sitio revelan despoblamientos temporales producto de las erupciones intermitentes del volcán Popocatepetl, sin embargo, la riqueza de esta cuenca condujo a la permanencia de sus habitantes hasta la actualidad. No está del todo claro el significado de la palabra Cholula, la mayoría de los investigadores considera que proviene del verbo *cholloa*, que el lexicógrafo francés Rémi Simeon interpretó como: correr, saltar o asentarse, por lo que su significado sería: "lugar de escape". Sin embargo, Cayetano Reyes García consideró que la palabra Cholula provenía del nombre dado al lugar en donde fue erigida la Gran Pirámide: *Achole*, cuyo significado es: agua que se filtra del embalse o, en términos populares, agua que corre; nombrado de esta manera por la presencia de un manantial. Los primeros colonos consideraron (por razones misteriosas) que el manantial era sagrado por lo que decidieron asentarse en sus bordes, mas tarde el manantial fue nombrado como *Aquiahuac* y se convertiría en el sitio ideal para construir el primer templo, probablemente con el pensamiento extendido de forma universal de que el agua sagrada santificaría a la construcción. No se sabe con exactitud cómo fue llamada originalmente la ciudad, pero se sabe que posteriormente fue conocida con el nombre de *Tlamachihualtépetl*, cuyo significado es: "tierra hecha a mano en la colina". La colosal estructura piramidal fue el centro vital de la ciudad hasta el siglo VIII D.C. y fue ofrecida a la deidad *Chiconahui Quiáhuitl* (que significa 9 Lluvias). A lo largo de los años la ciudad sufrió múltiples invasiones, una de las más violentas y destructivas fue de un grupo indígena que huía de Tula, los toltecas-chichimecas (de ahí la interpretación del verbo *cholloa* "lugar de escape"). Después de asentarse en el lado oeste de la ciudad, los toltecas construyeron un nuevo "*teocalli*" (recinto de Dios) dedicado a la deidad *Yacatecuhtli*, considerado el patrón de los comerciantes. Este evento marcaría la fundación de Cholula, convirtiéndola en uno de los mercados más grandes de Mesoamérica [59-62].



Figura 2.1. La Gran Pirámide de Cholula.

La Gran Pirámide por su esplendor y dimensiones, 400 metros de lado y 65 metros de alto, es la construcción más grande e importante de todo el valle de Puebla-Tlaxcala y está clasificada como la pirámide con la base con el mayor volumen del mundo [62]. Esta impresionante pieza de ingeniería es el resultado de siglos de acumulación de grandes estructuras, identificadas en nuestro tiempo por los arqueólogos como etapas constructivas (figura 2.2).



Figura 2.2. Maqueta que muestra las diferentes etapas constructivas que conforman a la Gran Pirámide.

Las etapas constructivas son el reflejo de los diversos asentamientos que se produjeron en este lugar a lo largo de varios siglos por las múltiples culturas prehispánicas, cada nueva edificación representa un símbolo de poder y dominación sobre la cultura anterior. Las últimas investigaciones demuestran que en total existen 8 etapas constructivas [59], todas manufacturadas en su mayoría de adobe. El arquitecto Ignacio Marquina Barredo, uno de los primeros investigadores contemporáneos de las Gran Pirámide, consideró que la primera etapa constructiva inició alrededor del año 250 D.C. [59], sin embargo, no se conoce con precisión la cultura que edificó esa primera etapa. Algunos investigadores consideran que fueron Cholutecas arcaicos, otros consideran a la cultura Olmeca-Xicalanca como la responsable [63]. La última etapa constructiva se terminó de edificar alrededor del siglo IX D.C. [59]. Cuando los españoles llegaron a Cholula, la Gran Pirámide parecía una colina natural con signos de haber sido abandonada siglos antes. Su revestimiento se veía desmantelado y la vegetación florecía en ella, pero los nativos sabían que esta no era una elevación ordinaria de la tierra sino un trabajo humano arcaico y venerado. Siguiendo con la costumbre de imponer un símbolo de dominación sobre la cultura conquistada, en 1954 los españoles construyeron un santuario sobre la Gran Pirámide que continúa edificado en nuestros días, el templo de “Nuestra Señora de los Remedios” (figura 2.3).



Figura 2.3. Santuario de “Nuestra Señora de los Remedios” construido sobre la Gran Pirámide.

En 1931, el Departamento de Monumentos de la SEP, encargó al arquitecto Emilio Cuevas, a Ignacio Herrera y a Marino Gómez comenzar trabajos de excavación para explorar la estructura arqueológica, empleando para ello una estrategia exitosa utilizada previamente dentro de la Pirámide del Sol (en Teotihuacán), que consistía en excavar túneles con un techo angular para distribuir la carga de manera eficaz (figura 2.4) [64]. Estos túneles se construyen para encontrar el frente de la primera estructura superpuesta, después de encontrar el primer frente se sigue el contorno de toda la estructura y luego se penetra el muro en búsqueda de la siguiente estructura hasta que finalmente se localiza el núcleo de la edificación, es decir, la primera etapa

constructiva. Tiempo después, la obra fue confiada al arquitecto Ignacio Marquina, quien decidió abrir dos túneles que atravesaran toda la pirámide, de norte a sur y de este a oeste, cortando los edificios que se superponen entre sí. La exploración resultó ser, inesperadamente, más compleja debido a la gran cantidad de muros que encontraron a medida que avanzaban las excavaciones y, al no poder seguir el perímetro de cada una de las estructuras, se vieron forzados a exponer porciones de los contornos de los edificios más grandes. Esta primera fase de exploración permitió descubrir 5 etapas constructivas [65]. En 1966 se inició una segunda fase de exploración: el "Proyecto Cholula", dirigido por el arquitecto Miguel Messmacher y consistió en la apertura de pozos estratigráficos. Estos pozos permitieron descubrir cuatro grandes sótanos cerca del edificio principal, sin embargo, el proyecto fue suspendido para regresar nuevamente a la excavación de túneles, esa vez en el lado sur de la pirámide. Las nuevas excavaciones revelaron la existencia de dos edificios que, más adelante, se les denominaría como el "Patio de los Altares" y el "Mural de los Bebedores". El proyecto de exploración finalizó en 1971, generando como resultado cerca de 10 kilómetros de túneles que cruzan de forma sinuosa el interior de la pirámide. La cantidad de datos obtenidos resultó abrumadora para los investigadores de esa época, pero el uso de nuevas tecnologías (como la denominada "estación total" o los diversos programas informáticos que existen) hicieron posible procesar toda esa información. Los análisis de todos estos datos permitió levantar planos precisos de, hasta el momento, el 30% de los túneles; además del descubrimiento de otras 3 etapas constructivas [65, 66].

Hoy en día, además de la incertidumbre que se tiene sobre la cultura responsable de erigir la primera etapa constructiva, también se desconoce la razón exacta por la cual la culturas prehispánicas que se establecieron alrededor de la Gran Pirámide de Cholula decidieron abandonar el lugar.

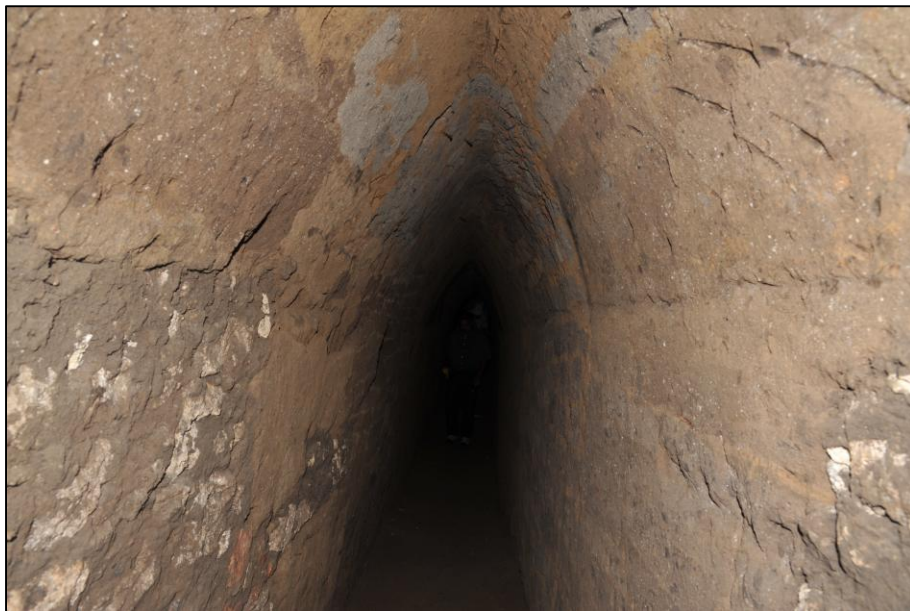


Figura 2.4. Túnel con techo angular excavado para explorar a la Gran Pirámide.

2.1. El gas radón.

El radón (Rn) es un elemento radiactivo perteneciente al grupo de los gases nobles de la tabla periódica, con número atómico $Z=86$ [67]. El radón es el único gas que aparece en las cadenas radiactivas naturales y se produce a partir de la desintegración natural del uranio-235, el uranio-238 y el torio-232, elementos que naturalmente se encuentran presentes en rocas y suelos distribuidos por todo el planeta [21]. La tabla 2.1 presenta los 3 diferentes isótopos del radón que se generan de manera natural, también presenta los productos de su desintegración, su periodo, energía y la cadena de la que proviene. La figura 2.5 presenta la cadena de desintegración del uranio-238.

Tabla 2.1. Partículas emitidas durante el proceso de desintegración que generan diferentes isótopos de radón, así como su periodo, energía y la cadena de la que proviene.

Desintegración	Nombre	$T_{1/2}$	T_{∞} (MeV)	Cadena
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + \alpha$	radón	3.82 días	5.5	^{238}U
$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po} + \alpha$	torón	55.6 segundos	6.29	^{232}Th
$^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po} + \alpha$	actinón	3.96 segundos	6.82	^{235}U

El ^{222}Rn es el más abundante de los isótopos del radón [67]. Se presenta como un gas incoloro, inodoro e insípido. Por su naturaleza gaseosa, el radón puede difundirse a través de diferentes medios, por esta razón, puede estar contenido de manera natural en agua si, por ejemplo, un río subterráneo se desplaza por donde existe una fuente de uranio o en aire cuando emana desde el subsuelo [67]. Su coeficiente de difusión en aire es de $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2 / \text{s}$ y en el agua es de $1.13 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{s}$. La concentración de radón en un determinado lugar puede variar por diversos factores, como por ejemplo, la temporada de lluvias y el acontecimiento de movimientos telúricos [21].

La evaluación de los niveles de concentración de radón intramuros (que se encuentra dentro de un lugar) es un asunto de interés pública, debido a que este gas radiactivo genera las mayores contribuciones a la exposición de radiación natural que recibe el ser humano [68], así lo reconocen diferentes organizaciones mundiales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) y la Comunidad Europea de Energía Atómica (EURATOM). La tabla 2.2 presenta una comparación, en porcentajes y en milisieverts, entre la radiación por radón que recibe el ser humano con respecto a los otros tipos de radiaciones naturales en condiciones normales por año. El peligro de este gas radiactivo para la salud humano se genera por la siguiente razón: si las partículas α , que emite el isótopo, son inhaladas por una persona pueden quedar atrapadas en sus pulmones, mientras estas partículas van desintegrándose se liberan pequeñas explosiones de energía provocando un daño en los tejidos de los pulmones. Si este proceso continua indefinidamente, conforme el paso de los años, se puede generar cáncer en este órgano [68].

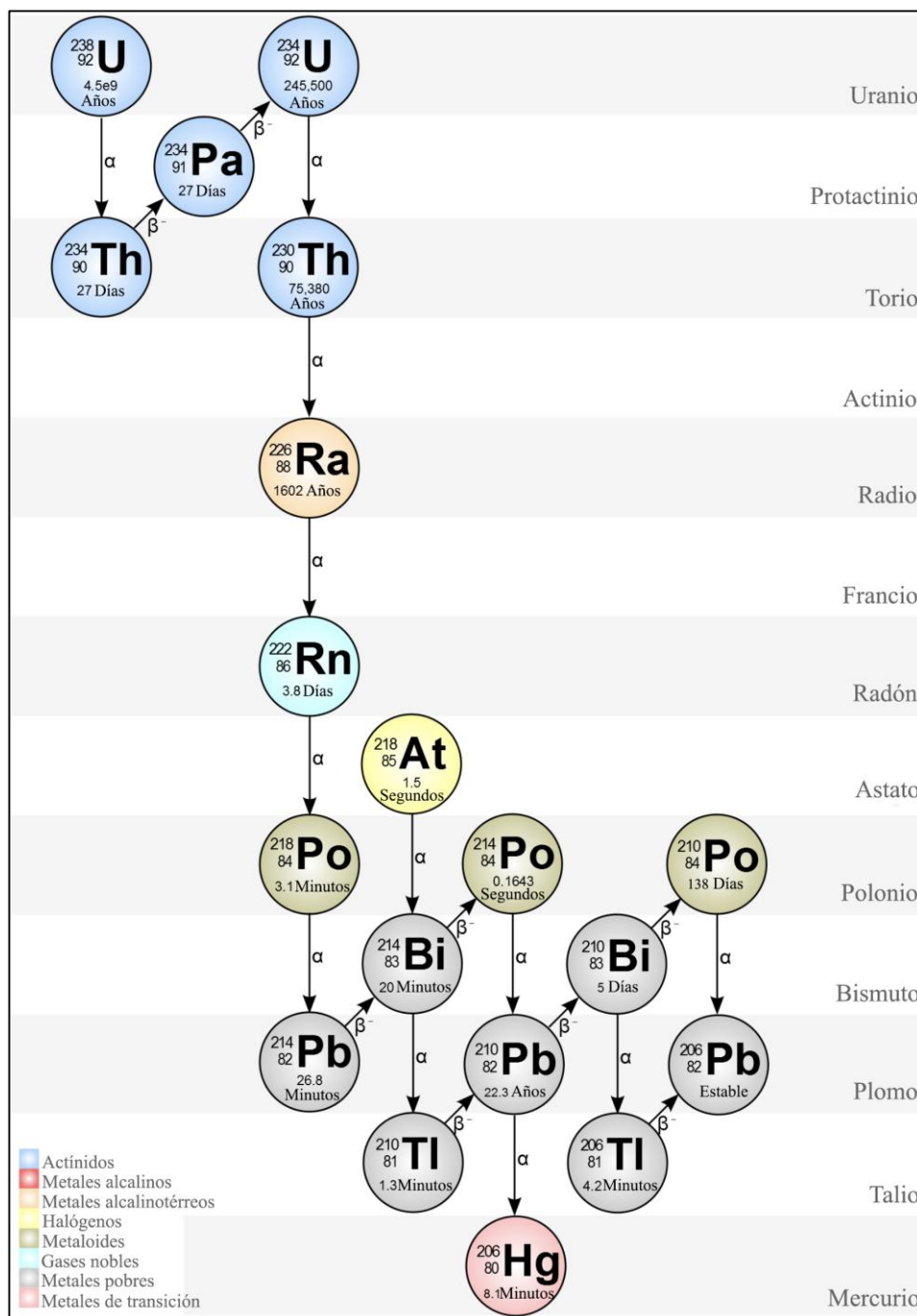


Figura 2.5. Cadena de desintegración del uranio-238.

En países como: Austria, Brasil, Canadá, China, Francia, Alemania, Grecia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Polonia, Rusia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Inglaterra, Ucrania y Estados Unidos, se tienen protocolos bien establecidos para la medición del radón debido a que, por las características de los suelos, de los materiales que se utilizan para construir las casas (como el granito) y las temperaturas que presentan algunos de estos países (al ser las temperaturas muy

bajas las personas generalmente no abren las ventanas por lo que no existe una correcta ventilación en el interior de las casas y los cuartos pueden concentrar el gas), el radón puede alcanzar niveles de concentración muy elevados, generando un riesgo para la salud de las personas. La tabla 2.3 presenta el valor de concentración de radón recomendado por diversas organizaciones para lugares cerrados dónde podrán permanecer las personas por tiempos prolongados (tanto para viviendas como para lugares de trabajo).

Tabla 2.2. Comparación entre los diferentes tipos de radiación que recibe el ser humano al año con respecto al radón-222 en condiciones normales.

Radiación natural	Porcentaje	mSv / año
Radón-222	57 %	1.20
Rayos cósmicos	17 %	0.35
Potasio-40, carbón-14	14 %	0.30
Otros	12 %	-

Tabla 2.3. Valor de concentración de radón recomendado por diversas organizaciones para la población en general tanto en viviendas como en lugares de trabajo.

Institución	Referencia	Vivienda (Bq / m³)	Lugar de trabajo (Bq / m³)
ICRP	ICRP 1994 ^a	200-600	500-1500
US-EPA	EPA 2004	148	400
UK-HSE	HSE 2004	200	400
OMS	OMS 2000	≥ 100	600

En México el radón no representa un riesgo latente, no obstante, esto no significa que no puedan existir situaciones en donde por diversos factores, como la ubicación de una construcción, el diseño de una vivienda y la composición de los materiales de construcción, puedan generar elevadas concentraciones de este gas radiactivo, pasando desapercibido para los habitantes de este lugar. Por esta razón, es necesario medirlo en todos los espacios cerrados donde habiten o trabajen personas y mitigarlo cuando sus niveles rebasen los límites establecidos por los diferentes organismos internacionales. Los métodos más comunes que existen para su mitigación en viviendas y lugares de trabajo son [69, 70]:

- Ventilación: Abrir ventanas u otras salidas de aire.
- Despresurización: Se controla el gas desde el subsuelo mediante el uso de una instalación

especial y el cambio de la estructura.

- Filtración: Requiere la instalación de equipo especial dentro de la construcción y su respectivo mantenimiento.
- Presurización: Mediante una instalación especial se evita la entrada de radón a la construcción.
- Recubrimiento: Mediante la instalación de un aislamiento, que se coloca entre el interior de la casa y el suelo, se evita la entrada del gas. Este aislamiento es costoso y requiere de un mantenimiento continuo.
- Captura del radón con moléculas de agua: Se trata de un invento desarrollado y patentado por el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) en el Instituto de Física de la UNAM, que permite capturar y mitigar el radón mediante el uso de un dispositivo con agua en su interior.

Una ventaja que presenta el radón para su mitigación, es que puede ser adsorbido por una gran variedad de sólidos, como por ejemplo, por carbón activado y geles. Esta ventaja radica en la facilidad que presenta este gas para condensarse [70].

2.2. Objetivo del proyecto.

Cuantificar los niveles de concentración del gas radón dentro de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula, con la finalidad de analizar el riesgo que existe por esta radiación ionizante para con la salud de los trabajadores, arqueólogos, antropólogos y demás investigadores que trabajen dentro de estos túneles.

2.3. Metodología y experimentación.

Como lo menciona el título de este proyecto, para cuantificar los niveles de radón dentro de los túneles se utilizó la Metodología de Trazas Nucleares en sólidos. Como detector de radiación se hizo uso del policarbonato CR-39, manufacturado por la compañía Lantrack®. El CR-39 presenta unas dimensiones de 1.8 cm de alto \times 0.9 cm de largo y un ancho de 750 μ m. (Figura 2.6) y fue elegido por su alta sensibilidad. Cada detector viene identificado con un número escrito sobre su superficie con un rayo láser y es suministrado por la compañía con una lamina protectora de 60 μ m, con la finalidad de reducir la exposición del detector a la radiación de fondo y para protegerlo del daño causado por su manipulación.

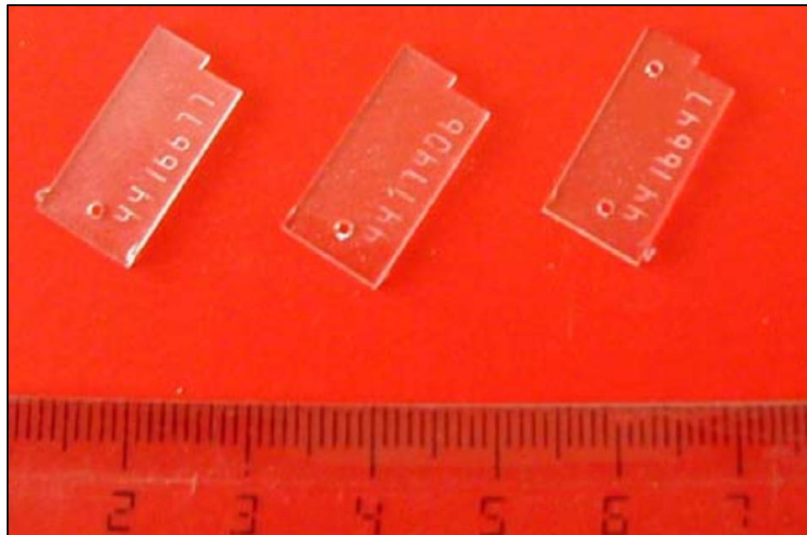


Figura 2.6. CR-39 producido por la compañía Lantrack®.

Como medidor de radón se hizo uso de un dispositivo desarrollado por el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) en el Instituto de Física de la UNAM (figura 2.7). Este medidor denominado "dispositivo detector" o "dispositivo medidor" [71, 72] consiste en un vaso de plástico rígido transparente con un volumen en su interior de 330 ml, en su interior se coloca un detector CR-39, un clip metálico de tamaño estándar y un desecante de Gel de Sílice para mantener constante la humedad relativa. El clip se utiliza para sujetar y colgar libremente al detector en el centro del volumen del interior del vaso. Por último, el vaso se envuelve y cubre con un protector de poliuretano de baja densidad con el objetivo de evitar que el detector sea irradiado por las partículas ionizantes que se encuentran en el ambiente; por las características que presenta el poliuretano de baja densidad, este material sólo permite el paso del gas radón [71].

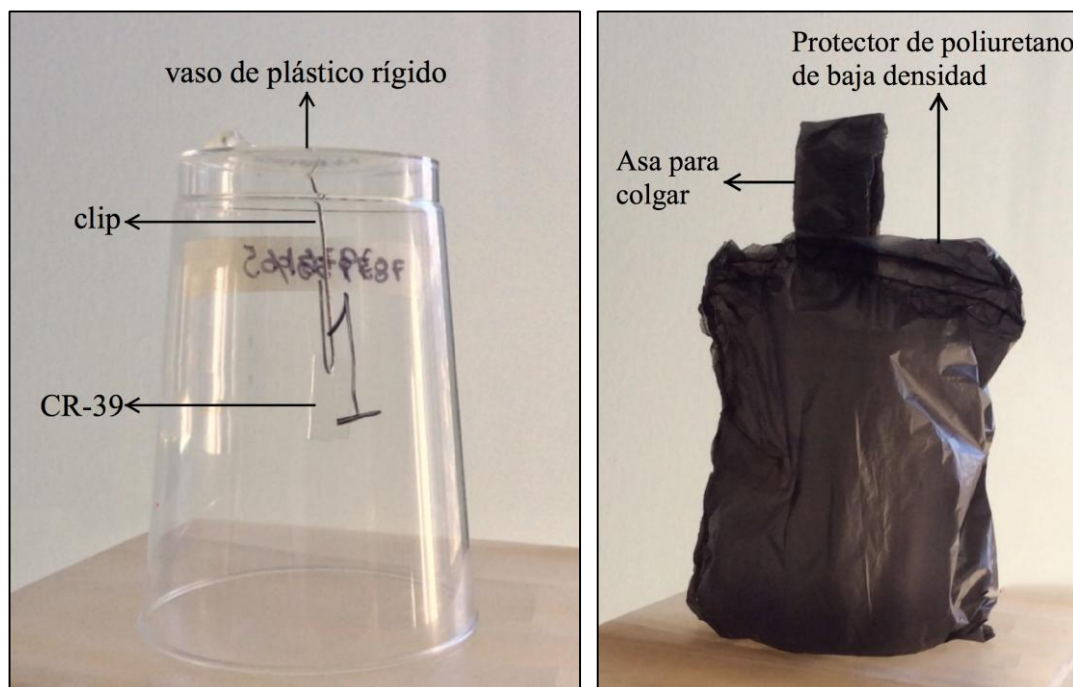


Figura 2.7. Dispositivo medidor de radón desarrollado por el PAD-IFUNAM.

Para desarrollar este proyecto se realizó una primera visita a los túneles, esta visita fue guiada por el antropólogo Martín Cruz (administrador de la zona arqueológica de Cholula). Durante el recorrido dentro de los túneles, se eligieron 20 diferentes puntos para medir el nivel de concentración de radón, estos puntos fueron elegidos en base a dos factores: el primer factor fue que no estuvieran directamente conectados a los túneles principales y el segundo factor fue que no presentaran longitudes mayores a los 25 metros. La razón de esto radica en el hecho de que se observó que cualquier otro lugar que no presentaba estas características mostraba un flujo de aire considerable y dado que el radón sólo puede concentrarse en lugares donde no existen corrientes de aire, no había razón para medir aquellas áreas que no presentaban un riesgo latente, por el contrario, lo importante era medir las áreas que si podían presentar este riesgo. Además, también se eligió no colocar dispositivos detectores en los túneles que estuvieran abiertos al público en general o en aquellos túneles donde comúnmente se realizaran visitas guiadas especiales, con la finalidad de evitar que las personas golpearan o extrajeran los dispositivos. El recorrido con el antropólogo se realizó con ayuda de un mapa del levantamiento de los túneles [73], conforme se recorrían los túneles se fue marcando en el mapa cada uno de los puntos elegidos para colocar un detector. La figura 2.8 presenta este mapa, en esta imagen se observa un recuadro de color rojo que hace referencia a la zona en donde se colocaron todos los dispositivos, también se pueden apreciar pequeños puntos de color rojo, cada punto indica el lugar exacto en dónde se puso un medidor.

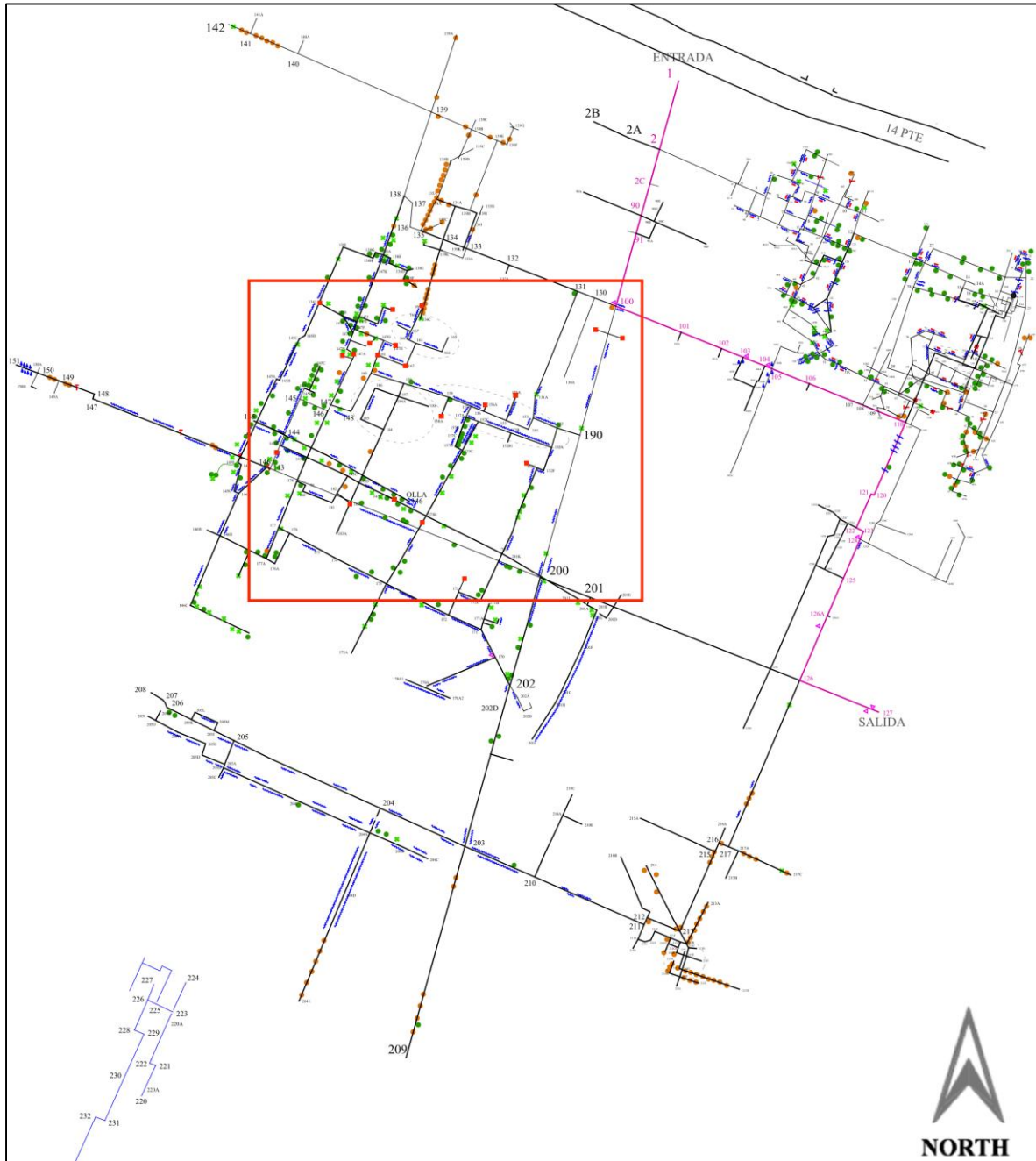


Figura 2.8. Mapa del levantamiento de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula (escala 1:750).

Después de elegir los lugares se armaron los 20 dispositivos. A cada uno de los vasos se le pegó una calcomanía con un código numérico para identificar al dispositivo detector, también se escribió el código numérico del CR-39 colgado en su interior. Después, sobre la bolsa de poliuretano se pegó otra calcomanía con el mismo código numérico que identificaba al detector y con nuestros datos para que quien lo deseara pudiera ponerse en contacto con nosotros. Posteriormente se realizó una segunda visita guiada para colocar los 20 dispositivos. Cada

dispositivo fue colgado a 20 centímetros del techo del punto seleccionado. La figura 2.9 presenta un acercamiento al área del recuadro rojo de la figura 2.8, en la imagen se pueden observar las posiciones exactas donde se colocaron los 20 dispositivos y su correspondiente código numérico de identificación.

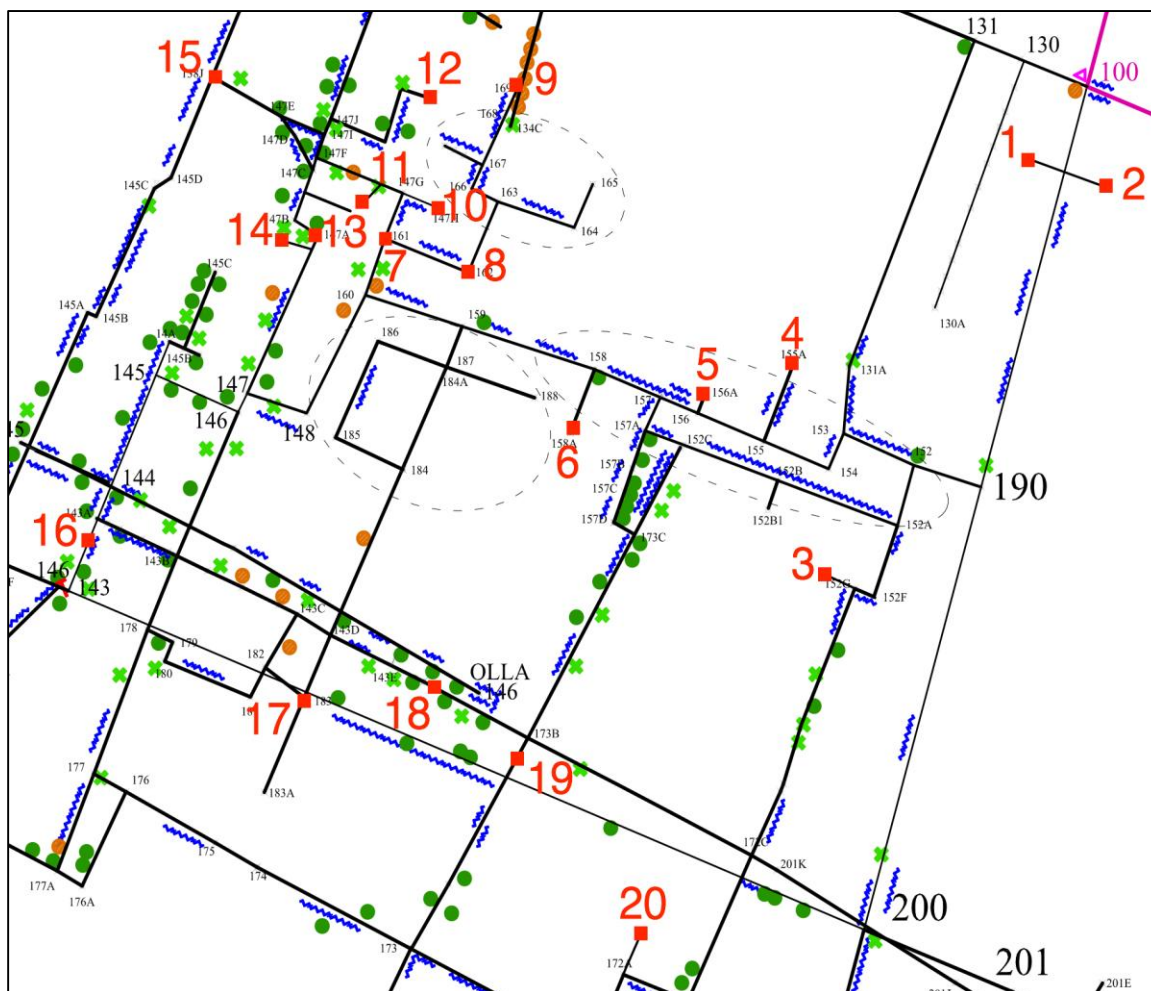


Figura 2.9. Posiciones exactas donde fueron colocados los 20 dispositivos y su código numérico de identificación.

Los dispositivos estuvieron expuestos a la radiación durante 3 meses, en la época de invierno, con la finalidad de evitar la temporada de lluvias (las lluvias mitigan los niveles de concentración de radón). Después del periodo de exposición, los dispositivos fueron retirados del lugar y grabados químicamente simultáneamente (figura 2.10) con las siguientes características:

- Tiempo de ataque químico: 18 horas.
- Solución y concentración: Hidróxido de potasio (KOH), 6.25 Molar.
- Temperatura: $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 2.10. Baño María eléctrico de laboratorio donde se realizó el grabado químico de los CR-39.

Estas características de grabado químico pertenecen a un protocolo desarrollado y estandarizado después de una amplia investigación durante muchos años por el PAD-IFUNAM. Después del grabado químico, los CR-39 fueron lavados con abundante agua destilada y secados, siguiendo también un protocolo bien establecido. Luego, los 20 detectores fueron observados en un microscopio óptico de la compañía Carl Zeiss y la superficie frontal de cada uno de ellos fue fotografiada con una cámara Canon (figura 2.11), en total se fotografiaron 4 campos. Por último, las trazas observadas fueron medidas y contabilizadas mediante el "Sistema de Análisis de Conteo en Imágenes Digitales" (CADIS por sus siglas en inglés) [74], para posteriormente caracterizarlas.

Esta caracterización consistió en los siguientes pasos: primero se obtuvo un promedio de las trazas contabilizadas en cada uno de los cuatro campos fotografiados, luego se realizaron una serie de análisis estadísticos en el programa informático Excel y finalmente se calculó la actividad de la fuente de radiación ionizante (en becquerelio por metro cúbico) para cada detector, es decir, el nivel de concentración de radón en el lugar. Para realizar el cálculo de la actividad se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Actividad} = \rho / At$$

dónde ρ se determina mediante la cuantificación de las trazas observadas en el detector (número de Trazas / cm^2), A se determina mediante la siguiente relación: $5 \text{ (trazas)}(\text{cm}^{-2}) / (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} / \text{mes})$ y t es el tiempo de exposición del detector a la radiación (en meses).

Por último, es importante mencionar que para el proceso de medición, se utilizaron otros dos detectores como referencias, uno de los cuales no fue expuesto a ningún tipo de radiación ionizante y el otro fue expuesto a una concentración de radón conocida en un cuarto de control. El primer detector sirve para conocer el número de trazas promedio que ya tenían previamente los CR-39 utilizados (radiación de fondo) y restarlos a las trazas contabilizadas y el segundo detector permitió comprobar que las mediciones obtenidas en los túneles corresponden a un valor real, es decir, el detector se comportó de manera normal bajo las condiciones establecidas.

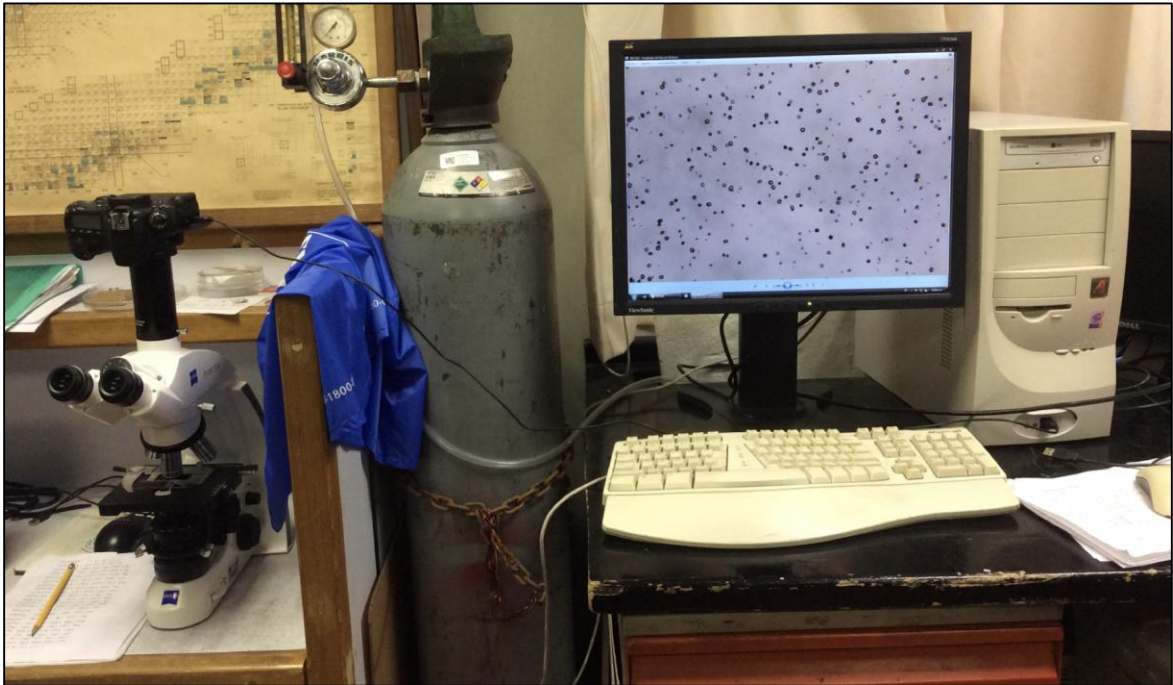


Figura 2.11. Microscopio óptico Carl Zeiss donde fueron observados los CR-39 y cámara Canon dónde fueron digitalizadas las imágenes observadas.

2.4. Resultados y discusión.

Los resultados obtenidos en el conteo digital muestran una significativa concentración de radón en los 20 detectores colocados dentro de los túneles de la Gran Pirámide. Esta concentración, evidentemente, proviene de la contribución del radon-222 que emerge del subsuelo. La tabla 2.4 muestra el promedio de la concentración de radón que registró cada CR-39 colocado, la tabla incluye el código numérico de cada detector de acuerdo a lo señalado en la figura 2.9.

Tabla 2.4. Promedio de la actividad del radón que registró cada CR-39 colocado dentro de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula.

Código de detector	Promedio de concentración de radón (Bq / m³)
01	816 ± 164
02	806 ± 92
03	925 ± 78
04	1134 ± 52
05	1048 ± 36
06	1098 ± 102
07	974 ± 83
08	1197 ± 76
09	1196 ± 46
10	961 ± 66
11	1157 ± 35
12	1053 ± 80
13	966 ± 122
14	738 ± 71
15	852 ± 52
16	717 ± 48
17	956 ± 83
18	1015 ± 114
19	855 ± 78
20	1092 ± 82

Como se observa en la tabla 2.3, los detectores 8 y 9 fueron los que registraron los mayores niveles de concentración de radón, mientras que los detectores 14 y 16 los que registraron la menor concentración. La Figura 2.12 muestra dos imágenes, la imagen a) pertenece a un campo fotografiado del CR-39 que registró el mayor promedio de concentración de radón (detector 8) y la imagen b) a un campo fotografiado del CR-39 que registró la concentración más baja (detector 16).

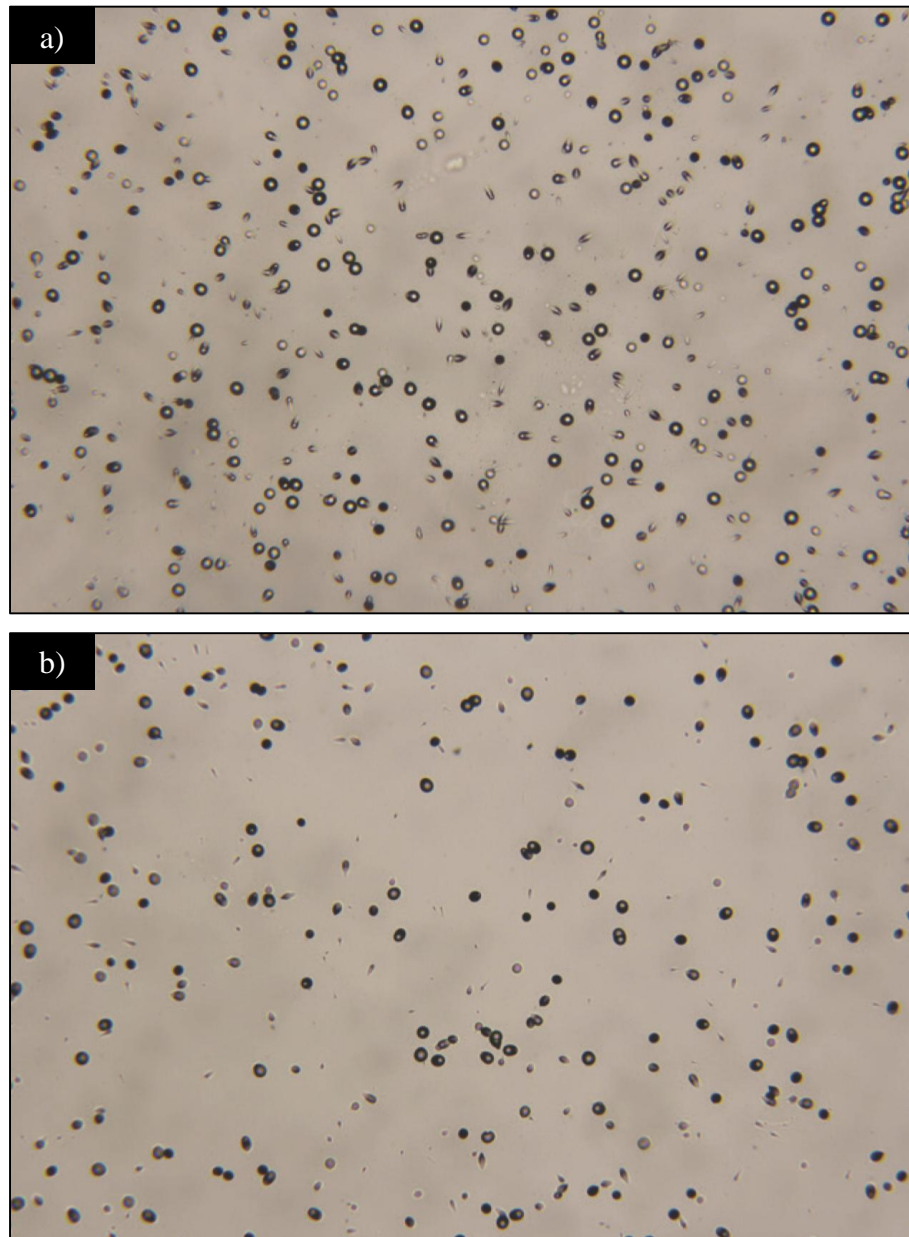


Figura 2.12. Imagen a) campo fotografiado en el detector 8, imagen b) campo fotografiado en el detector 16.

En general no se identificaron áreas que muestren una mayor concentración de radón con respecto a otras, ni tampoco se identificó una dinámica particular del comportamiento del gas dentro de los túneles, sólo se observa una concentración generalizada con algunos túneles con mayor concentración con respecto a otros. Si bien es cierto que no se colocaron dispositivos medidores en todos los túneles, pero debido a que todos los dispositivos colocados presentaron una concentración significativa de radón, se advierte la posibilidad de que todos los túneles, huecos y cavidades que no cuentan con una adecuada corriente de aire pueden presentar también elevados niveles de concentración de este gas. La concentración dentro de los túneles puede explicarse si se analizan las primeras conclusiones propuestas por el arquitecto Marquina después de terminar los primeros trabajos de excavación, en estas primeras conclusiones Marquina señaló que la cuarta etapa constructiva consistió en una gigantesca estructura de adobe que cubrió en su totalidad las anteriores etapas constructivas, por lo que esta estructura posiblemente bloquea la salida del radón que proviene del subsuelo y evita que salga a la superficie de la edificación, concentrándose dentro de los túneles y cavidades que no presentan una circulación de aire. Por el contrario, el radón que emerge del subsuelo dentro de los túneles principales o aquellos que tienen una longitud mayor aproximada a los 25 metros si puede salir al exterior, gracias a las corrientes de aire que se forman en estos lugares.

Con base en estos resultados y comparándolos con las dosis de exposición al gas radón recomendadas por la US-EPA y la UK-HSE como valor límite al que puede estar sometida una persona en un espacio de trabajo cerrado ($400 \text{ Bq} / \text{m}^3$) y a pesar de que se encuentre dentro del límite permitido de la ICRP, se recomienda que arqueólogos, antropólogos, arquitectos y trabajadores, en general, no permanezcan muchas horas a la semana dentro de los túneles y cavidades que carecen de una ventilación adecuada, con la finalidad de que no estén expuestos a dosis innecesarias de radón. Si fuera necesario que las personas trabajen dentro de estos lugares durante muchas horas, se recomienda que se coloquen ventiladores que permitan que fluya el aire, de manera continua, hacia los túneles más grandes. Si no fuera posible colocar ventiladores, se recomienda utilizar mitigadores de radón que reduzcan los niveles hasta volverlos seguros, como el dispositivo desarrollado en el PAD-IFUNAM.

"Tu visión devendrá más clara solamente cuando mires dentro de tu corazón... Aquel que mira afuera, sueña. Quién mira en su interior, despierta".

Carl Gustav Jung

CAPÍTULO 3

SIMULACIONES COMPUTACIONALES DE LA EXPANSIÓN Y DEPÓSITO DE DOSIS DE ENERGÍA DE PARTÍCULAS ALFA EMITIDAS POR RADÓN-222 CONTENIDO EN EL AGUA DE UN MANANTIAL MEDIANTE EL PROGRAMA GEANT4

Como se menciona en el capítulo anterior, la concentración de radón-222 en el aire de los espacios de trabajo y en las viviendas es un asunto de salud pública, debido a que según la Organización Mundial de la Salud es la primera causa de cáncer pulmonar en las personas que no fuman tabaco, por lo que los estudios de su cuantificación en diferentes espacios y su posterior mitigación son de extrema importancia. Sin embargo, esta situación se complica si se analiza el hecho de que el radón que emana del subsuelo, naturalmente, se transfiere a la infinidad de acuíferos y ríos subterráneos que existen por todo el mundo [21]. Basta con señalar que el volumen de agua subterránea es mucho mayor con respecto a la masa de agua que se encuentra retenida en los lagos y en los ríos superficiales [75]. Por tanto, el radón en el agua implicaría un doble riesgo para la población, por un lado esta el hecho de que el radón que sea emitido por el agua afecte los pulmones de las personas que lo inhalen y, por otro lado, se encuentra el riesgo de que el radón llegue al estómago de una persona que ingiera agua con elevadas concentraciones, generando la posibilidad de contraer cáncer de estómago (aunque el riesgo de contraer cáncer de estómago por ingerir radón es menor con respecto al riesgo de contraer cáncer de pulmón por inhalarlo: 11 % frente a 89%) [76]. Esto significa que es muy importante cuantificar los niveles de radón del agua que se encuentra en pozos y manantiales (sobre todo de aquellos que sean de uso recreativo para la población), así como de todos aquellos lugares donde los gobiernos acostumbren extraer agua para posteriormente enviarla a la población. La tabla 3.1 presenta el valor recomendado, por dos organizaciones, de concentración de radón contenido en agua para el consumo humano.

Tabla 3.1. Valor de concentración de radón contenido en agua para el consumo humano recomendado por dos organizaciones.

Institución	Referencia	Agua de consumo humano (Bq / L)
US-EPA	EPA 2006	148
OMS	OMS 2004	100

Sin embargo, si el agua del lugar presenta concentraciones de radón por debajo de los límites recomendados por la OMS el manantial puede ser utilizado con fines de Hormesis [11-13], por lo que el agua se convertiría en un beneficio para la población.

Por otra parte, es recomendable realizar análisis y simulaciones computacionales que permitan comprender como se expande la radiación en los alrededores del manantial o del pozo, así como el alcance que puede tener esa expansión. Estas simulaciones pueden realizarse modelando la radiación como un gas, en forma de partículas ionizantes (en este caso partículas alfa) o ambas. Sólo de esta manera será posible descartar un riesgo por radiación ionizante para las personas que nadan o trabajan en el lugar y para las personas que viven en las cercanías del manantial. Hay que recordar que el riesgo que presenta el radón que emana del agua o del subsuelo, es la posibilidad de que ingrese en una edificación y se acumule en un cuarto poco ventilada.

Si se modela la expansión de la radiación en forma de partículas es posible utilizar uno de los múltiples programas informáticos que existen para realizar estas simulaciones, uno de los más importantes es el programa científico Geant4.

3.1. El programa informático Geant4.

Geant4 es un programa informático de carácter libre y gratuito desarrollado para realizar simulaciones de interacciones de partículas con la materia en base al método estadístico de Monte Carlo [77, 78]. Geant4 es el sucesor de una serie de programas conocidos como "Geant", programados por científicos e investigadores de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN por sus siglas en francés). Geant proviene de las palabras en inglés: *geometry and tracking* (geometría y rastreo). Geant4 fue desarrollado en el lenguaje de programación C++ y utiliza una gran cantidad de modelos de física para simular las interacciones de las partículas con la materia en un rango de energía muy amplio, a decir verdad, el programa actúa como un repositorio de información científica debido a que incorpora una gran cantidad de datos sobre las interacciones entre partículas, producto de los resultados obtenidos en diversas investigaciones que se han realizado en todo el mundo a lo largo de muchos años. Las herramientas de simulación que incluye este programa son: la geometría del sistema, los materiales involucrados, las partículas fundamentales de interés, la generación de eventos primarios, el seguimiento de partículas a través de materiales y campos electromagnéticos, los procesos de física que rigen las interacciones de partículas, la respuesta de los componentes sensibles del detector, la generación de datos de eventos, el almacenamiento de eventos y trazas, la visualización del detector y las trayectorias de las partículas y la captura y análisis de datos de simulación en diferentes niveles de detalle y refinamiento. Geant4 es utilizado por científicos de todo el mundo para el desarrollo de investigaciones en diversas áreas de la física como: la física de altas energías, experimentos nucleares, simulaciones en el área de la medicina nuclear, producción de partículas en aceleradores y estudios de radiación espacial, entre muchos otros. Como Geant4 es un programa de simulación de interacción de partículas con la materia, no es posible simular la expansión del gas radón, por lo tanto, se simulará la expansión de la radiación como partículas α .

Una parte fundamental cuando se realiza una simulación de la interacción de la radiación con la materia, es el incluir en el programa computacional todos los fenómenos físicos que pueden ocurrir cuando las partículas interactúan con los átomos de la materia (incluyendo la producción de otro tipo de partículas como fotones y electrones). Geant4 es un programa que no solo contempla la producción de estas partículas secundarias, sino que también es capaz de simular la expansión tanto de las partículas primarias (en el caso de este trabajo de las partículas α) como de las secundarias, es decir, de toda la radiación en general.

En este trabajo se realizaron dos simulaciones, una para determinar el comportamiento de las partículas α (interacción con el aire y producción de radiación secundaria) y el alcance de la expansión de toda la radiación, y otra simulación para determinar la dosis de energía depositada por esta radiación al interactuar con el medio (en este caso en el aire).

3.1.1. Los parámetros en Geant4.

Geant4 no es un programa como los que se utilizan en ingeniería, arquitectura o diseño, en donde el usuario tiene toda una paleta de herramientas dentro del programa para diseñar estructuras en un espacio de trabajo. Geant4 es un programa que contiene un compendio de librerías y objetos

en C++, por lo que el usuario tiene que desarrollar un código, declarando variables y creando una estructura lógica, con el objetivo de que una vez que el código sea compilado y ejecutado se genere una simulación y un resultado. Además, Geant4 es un código Monte Carlo de muestreo aleatorio que provee de resultados bastante cercanos a los reportados en los experimentos. El programa también utiliza en conjunto modelos físicos y complejas geometrías para desarrollar las simulaciones. La ventaja de Geant4 y un lenguaje común de programación radica en el hecho de que sólo es necesario programar unas pocas líneas de código muy específico para que Geant4 desarrolle las interacciones de partículas con la materia, utilizando para esta tarea sus “listas de físicas” (código basados en diferentes modelos matemáticos, necesarios para simular las interacciones). En el interior del programa también existen múltiples librerías para facilitar la construcción del código.

Para desarrollar una simulación en Geant4 es necesario declarar ciertos parámetros. Estos parámetros representan todas las variables que pueden existir dentro de la simulación, así como los límites que la radiación tendrá durante su expansión e interacción con la materia. Estos parámetros son:

1. **El mundo.** Este parámetro representa las dimensionales totales del entorno donde se va a desarrollar toda la simulación, es decir, el volumen total al que se pueden expandir las partículas. Geant4 permite crear un mundo con las dimensiones que el usuario requiera pero siempre con una forma geométrica de paralelepípedo.
2. **El detector.** Este parámetro representa las dimensiones del espacio que va a registrar y cuantificar las partículas que sean emitidas por la fuente de radiación, es decir, es el volumen específico que el usuario coloca para medir la interacción de partículas con la materia. El mundo puede ser tan grande como se desee, pero las dimensiones del detector deben declararse siempre dentro de los límites dimensionales del volumen que representa el mundo, todas las partículas que se expandan más allá del detector no serán registradas y por lo tanto no existirán en los resultados de la simulación. A diferencia del mundo, el detector puede adquirir cualquier forma geométrica que el usuario requiera, distinguiendo entre detectores de volumen y de espacio fase, donde la diferencia entre ambos radica en la información que el usuario quiera obtener.
3. **La geometría.** Es el medio que interactuara con las partículas radiactivas, puede ser el medio ambiente (usualmente aire o agua), o diversas geometrías de manera que la radiación tenga que atravesarlas antes de llegar al detector. Geant4 permite desarrollar todo tipo de estructuras volumétricas y materiales con los que interactuarán las partículas que se emitan desde la fuente de radiación. Estas estructuras generalmente se desarrollan para recrear las condiciones de la simulación lo más real posible. Lógicamente estos parámetros frenaran y detendrán la libre expansión de las partículas en el medio, dependiendo de las dimensiones de los volúmenes y del tipo de materiales con los que se construyan.
4. **La fuente de radiación.** También llamado pistola de partículas (*particle gun*), es el punto, superficie o volumen desde el cual se estarán “lanzando las partículas”.
5. **Las partículas.** Hace referencia a la naturaleza de la radiación ionizante que interactuará con la materia. Geant4 precisa que se declaren dos variables para hacer efectivo este parámetro: el tipo de partícula y su energía.

- 6. El número de historias.** Es el número de eventos que llevara a cabo la pistola de partículas, es decir, cuantas partículas se lanzaran. Cada partícula y las partículas secundarias que se generen compondrán una historia.

Una vez definidos estos parámetros se puede iniciar la simulación. El tiempo de computo que necesitará al programa desde su ejecución hasta la entrega de los resultados dependerá de diferentes factores: el tamaño del mundo, la complejidad de todas las estructuras que existen dentro del mundo, el tamaño del detector, el numero de partículas enviadas por la fuente de radiación, el numero y tamaño de los materiales colocados para la interacción con las partículas, el poder de procesamiento de la computadora, entre otros factores. Afortunadamente, en este trabajo se tuvo la posibilidad de realizar la simulación en una computadora de alto rendimiento, en concreto se realizó en el Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México localizado en Ciudad Universitaria en la BUAP (figura 3.1), por lo que el tiempo que demoró el programa para terminar las simulaciones se redujo considerablemente.

Por último, es importante explicar la manera en que el programa simula la emisión de partículas desde la fuente de radiación: Geant4 no genera en un solo instante todas las partículas definidas previamente, sino que genera una sola y después simula toda la serie de interacciones y acontecimientos que pueden ocurrir basándose en todos los principios físicos que existen dentro de su estructura y el método de Monte Carlo, hasta que las partículas son atenuadas completamente por la materia o traspasan la frontera del mundo. Posteriormente, genera otra partícula y repite los acontecimientos hasta que termina de generar todas las partículas definidas [79]. Geant4 aprovecha la máxima capacidad de subprocesos (mejor conocidos en informática como hilo o thread) que tiene cada núcleo del procesador de la computadora para desarrollar una historia distinta por separado y nunca simula dos historias al mismo tiempo, de esta manera evita que existan errores graves en la escritura de los datos además de evitar que dos historias diferentes puedan afectarse una con la otra [79]. Una vez que la simulación ha finalizado, los resultados obtenidos deben ser analizados. Para realizar estos análisis, comúnmente se utiliza otro programa llamado ROOT [80]. ROOT es un programa informático utilizado para el desarrollo de aplicaciones de análisis de datos científicos a gran escala elaborado también por investigadores del CERN en el lenguaje de programación C++. Con ROOT es posible, por ejemplo, crear histogramas de las simulaciones desarrolladas en Geant4 con la finalidad de presentar mejor los resultados obtenidos. En este trabajo, los resultados obtenidos en Geant4 fueron analizados en ROOT, las gráficas obtenidas también fueron elaboradas en este programa.



Figura 3.1. Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México.

3.2. Objetivo del proyecto.

Realizar dos simulaciones computacionales de la expansión y el depósito de dosis de energía de partículas alfa emitidas por radón-222 contenido en el agua de un manantial natural, localizado en el estado de Puebla, mediante el programa informático GEANT4; con la finalidad de determinar el riesgo que existe por la radiación de estas partículas ionizantes para con las personas que nadan en el manantial o que habitan en las cercanías de este lugar.

3.3. Metodología y experimentación.

El manantial natural dónde fue desarrollado el estudio presenta una superficie de concreto que delimita su parte superior, es decir, mientras que el interior del manantial esta conformado por una estructura rocosa sin una forma geométrica concreta su superficie tiene cuatro paredes que le dan la apariencia de una alberca común. Este hecho permitió medir las dimensiones del manantial con un flexómetro, las dimensiones obtenidas fueron de 15 m de largo x 10 m de ancho. Su profundidad fue obtenida mediante la referencia de múltiples personas que trabajan cerca de este lugar y por personas que acostumbran nadar en el manantial, todos concordaron que la profundidad del manantial es de 5 m. En el fondo de este manantial existen una serie de diminutas cavidades por donde accede el agua que proviene del subsuelo, para posteriormente fluir libremente por un riachuelo, por lo que, conforme el agua ingresa por las diminutas cavidades al manantial, el gas radón también ingresa y emerge a la superficie. De manera que la fuente de emisión de radiación en el manantial es el caudal de agua. El flujo volumétrico de este caudal fue calculado por un grupo de geólogos en trabajos anteriores, reportando un flujo aproximado de 300 litros / segundo. Después de entrar por la cavidad el radón puede tener diferentes destinos:

- Distribuirse y concentrarse a lo largo de las paredes que conforman el manantial, preferentemente en las zonas mas bajas del espacio.
- Seguir el trayecto del agua por el riachuelo.
- Liberarse a la atmosfera.

El radón que sea liberado en la atmosfera se propagará por todo el espacio, sin embargo, gran parte del radón será mitigado por todos los árboles y materiales que se encuentren en los alrededores de la zona y por el propio aire.

3.3.1. Medición de los niveles de concentración de radón en el agua del manantial.

Para determinar si existía radón en el agua del manantial y el nivel de su concentración se utilizó un sistema de medición dinámico conformado por un detector profesional portable AlphaGUARD, modelo PQ2000 PRO [81], manufacturado por la compañía Saphimo y un dispositivo denominado AquaKIT manufacturado por la compañía Bertin Instruments [82]. El dispositivo AquaKIT utiliza el método de aireación para liberar el radón de las moléculas de agua para que posteriormente el detector registré la actividad del radón liberado.

El equipo AlphaGUARD pertenece al grupo de detectores que utilizan el principio de ionización eléctrica, utilizando para ello la denominada cámara de ionización [83]. En general, estas cámaras están conformados por dos placas metálicas (aunque también pueden ser dos electrodos planos paralelos o cilíndricos coaxiales) separadas por un espacio lleno de gas. Cuando la radiación entra al detector e interacciona con el gas se producen una serie de ionizaciones, estos iones se desplazarán hacia los electrodos de signo opuesto creando una corriente que puede ser registrada por un galvanómetro o un electrómetro. Para el caso de la espectrometría alfa, la

ionización es proporcional a la energía de partículas alfa y el resultado que generará el equipo será un espectro de partículas alfa (número de partículas detectadas) en función de su energía.

En el equipo AlphaGUARD, su cámara de ionización tiene un volumen activo de 0.56 litros, un voltaje de operación de 750 V, una capacidad para medir una concentración de radón en un intervalo de 2×10^{-3} a 2000 Bq / L y su medición es independiente a factores ambientales. El equipo también puede medir la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la humedad relativa. La tabla 3.2 presenta las características principales del detector AlphaGUARD [81].

Tabla 3.2. Características principales del equipo AlphaGUARD.

Aspecto	Característica
Tipo de detector	Cámara de ionización HV = 750 VDC
Volumen total del detector: activo / pasivo	0.62 litros / 0.56 litros
Modos de operación	Difusión optimizada (10/60 min ciclo) Flujo optimizado (1/10 min ciclo)
Material para filtrar los hijos del ^{222}Rn	Fibra de vidrio (factor de retención > 99.9%)
Sensibilidad	1 CPM por 1 CPM por 0.55 pCi / L
Rango de operación:	temperatura: -10 a 50 o C ± 1.5 o C presión: 700 a 1100 mbar ± 3 mbar humedad: 0 a 99 % rH ± 3 % rH
Erro lineal	< 3% dentro del rango total
Peso del equipo	4.5 kg

Por su parte el equipo AquaKIT consiste en un circuito formado por diferentes elementos: una bomba eléctrica de aire que la compañía denomina AlphaPUMP, dos tubos de vidrio (en uno de los tubos se hace burbujear la muestra de agua y el otro se utiliza para evitar el paso de líquidos al detector), un filtro de papel desecante y un conjunto de mangueras de plástico para conectar los diferentes elementos. La figura 3.2 presenta una imagen donde se muestra el sistema de medición dinámico y un esquema donde se pueden observar cada una de las partes que conforman al sistema dinámico.

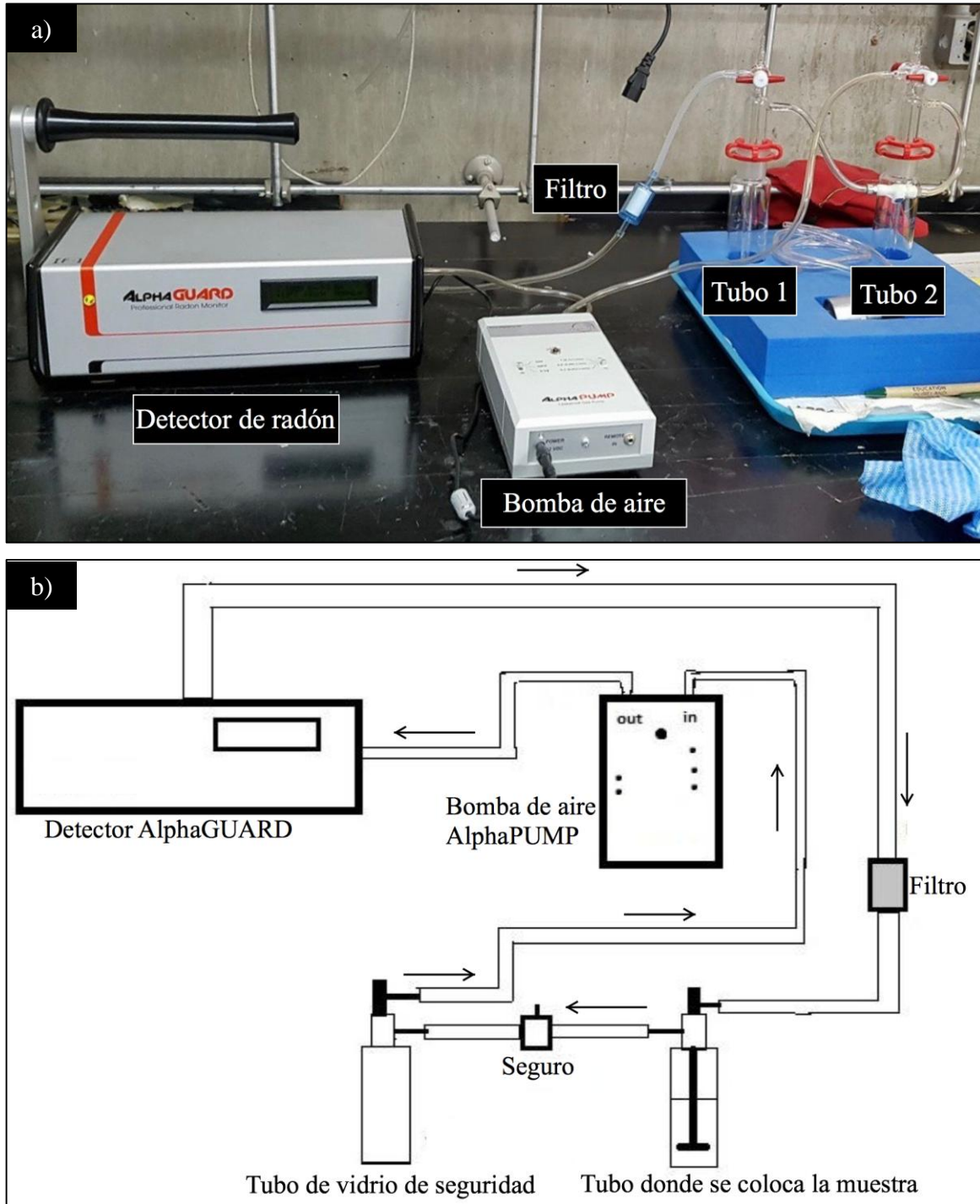


Figura 3.2. a) Sistema de medición dinámico utilizado para medir el radón en el agua del manantial, b) esquema de las partes que conforman al sistema dinámico.

El sistema de medición dinámico funciona de la siguiente manera:

1. Primero se debe armar todo el sistema dinámico tal y como lo muestra el esquema de la figura 3.2. Luego, el sistema se debe conectar a una computadora, la computadora debe tener instalado el programa informático DataEXPERT. Este programa será el encargado de recibir la información del detector y generar el espectro de partículas alfa.
2. Después se enciende el detector, se ejecuta el programa DataEXPERT y se seleccionan los comandos necesarios para realizar la medición.
3. Posteriormente se introducen 100 ml del agua que se desea medir en el tubo de vidrio, dónde se hará burbujear la muestra. Para introducir el agua, se inclina el vaso de vidrio y se vierte el agua lentamente con el objetivo de que el radón no sea liberado al ambiente.
4. Después se regula la bomba a una velocidad de 0.3 L / min y se enciende. Al encender la bomba se suministrará un flujo constante de aire al agua con el objetivo de generar burbujas en el líquido y, de esta manera, permitir la salida del gas al espacio vacío dentro del recipiente de vidrio.
5. El radón que sale del agua se envía por una manguera al segundo tubo de vidrio con el objetivo de precipitar la posible humedad que contenga el gas, esto evita que entre líquido al detector y descomponga el equipo. Luego, el gas es enviado por otra manguera al medidor AlphaGUARD.
6. La actividad radiactiva de la muestra que registre el medidor se enviará a la computadora, donde se podrán observar los niveles de concentración en un gráfico que se genera en tiempo real.
7. Posteriormente el gas remanente en el volumen activo del detector es enviado fuera del equipo.
8. El detector y la bomba puede mantenerse encendidos, midiendo la muestra, todo el tiempo que se requiera hasta que la bomba sea apagada.
9. Terminado el proceso de medición, el programa DataEXPERT muestra los resultados de dos maneras: en un gráfico y en una tabla de datos, en ambas presentaciones los resultados muestran la actividad radiactiva del agua en unidades de Becquerel / m³ y el tiempo de medición que se mantuvo el equipo en funcionamiento en segundos. Además de la actividad del agua, el programa DataEXPERT muestra otras mediciones como Rn-error, temperatura, presión y humedad.
10. Posteriormente se retira el agua del tubo de vidrio y se limpia con agua tridestilada.
11. Finalmente, se exportan los datos obtenidos en formato ASCII para poder ser leídos en otros programas como Microsoft Excel, Origin o algún otro programa similar.

Para realizar el cálculo de la concentración de radón en el agua, el equipo utiliza la siguiente ecuación [82]:

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

dónde,

C_{ag} = concentración de radón en el agua (Bq / L).

C_{ai} = concentración de radón en aire después de expeler el radón (Bq / m³).

C_o = concentración de radón en el aire antes de cerrar el ciclo (Bq / m³).

V_s = volumen interior del sistema (mL).

V_m = volumen de la muestra (mL).

k = coeficiente de distribución del radón.

Para medir la concentración de radón en el agua del manantial, se extrajeron 2 litros con la finalidad de poder realizar diversas mediciones y para poder realizar un análisis de espectroscopia gamma al agua. En total se realizaron 4 extracciones de agua en diferentes temporadas del año, de esta manera se podrían conocer las variaciones de los niveles de concentración a lo largo del año. Para realizar la medición, se realizaron los siguientes pasos:

1. Primero se colocó agua con un alto grado de pureza (agua tridestilada) en uno de los recipientes de vidrio. Este paso permite purgar el equipo, es decir, eliminar el radón que permanezca en todas las conexiones y en el propio medidor, producto de las mediciones realizadas anteriormente. El equipo se purgó durante 30 minutos.
2. Después se colocó el agua del manantial en el recipiente, se prendió y se dejó midiendo la muestra durante 30 minutos.
3. Terminado el tiempo de medición se desechó el agua y el equipo se purgó nuevamente, pero en esta ocasión sólo durante 10 minutos.
4. El ciclo se repitió dos veces más para obtener un total de tres mediciones diferentes con esa muestra.
5. Posteriormente se calculó el promedio de la concentración de radón de las tres mediciones realizadas para la muestra extraída ese día.
6. Los resultados fueron registrados y guardados en la computadora. Luego, se realizó una conversión de Bq / m³ a Bq / L mediante un factor de conversión previamente determinado.
7. El proceso se repitió de la misma manera para las otras tres extracciones de agua.

La figura 3.3 presenta una gráfica de los resultados obtenidos en una de las mediciones realizadas, en esta gráfica se puede observar en el eje de las abscisas el tiempo transcurrido mientras el detector AlphaGUARD realizaba la medición y en el eje de las ordenadas la actividad radiactiva del agua que el equipo registró en un determinado tiempo de medición.

Los resultados obtenidos del equipo AlphaGUARD muestran que, en efecto, el agua del manantial contiene una interesante concentración de radón. La tabla 3.3 muestra los promedios de los niveles de concentración de radón obtenidos para cada una de las cuatro mediciones realizadas, así como la fecha en que se realizó la medición.

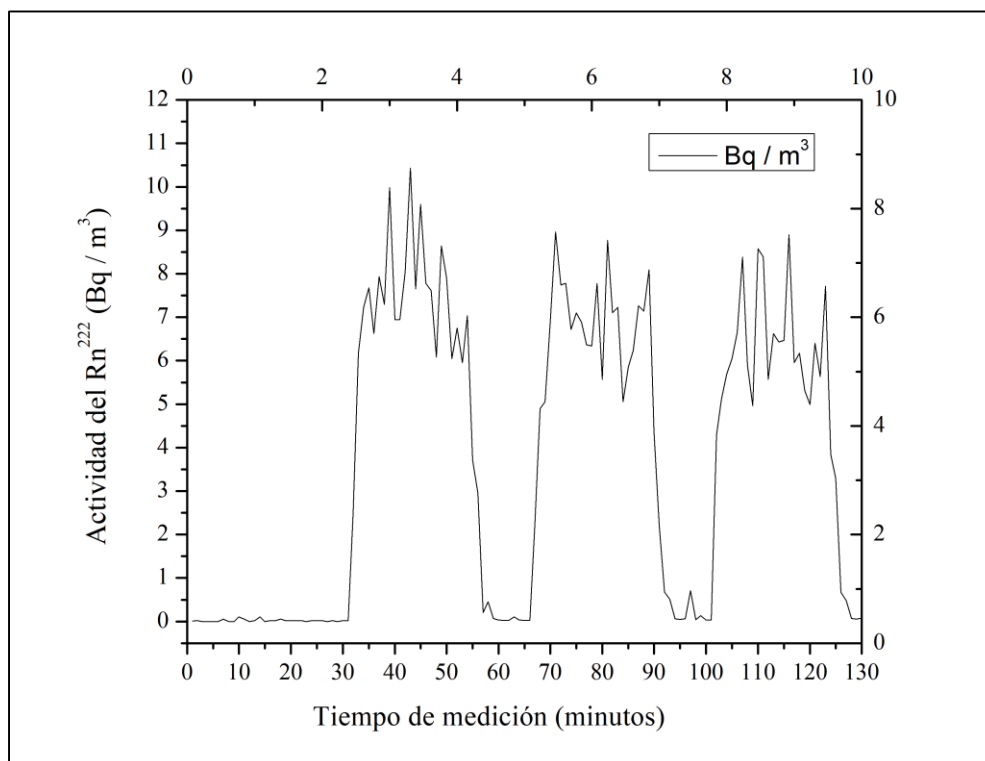


Figura 3.3. Gráfica de la concentración de Rn^{222} cuantificada por el detector AlphaGUARD en una de las muestras de agua analizadas.

Tabla 3.3. Resultados de los niveles de concentración de radón promedios obtenidos para cada una de las cuatro mediciones realizadas.

Fecha de análisis	Concentración de radón (Bq / L)
13 / 02 / 2015	74.10
24 / 11 / 2016	72.00
18 / 01 / 2017	70.53
23 / 10 / 2017	64.15

Como se observa en la gráfica de la figura 3.3, el detector AlphaGUARD primero cuantificó el valor de la actividad radiactiva en el agua tridestilada. Después de 30 minutos de purga, se colocó la muestra de agua del manantial y se analizó durante 30 minutos, luego el agua se desechó y se colocó nuevamente agua tridestilada durante 10 minutos. El ciclo se repitió hasta obtener 3 mediciones. En la gráfica puede observarse como la actividad radiactiva del agua tridestilada es casi nula y la del agua de manantial no lo es, debido a la presencia del Rn. Por último es importante mencionar que, debido a que el programa DataEXPERT no reinicia el marcador del

tiempo cuando se apaga la bomba de aire para realizar el cambio de agua, se puede apreciar en la gráfica un tiempo continuo desde que inició el análisis hasta que terminó, por lo tanto, el programa ignora el tiempo que esta apagada la bomba y sólo registra el tiempo en que el equipo esta analizando la muestra; en la práctica la medición duró más tiempo debido a los intervalos utilizados para cambiar el agua en el tubo de vidrio y a la preparación de la nueva muestra antes de encender la bomba.

Según la US-EPA, la recomendación del nivel de concentración de radón en agua para consumo humano no debe ser mayor a los 148 Bq / L y según la OMS no debe ser mayor a 100 Bq / L y el promedio de concentración de las cuatro muestras analizadas fue de 70.19 Bq / L, por lo que los niveles de radón en el agua no representan un riesgo para las personas que nadan en el lugar y, en teoría, el agua es apta para consumo humano (aunque esto no es recomendable por que se necesitan realizar otro tipo de caracterizaciones como estudios de su composición química o pruebas bacteriológicas).

3.3.2. Análisis del espectro de energía de la radiación gamma emitida por el agua.

Después de comprobar que existía una concentración de radón en el agua del manantial, se decidió realizar otro análisis denominado "espectrometría de radiación gamma" [84]. Este tipo de análisis permite determinar si existe en la muestra algún radionúclido que emita radiación gamma, además de permitir la identificación y la cantidad de estos radionúclidos. En esta investigación, en concreto, permitiría conocer si existe presencia de isótopos de uranio en el agua a partir de la detección de uno de sus hijos: el radio-226, lo que revelaría un posible aumento en el riesgo para las personas. La radiación gamma es una energía que tiene la capacidad de afectar severamente al cuerpo humano, estas afectaciones incluyen la producción de tumores cancerígenos y daño en el ADN [85]. Incluso puede producir mutaciones en la descendencia de aquellas personas que se encuentren expuestas a altas dosis de esta radiación [86]. La gravedad de los efectos que produzca esta radiación dependerán de su energía, de la proximidad de la persona a la fuente de emisión y de su tiempo de exposición. No obstante, la probabilidad de que en un acuífero natural exista presencia de isótopos emisores de radiación gama tal que su cantidad y energía represente un riesgo para las personas es baja, la mayoría de los acuíferos que pudieran presentar elevadas cantidades de estos radioisótopos son aquellos que se encuentran cerca de una central nuclear.

La espectroscopia de radiación gamma basa su principio de detección en el hecho de que cada núcleo de un átomo radiactivo emite una energía e intensidad característica que es detectable y cuantificable [84]. Esta detección y posterior cuantificación es posible gracias a los diversos mecanismos de interacción y posterior transferencia de energía que ocurre entre el fotón y el material detector, estos mecanismo fueron descritos en el apartado 1.1.1 (interacción de la radiación con la materia) y son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares; en estas interacciones la energía de los fotones se degrada dentro del detector generando distintos tipos de excitaciones.

Para desarrollar esta técnica de análisis se puede utilizar un detector de estado sólido (como el semiconductor de Germanio hiperpuro o HPGe) o un detector de centelleo (como el de yoduro de sodio con impurezas de talio o NaI(Tl)) [84]. En esta investigación, se utilizo un HPGE

enfriado criogénicamente con nitrógeno líquido. El HPGe se utiliza como un medio ionizable, similar al gas utilizado dentro de la cámara de ionización descrita anteriormente. Cuando un fotón interactúa con los átomos del HPGe, las partículas cargadas eyectadas son enviadas a un electrodo por medio de un campo eléctrico, cuando el electrodo registra una partícula se genera un pulso eléctrico. Estos pulsos de carga son enviados a un preamplificador, cuyo objetivo es proporcionar una señal de voltaje de crecimiento y decrecimiento exponencial a cada pulso registrado. Luego, la señal de voltaje es aumentada y adecuada a la forma de los pulsos por medio de un amplificador. Posteriormente la señal es enviada a un "analizador multicanal" o MCA por sus siglas en inglés *Multichannel Analyzer*, cuyo objetivo es obtener el espectro de energía mediante el procesamiento de los pulsos de voltaje que registra. Para realizar este trabajo el MCA cuenta con un componente electrónico que convierte la señal analógica que recibe a una señal digital. En esencia, el MCA contabiliza el número de veces que registró un pulso de una determinada amplitud. La distribución de las amplitudes de los pulsos proporciona información que permite diferenciar cada una de las energías de los fotones que emitieron los isótopos radiactivos. Finalmente, el resultado se envía a una computadora para mostrar el espectro de energía de la radiación obtenido, en donde en el eje de las abscisas se coloca la energía del fotón, característico de cada radionúclido, y en el eje de las ordenadas se coloca el número de veces que el MCA contabilizó una determinada amplitud de cada pulso que recibió.

Debido a que la radiación gamma es una de las energías más difíciles de frenar, la muestra se coloca dentro de un cubo, generalmente manufacturado de plomo, denominado "blindaje", con la finalidad de evitar que el detector registre la radiación gamma de "fondo" producida por los radioisótopos que se encuentran en la corteza terrestre y, en menor medida, de la que proviene del espacio [84]. Sin embargo, esta protección no es suficiente para frenar completamente la radiación gamma de fondo, por lo que antes de medir la muestra es necesario obtener un espectro de esta radiación de fondo. Después de analizar la muestra es necesario superponer ambos espectros, de esta manera es posible determinar cuales picos corresponden a la radiación de fondo y cuales a la radiación emitida por la muestra [84].

Para realizar el análisis primero se enciende el equipo, después se coloca la muestra de agua en un recipiente de plástico, luego se coloca el recipiente de plástico dentro del blindaje de plomo. Posteriormente se vierte nitrógeno líquido al detector HPGe, por medio de un embudo, hasta que el detector comience a liberar el excedente de nitrógeno líquido y finalmente se inicia el proceso de medición. El tiempo de duración de la medición fue de 86,400 segundos (24 horas).

La figura 3.4 presenta una imagen del laboratorio donde fue realizado el análisis de espectrometría de radiación gamma, en la imagen se han identificado las diferentes partes que componen al equipo. Este laboratorio también se encuentra dentro de las instalaciones del IFUNAM. La figura 3.5 presenta una gráfica del espectro de energía gamma de los resultados obtenidos al analizar la radiación de fondo y el agua del manantial, ambos espectros fueron superpuestos para observar si existen picos que no correspondan a la radiación de fondo.

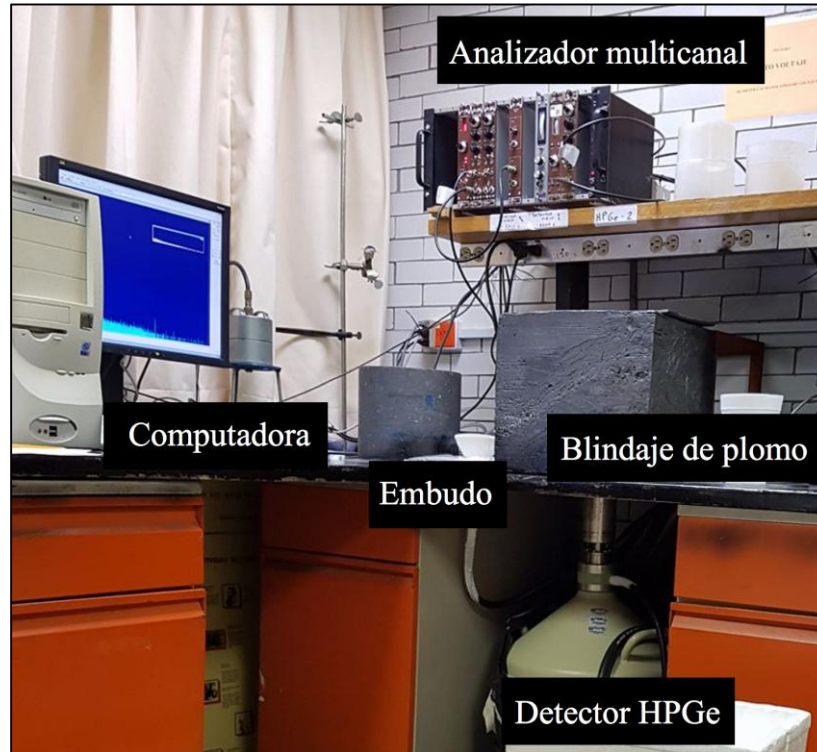


Figura 3.4. Laboratorio en el IFUNAM dónde fue realizado el análisis de espectrometría de radiación gamma.

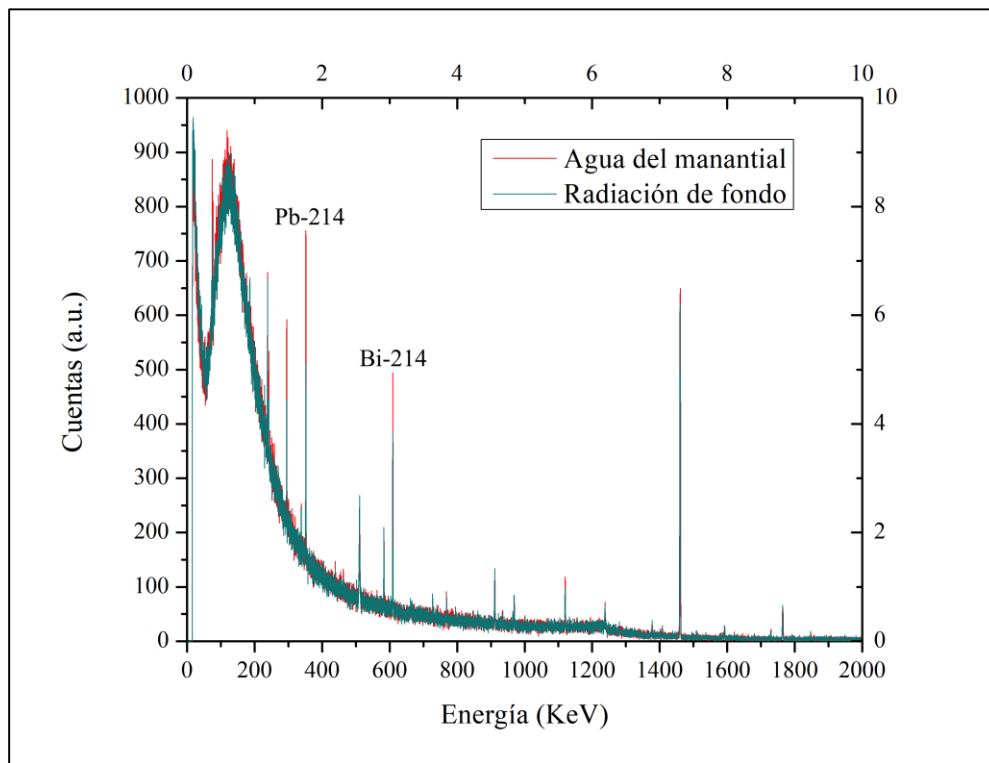


Figura 3.5. Gráfica del espectro de energía gamma de la radiación de fondo y del agua del manantial.

En el gráfico de la figura anterior, se observa que no existe presencia de Ra-226 (186 KeV), por lo tanto, el agua del manantial no contiene isótopos de uranio. Además, también se observa que los demás picos coinciden con las emisiones de la radiación gamma de fondo, sólo el plomo-214 y el Bismuto-214 de la muestra del agua del manantial presentó un mayor número de cuentas con respecto a la radiación de fondo. Esto significa que el agua no presenta un riesgo por radiación gamma para las personas que nadan en el manantial o para las personas que beban el agua, evidentemente, desde el punto de vista de las radiaciones ionizantes.

3.3.3. Desarrollo de las simulaciones en el programa Geant4.

Para desarrollar las simulaciones de la expansión de las partículas α y el depósito de dosis de energía de estas partículas en el medio se definieron las siguientes condiciones en los parámetros del programa:

1. **El mundo.** Las dimensiones de este parámetro en las dos simulaciones fueron de 300.1 metros de largo por 300.1 metros de ancho y una altura de 50 metros.
2. **El detector.** Para la primera simulación se colocaron 10 detectores a diferentes alturas: 1, 3, 5, 6, 7, 10, 15, 20, 25 y 30 metros, con el objetivo de analizar como se expande la radiación a diferentes alturas. Cada detector fue diseñado con una estructura geométrica de cilindro y sus dimensiones fueron de 300 metros de radio y 1 milímetro de espesor. Para la segunda simulación se colocó un solo detector con una forma geométrica de paralelepípedo y unas dimensiones de 500 metros de lado por 500 de ancho y 28 metros de altura.
3. **La geometría.** El medio elegido con el que interactuarían las partículas radiactivas una vez que salieran del agua del manantial fue aire. En ambas simulaciones no se crearon estructuras volumétricas que pudieran representar, por ejemplo, árboles, casas, postes de luz, edificios, etc. Solo se construyó la superficie volumétrica de concreto que delimita al manantial.
4. **Las partículas.** El radon-222 decae en partículas α . Estas partículas poseen una energía de 5.5 MeV, por tanto estas fueron las partículas y la energía declaradas en el programa para las dos simulaciones.
5. **La fuente de radiación.** Como se mencionó anteriormente, la fuente de radiación es el caudal de agua que ingresa por las diminutas cavidades en el fondo del manantial. Sin embargo, como en esta investigación se quería analizar el riesgo para las personas por la expansión y depósito de dosis de energía de las partículas α y no la forma en como se distribuyen las partículas dentro del manantial, se decidió (en las dos simulaciones) que las partículas α emergieran libremente desde la superficie del manantial, donde termina el agua y empieza el aire, tomando como área de emisión el área superficial que tiene el manantial (15 x 10 metros). Esta fuente de radiación se posiciono en el centro del mundo y del detector.
6. **El número de historias.** Para el desarrollo de la simulación de la expansión de las partículas se consideró que la fuente de radiación emitió 604, 800,000 partículas α y para el desarrollo de la simulación del depósito de dosis en el medio se consideraron 2, 419,200,000 partículas α . La razón de haber elegido este número de partículas es debido

a que, para la primera simulación este número de partículas fue suficiente para observar cual es la tendencia de la expansión de la radiación y para la segunda simulación este número de partículas fue suficiente para obtener una estadística adecuada del deposito de dosis. Es importante resaltar que esto se pudo comprobar después de realizar diversas simulaciones y observar que, sin importar cuanto se aumentará más el número de partículas, en ambas simulaciones la tendencia no se modificaba, sólo se aumentaba el registro de entradas como se mostrará en los resultados.

La figura 3.6 presenta la construcción en Geant4 de los parámetros definidos para la primera simulación antes de compilar el código, en esta figura se pueden observar los siguientes elementos: el mundo (presenta una geometría rectangular), el detector (presenta una geometría circular), la fuente de radiación (presenta una geometría rectangular y de color azul claro) y la geometría, es decir, los bloques de concreto que delimitan al manantial (presenta una geometría rectangular y de color gris). La figura 3.7, presenta un acercamiento a la fuente de radiación y a la geometría.

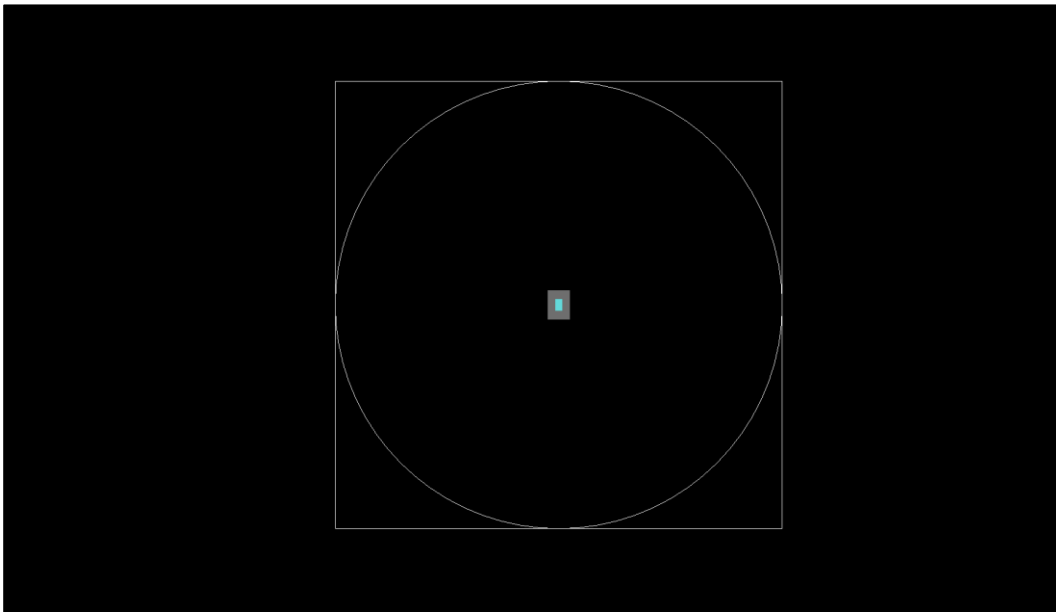


Figura 3.6. Construcción en Geant4 de diferentes parámetros antes de ejecutar la primera simulación. En la imagen se puede observar: el mundo, el detector, la fuente de radiación y la geometría.

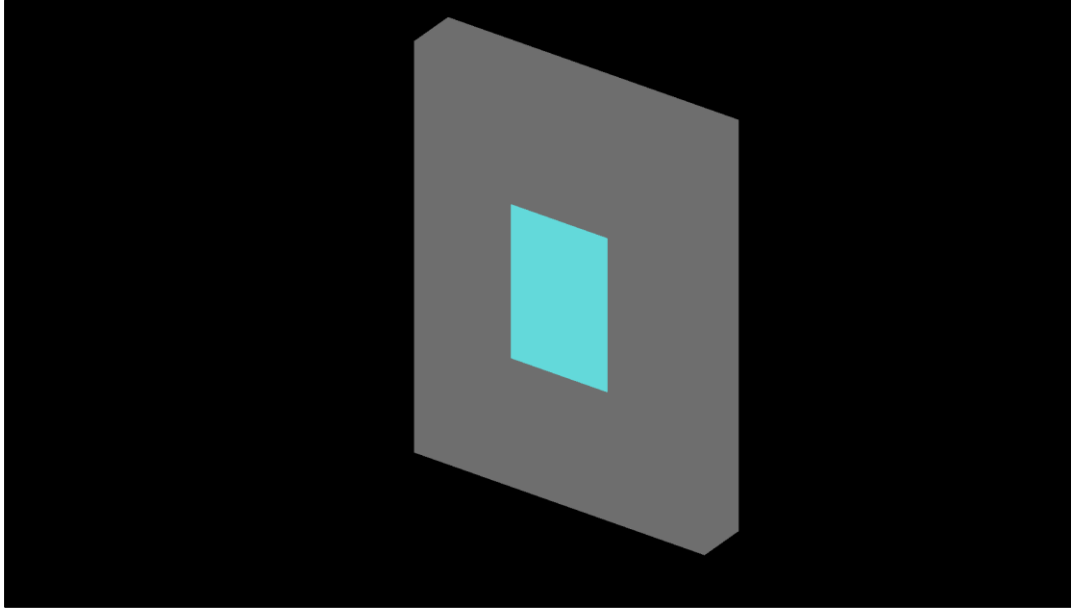


Figura 3.7. La fuente de radiación y la geometría construida en Genat4 para la primera simulación.

3.4. Resultados y discusión.

La figura 3.8 presenta los resultados de la primera simulación. En esta imagen se observa una gráfica en 3 dimensiones, en dónde el área superficial del suelo esta representado por los ejes x , y y la altura por el eje z . Esta gráfica muestra la manera en como se expande la concentración de la radiación a diferentes alturas. En esta gráfica se observan manchas y puntos de color negro, cada punto representa una partícula (tanto partículas α como partículas secundarias) que el detector registró y cada mancha representa una densidad de partículas. En la gráfica se puede observar como las partículas se dispersan conforme se alejan de la fuente de radiación. Las dimensiones del volumen de la gráfica se encuentran en centímetros.

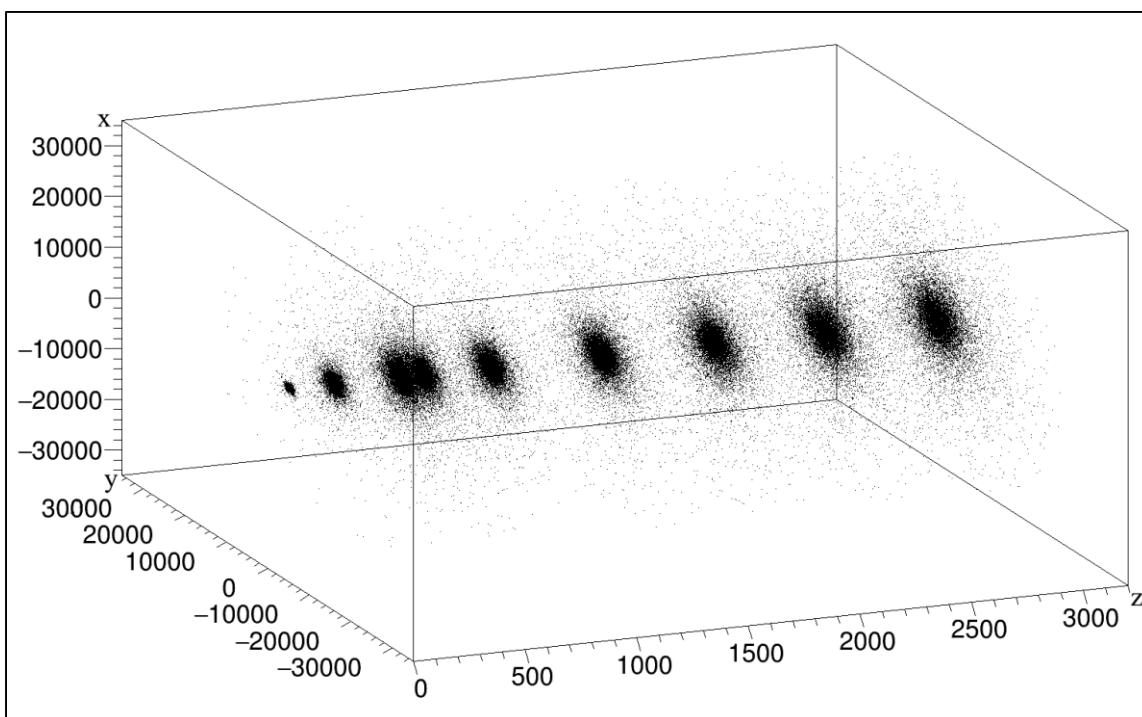
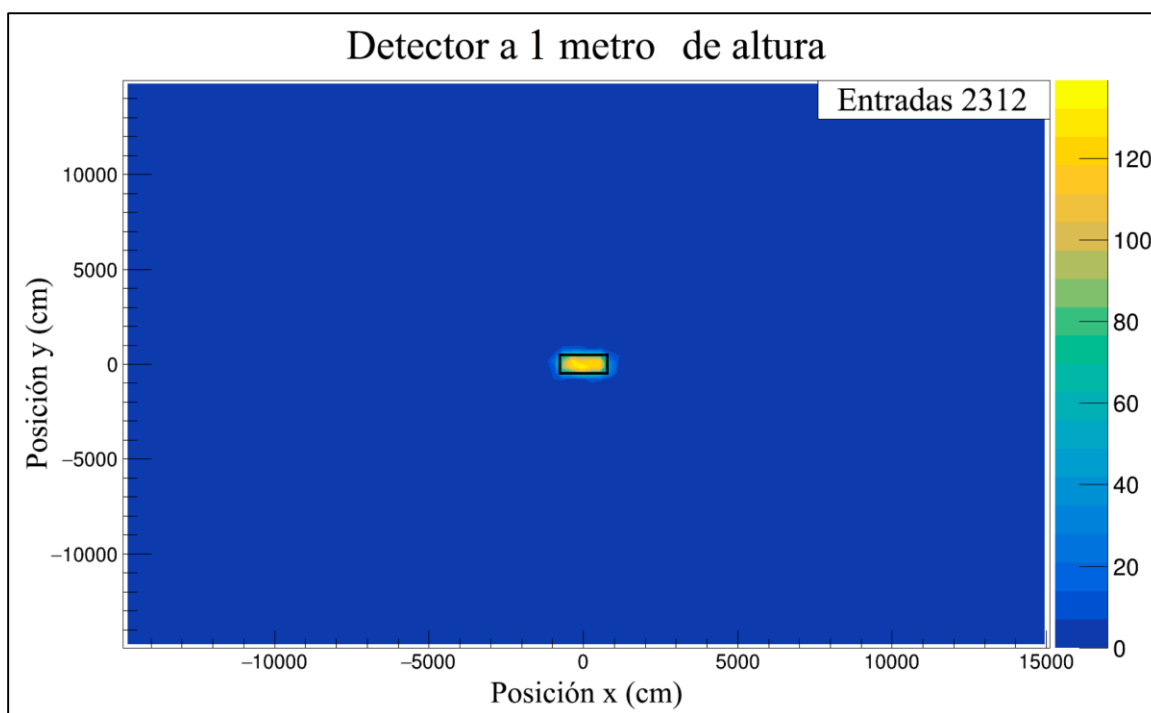
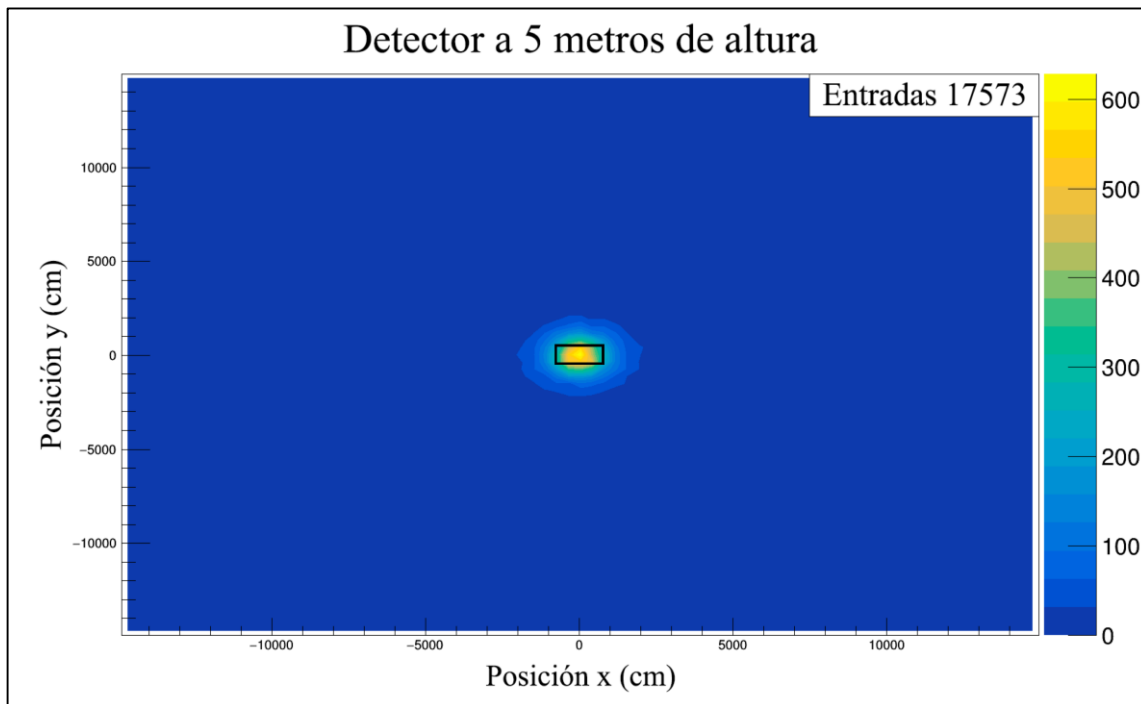
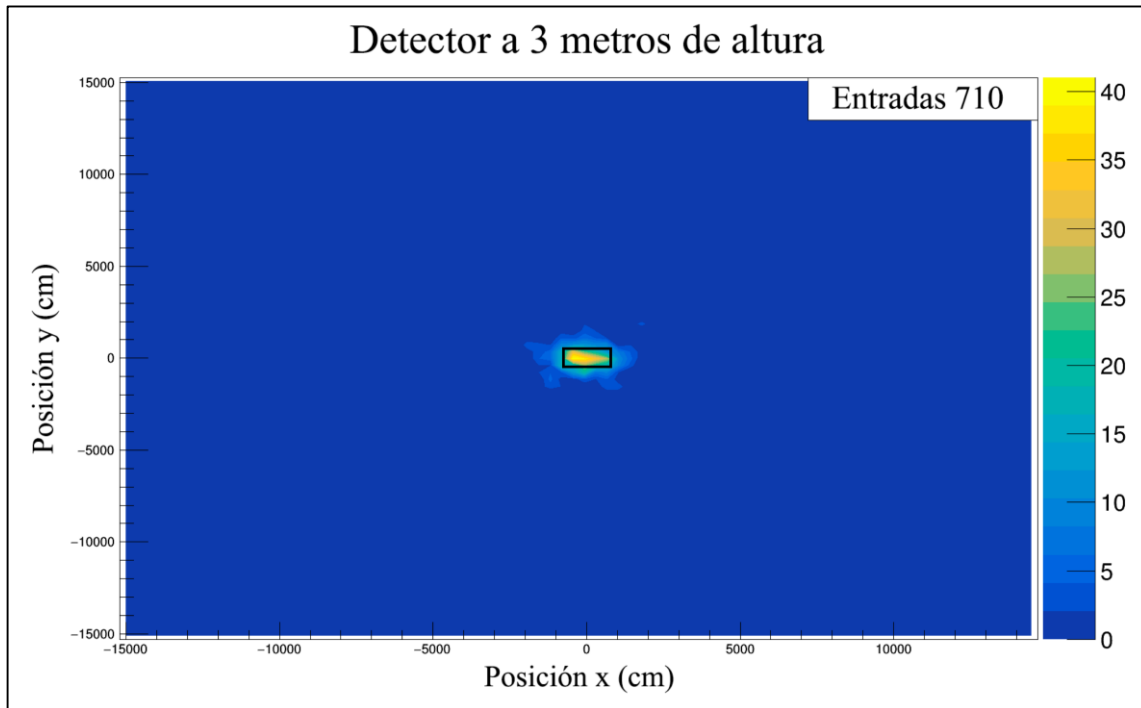


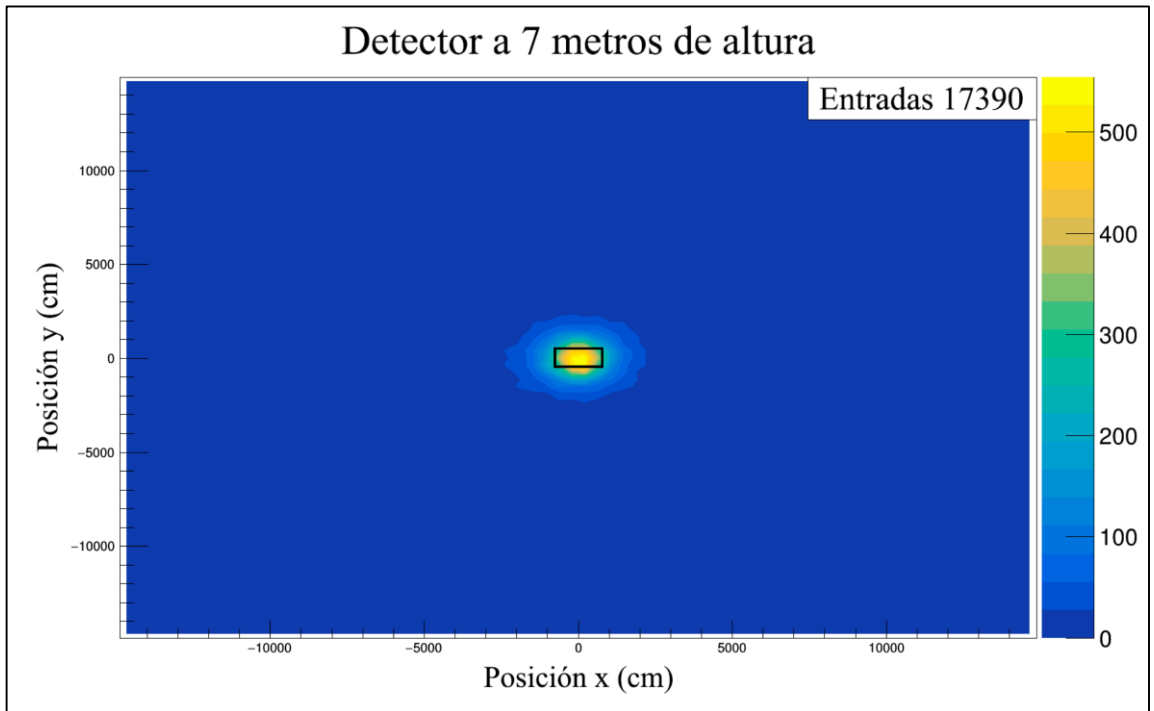
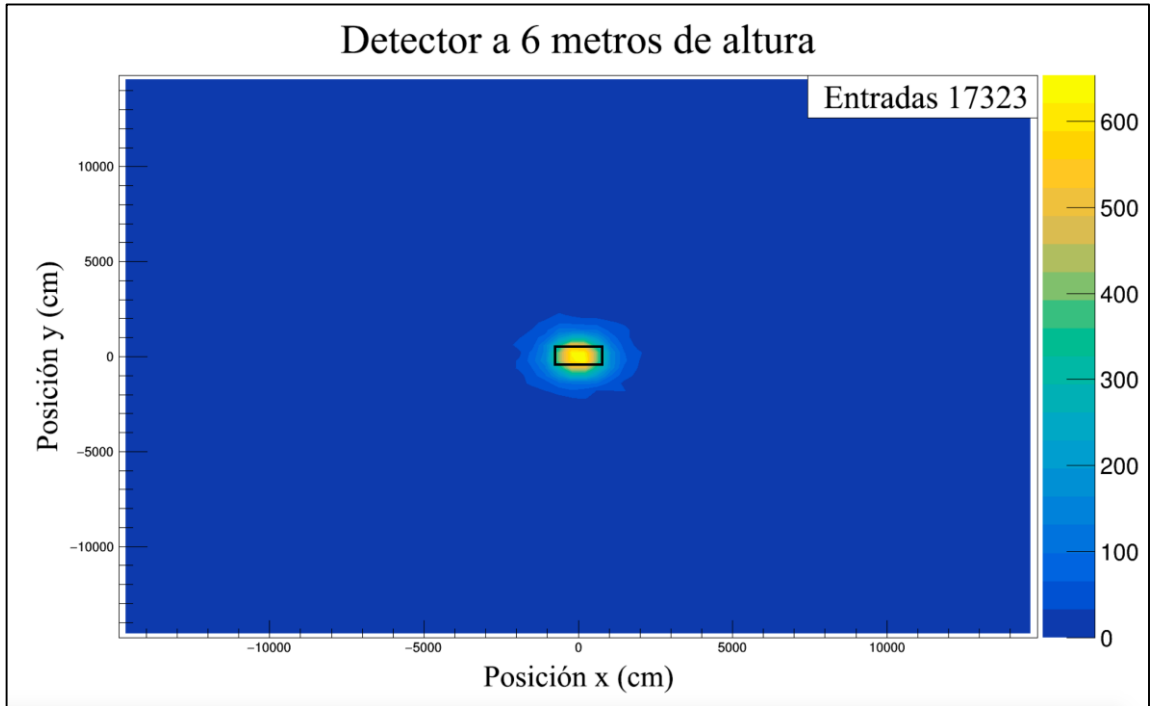
Figura 3.8. Gráfica en 3 dimensiones de la expansión de la radiación producida por partículas α y partículas secundarias a diferentes alturas.

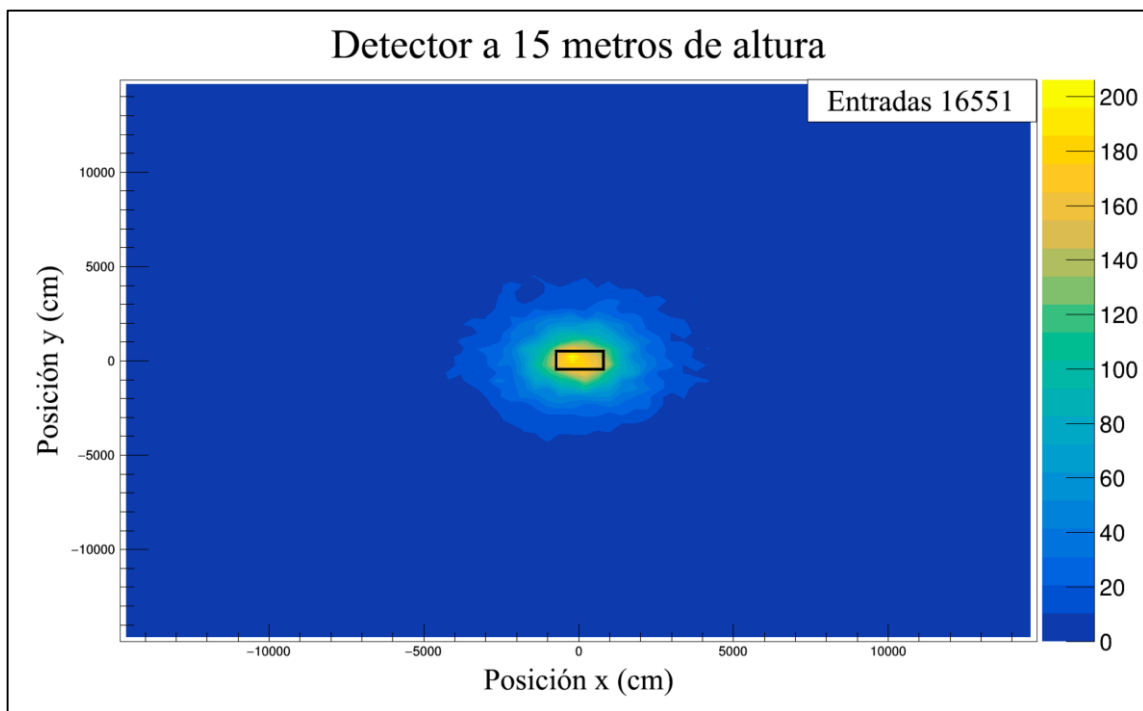
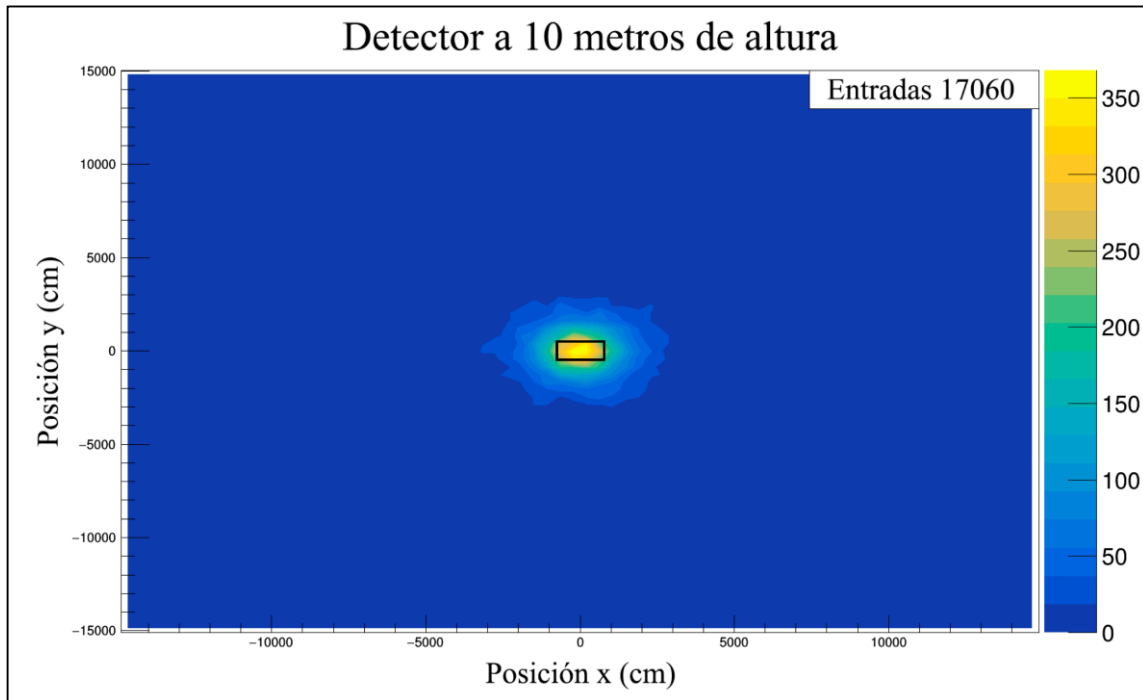
Aunque esta grafica presenta el resultado obtenido por los 10 detectores colocados en la simulación solo es posible observar 9 manchas, esto se debe a que las densidades de las partículas en las alturas de 5, 6 y 7 metros se encuentran muy cercanas entre ellas y se superponen en la perspectiva mostrada. El riesgo por radiación se localizaría en el centro de cada mancha que aparece en la imagen, por que en esta zona se concentra la mayor parte de la radiación ionizante. Conforme la densidad de partículas disminuye la concentración de radiación también disminuye, por lo que las partículas que se observan en los bordes del volumen no representan un riesgo. La figura 3.9 presenta 10 gráficas (una para cada detector colocado), en cada gráfica se presenta el área de expansión que la radiación presentó en esa determinada altura. Cada gráfica incluye un

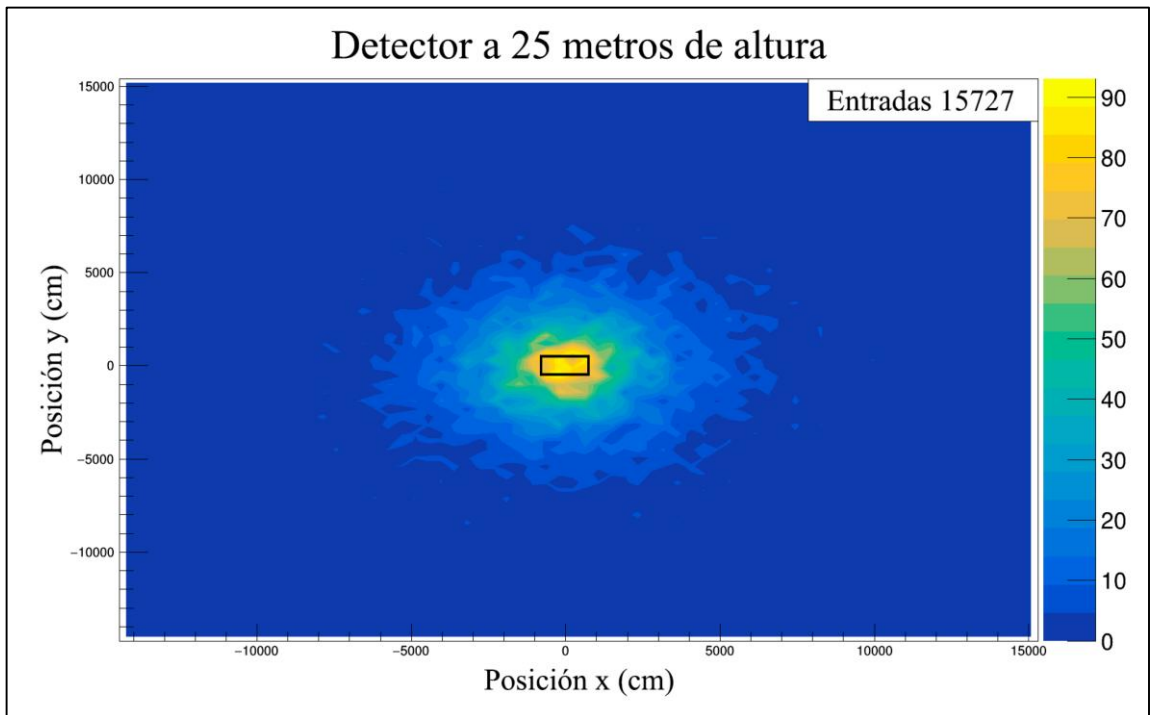
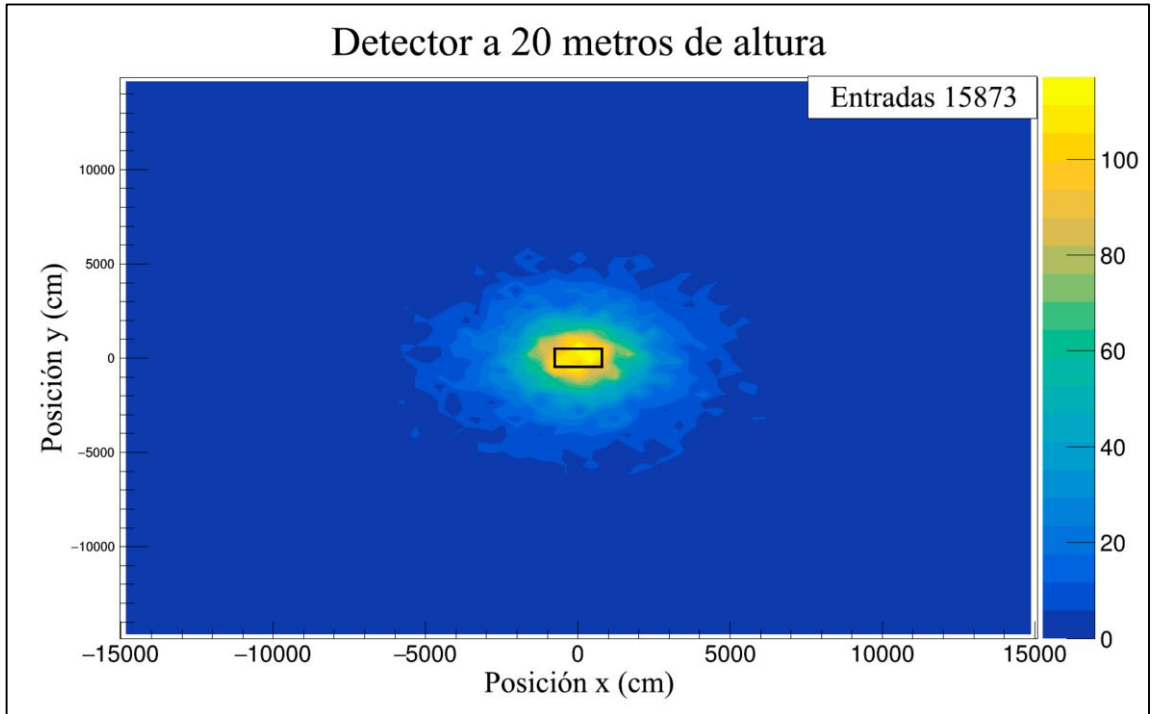
código de colores, donde el color amarillo claro representa el mayor número de partículas que el detector registró y el color azul fuerte representa que el detector no registró partículas. Adicionalmente, en el centro de cada gráfica se ha dibujado un rectángulo de color negro, este rectángulo simboliza las dimensiones, a la misma escala de la gráfica, el área superficial del manantial y permite observar si la densidad de partículas se ha expandido fuera de estos límites superficiales o se mantiene dentro de estos límites; es importante señalar que sólo las manchas de color amarillo pueden presentar un riesgo por radiación para las personas. Por último, cada gráfica incluye el conteo total de partículas o entradas (partículas α , fotones, electrones, etc.) que el detector registro a esa determinada altura.











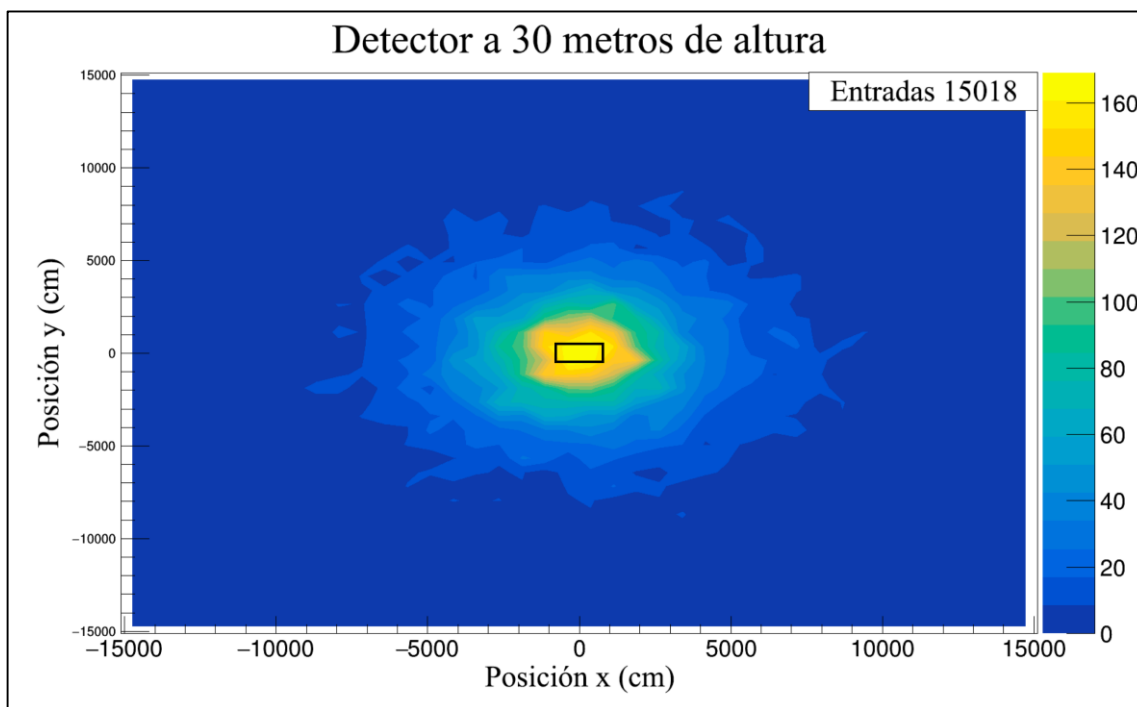


Figura 3.9. Gráficas donde se muestra el área de expansión de la radiación generada por partículas α y partículas secundarias a diferentes alturas.

En las gráficas de la figura anterior se observa que a 1 metro de altura la radiación se ha comenzado a expandir muy lentamente, la mancha radiactiva conserva la misma forma del manantial. A los 3 metros de altura las partículas α han disminuido drásticamente debido a que han sido mitigadas por el aire, incluso es muy posible que todas las α hayan sido mitigadas completamente y las partículas que el detector registró sean, en realidad, partículas secundarias. A 5 metros de altura el detector registra un súbito incremento de partículas, debido a la disminución de partículas registrada en la gráfica anterior y a este súbito aumento, hay una fuerte evidencia de que todas estas partículas son partículas secundarias, incluso es posible que las interacciones de las partículas secundarias con el medio estén generando nuevas partículas; sin embargo, también se observa que la mancha amarilla se mantiene dentro de los límites superficiales del manantial. A los 6 metros de altura la radiación por partículas secundarias disminuye levemente pero la mancha amarilla se mantiene dentro del área superficial del manantial. A los 7 metros de altura el detector nuevamente registra un ligero incremento de partículas secundarias, esto es una evidencia de que las partículas secundarias están interactuando con el aire y generando más partículas, sin embargo, se observa que las partículas secundarias generan menos partículas en comparación con las partículas α por lo que se determina que la radiación ya no se incrementará más y a partir de este momento comenzará a disminuir lentamente hasta su completa mitigación. A los 10 y 15 metros de altura no se observan cambios importantes, el número de partículas continúa disminuyendo lentamente y la mancha amarilla se mantiene dentro de los límites superficiales del manantial. A los 20 metros de altura las partículas continúan disminuyendo, pero la mancha amarilla ha finalmente sobrepasado los límites superficiales del manantial. A los 25 metros de altura se observa que la tendencia de la radiación

por partículas secundarias no cambiará, las partículas continuarán disminuyendo lentamente y la radiación seguirá expandiéndose. Por último, a los 30 metros de altura se confirma, nuevamente, que la radiación no modificará su tendencia. La mancha amarilla continua expandiéndose fuera de los límites superficiales del manantial y las partículas continúan disminuyendo lentamente, también se observa que la mancha radiactiva general ha alcanzado los 100 metros de distancia, pero si se observa la gráfica de la figura 3.8 se puede comprender que son partículas individuales las que se encuentran en esta posición, por lo que no representan ningún tipo de riesgo. Es evidente, que si se continuaran colocando detectores a alturas mayores a los 30 metros, el comportamiento de la radiación no variará y su tendencia se mantendrá a lo observado en las tres gráficas anteriores.

Esta primera simulación demuestra lo siguiente:

1. Las partículas α son rápidamente mitigadas por el aire y desde el primer metro de altura han desaparecido casi por completo. A los 3 metros de altura todas las partículas que el detector registró son, en realidad, partículas secundarias.
2. La radiación por partículas α genera una elevada cantidad de partículas secundarias al interactuar con el aire, esto se debe principalmente, a que las partículas α poseen una gran capacidad de ionización pero una poca capacidad de penetración.
3. La interacción de las partículas secundarias con el aire genera más partículas, aunque esta segunda generación es mucho menor a las partículas generadas por la radiación α .
4. Por último, la simulación demuestra que la expansión de la radiación se produce hacia arriba del manantial y no hacia los lados y es hasta los 20 metros de altura que la mayor concentración de la radiación comienza a traspasar el área superficial que tiene el manantial.

La figura 3.10 presenta una gráfica que muestra la fluencia de las partículas durante su proceso de expansión, en concreto, se puede observar el aumento y disminución de las partículas que registran los detectores en un determinado tiempo conforme se incrementa la altura. La figura 3.11 muestra una gráfica que muestra el área de la propagación total que tuvieron las partículas conforme se incrementó la altura.

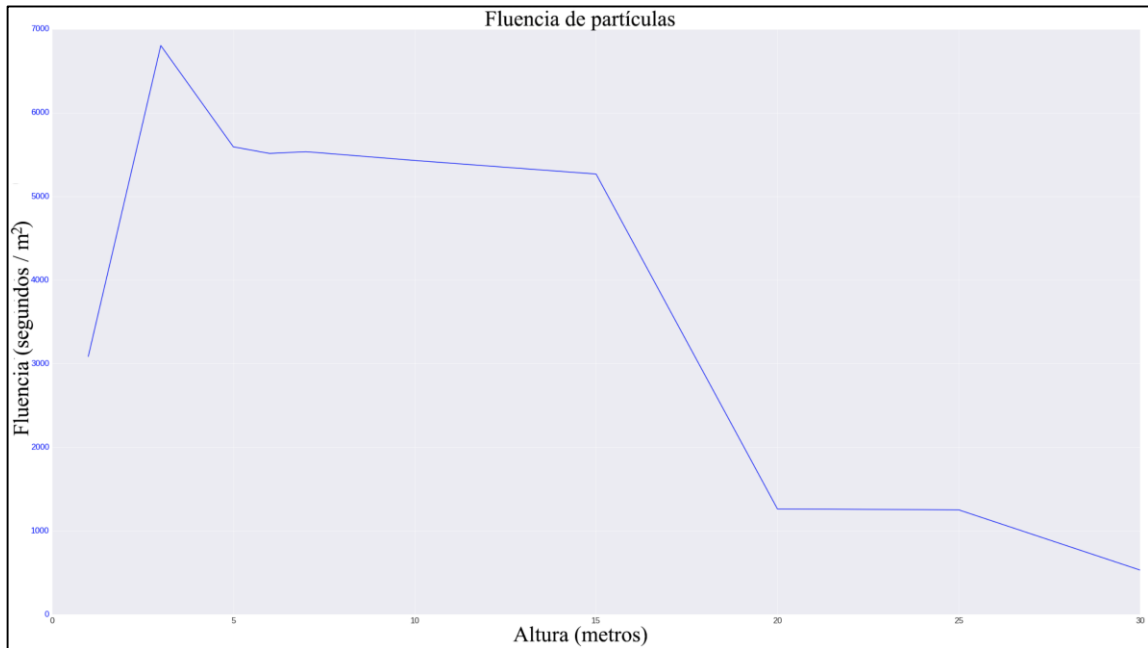


Figura 3.10. Fluencia de las partículas conforme se incrementa la altura.

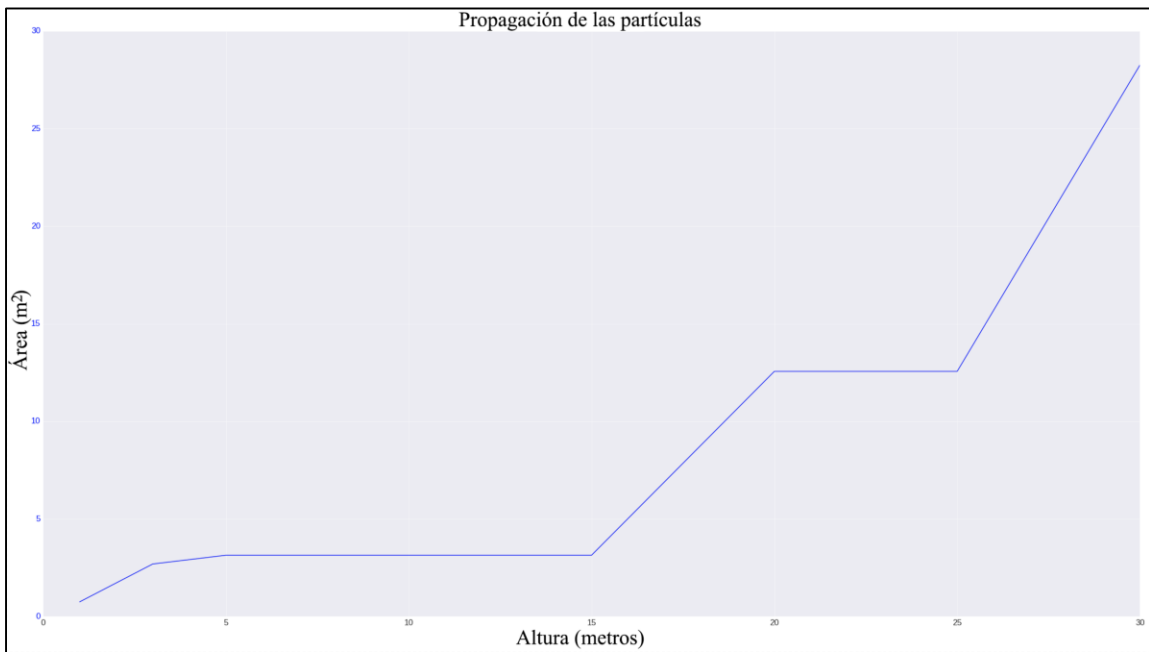


Figura 3.11. Área de propagación de las partículas conforme se incrementa la altura.

La figura 3.12, presenta los resultados obtenidos de la segunda simulación desarrollada, dosis de energía depositada en el aire por las partículas α . En esta imagen se observa una figura en 3 dimensiones, en donde el área superficial del suelo en el manantial esta representado por los ejes x , y y la altura por el eje z . La figura muestra cuadros de diferentes colores, cada cuadro representa una zona donde el programa simuló una interacción entre la radiación por partículas y el aire; sin embargo, aunque la figura muestra cuadros, en realidad, el programa simuló depósito de energía en cubos de aire. Es importante señalar que, en base a los resultados mostrados en la primera simulación la dosis de energía es depositada por toda la radiación secundaria que se genera como resultado de las intersecciones entre las partículas α y el aire. La figura también incluye un código de colores, donde el color amarillo claro representa la mayor cantidad de energía depositada en el aire (en sieverts) y el color azul fuerte indica que no hubo energía depositada en esa zona. Las dimensiones del volumen de la gráfica se encuentran en metros.

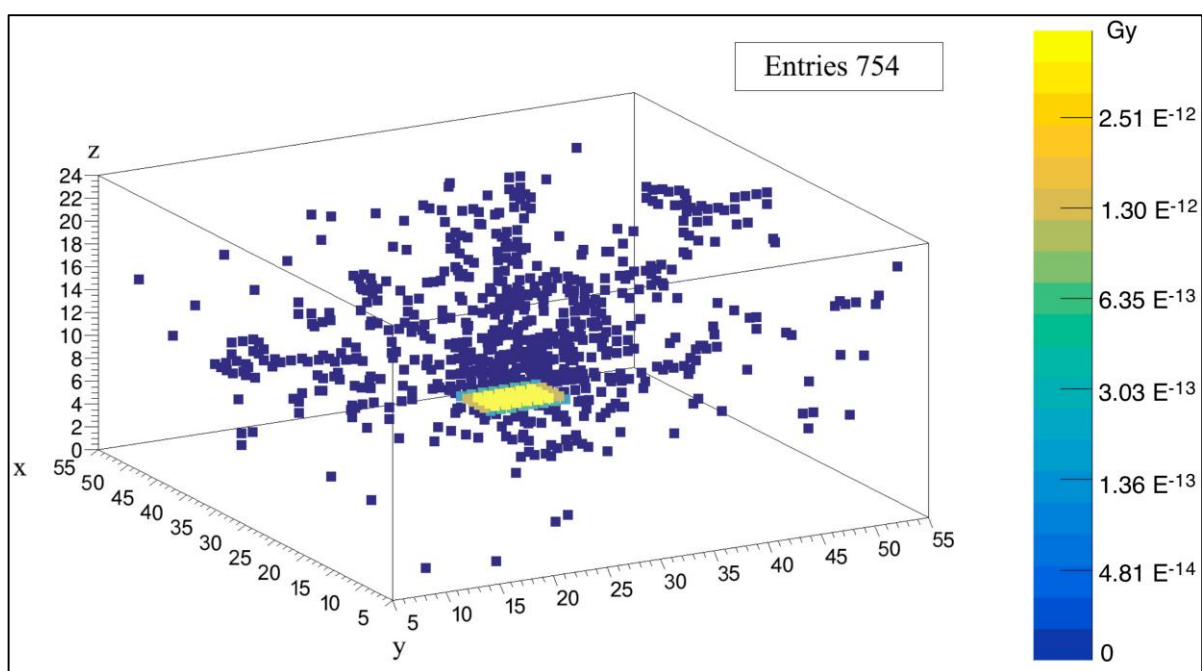


Figura 3.12. Histograma de la dosis de energía depositada por la radiación al interactuar con el aire.

En la figura 3.12, se puede observar que la zona donde la radiación deposita su dosis de energía es pequeña comparada con el volumen total. Este depósito se efectuó entre los 6 y los 8 metros de altura. En la gráfica también se observa que el número total de cubos que presentaron un depósito de dosis de energía fue de 754. Es importante mencionar que, a pesar de que el programa no generó cubos de colores en todo el volumen, todos los espacios en blanco deberían mostrar un cubo de color azul fuerte, por lo tanto, la única zona dentro del volumen que presentó depósito de dosis de energía es la mostrada en esta figura. Por las características de Geant4, no existe una posibilidad de que en algún espacio en blanco haya ocurrido un depósito de dosis de energía, por más pequeña que hubiera sido la cantidad de energía depositada. Con la finalidad de poder observar mejor la zona donde la radiación depositó su dosis de energía, se realizó un

acercamiento a la figura 3.12 y se rotó para poder observarla desde otra perspectiva. La figura 3.13 presenta 2 gráficas, la primera gráfica (a) muestra los ejes x y z y la segunda (b) muestra los ejes x y y .

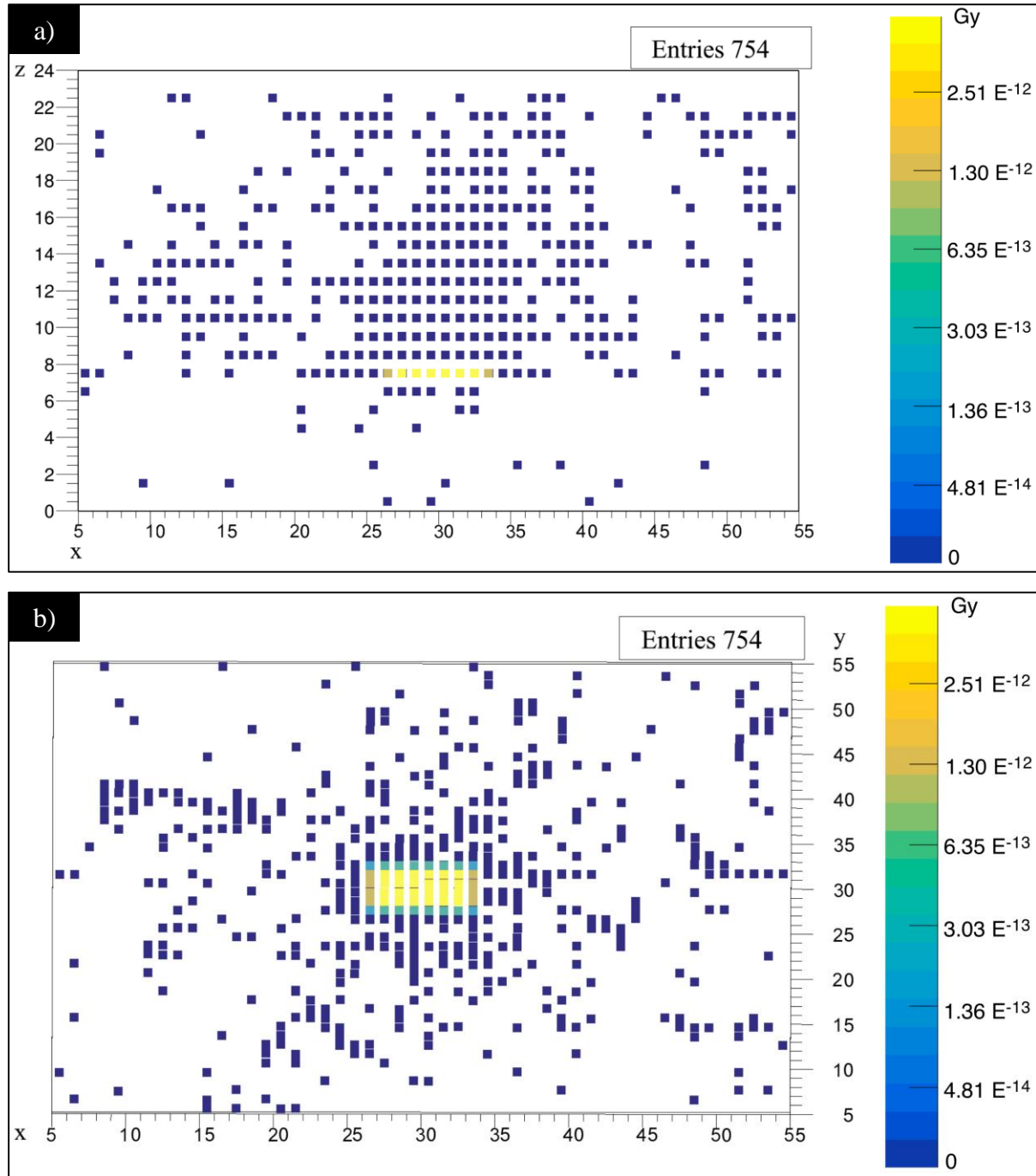


Figura 3.10. Gráficas de la dosis de energía depositada por la radiación al interactuar con el aire desde 2 perspectivas diferentes; a) ejes x , z y b) ejes x , y .

Observando las gráficas a) y b), se puede apreciar la zona específica donde se la radiación depositó energía. En el caso la gráfica a) se observa que el deposito se generó a una altura aproximada de 7.5 metros, mientras que la gráfica b) muestra que este deposito se produjo en un área de aproximadamente de 10 x 5 metros, es decir, dentro del área superficial que comprende el manantial. Este resultado es lógico debido a que la primera simulación mostró que la expansión de la radiación no traspasa el límite superficial del manantial hasta alcanzar los 20 metros de altura.

En base a los resultados obtenidos en las dos simulaciones y observando que no existe ningún tipo de edificación arriba del manantial, se puede afirmar que no existe riesgo por radiación de partículas ionizantes para las personas que habitan en los alrededores del manantial o para las personas que nadan o trabajan en este lugar.

No obstante, es importante señalar que estas simulaciones muestran el comportamiento de la radiación por partículas α por lo que es necesario realizar un modelo adicional que contemple la expansión del gas radón, con la finalidad de tener una mejor certeza del bajo riesgo por radiación que representa el agua de este manantial para con las personas.

"La evolución espiritual no se manifiesta por la posibilidad de almacenar conocimientos, declamar verdades u obrar milagros, sino por la capacidad de corregir los propios errores".

Rudolf Steiner

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE NEUTRONES SECUNDARIOS EN UN CUARTO DE TRATAMIENTOS MÉDICOS DONDE OPERA UN ACELERADOR LINEAL (LINAC) MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES

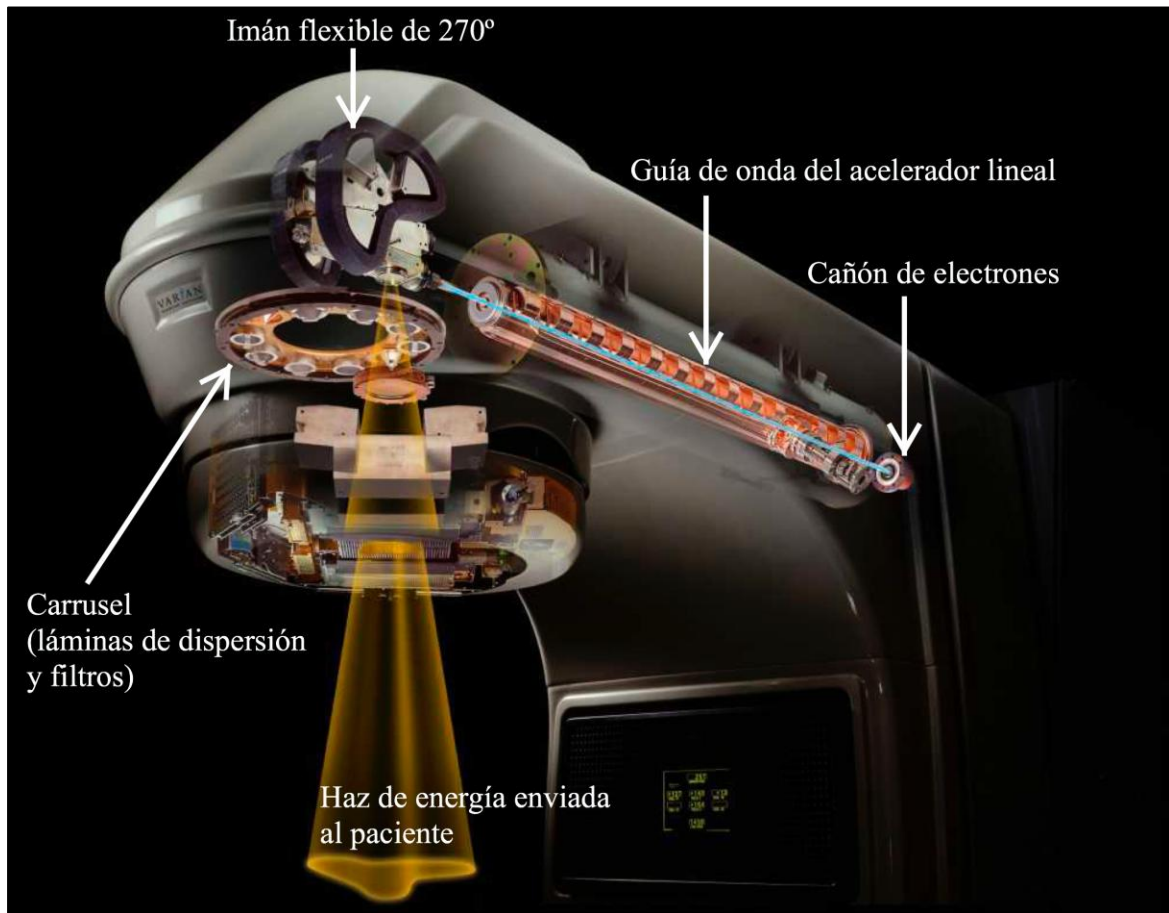
Existe en la actualidad un gran interés, entre la comunidad científica y médica, en la realización de diversas investigaciones que permitan comprender las causas y efectos negativos de la generación indeseable de fotoneutrones en los aceleradores lineales (LINAC) utilizados en aplicaciones médicas para combatir el cáncer [87-91]. Este interés se ha motivado debido a que comienza a consolidarse la opinión, entre los especialistas de esta área, de que la irradiación con fotoneutrones en los órganos periféricos de los pacientes durante las sesiones de radioterapia está significativamente relacionada con la aparición de cánceres secundarios [92, 93]. Sin embargo, la generación de fotoneutrones puede generar otros efectos negativos como la producción de neutrones secundarios cuando interactúan con determinados materiales que se encuentran a su alrededor [94], generando un posible riesgo radiológico para los médicos y técnicos que se encuentren dentro del cuarto de tratamientos. Por esta razón, es muy importante impulsar todas las investigaciones que permitan comprender tanto las consecuencias negativas de la generación de los fotoneutrones y los neutrones secundarios como el comportamiento que tienen estas partículas al interactuar con el medio y con las personas, sólo de esta manera será posible desarrollar técnicas y procedimientos que permitan su mitigación y así evitar que los aceleradores lineales provoquen la enfermedad que se supone deben combatir.

Un acelerador lineal para aplicaciones médicas utiliza ondas electromagnéticas de alta frecuencia para acelerar electrones a altas energías (entre 4 y 25 MeV) a través de un dispositivo denominado “guía de onda de acelerador lineal” [16].

El procedimiento para generar la energía que combatirá las células cancerígenas en un paciente es, en general, el siguiente: primero se genera un flujo de electrones en un dispositivo denominado "cañón de electrones", este cañón de electrones está constituido en uno de sus extremos por un ánodo (normalmente se utiliza un filamento de tungsteno) y en el otro extremo por un cátodo. Cuando se aplica alto voltaje en este dispositivo, el ánodo emite un flujo de electrones en dirección al cátodo, después este flujo de electrones es enviado a la guía de onda del acelerador lineal para que las partículas sean aceleradas a velocidades relativistas, esta aceleración se genera por medio de la transferencia de energía en forma de radiación de microondas [95]; al acelerar los electrones se produce un haz de energía uniforme. Posteriormente este haz de energía uniforme es enviado al cabezal del LINAC, donde se hará colisionarlo con un material denominado “blanco” (convencionalmente fabricado con un alto número atómico y un alto punto de fusión, como por ejemplo, de tungsteno) con la finalidad de convertir el haz de energía de electrones en un espectro de energía de rayos-X [96]. Después, los

rayos-X son enviados a un colimador primario para homogeneizar su energía y luego el haz será modificado en un circuito eléctrico denominado "filtro de condensador" [97]. Posteriormente, el haz modificado se hace pasar por otro colimador secundario para después enviar la energía al órgano del paciente y destruir las células cancerígenas.

Los indeseables fotoneutrones se generarían en el "blanco", cuando el haz de electrones se convierte en una energía de rayos-X [98]. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que exista una producción de fotoneutrones en otras partes del acelerador lineal. La figura 4.1 presenta dos esquemas que muestran algunas de las diferentes partes que conforman un acelerador lineal para aplicaciones médicas.



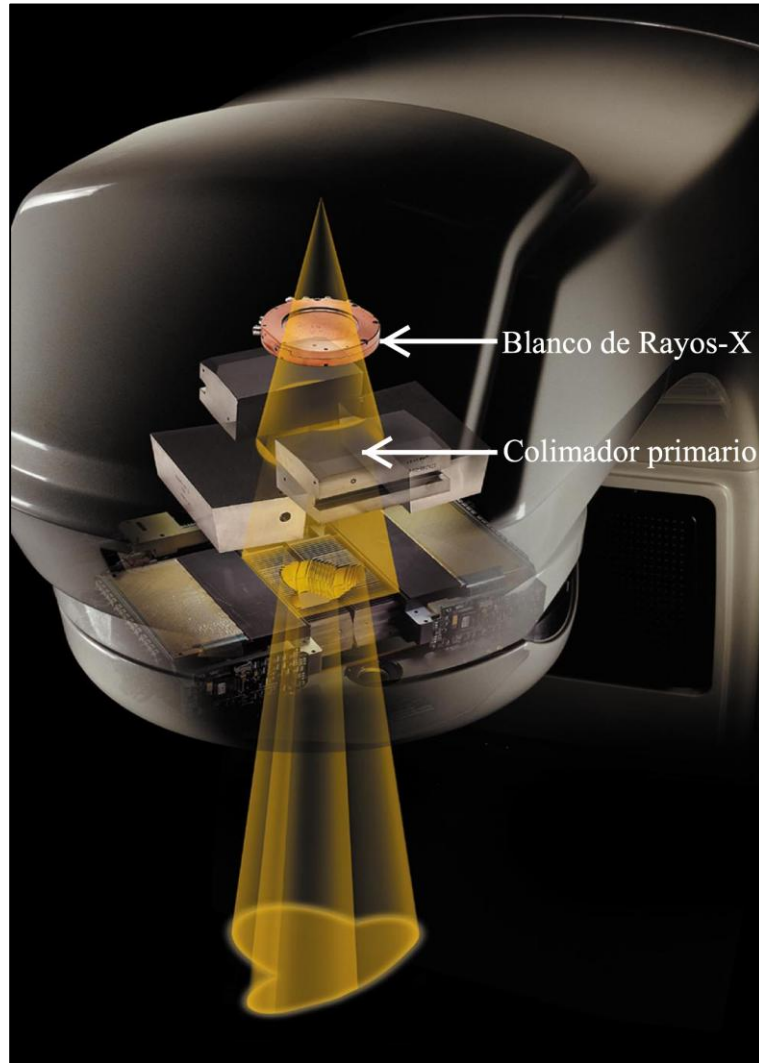
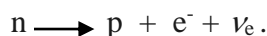


Figura 4.1. Algunas de las diferentes partes que conforman un acelerador lineal para aplicaciones médicas. [99]

4.1. El neutrón.

El neutrón es una partícula subatómica sin carga eléctrica, posee una masa de $939.565 \text{ MeV} / c^2$ o $1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Está clasificado dentro de las partículas conocidas como bariones e internamente se encuentra conformado por tres partículas fundamentales conocidas como quarks (2 quarks *down* **d** y un quark *up* **u**), unidos por la fuerza nuclear fuerte mediante gluones (un gluon es un bosón portador de la interacción nuclear fuerte, no presenta carga eléctrica ni masa) [100]. Los neutrones comúnmente se encuentran dentro de los núcleos de los átomos de los múltiples elementos que existen en el universo pero también pueden encontrarse fuera de ellos, a este tipo de neutrones se les denomina como "neutrones libres" [100]. Los neutrones libres son inestables y decaen con una vida media cercana a los 887 ± 0.8 segundos, este decaimiento se produce por acción de la fuerza nuclear débil y genera como producto un protón, un electrón y un antineutrino de electrón, es decir, una desintegración beta inversa (β^-) [100]:



Existen tres tipos de fuentes emisoras de neutrones: los reactores nucleares (cuya densidad de emisión de flujo es de 10^{12} a $10^{15} \text{ n} / \text{cm}^2\text{s}$), los aceleradores (cuya densidad de emisión de flujo es de 10^6 a $5 \times 10^{11} \text{ n} / \text{cm}^2\text{s}$) y las fuentes isotrópicas móviles (cuya densidad de emisión de flujo es de 10^4 a $10^7 \text{ n} / \text{cm}^2\text{s}$) [100]. La energía que presentará un neutrón, también denominada temperatura del neutrón, dependerá del tipo de reacción que lo genere e indicará su energía cinética cuando se encuentre fuera del núcleo del átomo. La tabla 4.1 presenta la clasificación que tienen los neutrones de acuerdo a su energía o temperatura [100].

Tabla 4.1. Clasificación de los neutrones de acuerdo a su energía o temperatura.

Nombre	Intervalo de energía	Unidad
Fríos	0 - 0.025	eV
Térmicos	0.025	eV
Epitérmicos	0.025 - 0.4	eV
Cádmicos	0.4 - 0.6	eV
Epicádmicos	0.6 - 1.0	eV
Lentos	1 - 10	eV
De resonancia	10 - 300	eV
Intermedios	0.3 - 500	KeV
Rápidos	0.5 - 20	MeV
Relativistas	> 20	MeV

4.1.1. El fotoneutrón y los efectos de su interacción con la materia.

La interacción de los fotones con la materia puede generar diversos resultados que se clasifican de acuerdo al tipo de partícula con la que interactúa (átomos, núcleos o electrones) o al fenómeno que se produce como resultado de la interacción (absorción o dispersión). Si un fotón al interactuar con el núcleo de un átomo desplaza a un neutrón fuera de este núcleo, este neutrón recibirá el nombre de fotoneutrón [100].

Los fotoneutrones se pueden generar de dos maneras: reacciones de fotodesintegración, que ocurren cuando un núcleo absorbe un fotón de alta energía causando la eyección de una o más partículas subatómicas (protones, neutrones o partículas alfa) y por emisión directa, que ocurre cuando una partícula de alta energía (como un fotón de rayos-X) interactúa directamente con uno o más nucleones individuales dentro de un núcleo [100]. Para los rayos-X que interactúan con núcleos pesados cuyo rango de energía se encuentre entre los 15 y los 30 MeV, la producción de neutrones es de aproximadamente un 10 y un 20% [101].

Los neutrones, al no poseer carga eléctrica, no se ven afectados por la barrera de Coulomb, por lo tanto, cuando viajan a través de la materia no se producen interacciones causadas por fuerzas electroestáticas. Pero, si un neutrón es capaz de interactuar con la materia lo hará directamente con las partículas en los núcleos de los átomos dando como resultado diferentes procesos que, en general, se pueden clasificar en absorción y dispersión [100]. La tabla 4.2 presenta los posibles resultados que se pueden generar de la interacción de un neutrón con la materia.

Tabla 4.2. Posibles resultados que se pueden generar después de la interacción de un neutrón con la materia.

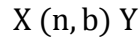
Absorción	Dispersión
Electromagnética	Elástica
Cargada	Inelástica
Neutra	
Fisión	

4.1.1.1. Absorción.

En procesos de absorción, un neutrón incidente es absorbido o capturado por el núcleo del material formando un núcleo compuesto, este núcleo compuesto, por lo general, se desintegrará y emitirá diversas partículas hasta obtener un estado de menor energía. Estas emisiones pueden incluir: rayos gamma (producidos por la excitación que presenta el núcleo), partículas neutras (se emiten uno o más neutrones) y partículas cargadas (como protones, deuterones, partículas alfa e incluso fragmentos de fisión donde el núcleo se divide en dos o más fragmentos liberando una cantidad de neutrones en el proceso) [100].

4.1.1.2. Dispersión.

Es posible escribir una reacción de neutrones de la siguiente manera:



donde "X" es el núcleo del material, "n" es el neutrón, "Y" y "b" son los productos de la reacción. Si la partícula que se libera de la reacción es un neutrón, y el átomo y la reacción en el núcleo permanecen iguales, entonces se producirá una reacción de dispersión. Esta dispersión podrá llevarse a cabo de dos maneras diferentes: elástica e inelástica.

En la dispersión elástica, el neutrón incidente se dispersa por efecto del núcleo del átomo del material que produce un cambio en su dirección y velocidad. En este proceso, el núcleo del átomo permanece intacto y se conserva la energía cinética de todo el sistema [100].

En la dispersión inelástica, la energía cinética del neutrón y el núcleo del material después de la colisión es siempre menor que la energía cinética antes de la colisión, por lo tanto, la energía cinética no se conserva. Esto se debe a que el núcleo del material experimenta una reorganización interna que lo deja en un estado excitado. Posteriormente, el núcleo se desexcitará a través de la emisión de fotones u otras partículas secundarias; a este proceso se le denomina evaporación. Si la energía de los neutrones es menor que la energía requerida para elevar un núcleo a un estado excitado, no se producirá dispersión inelástica [100].

En adelante, a los neutrones que se generen por el efecto de la dispersión los denominaremos neutrones secundarios.

4.2. Objetivo del proyecto.

Cuantificar las concentraciones de neutrones secundarios en diferentes zonas dentro de un cuarto de tratamientos donde opera un acelerador lineal (LINAC) para aplicaciones medicas, con la finalidad de comprender cuales son los factores que influirán en la manera en como se distribuirán los neutrones secundarios dentro de la habitación y para observar si existe un posible riesgo radiológico al que puedan estar sometidos los pacientes, médicos y técnicos por estas partículas.

4.3. Metodología y experimentación.

Para medir las concentraciones de neutrones secundarios en diferentes zonas dentro del cuarto, se seleccionaron diversos puntos estratégicos. Este lugar presenta unas dimensiones de 770 cm de largo por 764 cm de ancho y una altura de 300 cm. Como en todas las habitaciones diseñadas para estos propósitos, el cuarto cuenta con un túnel de 1100 cm de largo y 200 cm de ancho. En el interior del lugar opera un acelerador lineal para aplicaciones médicas (figura 4.2) que suministrar tratamientos para combatir el cáncer. Para este objetivo, el equipo emite fotones de 6 y 18 MeV y electrones de 4, 6, 9, 12 y 16 MeV. Diariamente se proporciona tratamiento a aproximadamente 220 pacientes, el equipo opera cinco días a la semana y el tiempo de irradiación puede ir desde los 30 segundos hasta los 2 minutos.



Figura 4.2. Acelerador lineal utilizado en el cuarto donde se realizó la medición.

Por otra parte, el dispositivo utilizado para detectar y cuantificar la concentración de neutrones secundarios es pequeño y discreto, lo que permite colocarlo en diferentes lugares sin interferir con los tratamientos que se llevan a cabo dentro de la habitación, además de tener un bajo costo de fabricación. Este dispositivo consta de tres partes:

- 1. Un detector sensible a la radiación.** En este caso se hizo uso nuevamente del policarbonato CR-39 (manufacturado por la compañía Lantrack®) [102, 103]. El detector presenta las mismas dimensiones mencionadas previamente: 1.8 x 0.9 cm² y 750 mm de espesor.
- 2. Un material moderador.** Como se menciona en el apartado 1.2.4.2, los neutrones no pueden ser detectados por ningún material, por lo que es necesario utilizar las interacciones n, p para su detección. En el caso del detector CR-39, cuando los neutrones se desplazan por el material pueden interactuar con los protones que se encuentran en los múltiples átomos que conforman al policarbonato, en ocasiones esta interacción puede desplazar protones fuera del núcleo produciendo un daño en el material durante su desplazamiento, a este fenómeno se le denomina efecto de protón de retroceso. Sin embargo, las interacciones n, p que pueden ocurrir dentro del CR-39 son muy bajas, por tanto, es necesario aumentar la eficiencia de detección colocando un material entre el CR-39 y la fuente de emisión de neutrones. Este material recibe el nombre de moderador y comúnmente debe presentar una estructura con un alto contenido de protones [104-106]. Para este trabajo, como material moderador se utilizaron láminas de acrílico (poli (2-metilpropenoato de metilo)). El acrílico aumenta la eficiencia de detección debido a que es un material con una estructura con un alto contenido de hidrógenos y, por tanto, de protones. Las láminas de acrílico utilizadas presentan un espesor de 3 mm y se cortan a las mismas dimensiones superficiales del detector. Luego se unen al contacto de cada superficie del CR-39 con cinta diurex.
- 3. Un protector de contaminación de radiación ionizante ambiental.** Para evitar la contaminación del detector con otras partículas radiactivas (como las que produce el gas radón), el detector y las láminas acrílicas se encerraron en una caja de plástico redonda, cuyas dimensiones son de 3.0 cm de diámetro y 1.6 cm de altura. El detector y las láminas de acrílico se sujetan a presión dentro de la caja mediante un material flexible denominado "hule espuma", para evitar que se muevan. Este hule espuma es cortado a las mismas dimensiones de la caja redonda de plástico.

La finalidad de colocar una lámina de acrílico en ambas superficies del detector, es para poder no sólo registrar los neutrones secundarios que impacten por el frente del CR-39, sino también evaluar si es posible que la interacción de estos neutrones secundarios con la superficie que se encuentra detrás del dispositivo (por ejemplo las paredes del cuarto) puede generar mas neutrones generando una "segunda producción de neutrones secundarios", y de existir esta segunda producción compararla con respecto a la primera.

Después de armar los dispositivos, a cada uno de ellos se le colocó en la parte posterior un trozo de cinta doble cara, de esta manera se podrían pegar en cualquier superficie donde se deseará realizar una medición. La figura 4.3 presenta dos imágenes, en la primera imagen se muestra el dispositivo detector y los diferentes elementos que lo conforman y en la segunda imagen se muestra un esquema de las interacciones n, p que ocurren dentro del dispositivo detector.

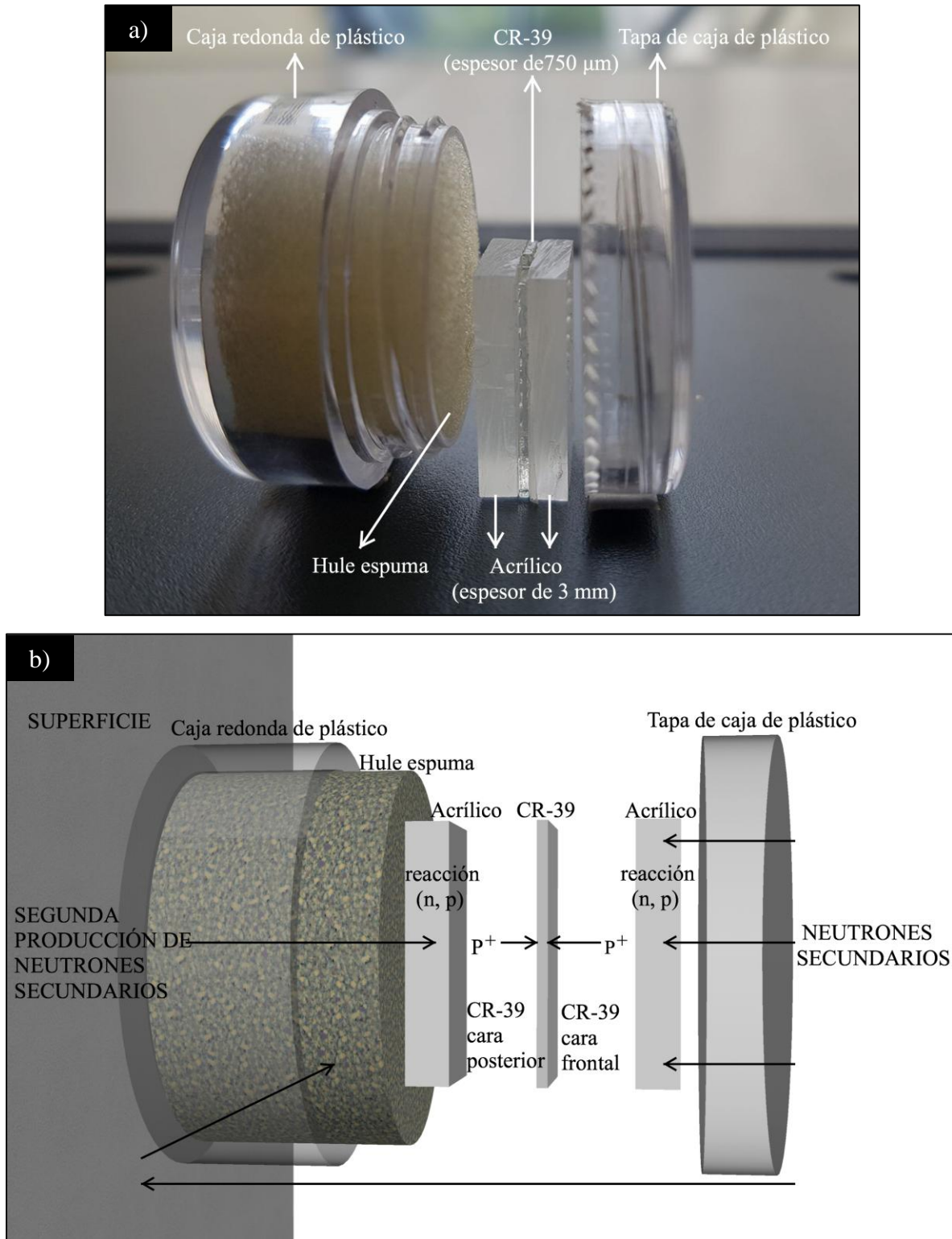


Figura 4.3. a) Imagen del dispositivo detector y de los elementos que lo conforman, b) esquema de las interacciones n, p que ocurren dentro del dispositivo detector.

En total se eligieron 16 puntos para evaluar las concentraciones de neutrones secundarios dentro del cuarto. Para cuantificar los niveles en la zona dónde se coloca al paciente que va a recibir el tratamiento de radioterapia, se colocaron 6 dispositivos en la camilla. Para cuantificar todo el volumen de la habitación se colocaron 2 dispositivos en cada una de las cuatro paredes que confinan al cuarto. Por último, se colocaron 2 dispositivos en el cabezal del LINAC, cerca de la zona donde se emiten las energías de radiación. La figura 4.4 presenta dos esquemas dónde se observan las dimensiones de la habitación (en centímetros), la localización del LINAC y de la camilla dentro del cuarto y las posiciones donde fueron colocados los 16 dispositivos.

Los dispositivos fueron dejados en la habitación durante 1 mes, tiempo suficiente para obtener suficientes trazas en el policarbonato CR-39. Un total aproximado de 1,031 pacientes fueron irradiados durante este período de tiempo. De los 16 dispositivos, los 8 que fueron pegados en la pared permanecieron inmóviles todo el tiempo que duro la medición y los 8 restantes si estuvieron en movimiento, como consecuencia del movimiento que puede tener el LINAC y la camilla (la camilla puede moverse en dos de sus ejes y el cabezal del LINAC puede girar 360°). Los movimientos que tendrán estos dos objetos durante un tratamiento de radioterapia dependerán de la localización del tumor cancerígeno en el cuerpo del paciente.

Después del periodo de medición, los 16 dispositivos fueron retirados del cuarto de tratamiento y llevados para su caracterización. Todos los CR-39 fueron procesados bajo las mismas condiciones en como fueron procesados los utilizados en la medición de la concentración de gas radón en los túneles de la pirámide, es decir, primero se lavaron con agua destilada, luego se grabaron químicamente y después fueron caracterizados mediante el Sistema de Análisis de Conteo en Imágenes Digitales. El grabado químico se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Tiempo de ataque químico: 18 horas.
- Solución y concentración: Hidróxido de potasio (KOH) 6,25 Molar.
- Temperatura: $60^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$.

La caracterización nuevamente consistió en fotografiar cuatro campos de cada detector CR-39, después se contabilizó el número de trazas que tuvo cada campo mediante el uso del sistema CADIS [74] y posteriormente se obtuvo el promedio de trazas para cada detector. El proceso se repitió nuevamente para la otra superficial del detector. En esta caracterización, nuevamente se hizo uso de un CR-39 sin irradiar como detector de referencia, con la finalidad de restar el fondo a cada uno de los 16 CR-39 utilizados en la medición.

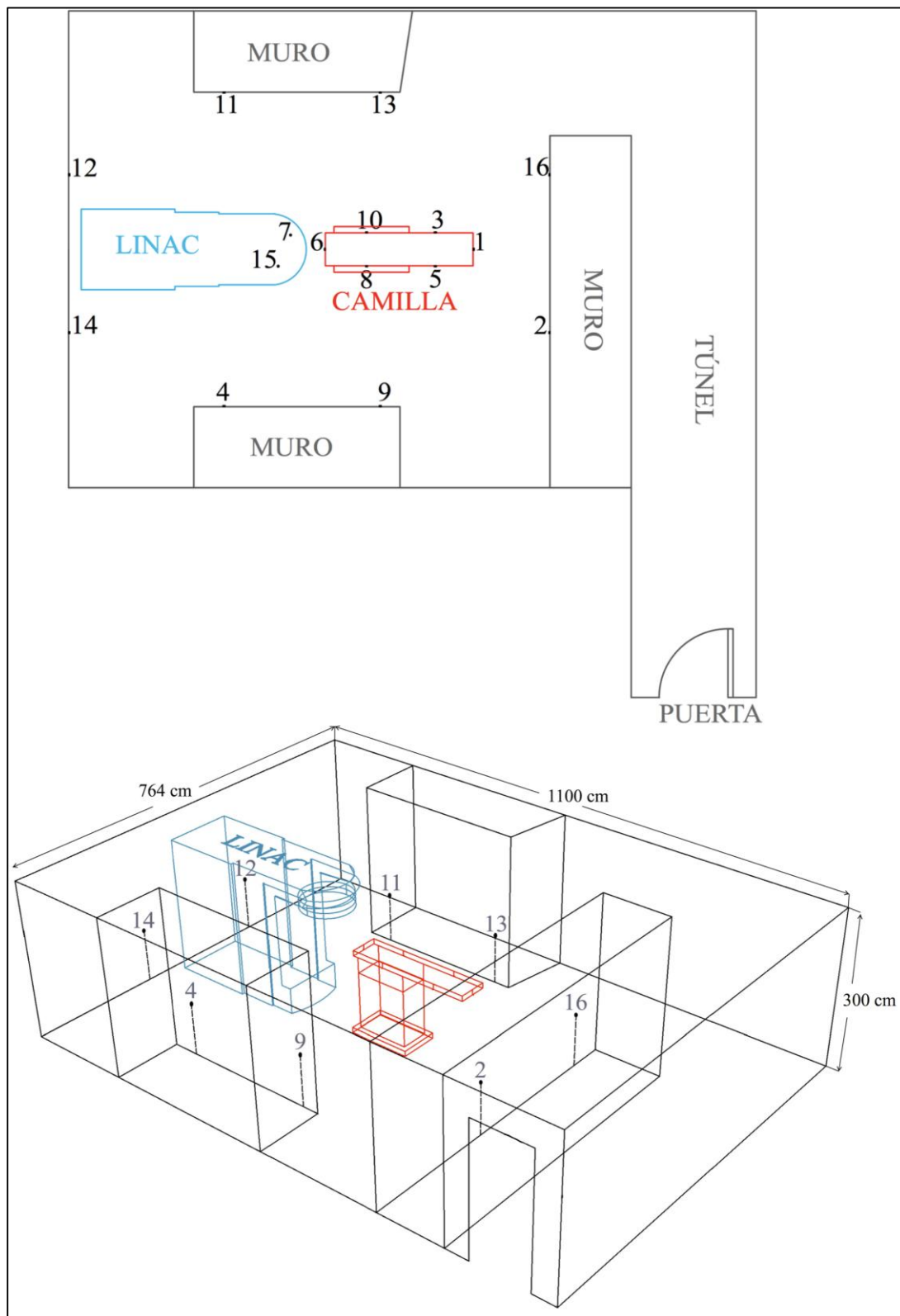


Figura 4.4. Esquemas dónde se observan las dimensiones de la habitación, la localización del LINAC y de la camilla dentro del cuarto y las posiciones de los 16 dispositivos colocados.

4.3.1. Calibración del dispositivo.

Con el objetivo de comparar la eficiencia del dispositivo utilizado para detectar y cuantificar los neutrones con respecto a otros dispositivos utilizados por otros autores y, de esta manera, verificar que se obtendrían resultados confiables, el dispositivo fue calibrado con una fuente de Americio-Berilio-214, marca EMA. Esta fuente de neutrones tiene una actividad (\mathcal{A}) de $1.13 \pm 0.03 \times 10^6$ n / s 4π , con incertidumbre de $\pm 2.5\%$ y sus dimensiones son de 10 mm de diámetro por 34 cm de alto. A fin de evitar que la radiación neutrónica sea emitida en todas las direcciones la fuente se encuentra encerrada dentro de un contenedor de parafina, cuya dimensión es de 23.5 cm de largo por 23.5 cm de ancho y 34 cm de alto. El contenedor cuenta con un orificio de 3.5 cm de diámetro en cada una de sus seis caras por donde se emite la radiación neutrónica. Para desarrollar el proceso de calibración, primero se irradiaron cuatro dispositivos (armados tal y como lo muestra la figura 4.3) a una distancia de la fuente de 9.5 cm, variando el tiempo de irradiación de cada uno de ellos a: 3, 4.5, 6 y 9 horas. Luego, los CR-39 fueron grabados químicamente, lavados con agua destilada y caracterizados en el microscopio óptico. La tabla 4.3 muestra la densidad de trazas obtenidas en cada CR-39 según el tiempo que se dejó expuesto a la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$. La figura 4.5 muestra un gráfico donde se puede observar el comportamiento de cada CR-39 en función del tiempo de exposición.

Tabla 4.3 Densidad de trazas obtenidas en cada CR-39 según el tiempo que se dejó expuesto a la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$.

Número de dispositivo	Tiempo de exposición (horas)	Densidad de traza (δ) (Trazas / cm ²)
01	3	4907 \pm 743
02	4.5	7879 \pm 962
03	6	9722 \pm 1363
04	9	16113 \pm 1166

El flujo de neutrones (φ) de la fuente $^{241}\text{Am-Be}$ se puede calcular a partir del ángulo sólido (Ω) mediante la siguiente relación:

$$\Omega = \frac{\pi a^2}{d^2} \quad (1)$$

dónde a es el radio del detector (1.75 cm) y d la distancia que existe desde la fuente de neutrones hasta el detector (9.5 cm). Al resolver la ecuación (1) se obtiene un ángulo sólido de $\Omega = 0.1066$.

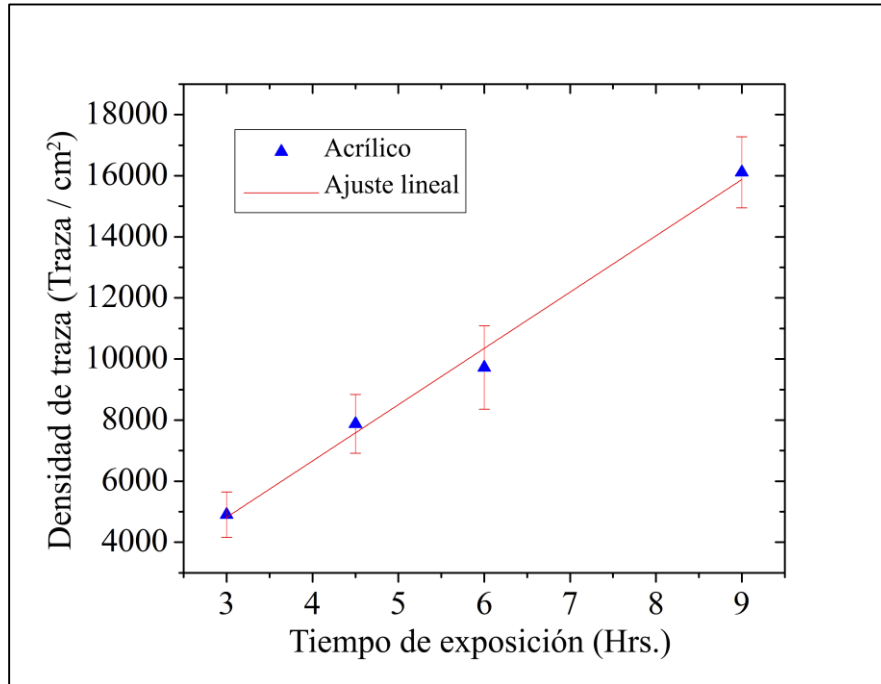


Figura 4.5. Gráfico que muestra el número de trazas registradas en cada CR-39 en función del tiempo de exposición.

Para calcular el flujo neto de neutrones que la fuente irradia a cada detector (φ_{Ω}), se utiliza la siguiente ecuación:

$$\varphi_{\Omega} = \Omega \left(\frac{\varphi}{4\pi} \right) \quad (2)$$

Al resolver esta ecuación se obtiene que el flujo neto de neutrones que la fuente irradia a cada detector para un ángulo sólido de $\Omega = 0.1066$ y una actividad de $\mathcal{A} = 1.13 \pm 0.03 \times 10^6 \text{ n / s } 4\pi$ es de $\varphi_{\Omega} = 9.58 \times 10^3 \text{ n-cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Para calcular el flujo total de neutrones (φ_{T}) recibidos por el dispositivo durante el tiempo que está sujeto a la irradiación se utiliza la siguiente ecuación:

$$\varphi_{\text{T}} = \varphi_{\Omega} t \quad (3)$$

dónde t es el tiempo de exposición total del dispositivo a la fuente radiactiva. La tabla 4.4 muestra el flujo total de neutrones calculado para cada uno de los cuatro CR-39 expuesto a radiación.

Tabla 4.4. Flujo total de neutrones calculado para cada uno de los cuatro CR-39 expuesto a radiación.

Número de dispositivo	Tiempo de exposición (horas)	Flujo total de neutrones (φ_T) ($n - cm^2 h^{-1}$)
01	3	1.0346×10^{08}
02	4.5	1.5520×10^{08}
03	6	2.0693×10^{08}
04	9	3.1039×10^{08}

Finalmente, se calcula el valor promedio de la eficiencia (ε) a partir de la densidad de trazas (δ) registrada en el CR-39 y el flujo total de neutrones (φ_T) emitidos por la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ en un tiempo determinado mediante la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\varphi_T} \quad (4)$$

La eficiencia promedio obtenida fue de $4.91 \times 10^{-5} \pm 2.53 \times 10^{-6}$ trazas / neutrón. Este valor se puede comparar con los valores de eficiencia reportados por otros autores [107]. Por lo tanto, el dispositivo es confiable para realizar las mediciones de neutrones secundarios dentro del cuarto de tratamientos.

4.4. Resultados y discusión.

Los 16 detectores CR-39 colocados dentro del cuarto registraron un número considerable de trazas, tanto en la superficie frontal como en la superficie posterior. Esto refleja que existe una considerable densidad de neutrones dentro del cuarto producidos por la interacción de fotoneutrones con la materia que se encuentra a su alrededor, también refleja que las interacciones que se generan entre estos neutrones secundarios y las diversas superficies que existen dentro del cuarto producen más neutrones. Primero se analizarán los resultados registrados en la superficie frontal de cada CR-39.

La figura 4.6 presenta un esquema dónde se pueden observar las diferentes concentraciones de neutrones secundarios en las zonas donde fueron colocados los dispositivos. Cada concentración se muestra como una mancha de colores, en las paredes las manchas se observan como elipses y en el LINAC y en la camilla las manchas se observan como gaussianas. En la figura también se presenta una barra con una escala de colores, dónde el color rojo oscuro refleja una mayor concentración de neutrones secundarios (reflejado por un mayor número de trazas contabilizadas en el CR-39) y el color púrpura la menor concentración de neutrones.

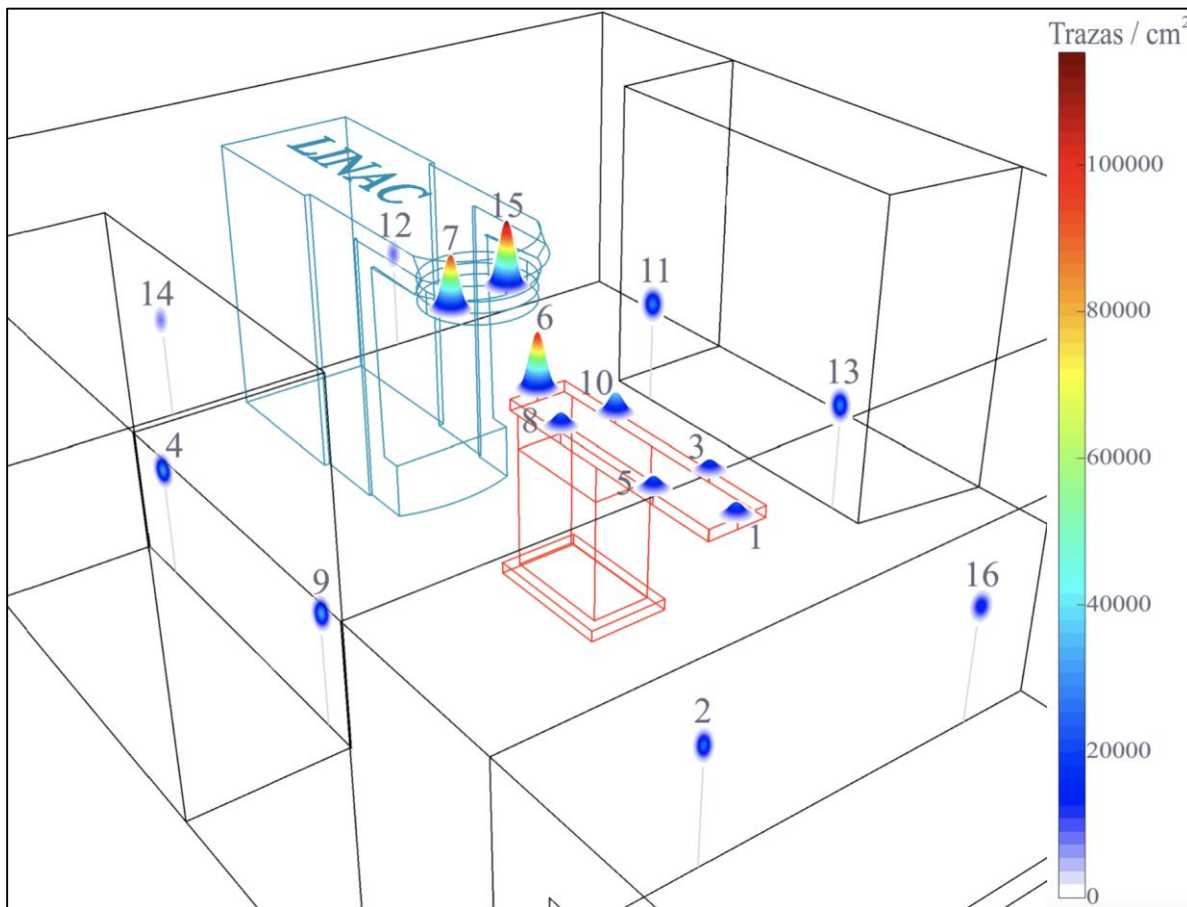


Figura 4.6. Concentraciones de neutrones secundarios registrados en la superficie frontal de cada CR-39.

El esquema de la figura 4.6 fue desarrollada en el programa computacional MATLAB® (abreviatura en inglés de “Matrix Laboratory”, laboratorio de matrices) desarrollado por la compañía MathWorks y en el programa de diseño asistido por computadora AutoCAD de la compañía AUTODESK®.

Como se puede observar en la figura anterior, la zona que presentó la mayor concentración de neutrones secundarios se localizó en el área del cabezal del acelerador lineal. En esa ubicación, el dispositivo 7 registró más de 110,000 trazas / cm², mientras que el dispositivo 15 registró más de 90,000. En la camilla, la zona que tuvo la mayor concentración fue en la zona donde los pacientes colocaban su cabeza. En esa ubicación se posicionó el dispositivo 6 que registró aproximadamente 100.000 trazas / cm². Mientras que las zonas cercanas a donde los pacientes colocan sus extremidades superiores obtuvieron una menor densidad con respecto a la cabeza. En esos lugares se colocaron los dispositivos 10 y 8, el dispositivo 10 registró poco más de 35,000 trazas / cm² y el dispositivo 8 más de 20,000. La concentración de neutrones secundarios en las zonas donde los pacientes colocan sus extremidades inferiores también fue muy similar con respecto a la zona mencionada anteriormente. En esta ubicación, los dispositivos 3 y 5 registraron aproximadamente 20,000 trazas / cm². Finalmente, la zona cercana a donde los pacientes colocan sus pies registró una densidad también muy similar a las anteriores, aquí el dispositivo registró aproximadamente 23,000 trazas / cm². Estos resultados reflejan que, posiblemente, los pacientes son sometidos a una irradiación adicional de neutrones.

Por otro lado, con respecto a las paredes del cuarto de tratamiento, el lugar con la mayor concentración de neutrones secundarios se ubicó en la zona donde se colocaron los dispositivos 4 y 9. Aquí, ambos dispositivos registraron un poco más de 30,000 trazas / cm². Mientras que los dispositivos 11 y 13 registraron aproximadamente 25,000 trazas / cm². Con respecto a la pared que se encuentra frente al LINAC, hubo cierta variación en los resultados. Por un lado, el dispositivo 16 registró un poco más de 15,000 trazas / cm², mientras que el dispositivo 2 registró más de 20,000. Finalmente, la concentración de neutrones secundarios más baja se localizó en la pared posterior al LINAC. Aquí el dispositivo 12 registró aproximadamente 8,000 trazas / cm², mientras que el dispositivo 14 registró aproximadamente 7,000. Estos resultados reflejan que, posiblemente, los técnicos pueden también estar sujetos a una radiación de neutrones. Estos resultados señalan que, la forma en como se distribuirán los neutrones secundarios dentro de una habitación dependerá de diversos factores como: las dimensiones y características de la habitación, la posición del acelerador lineal con respecto a las paredes, los materiales que se encuentren dentro de la habitación, el número de tratamientos y energías que se suministren al paciente e incluso de la posición del cabezal y la camilla cuando se irradie al paciente.

La figura 4.7 muestra un histograma de la distribución del número de trazas contabilizadas en la superficie frontal de cada CR-39 en función de la distancia que tuvo cada detector con respecto a la fuente de emisión de energía de radiación, es decir, el cabezal del acelerador lineal.

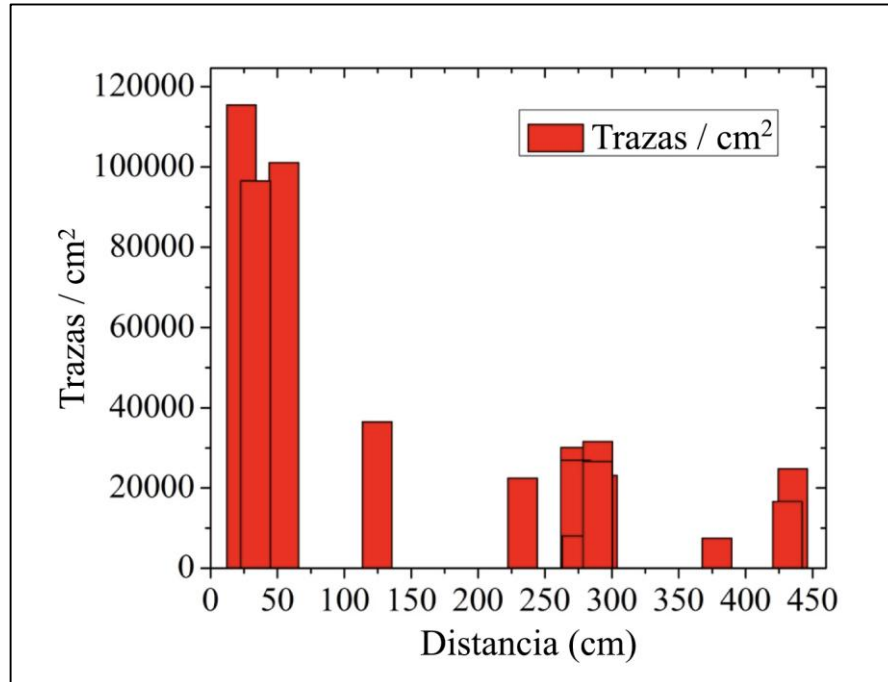


Figura 4.7. Histograma de la distribución del número de trazas contabilizadas en la superficie frontal de cada CR-39 en función de la distancia que tuvo cada detector con respecto a la fuente de emisión de energía de radiación.

En este histograma se puede observar que, en algunos casos, a medida que los dispositivos de detección se alejan de la fuente de emisión de energía disminuye el número de interacciones de neutrones secundarios con el detector. No obstante, hay dispositivos en los que esto no sucede a pesar de estar más cerca de la fuente de emisión de energía, de manera que el número de trazas registradas es menor con respecto a otros dispositivos que estuvieron más lejos. Esto se deba a que, como se mencionó anteriormente, la distribución de la densidad de los neutrones secundarios dentro de la habitación dependerá de múltiples factores y no solo de las dimensiones de la habitación o de la posición del LINAC dentro del lugar.

Con respecto a los resultados registrados en la superficie posterior de los 16 CR-39, se observa una disminución en el número de trazas / cm² registradas, lo que refleja que la producción de neutrones secundarios por efecto de los fotoneutrones es mayor en comparación de la producción de neutrones al interactuar los neutrones secundarios con las paredes y superficies del lugar. Para los dispositivos dónde se presentó una mayor diferencia entre el número de trazas registradas en la superficie frontal con respecto al número de trazas registradas en la superficie posterior, la diferencia no fue mayor a las 10,000 trazas / cm². Sólo los dispositivos 7, 6 y 15 registraron un número de trazas muy similar tanto en su superficie frontal como en su superficie posterior. Estos dispositivos nuevamente registraron el mayor número de trazas con respecto a los otros 13 dispositivos, siendo el dispositivo 7 el que registró el mayor número de interacciones y el dispositivo 14 el que menor número de interacciones registró.

La figura 4.8 presenta un histograma similar al que se mostró en la figura anterior, pero los resultados pertenecen a las trazas registradas en la superficie posterior de cada uno de los 16 detectores CR-39.

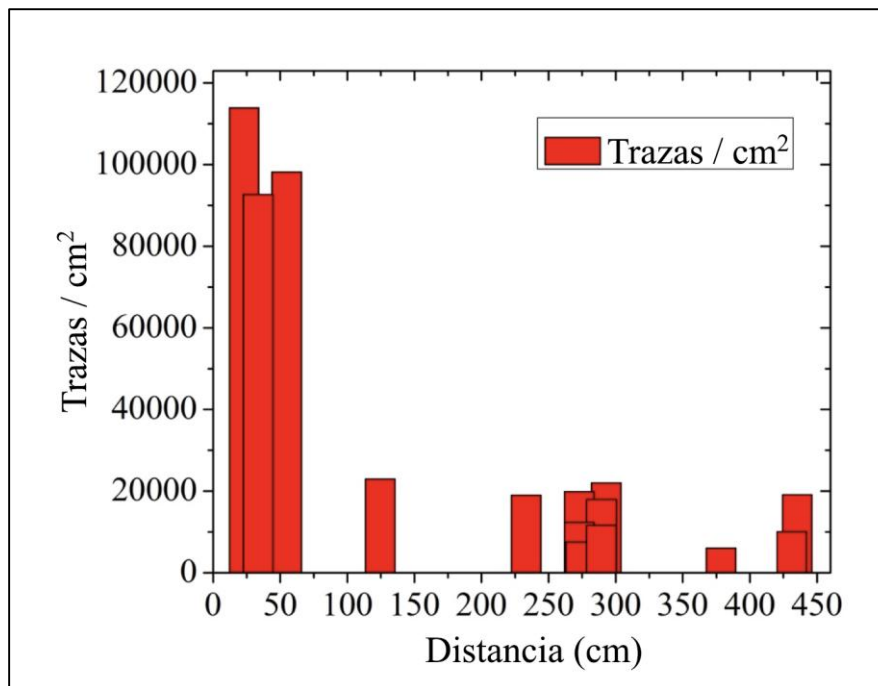


Figura 4.8. Histograma de la distribución del número de trazas contabilizadas en la superficie posterior de cada CR-39 en función de la distancia que tuvo cada detector con respecto a la fuente de emisión de energía de radiación.

Como se puede observar en este histograma el comportamiento de las interacciones de los neutrones secundarios con la superficie posterior de los CR-39 es muy similar a las interacciones mostradas en el histograma de la figura 4.7, pero con una disminución en el número de trazas registradas, (a excepción de los tres dispositivos que estuvieron más cerca de la fuente de emisión de energía). Estos resultados reflejan la posibilidad de que, tanto pacientes como técnicos y médicos se encuentran expuestos a la radiación generada por neutrones secundarios, sin embargo, es necesario realizar más investigaciones que permitan entender el riesgo radiológico que se genera cuando estas partículas interactúan con las personas que pasan muchas horas dentro del lugar.

Por último se observa que este dispositivo también puede ser utilizado para determinar cual es la eficiencia de la mitigación de las paredes del Bunker que confina un acelerador lineal o de cualquier otro material que se desee utilizar como mitigador de neutrones.

La figura 4.9 presenta dos imágenes que corresponden a las fotografías tomadas al dispositivo número 8, la primera imagen muestra las trazas observadas en la superficie frontal del CR-39 y la segunda imagen muestra las trazas observadas en la superficie posterior.

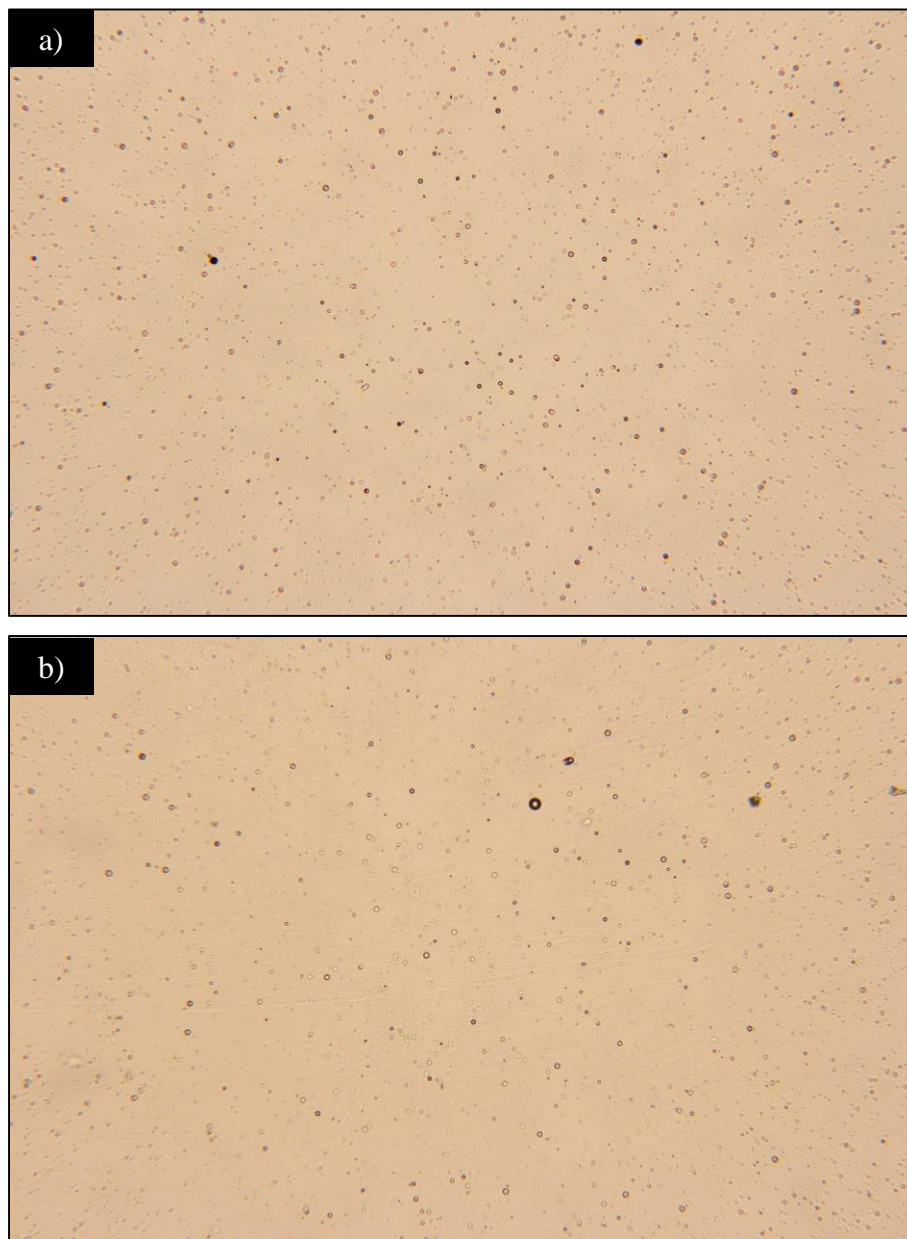


Figura 4.9. Fotografías tomadas al dispositivo 8. a) Trazas observadas en la superficie frontal del CR-39 y b) trazas observadas en la superficie posterior del CR-39.

En la figura 4.9 se observa que la imagen a) presenta un mayor número de trazas con respecto a la imagen b), esto se debe a que los neutrones que se generan en las diferentes superficies dónde fue colocado un detector presentan una menor energía y, por lo tanto, no logran desplazar los protones del acrílico fuera de los núcleos de sus átomos, generando un menor número de trazas en el CR-39.

"La belleza es una manifestación de las leyes naturales secretas, que de otro modo habrían sido escondidas de nosotros para siempre".

Johann Wolfgang von Goethe

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE UNA POSIBLE CORRELACIÓN ENTRE LAS TRAZAS FORMADAS EN DETECTORES CR-39 Y LAS ARBORESCENCIAS ELÉCTRICAS QUE SE GENERAN EN EL POLICARBONATO MEDIANTE EL GRABADO ELECTROQUÍMICO

Como se menciona en el apartado 1.3.6, el grabado electroquímico genera arborescencias eléctricas en los detectores dieléctricos que presentan trazas en sus superficies. Estas estructuras tienen la ventaja de hacer más visible el daño por radiación producido por el paso de las partículas ionizantes, pero no permite determinar la energía o el tipo de partícula ionizante que interactuó con el material. Para poder determinar el tipo de partícula incidente es necesario desarrollar un método que, primero, permita relacionar de alguna manera la geometría de la arborescencia con algún valor numérico, tal y como la geometría circular de las trazas se relaciona con el valor numérico de su diámetro. Después se debe encontrar una correlación entre el tipo de partícula, o su energía, y este valor numérico. Por lo tanto, es necesario experimentar con diversas fuentes de radiación o irradiar el material con un acelerador de partículas con diferentes energías y observar si es posible encontrar un patrón que permita realizar esta correlación.

Es evidente que las arborescencias eléctricas no pueden ser descritas mediante figuras contenidas en la geometría euclidiana, hiperbólica, elíptica, de Riemann o algún otro tipo de geometría conocida, por tanto, tampoco es posible medir estas estructuras con algún método convencional. Sin embargo, si se observa el nombre que reciben estas estructuras "arborescencias" se puede deducir que esta designación hace referencia a la semejanza que tienen con la geometría que presentan las ramas de los árboles y el problema de poder medir estas y otras formas de la naturaleza no es un problema nuevo, sino más bien, es un problema que los matemáticos se han planteado desde hace mucho tiempo.

Benoit Mandelbrot [108], fue un matemático que inventó un término para poder agrupar a todas las formas geométricas que presentaban este tipo de morfología particular: "fractales" [109] y también desarrollo un método para poder caracterizarlas: medir su "dimensión fractal" [110]. Los primeros trabajos para caracterizar estas arborescencias eléctricas mediante la medición de su dimensión fractal fueron realizados en los años 90 por investigadores del Instituto de Física de la UNAM [111, 112] y aunque estos primeros trabajos no desarrollaron un método para poder determinar la partícula ionizante a partir de la caracterización de estas estructuras, si pudieron demostrar que estas arborescencias podían ser caracterizadas mediante el cálculo de su dimensión fractal. Sin embargo, antes de continuar este trabajo es necesario preguntarse primero ¿qué es un fractal? y ¿qué representa su dimensión?

5.1. Los fractales y el concepto de dimensión fractal.

A finales del siglo XIX, los matemáticos habían puesto por escrito una descripción formal de cómo debía ser una curva, definiéndola como una línea continua de una dimensión sin una sola parte recta y además con variaciones graduales de dirección. Sin embargo, dentro de esta descripción existían singularidades, elementos que satisfacían la definición formal de lo que era una curva pero que eran tan complejos que ni siquiera podían ser dibujados. Estos elementos extraños no podían ser medidos como las figuras geométricas euclidianas y fueron denominados monstruos matemáticos. En 1883, el matemático alemán Georg Cantor creó el primero de estos monstruos cuando realizaba investigaciones para una de sus principales preocupaciones: el continuo. Cantor partió de un segmento de tamaño 1 al que posteriormente dividió en tres segmentos de tamaño $1/3$ cada uno, eliminó el central y se quedó con los extremos. A estos dos segmentos repitió la operación nuevamente dividiendo en tres ($1/9$), eliminando el segmento central y así sucesivamente, de esta manera obtuvo para cada número de segmentos una longitud del segmento igual a $(1/3)^n$. Después de infinitos pasos se obtiene el subconjunto de los números reales que se denomina conjunto de Cantor [113]. Un análisis del conjunto de Cantor muestra dos observaciones: la primera es pensar que, después de realizar esta operación un número determinado de veces llegará un momento en que ya no exista ningún segmento más que dividir, sin embargo, esto no es así porque los extremos de los intervalos nunca son eliminados y por tanto queda una infinidad de puntos. La segunda observación es pensar que, si se toma la primera división de longitud del segmento ($1/3$) y se amplía 3 veces se obtienen el conjunto de Cantor original, o si se toma la segunda división ($1/9$) y se amplía 9 veces se obtiene nuevamente el conjunto de Cantor, es decir, desde cualquier división se puede conseguir el conjunto original de modo que toda parte, por minúscula que sea, contiene la información del todo. Esta propiedad del conjunto de Cantor recibe el nombre de autosimilaridad. De manera que cualquier parte de una línea recta es, evidentemente, una línea recta idéntica a la total salvo por un factor de escala. Se observa que muchas formas euclidianas no tienen esta propiedad, por ejemplo un arco de círculo no es un círculo por sí mismo o un lado de un triángulo no es triángulo. Más tarde otros matemáticos propondrían nuevos monstruos matemáticos. En 1904, el matemático sueco Niels Fabian Helge von Koch propuso la curva de Koch [113]. Esta curva representa una paradoja porque a la vista parece finita pero matemáticamente resulta infinita lo que supone que no se puede medir, además la curva de Koch es una curva continua en todos sus puntos pero no derivable en ninguno porque no se puede trazar una tangente a ninguno de sus puntos debido a que sus curvas no son “suaves”. Esta curva recibiría posteriormente el nombre de curva patológica. Otros monstruos definidos más tarde fueron el triángulo y la alfombra de Sierpinski, propuestos por el matemático polaco Waclaw Sierpinski; la curva de Hilbert, propuesta por el alemán David Hilbert y la esponja de Menger, propuesta por el austriaco Karl Menger [113]. En un principio estas complejas figuras parecían no tener ninguna utilidad frente a las figuras Euclidianas, sin embargo, la curva de Koch resultó ser crucial de cara a un problema persistente de medida, la longitud de una costa.

En 1940 el científico británico Louis Richardson había observado que puede haber mucha variación entre las diferentes medidas de una costa, ya que la precisión en el resultado depende de la longitud de la regla con que se mida; esto debido a que entre menor longitud tenga la regla más entrantes de la costa se pueden medir y por lo tanto mayor exactitud se tendrá. El matemático polaco Benoit Mandelbrot descubrió que si se superponía la curva de Koch en los entrantes de la

costa de Inglaterra estos se acoplaban con cierta exactitud y de esta manera se encontraba una manera de poder medirlas, además encontró que cuanto más finos eran los entrantes de la curva de Koch estos se acoplaban mejor al contorno de la costa [114]. Mandelbrot sospecho entonces que, si bien no era posible medir la longitud de las costas se podía medir otra característica de ellas: su rugosidad.

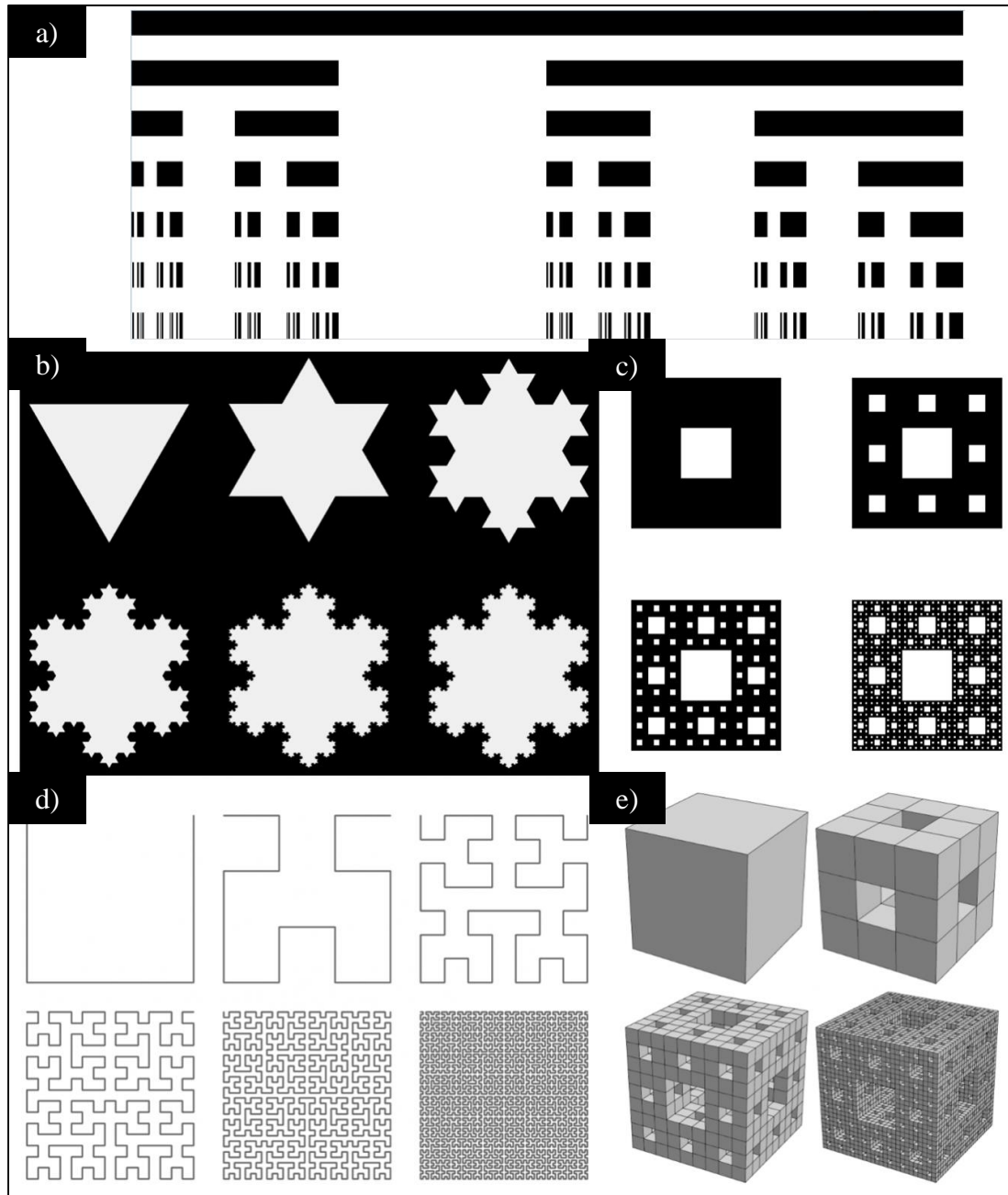


Figura 5.1. Diferentes monstruos matemáticos y la forma de construirlos: a) conjunto de Cantor, b) curva de Koch, c) alfombra de Sierpinski, d) curva de Hilbert y e) esponja de Menger.

Para lograr esto, Mandelbrot tuvo que replantear uno de los conceptos más básicos de las matemáticas: la dimensión. En geometría convencional cuando queremos representar una dimensión la dibujamos como una línea recta, dos dimensiones la dibujamos como la superficie de un cuadrado y tres dimensiones como un cubo, pero ¿podría existir algo más entre cada dimensión?. Mandelbrot dijo que sí: la dimensión de los fractales, término derivado del latín *fractus*, que significa quebrado o fracturado y que él utilizaría por primera vez en 1975 bajo la publicación de su libro *Les objets fractals, forme, hasard et dimension* (Los objetos Fractales, forma, oportunidad y dimensión). Un fractal puede ser definido como una figura geométrica compuesta por una infinita variedad de tamaños de fragmentos, tales que cada uno de ellos es una copia reducida del total, es decir, la totalidad del fractal es igual que cualquiera de sus partes [115]. A diferencia de los objetos comunes, los fractales presentan la propiedad de autosimilaridad, es decir, son independientes de escala. En general, los fractales están caracterizados por la presencia de una longitud y detalle infinitos y la ausencia de suavidad o derivabilidad, sin embargo, la característica principal de cualquier objeto fractal es su dimensión fractal. La dimensión fractal (D) es un número real y exponencial que generaliza el concepto de dimensión euclidiana para objetos geométricos que no admiten espacio tangente y mide el grado de irregularidad e interrupción de una estructura [115], entre mayor sea la rugosidad de la estructura mayor será su dimensión fractal. Este número exponencial indica de qué forma o en qué medida una línea fractal llena una porción del plano de estas estructuras geométricas; esta dimensión fractal puede ser desde una fracción simple ($1/2$, $5/3$), un número irracional ($\log 4 / \log 3$) o simplemente π [115].

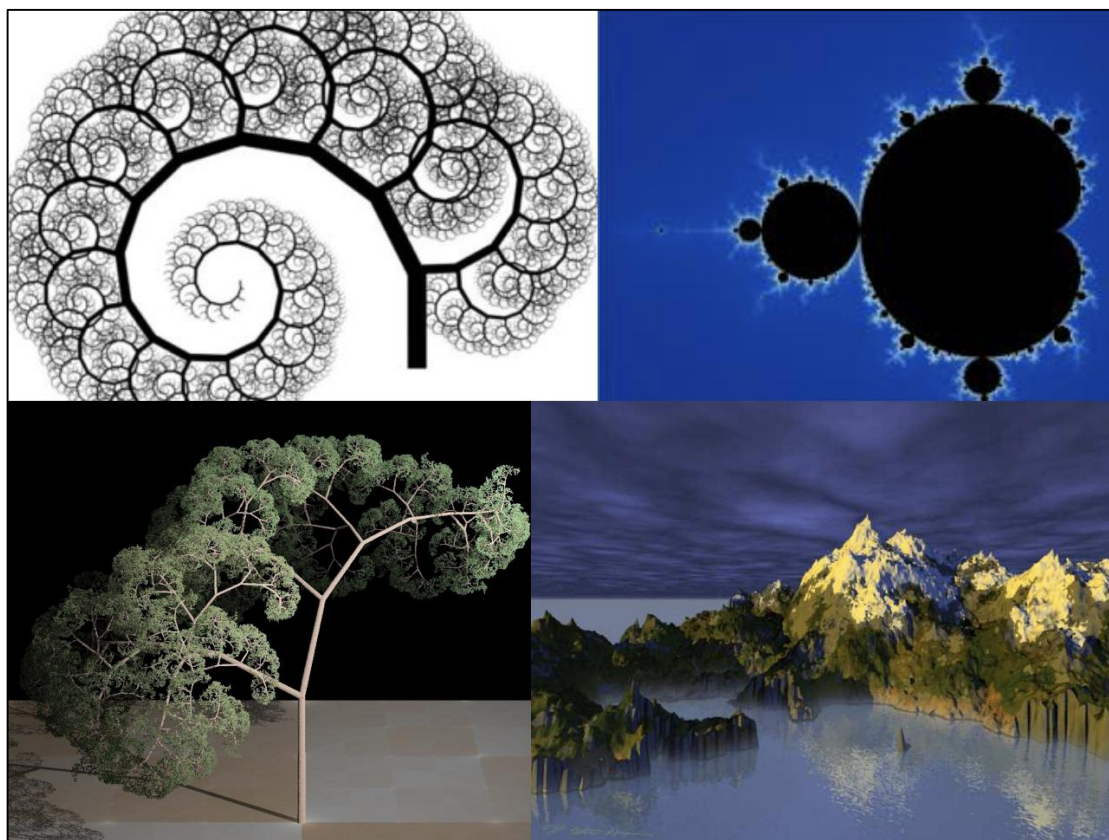


Figura 5.2. Ejemplos de estructuras fractales generadas por computadora.

Existen además otros métodos matemáticos que permiten medir de manera más acertada la dimensión de los fractales, como por ejemplo, la dimensión de Hausdorff-Besicovitch [115]. Esta dimensión es una generalización métrica del concepto de dimensión de espacio topológico y permite medir una dimensión fraccionaria para objetos fractales. Es interesante observar que los fractales son estructuras que presentan una forma adecuada para modelar las formas irregulares de la naturaleza [116], como por ejemplo: los rayos de las tormentas eléctricas, los árboles, las raíces de las plantas, las flores, las arterias del sistema circulatorio del cuerpo humano, las terminaciones del sistema nervioso, el ojo humano o la bifurcación de un río. A partir del descubrimiento de los fractales, la ciencia entraría en una nueva etapa de comprensión de la naturaleza, este nuevo conocimiento comenzaría a ser utilizado en la gran mayoría de los campos del saber humano como por ejemplo: en el arte, la moda, la música, la biología, la economía, la informática, la medicina, la ingeniería, la física y en las matemáticas. Algunas investigaciones en física que han utilizado el concepto de la geometría fractal son: el modelado de agregados coloidales, la caracterización de materiales no cristalinos, el estudios de la turbulencia en la dispersión de la luz, la determinación de la formación de grietas en los procesos de fracturas de materiales, la distribución de las galaxias, las transiciones de fases, el decaimiento lumínico en cadenas de polímeros y el estudio del ruido Johnson-Nyquist en transmisiones en mecánica cuántica [116].



Figura 5.3. Ejemplos de estructuras fractales en la naturaleza.

Para poder determinar la energía o el tipo de partícula ionizante que incide en detectores de trazas nucleares se propone realizar un análisis de la factibilidad de hacer una correlación entre el tamaño del diámetro de las trazas y la dimensión fractal de las arborescencias eléctricas. De esta manera, si se comprueba que la energía de una partícula ionizante puede influir en la formación de la arborescencia eléctrica, será posible entonces designar un valor de dimensión fractal a una energía o isótopo radiactivo, de manera análoga a como se designa un diámetro de traza a la energía de la partícula.

La desventaja que se presenta en este procedimiento propuesto, es el hecho de que el tiempo de grabado electroquímico afecta el tamaño final de la arborescencia, por lo tanto, es necesario que se analice el tiempo de grabado electroquímico más adecuado para todos los detectores irradiados y para todos los isótopos utilizados en una calibración, es decir, determinar el tiempo mínimo que se requiere para producir el rompimiento dieléctrico en todos los diferentes tamaños de trazas que tenga el detector y utilizar el mismo tiempo para cada medición de radiación ionizante que se realice.

5.2. Objetivo del proyecto.

Analizar si existe una manera de correlacionar el diámetro de las trazas producidas por la interacción de las partículas ionizantes con el detector CR-39 y la dimensión fractal de Hausdorff-Besicovitch de las arborescencias eléctricas que se forman en el policarbonato después de someterlo a un grabado electroquímico; con la finalidad de desarrollar un método, en trabajos posteriores, que permita determinar la energía o el tipo de partícula ionizante a partir de la caracterización de estas arborescencias eléctricas.

5.3. Metodología y experimentación.

El primer paso para desarrollar este proyecto fue adquirir detectores CR-39 que tuvieran una mayor área superficial con respecto a los detectores utilizados en los trabajos anteriores (esto debido a las dimensiones que presentan las arborescencias eléctricas). El CR-39 adquirido es manufacturado en la ciudad de Bristol por la compañía inglesa Track Analysis System Ltd., cuyo nombre comercial es Tastrak (figura 5.4). El área superficial del detector es de $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$ y 1 mm de espesor, además presenta una densidad de 1.30 g / cm^3 y un módulo de elasticidad a la flexión de $10 \times 10^5 \text{ lb / in}^2$ [117].



Figura 5.4. CR-39 manufacturado por la compañía Track Analysis System Ltd.

El siguiente paso fue irradiar el detector. Aunque no fue posible adquirir diferentes fuentes de partículas ionizantes o un acelerador lineal, si fue posible adquirir una fuente de uranio. El uranio presenta una desventaja para su detección en la Metodología de Trazas Nucleares pero una ventaja para el objetivo de este proyecto. El uranio es una fuente de radiación que no decae en un sólo tipo de partícula alfa (como si lo hacen otras fuentes como el americio-240, el radón-222, el californio-248, el plutonio-238, el gadolinio-152 o el torio-228), sino que decae en diferentes tipos de partículas α generando trazas de diferentes diámetros; estas energías dependerán del tipo de isótopo de uranio [118]. Por ejemplo, para el caso del uranio-238 (figura 2.4) se producen partículas α cuando decae en torio-234, en radio-226, en radón-222, en polonio-218 o en plomo-214. Por lo tanto, detectar uranio mediante la NTM es, relativamente, complejo. Sin embargo, este hecho también permite que, al grabar electroquímicamente al detector se obtengan arborescencias eléctricas de múltiples tamaños. La figura 5.5 muestra una imagen donde se puede observar la fuente de uranio utilizada para irradiar el policarbonato.



Figura 5.5. Fuente de uranio utilizada para irradiar el CR-39.

Después, para observar la densidad de trazas que se generaban en el CR-39 con respecto al tiempo de exposición a la fuente de uranio, se realizaron cuatro experimentaciones a diferentes tiempos: 50 segundos, 2, 5 y 20 minutos. Para obtener trazas circulares, el detector fue colocado perpendicularmente sobre la fuente de uranio. Después del proceso de irradiación, los policarbonatos fueron grabados químicamente simultáneamente en un Baño María eléctrico de la compañía TECHNE (figura 5.6). Luego, los policarbonatos fueron lavados con agua destilada, siguiendo el mismo protocolo utilizado en los trabajos anteriores. Como estos detectores fueron manufacturados por una compañía diferente a los CR-39 de Lantrack, las condiciones de grabado químico también fueron diferentes, las nuevas condiciones fueron elaboradas tomando en consideración las recomendaciones del fabricante del detector [119] y desarrollando múltiples experimentaciones, hasta que se obtuvieron los resultados más eficientes. Las condiciones de grabado químico utilizadas fueron las siguientes:

- Tiempo de grabado químico: 5 horas.
- Solución y concentración: Hidróxido de sodio (NaOH), 6.25 Molar.
- Temperatura: $75^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Después los detectores fueron observados en un microscopio óptico Carl Zeiss y las imágenes fueron digitalizadas con una cámara de la misma compañía (figura 5.7).

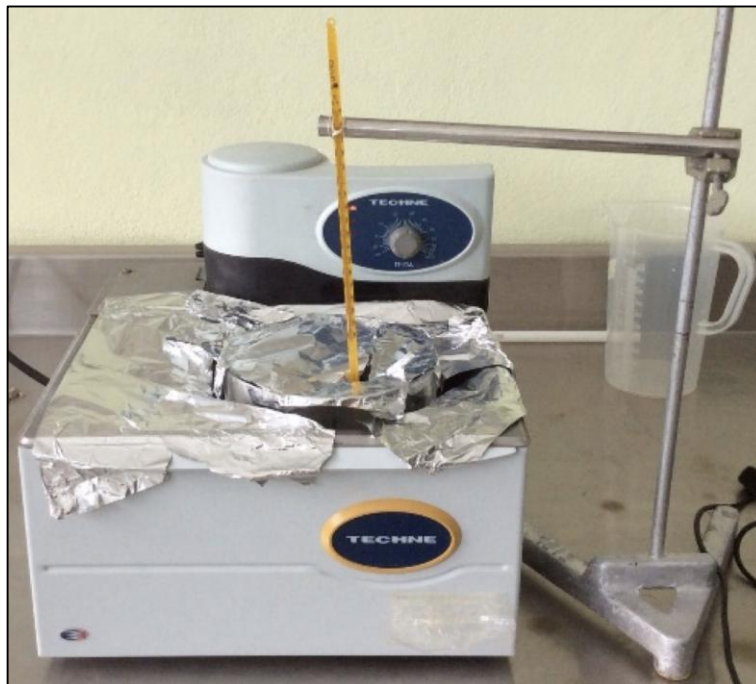


Figura 5.6. Baño María eléctrico de laboratorio utilizado para el grabado químico de los detectores.

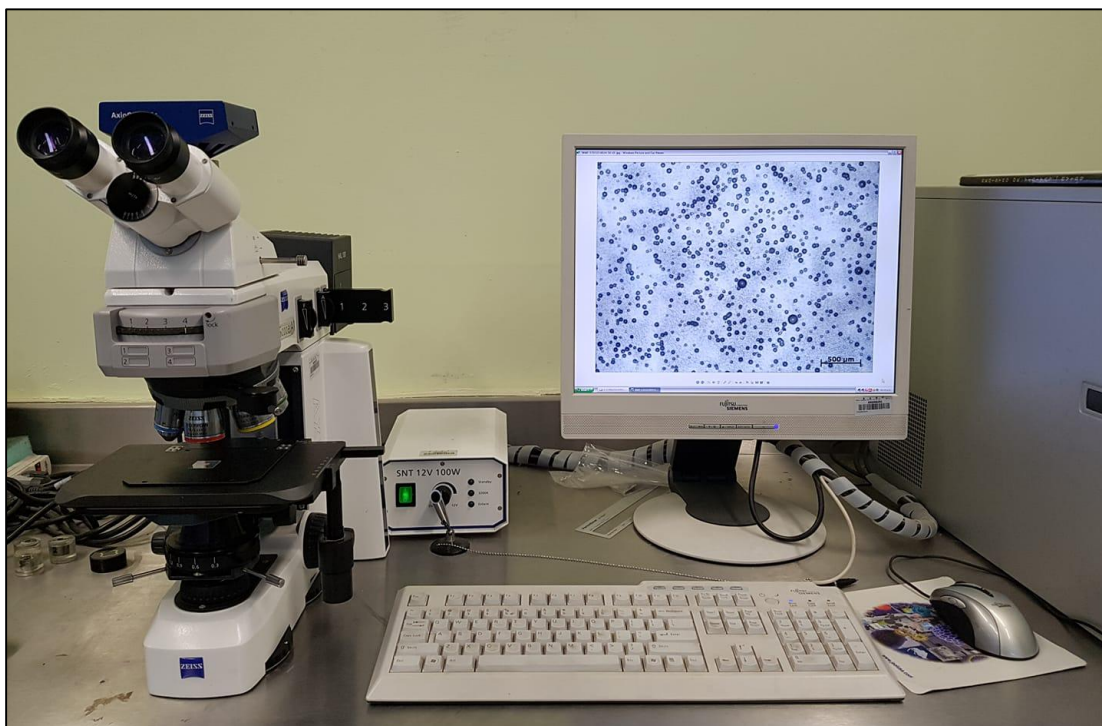
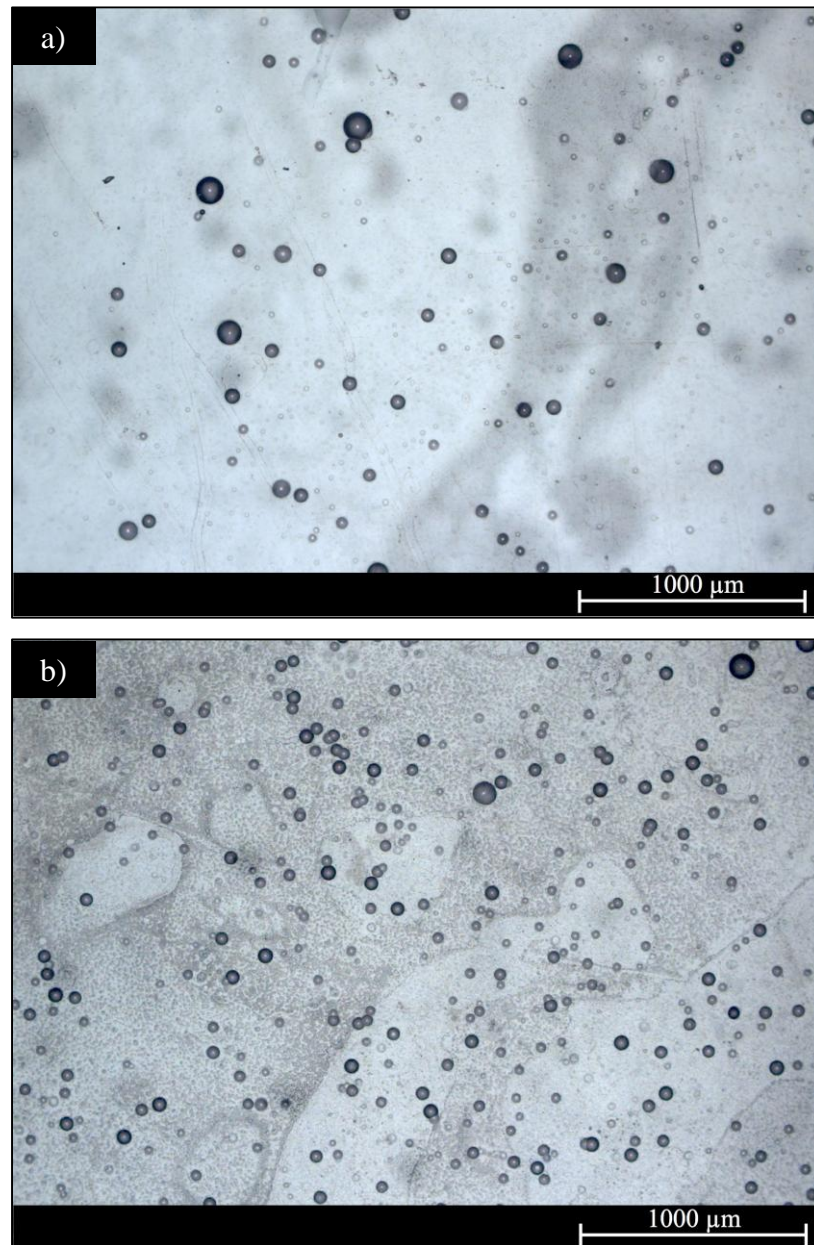


Figura 5.7. Microscopio óptico y cámara Carl Zeiss utilizados para caracterizar las trazas de uranio.

La figura 5.8 presenta los resultados obtenidos de la irradiación de los CR-39 con la fuente de uranio, los cuatro campos mostrados presentan una ampliación de 500 aumentos.



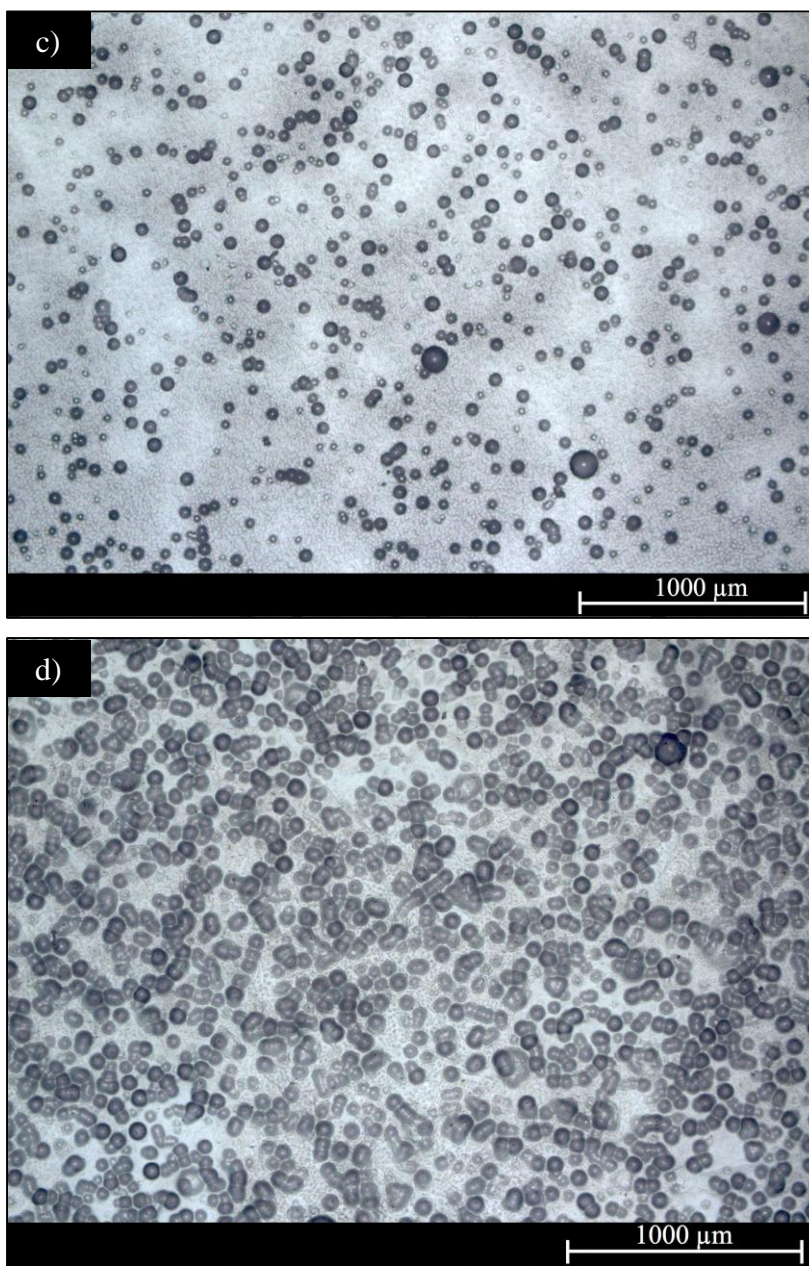


Figura 5.8. Trazas generadas al exponer el CR-39 a la fuente de uranio a diferentes tiempos: a) 50 segundos, b) 2 minutos, c) 5 minutos y d) 20 minutos.

Como se observa en la figura 5.8, las imágenes presentan trazas de diferentes diámetros, también se observa como la densidad de trazas aumenta conforme se aumenta el tiempo de irradiación. En la cuarta imagen se aprecia una saturación de trazas que ha provocado que los círculos se sobreexpongan. Cuando esto ocurre es necesario disminuir el tiempo de exposición a la radiación, debido a que es imposible caracterizar las trazas.

La figura 5.9 muestra un histograma, elaborado en el programa informático ImageJ, dónde se presenta la contabilización de las trazas y la medición de sus diámetros de uno de los campos fotografiados del CR-39 que fue irradiado durante 2 minutos.

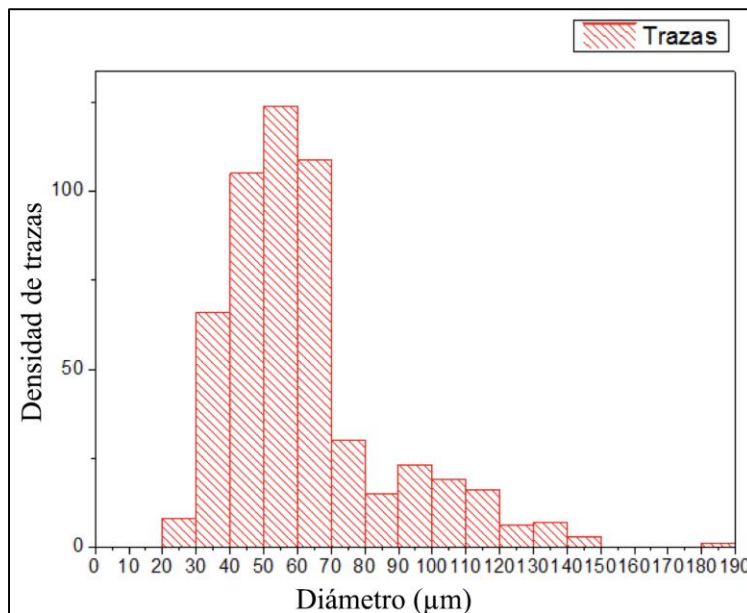


Figura 5.9. Histograma de la caracterización de las trazas obtenidas en el CR-39 irradiado durante 2 minutos.

Como se observa en el histograma de la figura 5.9, los diámetros que predominan en el CR-39 al exponerlo a la fuente de uranio y bajo las condiciones de grabado químico presentadas, van desde los 40 a los 70 μm , sin embargo, no es posible saber a que tipo de partículas α o isótopos radiactivos pertenecen estos diámetros. En base a estos resultados se observa que no es recomendable utilizar elevados tiempos de exposición a la fuente, debido a que al generar las arborescencias eléctricas se pueden superponer entre ellas impidiendo su caracterización. Por esta razón, para los objetivos de este proyecto se eligió irradiar el CR-39 durante 5 segundos. Posteriormente se procedió a diseñar y construir la cámara electroquímica y la fuente de alto voltaje. Los parámetros utilizados para desarrollar el grabado electroquímico fueron los mencionados en el apartado 1.3.6 y son los siguientes:

- Corriente: alterna.
- Señal: senoidal.
- Voltaje: 3000 V (debido a que el CR-39 presenta un espesor de 1 mm).
- Frecuencia: 2000 Hz.
- Solución y concentración del electrolito para realizar el rompimiento dieléctrico: Hidróxido de sodio (NaOH), 6.25 Molar.
- Solución y concentración del segundo electrolito: agua saturada con sal.

5.3.1. Diseño y construcción de la cámara electroquímica.

La cámara electroquímica utilizada en este trabajo fue diseñada siguiendo los parámetros descritos en el apartado 1.3.6. El proceso para su diseño y manufactura fue el siguiente:

1. Primero la cámara fue esbozada en el programa de diseño asistido por computadora en 3 dimensiones (CAD) AUTODESK Inventor®.
2. Después, el modelo esbozado fue impreso en una impresora 3D, con el objetivo de revisar la cámara a escala real y descartar errores en el diseño. Para imprimir la cámara, el diseño fue exportado al programa informático MakerBot Print. Este programa permite simular el proceso de impresión con la finalidad de verificar y corregir cualquier problema que pudiera generarse durante la impresión.
3. La cámara fue impresa en un equipo de la compañía WANHAO, modelo Duplicator 4 (figura 5.10). El material elegido para imprimir la cámara fue Nylon. Por las características de impresión elegidas, el equipo tardó un tiempo total de 20 horas para completar la operación.
4. Después, el modelo impreso fue revisado exhaustivamente para comprobar posibles deficiencias en el diseño.
5. Al confirmar la existencia de algunos problemas en el diseño, la cámara fue rediseñada en AUTODESK Inventor® y después impresa nuevamente.
6. Una vez que se obtuvo el modelo final de la cámara, se procedió a seleccionar el material más indicado para su manufactura. Después de una exhaustiva revisión de distintos materiales en el mercado, se eligió el polietileno de ultra alto peso molecular UHMWPE (por sus siglas en inglés "*Ultra-high-molecular-weight polyethylene*") cuyo nombre comercial es TIVAR® 1000. El TIVAR® 1000 presenta diferentes características que lo convierten en un material altamente eficiente para la realización del grabado electroquímico [120], como por ejemplo, tiene una elevada capacidad para resistir la corrosión de sustancias alcalinas con altas concentraciones, posee una elevada resistencia dieléctrica y finalmente es un material que puede ser maquinado con relativa facilidad, cualidad importante debido a que el diseño de la cámara no es convencional y, por tanto, su maquinado tiene un cierto grado de complejidad.
7. Posteriormente, el modelo impreso fue llevado a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP, en el centro de maquinado, con el objetivo de que los ingenieros del lugar analizaran el modelo y desarrollara una técnica efectiva para su correcta manufactura. Para desarrollar esta técnica efectiva, los ingenieros exportaron el diseño a otro programa CAD llamado SolidWorks de la compañía Dassault Systemes. Este programa, además de diseñar piezas, permite simular la manufactura de un objeto en una máquina herramienta automatizada (CNC). La simulación también permitió que los ingenieros seleccionaran los cortadores específicos que la máquina CNC necesitaría para desbastar y cortar el polietileno.
8. Una vez que los ingenieros revisaron exhaustivamente la simulación, exportaron el código del modelo a un programa llamado HSMWorks (también de la compañía AUTODESK). Este programa permite convertir un diseño CAD en un lenguaje que las máquinas CNC puedan leer para poder ejecutar el maquinado.
9. La cámara electroquímica fue exitosamente manufacturada en una máquina CNC de la

- compañía HAAS Automation Inc., modelo VF-2SS (figura 5.11).
10. Para sellar la cámara y evitar la fuga de los electrolitos, se diseñó un elemento que permitiera unir, a presión, la cámara y el detector CR-39. Es evidente que este sello también debía poseer propiedades análogas al polietileno TIVAR® 1000. El material elegido para esta tarea fue el caucho de etileno propileno dieno o EPDM (por sus siglas en inglés "*ethylene propylene diene monomer (M-class) rubber*"), material que posee también una elevada resistencia a la abrasión de sustancias acidas y alcalinas y una elevada resistencia dieléctrica (es incluso utilizado como material aislante en la industria) [121].
 11. Como electrodos se decidió utilizar dos pequeños punzones metálicos. Para sujetar estos punzones a la cámara, se introdujo cada punzón dentro de un tornillo de plástico pequeño. Después se realizaron 2 barrenos, con cuerda interna, a la cámara para atornillar los punzones. Los barrenos de la cámara también servirían para introducir los electrolitos dentro de la cámara.
 12. Posteriormente se armó la cámara y se introdujeron los electrolitos para comprobar que no existieran fugas de líquido.
 13. Para poder detener la cámara y colocarla en una superficie, se diseñó una base especial en el programa AUTODESK Inventor®. Después, la base fue maquinada también de polietileno TIVAR® 1000.
 14. Por último, para desplazar las burbujas que pudieran llegar a formarse dentro de la cámara se instaló un vibrador eléctrico sobre la base y para evitar que el vibrador se moviera al ser encendido, se construyó un dispositivo, también de polietileno, para sujetarlo a la base.

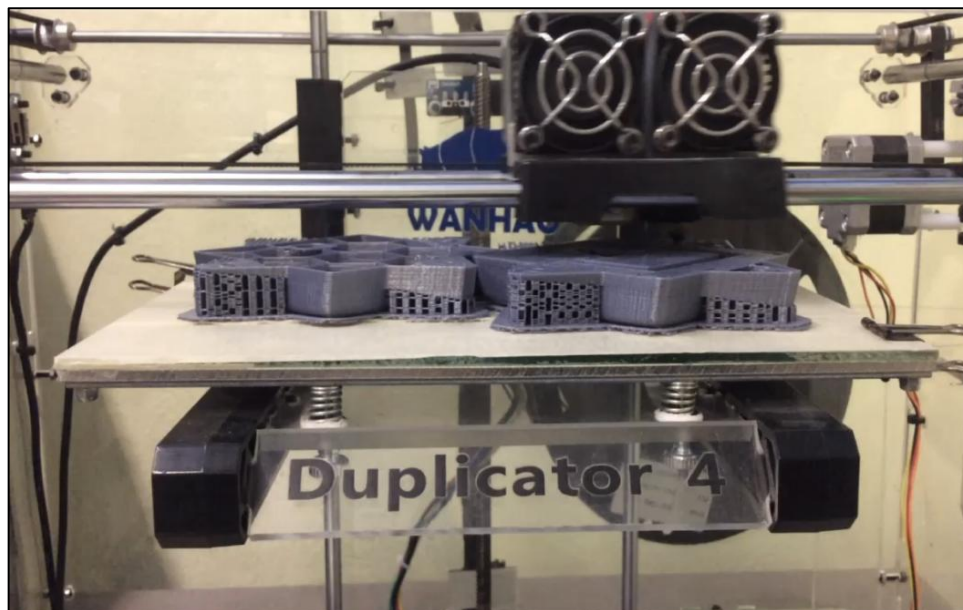


Figura 5.10. Impresión de la cámara electroquímica.

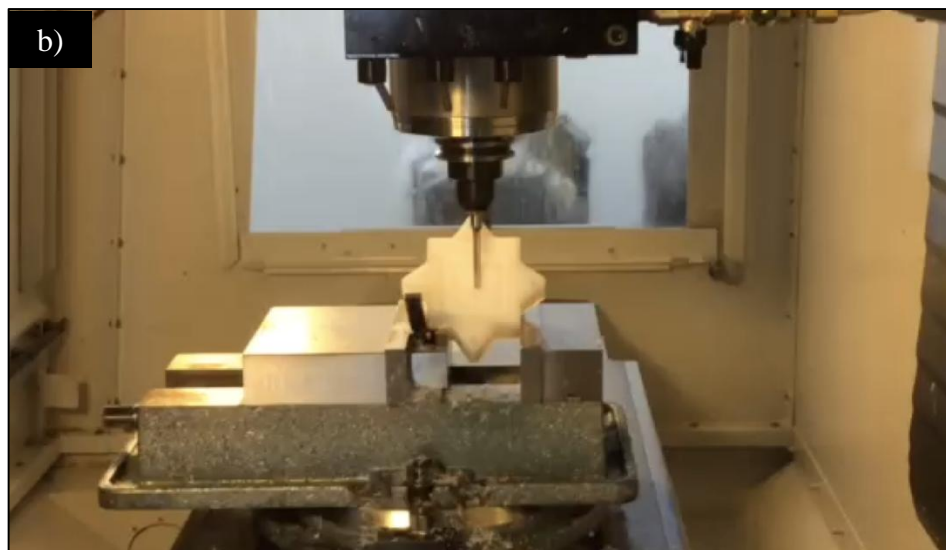


Figura 5.11. a) CNC HAAS VF-2SS. b) Maquinado de la cámara electroquímica.

La figura 5.12 presenta un esquema que muestra el diseño final de la cámara electroquímica elaborado en el programa AUTODESK Inventor®, en este esquema también se presentan todas las partes que conforman a la cámara. La figura 5.13 presenta imágenes de la cámara electroquímica armada y desarmada.

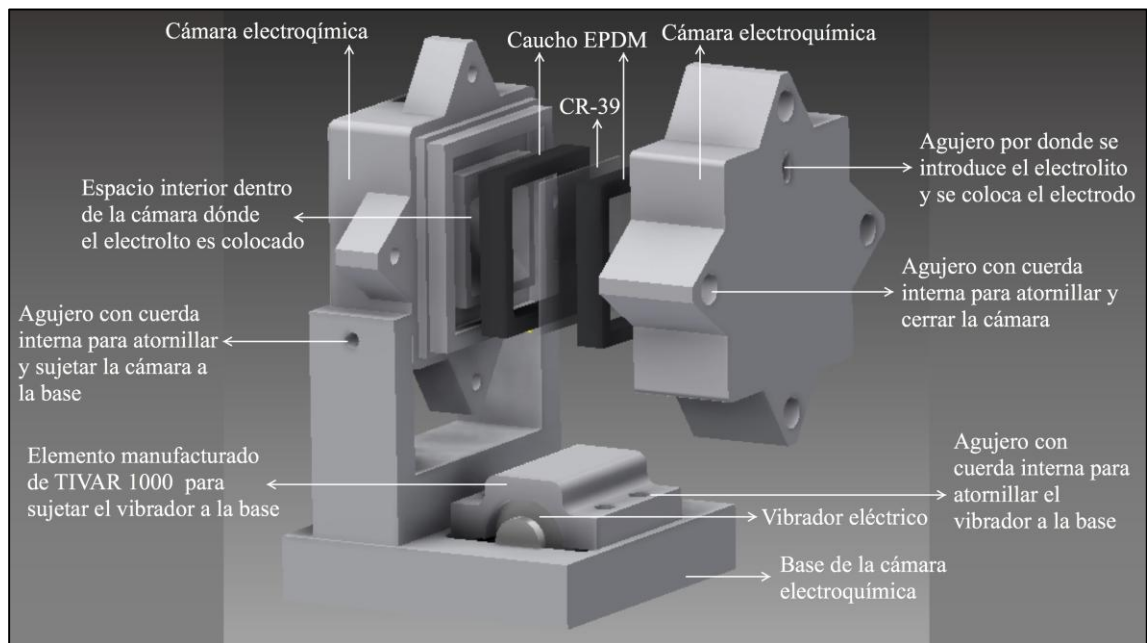


Figura 5.12. Esquema completo de la cámara electroquímica elaborado en el programa AUTODESK Inventor.



Figura 5.13. Cámara electroquímica maquinada armada y desarmada.

5.3.2. Construcción de la fuente de alto voltaje de corriente alterna (CA).

La fuente de alto voltaje de corriente alterna (CA) construida para suministrar la energía eléctrica requerida para efectuar el rompimiento dieléctrico en el CR-39, consta de los siguientes dispositivos:

1. Un oscilador de señal senoidal.
2. Un amplificador de audio.
3. Un transformador elevador de voltaje.

Adicionalmente se utilizaron estos dos dispositivos para medir la tensión y visualizar la señal que la fuente suministró a la cámara electroquímica en todo el tiempo que duró el grabado electroquímico:

4. Un divisor de voltaje.
5. Un osciloscopio.

La figura 5.14 muestra un diagrama de bloques donde se presentan los diferentes dispositivos que componen a la fuente de alto voltaje de CA:

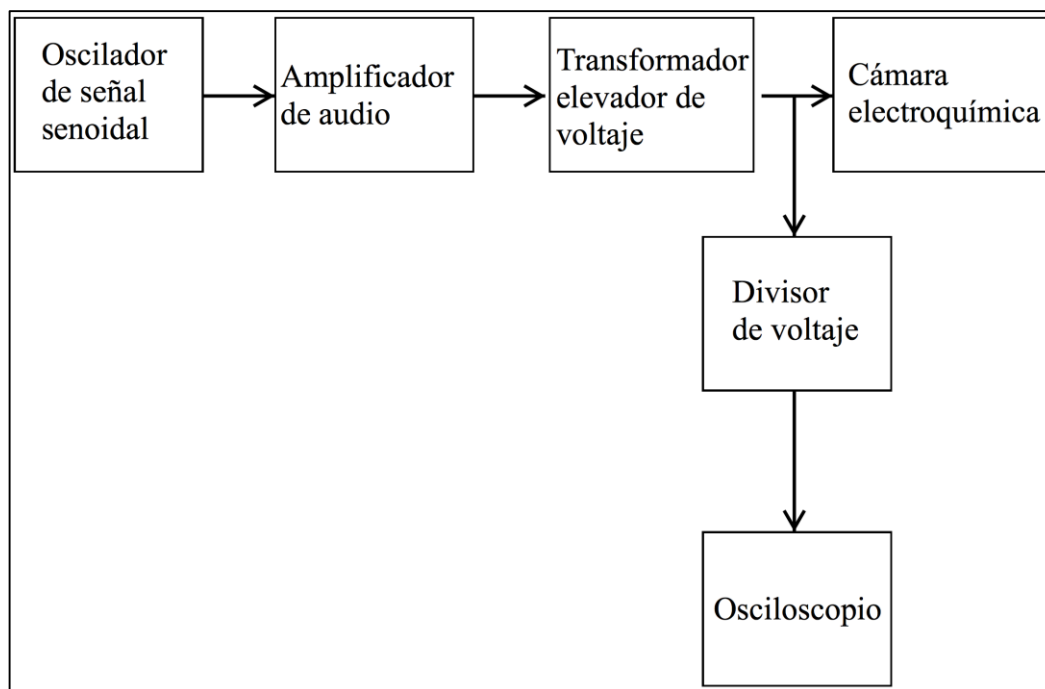


Figura 5.14. Diagrama de bloques de los diferentes dispositivos que constituyen la fuente de alto voltaje de CA.

En general, la fuente funciona de la siguiente manera: Un oscilador, que genera una señal senoidal de 2000 Hz a 1 voltio (pico a pico), se conecta a la entrada de un amplificador de audio. El amplificador de audio recibe el voltaje del oscilador y lo eleva a 40 voltios en la salida. Este amplificador de audio está constituido por 4 elementos: 2 fuentes de alimentación (potencia eléctrica), un preamplificador y un amplificador de potencia. Una de las fuentes de alimentación (potencia 1) está regulada, lo que significa que si la tensión de entrada varía la tensión de salida no variará y suministra energía eléctrica al oscilador de señal senoidal y al preamplificador. La otra fuente de alimentación (potencia 2) no está regulada y es simétrica, lo que significa que suministra tensión positiva y negativa con respecto a tierra. El preamplificador recibe la señal del oscilador (2 kHz a 1 V) y la aumenta a la tensión de entrada que requiere el amplificador de potencia. Por su parte, el amplificador de potencia suministra el voltaje y los amperios que requiere el transformador para proporcionar la corriente eléctrica necesaria para que la cámara electroquímica pueda producir los rompimientos dieléctricos en el policarbonato. En este caso, como el CR-39 utilizado tiene un espesor de 1 mm se requieren 3000 voltios para generar las arborescencias eléctricas, por lo tanto, el transformador elevará el voltaje que recibe en el embobinado primario (40 voltios) a 3000 voltios, mediante una relación de vueltas 1:75, manteniendo la frecuencia a 2 kHz.

Por último, para medir el voltaje y analizar la forma de la señal que el transformador suministra a la cámara electroquímica, se conectó un divisor de voltaje y una punta atenuada x10. El divisor está conformado por 8 resistencias de 1 mega ohmio a 1 watt. La razón de utilizar este divisor de voltaje y la punta atenuada es debido a que el osciloscopio solo puede medir una corriente máxima de 40 voltios, por lo tanto, es necesario disminuir nuevamente el voltaje de 3000 a 40 voltios, antes de enviar la señal al osciloscopio.

Como oscilador de señal senoidal fue empleado un temporizador 555 en modo astable. Para que este temporizador generará una frecuencia de 2 kHz a la salida, se utilizó un circuito RC. La siguiente ecuación permite obtener el valor de la frecuencia a partir de los valores de la resistencia y el condensador en un circuito RC:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

donde f es el valor de la frecuencia (en hercios, Hz), R el valor de la resistencia (en ohmios, Ω) y C el valor del condensador (en faradios, F). Es evidente que los valores que se propongan en la ecuación (1) deben hacer referencia a componentes electrónicos que existan en el mercado. En este caso como se requiere una frecuencia de 2000 Hz, se propuso una resistencia comercial de 3.6 k Ω y un condensador de 22 nF. Al resolver la ecuación (1) se obtiene una frecuencia de 2009.5 Hz. Sin embargo, el temporizador 555 genera una señal cuadrada, por lo que es necesario convertir la señal cuadrada a una señal senoidal. Para realizar esta conversión se utilizó un circuito resonante LC a la salida del temporizador, este circuito está formado por una bobina y un condensador. La siguiente ecuación permite calcular los valores de estos componentes en función de la frecuencia requerida:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

donde L es el valor de la bobina (en henrios, H). Si se requiere obtener una onda senoidal perfecta es necesario que se produzca la resonancia correcta en el circuito; para conseguir esta resonancia, el resultado en la ecuación (2) debe ser lo más cercano posible a 2 kHz. Tomando esto en consideración se propuso el uso de una bobina comercial de 33 H y un condensador de 200 F, obteniendo como resultado un valor de 1959.06 Hz (valor muy cercano a 2000 Hz). La figura 5.15 presenta el circuito electrónico del oscilador con el valor de cada componente electrónico utilizado para generar la señal senoidal de 2 kHz a 1 V.

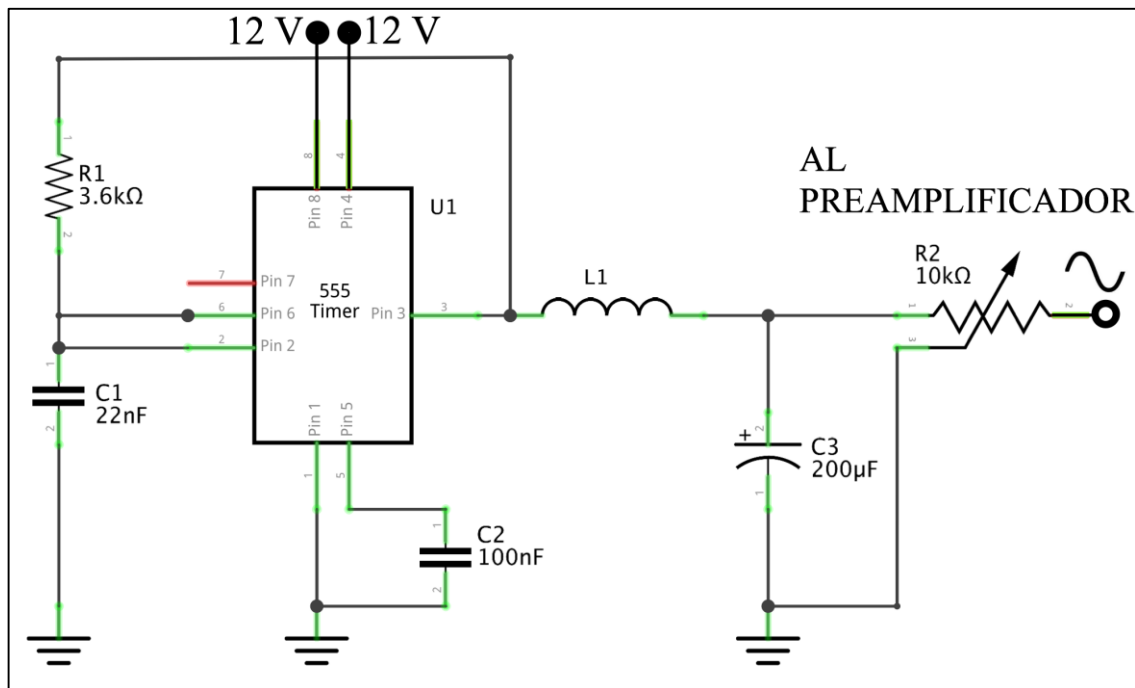


Figura 5.15. Diagrama del circuito electrónico del oscilador de señal senoidal.

El preamplificador y el amplificador de potencia fueron construidos tomando como referencias diagramas electrónicos de amplificadores de audio comerciales. La figura 5.16 presenta el diagrama del circuito electrónico del preamplificador construido y la figura 5.17 presenta el diagrama del circuito electrónico del amplificador de potencia construido.

Por otra parte, las 2 fuentes de potencia utilizadas se construyeron tomando como referencia las características del suministro eléctrico comercial que proporciona la Comisión Federal de Electricidad en la ciudad de Puebla y los requisitos de alimentación del oscilador, el preamplificador y el amplificador de potencia.

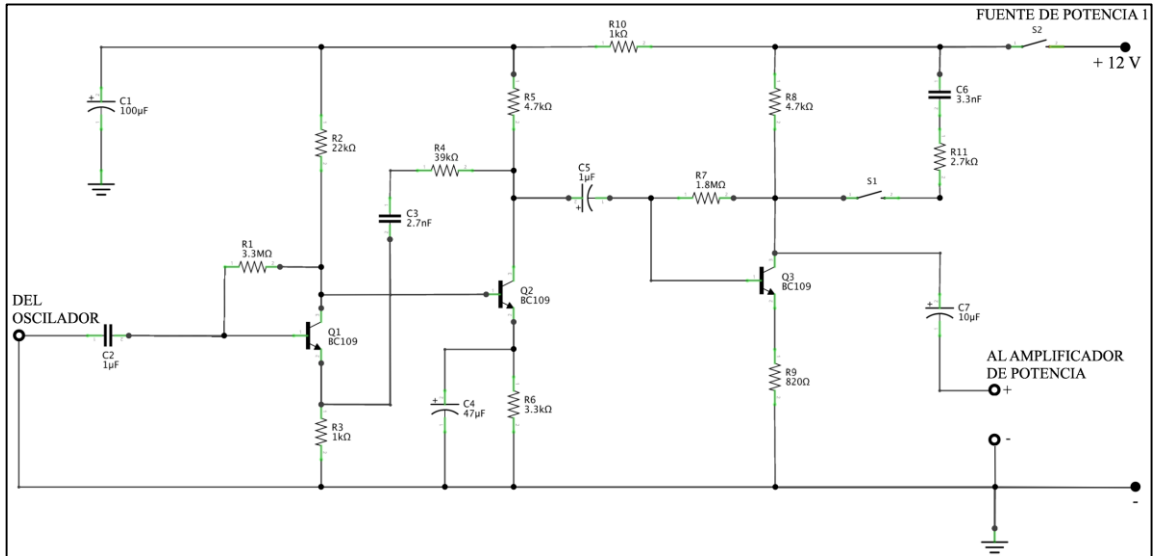


Figura 5.16. Diagrama del circuito electrónico del preamplificador.

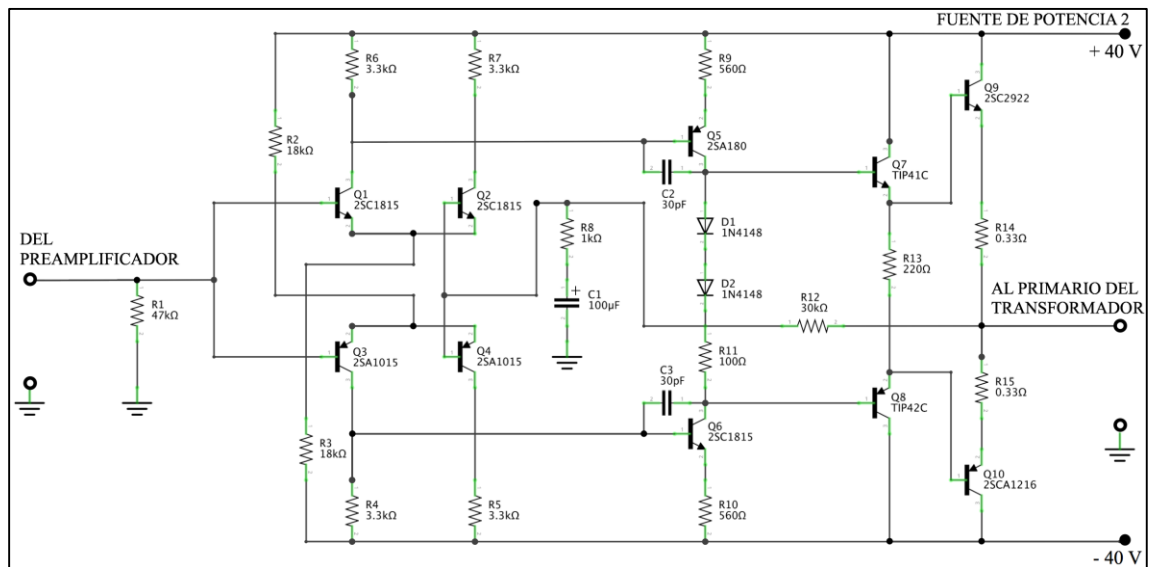


Figura 5.17. Diagrama del circuito electrónico del amplificador de potencia.

La figura 5.18 muestra el diagrama del circuito electrónico de las 2 fuentes de potencia construidas.

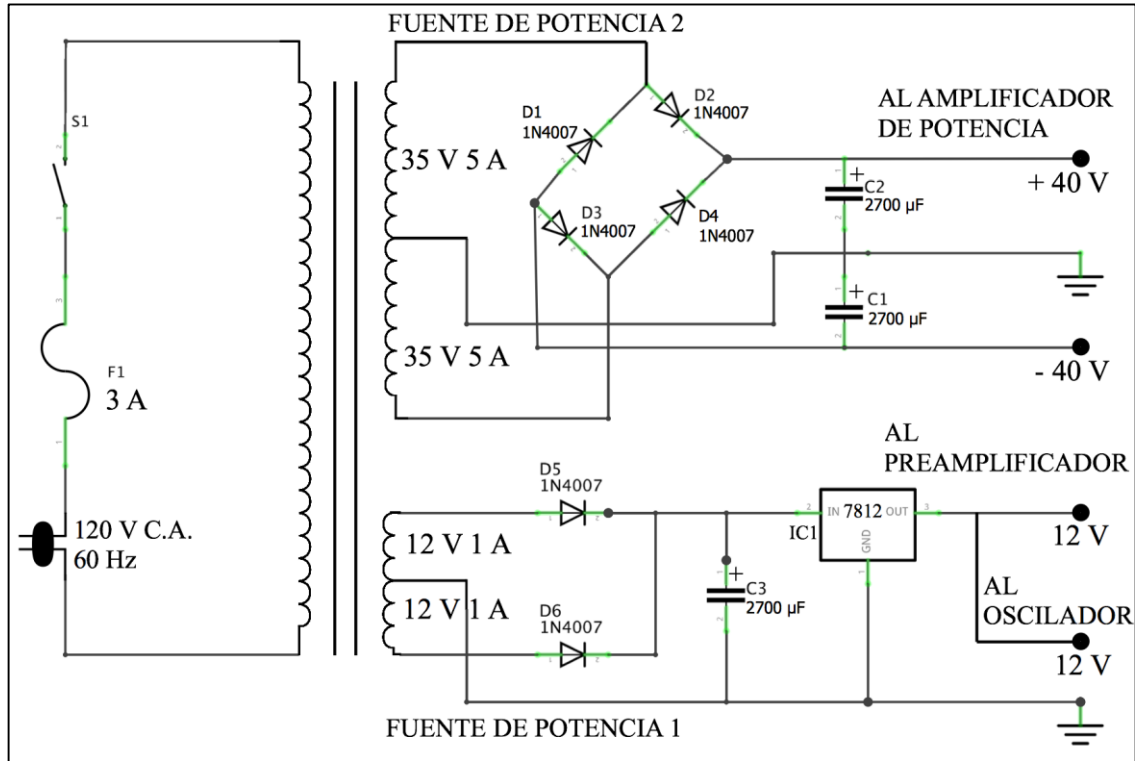


Figura 5.18. Diagrama del circuito electrónico de las 2 fuentes de potencia.

El transformador elevador de voltaje fue diseñado y construido en función del voltaje de salida del amplificador de potencia (40 V) y el voltaje requerido para desarrollar la ruptura dieléctrica en el CR-39, 3 kV. El primer paso para construir el transformador fue calcular la potencia que requiere este dispositivo eléctrico para elevar la tensión de 40 V a 3 kV, esta potencia depende de la carga que vaya a ser conectada al transformador. Como se mencionó, la cámara electroquímica es un condensador, por lo tanto, para calcular la carga de la cámara electroquímica es necesario calcular primero la capacitancia y la reactancia que se generan en este condensador. La capacitancia (C) en la cámara depende de las dimensiones del detector CR-39 y se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{K \epsilon_0 A}{d} \quad (3)$$

donde K representa la constante dieléctrica relativa del policarbonato (2.8), ϵ_0 es la constante de permitividad también del policarbonato (8.85×10^{-12} F/m), A es el área del CR-39 (0.0016 m^2) y d es el espesor del detector (0.001 m). El valor que se obtiene al resolver la ecuación (3) es 3.9648×10^{-11} F o 39 pF. La reactancia (X_C) se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

Resolviendo la ecuación (4) se obtiene una reactancia de 2007099.263 ohmios o 2 mega ohmios. Ahora es necesario calcular la corriente (I_C) que se forma en el condensador mediante la siguiente ecuación:

$$I_C = \frac{V_{RMS}}{X_C} \quad (5)$$

y para calcular el valor V_{RMS} se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{RMS} = \frac{V_{Pico-a-Pico}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

donde el valor de $V_{Pico-a-Pico}$ es 3 kV. Resolviendo la ecuación (5) y (6), se obtiene un valor de 0.001 amperios o 1000 μ A. Finalmente, la potencia eléctrica (P) simplemente se calcula multiplicando el voltaje del devanado secundario por la corriente: $P = (3000 \text{ V}) (0.001 \text{ A}) = 3 \text{ Watts}$. El siguiente paso fue calcular el número de vueltas de los devanados del transformador. Para construir este transformador se eligió un núcleo de hierro. Aunque la potencia del transformador es baja, se requiere una relación de vueltas considerable para elevar 40 V a 3 kV, por esta razón se eligió un área de sección transversal no muy pequeña para el núcleo. La sección transversal elegida fue 12.8 cm² (3.2 x 4 cm) o 1.984 in². Después se calculó el número de vueltas por voltio que tendrían los devanados con la siguiente ecuación:

$$\text{vuelta / voltio} = \frac{6.47}{\text{área transversal del núcleo (en pulgadas)}} \quad (7)$$

dónde 6.47 es una constante utilizada para la construcción de transformadores. Con esta información el número de vueltas para el devanado primario y el devanado secundario se calcula multiplicando el resultado obtenido en la ecuación (7) por la tensión requerida por los devanados primario y secundario:

$$\text{Número de vueltas del devanado primario} = 40 \text{ V} \times 3.261 = 130 \text{ vueltas}$$

$$\text{Número de vueltas del devanado secundario} = 3000 \text{ V} \times 3.261 = 9783 \text{ vueltas}$$

Por último, se eligieron los calibres del alambre de cobre para cada devanado. Este calibre se elige en base al amperaje que estos alambres transmitirán. Para el devanado secundario, como 0.001 amperios es una corriente muy baja, es posible utilizar un calibre de alambre muy delgado, en este caso se eligió el calibre AWG 40.

Ahora es necesario calcular la corriente que se transmitirá en el devanado primario. Como la potencia debe ser igual tanto para el embobinado primario como para el secundario, la corriente eléctrica se calcula dividiendo la potencia entre la tensión: $I = 3 \text{ W} / 40 \text{ V} = 0.075 \text{ A}$. En base a esta información, se eligió un calibre AWG 27 para construir el embobinado primario.

La figura 5.19 presenta un diagrama donde se muestra la conexión del devanado secundario del transformador a los electrodos de la cámara electroquímica y al divisor de voltaje, así como del divisor de voltaje al amplificador.

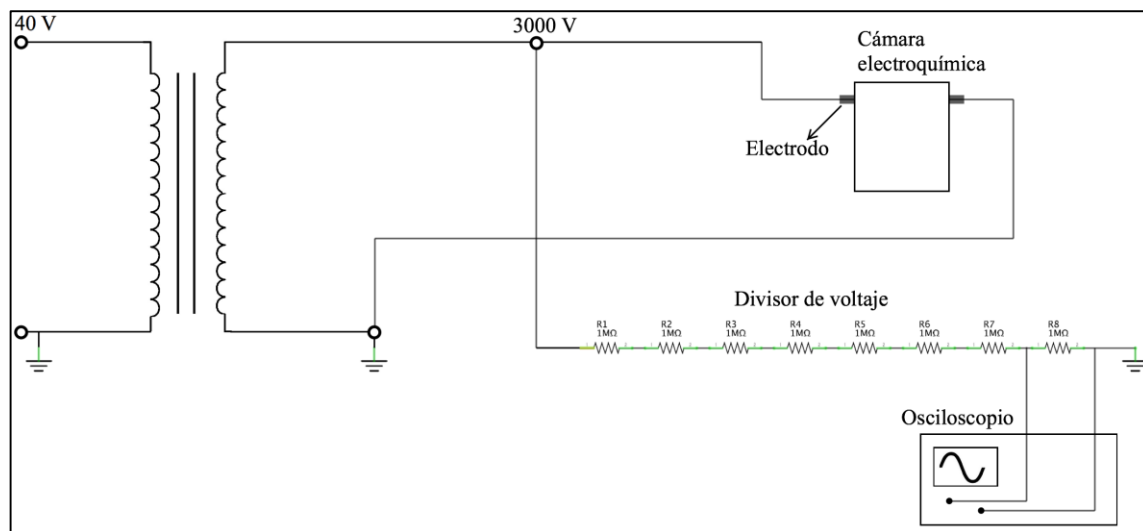


Figura 5.19. Diagrama de la conexión del transformador a la cámara electroquímica y al divisor de voltaje.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la fuente de alto voltaje y la estabilidad de la corriente eléctrica que suministraría a la cámara electroquímica, el equipo fue conectado a la cámara y se mantuvo en funcionamiento durante 5 horas continuas, por una semana. Todo este tiempo la fuente suministró una señal senoidal y una corriente estable de 3000 V a 2000 Hz. El transformado no presentó calentamiento, sólo un zumbido continuo.

5.3.3. Generación y caracterización de las arborescencias eléctricas.

Para generar las arborescencias eléctricas en el CR-39, un detector fue irradiado con la fuente de uranio durante 5 segundos, después fue grabado químicamente (bajo las condiciones mencionadas anteriormente). La figura 5.20 presenta 2 campos de los resultados obtenidos.

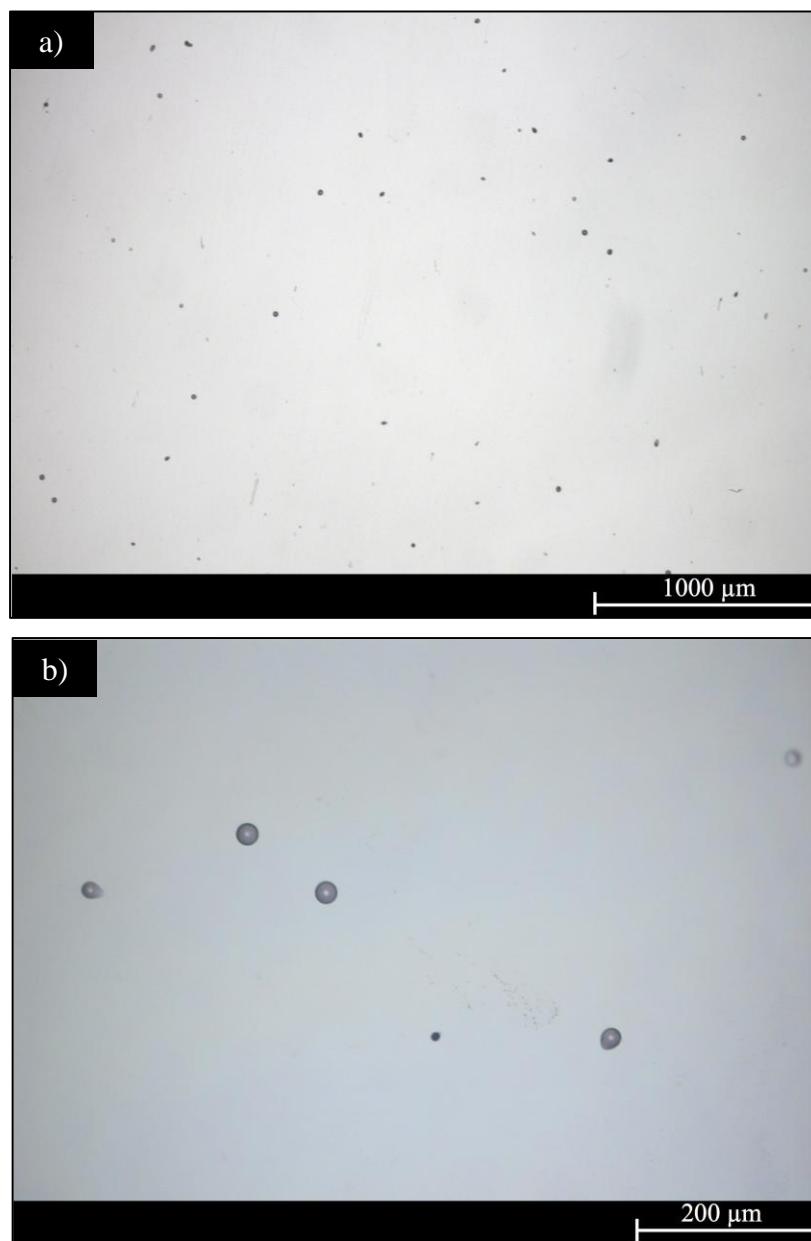


Figura 5.20. Trazas formadas en el CR-39 después de ser irradiado con la fuente de uranio durante 5 segundos; ampliación de: a) 50 aumentos, b) 200 aumentos.

Posteriormente, el policarbonato fue grabado electroquímicamente durante 5 horas continuas. Terminado el grabado electroquímico, el CR-39 fue retirado de la cámara y lavado con agua destilada, siguiendo el mismo protocolo utilizado en los lavados anteriores. Luego, el detector fue observado en el microscopio óptico Carl Zeiss y los resultados fotografiados. Después, el detector fue nuevamente grabado electroquímicamente durante otras 5 horas, lavado y observado en el microscopio óptico. Por último, el CR-39 fue grabado por otras 10 horas más. En total el detector fue grabado electroquímicamente un total de 20 horas.

Durante el grabado electroquímico el vibrador eléctrico fue encendido 20 minutos y después fue apagado 10 minutos. Luego se volvió a encender otros 20 minutos y así sucesivamente.

Después de comprobar en el microscopio óptico la producción de arborescencias eléctricas en el detector, las estructuras fueron caracterizadas mediante el cálculo de su dimensión de Hausdorff-Besicovitch. Para realizar este cálculo se utilizó nuevamente el programa informático MATLAB®, debido a que existen múltiples códigos en los foros de MathWorks® para calcular la dimensión fractal de Hausdorff de una estructura. Después de descargar uno de los múltiples códigos que existen [122], la estructura del código fue revisada y modificada para hacerla funcionar adecuadamente. Los pasos que realiza, en general, el programa para calcular la dimensión de Hausdorff son los siguientes:

1. Primero el usuario debe cargar la imagen original dentro del programa. Esta imagen debe encontrarse en el formato digital png (abreviatura en inglés de "*Portable Network Graphics*", Gráficos de Red Portátiles).
2. Después, el programa convierte la imagen original en una imagen a escala de grises.
3. Posteriormente, el programa identifica en la imagen los bordes de la figura mediante el algoritmo de Canny [123], luego genera una nueva imagen con los bordes que detectó, eliminando el área de la figura previa y eliminando el fondo de la imagen original.
4. El siguiente paso consiste en realizar el cálculo de la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de la figura reconstruida mediante la técnica denominada "Box counting" [124]. Para realizar este cálculo el programa primero cubre a la imagen con una malla cuadrada, identificando cada cuadrado con una letra n y otorgando a cada lado de un cuadrado un valor r . Luego, el programa contabiliza el número total de cuadrados que contienen alguna parte del perímetro de la figura e identifica ese número como nf . Después, el programa repite exactamente la misma operación pero con una malla con cuadrados más pequeños. El proceso se realiza nuevamente hasta que esta operación sea repetida un total de 7 veces. Después, el programa gráfica los resultados obtenidos, colocando en el eje de las abscisas el resultado del cálculo del logaritmo inverso del tamaño del lado de los cuadrados, es decir, $\ln(1/r)$ y en el eje de las ordenadas coloca el resultado del cálculo del logaritmo del número de cuadrados no vacías, es decir, $\ln(nf)$. Luego, el programa traza una línea recta de pendiente positiva que se ajusta a los datos de la gráfica mediante una función del tipo: $\ln nf = D * \ln (1/r) + C$. Posteriormente, el programa calcula el valor de la pendiente, el resultado de este cálculo representa el valor de la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de la figura.
5. Por último, el programa muestra en la pantalla el resultado obtenido.

Para comprobar que el código del programa funcionaran adecuadamente y el resultado entregado correspondiera a un valor real, se calculó la dimensión de una figura fractal cuyo valor fuera conocido con exactitud. Para esta comprobación se utilizó el fractal denominado triángulo de Sierpinski (figura 5.21), cuya dimensión fractal es de 1.58. Después de cargar una imagen del triángulo de Sierpinski y de ejecutar el programa se obtuvo un resultado de 1.54, es decir, una diferencia entre el valor real y el valor obtenido de sólo 0.04. Por lo tanto, el programa es confiable y es posible utilizarlo para caracterizar las arborescencias eléctricas.

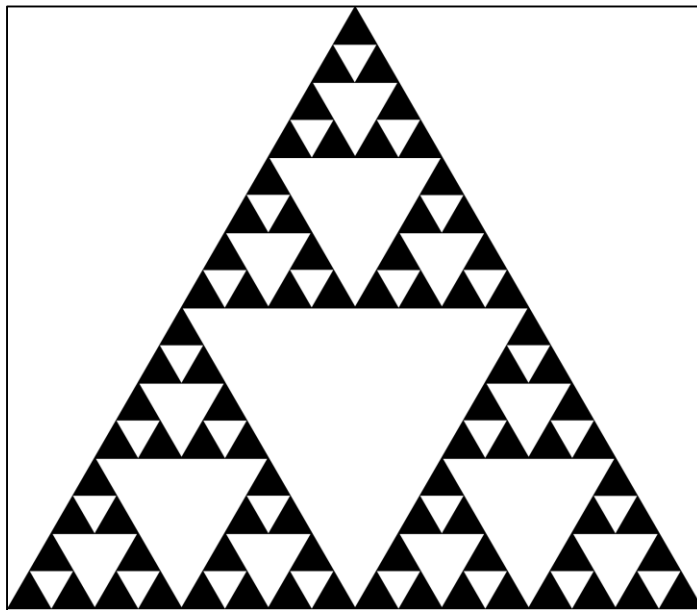


Figura 5.21. Triángulo de Sierpinski.

Los primeros intentos para calcular la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de las arborescencias mostraron una deficiencia en el programa no identificada previamente: para que el código pueda identificar correctamente los bordes de la figura mediante el algoritmo de Canny la imagen original debe ser muy nítida y las fotografías que genera la cámara del microscopio de las estructuras no son lo suficientemente nítidas. Para solucionar este inconveniente se decidió eliminar el fondo de las fotografías originales antes de procesarlas en MATLAB, de esta manera, todas las imperfecciones que presentaran las superficies de los detectores CR-39, así como las sombras que se producen al iluminar la muestra con el microscopio no serían identificadas erróneamente por el algoritmo de Canny.

Existen diversos programas informáticos de procesamiento de imágenes digitales que tienen la capacidad de desarrollar este procedimiento, no obstante, el programa en el que se obtuvieron los mejores resultados fue el editor de gráficos rasterizados conocido como Photoshop, desarrollado por la compañía Adobe Systems Incorporated.

Después de eliminar el fondo de las imágenes originales, el algoritmo de Canny pudo identificar correctamente los bordes de las arborescencias. La figura 5.22 presenta el resultado obtenido en MATLAB al identificar los bordes de una arborescencia en una imagen obtenida en el microscopio óptico y la figura 5.23 presenta el resultado obtenido al identificar los bordes de la misma arborescencia pero con el fondo de la imagen eliminado.

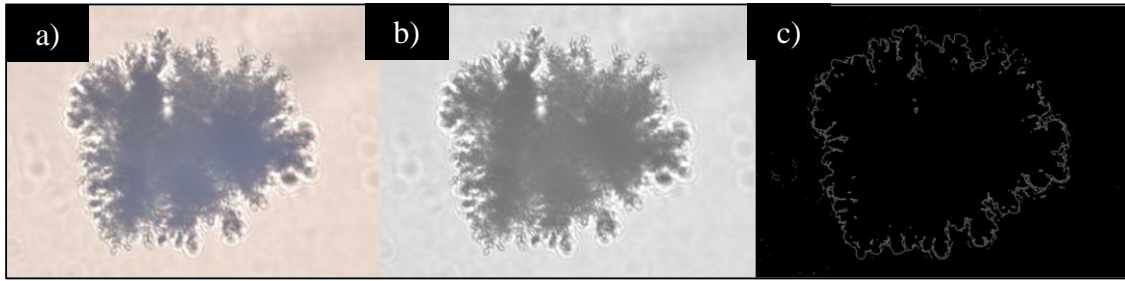


Figura 5.22. a) Imagen original, b) conversión de la imagen a escala de grises y c) bordes de la figura que el programa pudo identificar.

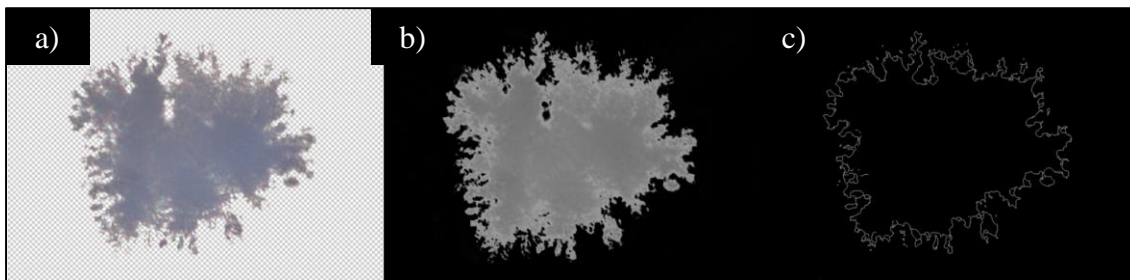


Figura 5.23. a) Imagen con el fondo eliminado, b) conversión de la imagen a escala de grises y c) bordes de la figura que el programa pudo identificar.

Al comparar los resultados obtenidos en los incisos c) de ambas figuras, se observa que el programa fue más preciso al reconstruir la arborescencia de la figura 5.23 con respecto a la arborescencia de la figura 5.22, por lo que las curvas de la segunda figura son más suaves con respecto a la primera. Este nivel de precisión es muy importante debido a que el resultado del cálculo de la dimensión de Hausdorff para ambas figuras fue diferente, a pesar de tratarse de la misma arborescencia. La dimensión para la figura 5.22 fue de 1.5493 mientras que para la figura 5.23 fue de 1.4275, lo que representa una diferencia considerable que no puede ser descartada. Para evitar variaciones en los resultados obtenidos, todas las imágenes fotografiadas en el microscopio fueron procesadas bajo estos mismos procedimientos.

Por último, para evaluar si el tamaño de la traza nuclear es un factor que influya en el tamaño del rompimiento dieléctrico que se produce en el material y de esta manera analizar si existe una manera de correlacionar el diámetro de la traza con la fractalidad de la arborescencia eléctrica, se seleccionaron, al azar, 7 trazas en un CR-39 después de haber sido irradiado con la fuente de uranio durante 5 segundos. Luego, se midieron los diámetros de estas 7 trazas y se identificó su posición exacta en la superficie del detector, de manera que pudieran ser observadas las arborescencias eléctricas que se formarían debajo de estas trazas. Para poder identificar esta posición, se colocó una cuadrícula milimétrica detrás del detector de manera que al seguir las líneas horizontales y verticales se pudiera localizar cualquier cuadrante en la superficie del CR-

39; para realizar esto, el eje de las abscisas de la cuadrícula fue identificada con un valor numérico y el eje de las ordenadas con una letra. Luego, se hicieron marcas en la superficie del CR-39 con una punta de diamante para poder colocar la cuadrícula sobre la superficie del detector siempre en la misma posición.

Después el CR-39 fue grabado electroquímicamente durante 20 horas y las arborescencias obtenidas fueron caracterizadas bajo las mismas condiciones. Por último, se comparó el valor del diámetro de las 7 trazas seleccionadas y la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de su correspondiente arborescencia eléctrica.

5.4. Resultados y discusión.

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de irradiar un detector CR-39 con la fuente de uranio durante 5 segundos y de grabarlo electroquímicamente durante 5, 10 y 20 horas.

La figura 5.24 presenta 2 campos observados en el CR-39 después de grabarlo electroquímicamente durante 5 horas. La ampliación en ambas imágenes es de 500 aumentos.

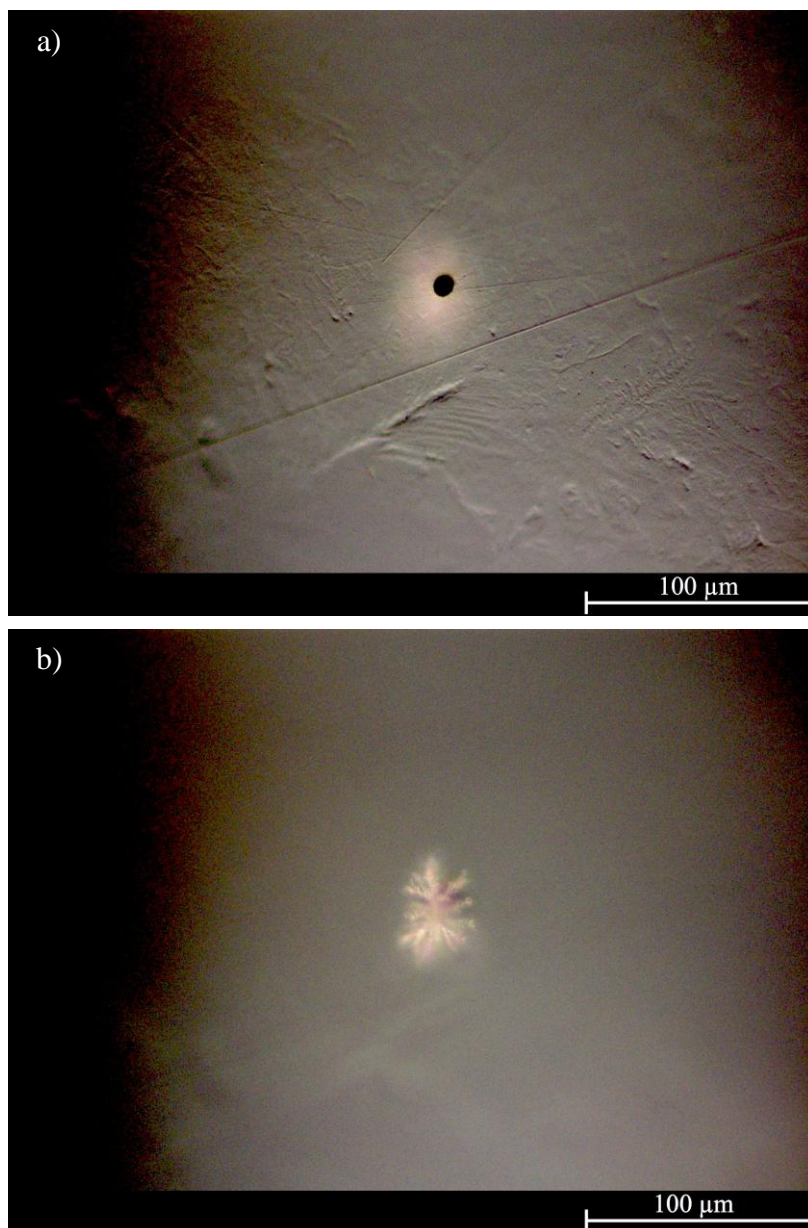


Figura 5.24. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 5 horas; a) traza y b) inicio del rompimiento dieléctrico de esta traza.

En la primera imagen de la figura 5.24, se observa una traza generada por una partícula α y la segunda imagen corresponde al rompimiento dieléctrico que comienza a ocurrir por debajo de esta traza. Como la traza se encuentra por encima del rompimiento dieléctrico es necesario enfocar correctamente el microscopio óptico para poder observar el inicio de la formación de la arborescencia, sin embargo, esto genera que la estructura pierda nitidez.

La figura 5.25 presenta 2 campos observados en el CR-39 después de grabarlo electroquímicamente durante 10 horas.

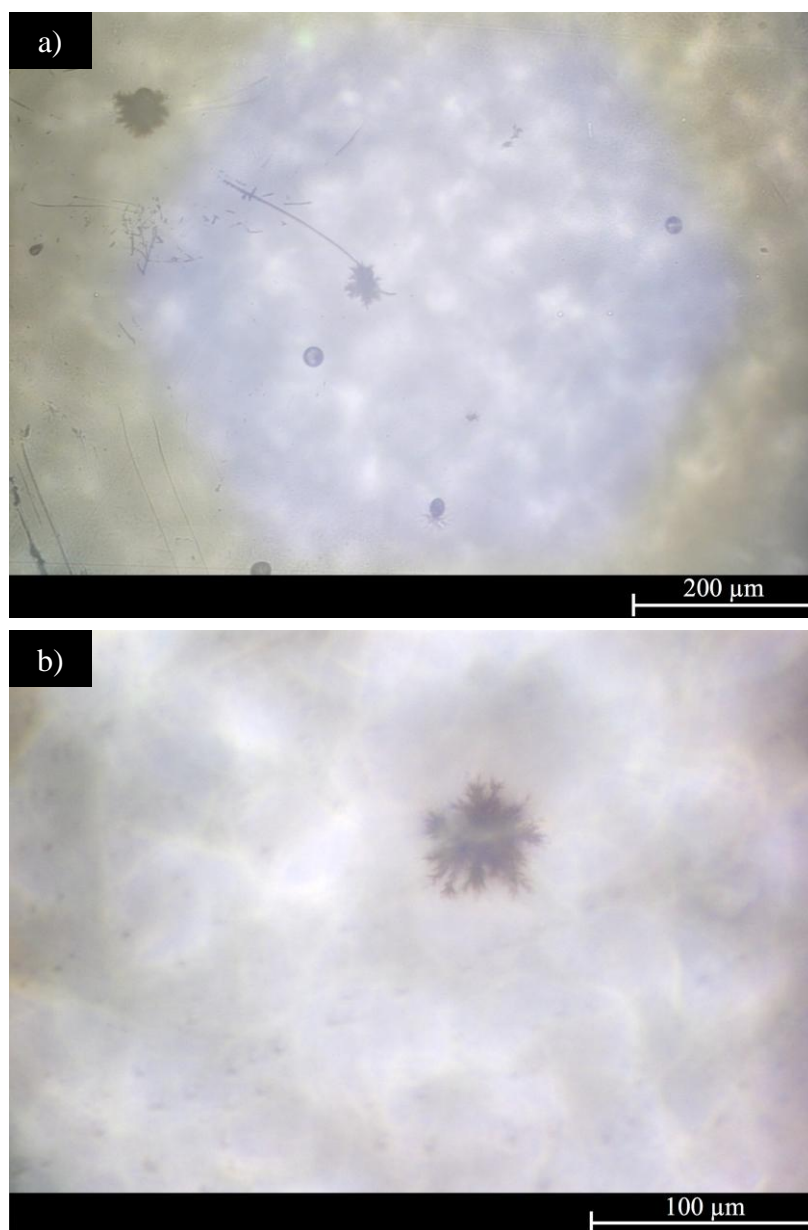


Figura 5.25. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 10 horas; ampliación de: a) 200 aumentos y b) 500 aumentos.

Las arborescencias eléctricas de la figura 5.25 son más grandes con respecto a la arborescencia de la figura 5.24, por lo que se puede apreciar que el rompimiento dieléctrico del policarbonato aumenta conforme se aumenta el tiempo de grabado electroquímico. De manera similar a la arborescencia presentada en la figura anterior, para poder observar las estructuras de la figura 5.25 fue necesario buscar el enfoque correcto en el microscopio óptico.

La figura 5.26 presenta 2 campos observados en el CR-39 después de grabarlo electroquímicamente durante 20 horas.

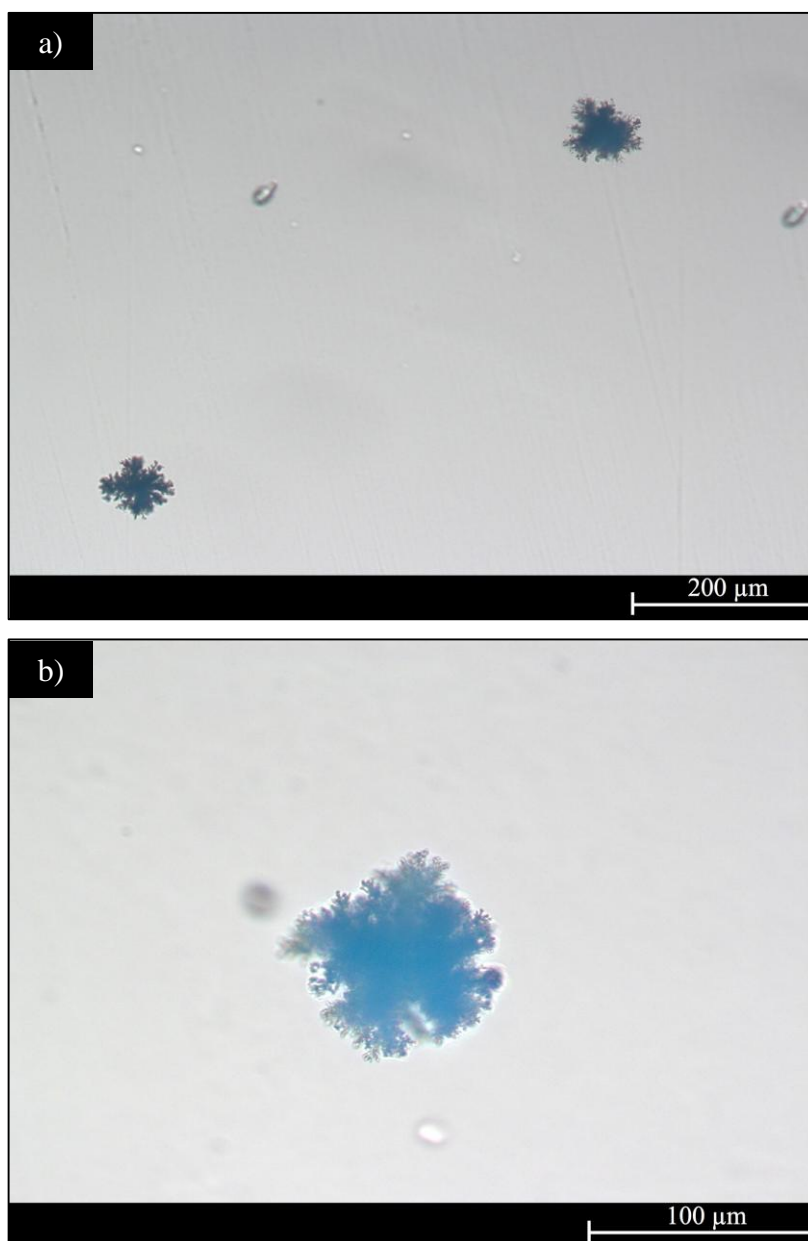


Figura 5.26. CR-39 observado en el microscopio después de ser grabado electroquímicamente durante 20 horas; ampliación de: a) 200 aumentos y b) 500 aumentos.

En las imágenes de la figura 5.26, se observa que después de 20 horas de grabado electroquímico las arborescencias eléctricas se han formado completamente, es decir, al enfocar con el microscopio óptico la superficie del CR-39, lo primero que se pudo observar fueron las arborescencias eléctricas formadas y no las trazas nucleares. A decir verdad, en la mayoría de los casos ya no fue posible observar las trazas y en otros casos fue muy complicado poder distinguir las múltiples ramificaciones que se formaron. 20 horas fue el tiempo necesario para poder generar, completamente, las arborescencias eléctricas en las trazas de los múltiples tamaños que produce el uranio en el detector CR-39.

Es evidente que si se desea hacer más grande el rompimiento dieléctrico sólo es necesario aumentar el tiempo de grabado electroquímico, sin embargo, para el objetivo de este trabajo (caracterizar las estructuras mediante el cálculo de su dimensión de Hausdorff) el tamaño obtenido fue suficiente. También fue posible observar algunas trazas que no presentaron rompimientos dieléctricos debajo de ellas, por lo que se infiere que algunas burbujas de aire se posicionaron entre el electrolito y la superficie del CR-39, por tanto, es necesario analizar la manera de desplazar las burbujas por la superficie del detector de una manera más eficiente, mediante el cambio de la posición de la cámara o aumentando el tiempo de encendido del vibrador eléctrico. También se observa la necesidad de producir las arborescencias eléctricas en un menor tiempo de grabado electroquímico, por lo que futuras investigaciones deben de enfocarse en aumentar el voltaje que suministra la fuente a 4000, 5000, 7000 o 10000 V.

Por otra parte, debido a que el rompimiento dieléctrico se genera a lo largo del espesor del CR-39 no es posible fotografiar, en una sola imagen, todas las ramificaciones que conforman a una arborescencia eléctrica. Esto se debe a que las ramificaciones se generan a diferentes profundidades del material, por lo que es necesario utilizar múltiples enfoques del microscopio para poder observar, nítidamente, todas las ramificaciones. En general, para poder capturar todas las ramificaciones de las arborescencias generadas después de 20 horas de grabado electroquímico, fue necesario realizar desde 2 hasta 4 enfoques, evidentemente, entre más grandes sean las arborescencias, más enfoques serán necesarios realizar para poder observar todas las ramificaciones de la estructura. Sin embargo, si el rompimiento dieléctrico es muy profundo, las ramificaciones que se encuentran en la parte superior del detector no permitirán observar las ramificaciones más profundas; no obstante, siempre será posible observar todas las que se encuentran fuera de la parte central del árbol. Es importante mencionar que, el enfoque utilizado para digitalizar las arborescencias que fueron posteriormente caracterizadas fue aquel que permitió registrar, lo más nítidamente posible, la mayor parte de sus ramificaciones, como por ejemplo, la imagen obtenida de la arborescencia mostrada en la figura 5.26 b).

La figura 5.27 presenta 4 campos fotografiados de una misma arborescencia eléctrica, en esta figura se pueden observar los diferentes enfoques que se realizaron para poder apreciar, nítidamente, todas las ramificaciones que conforman a la estructura. El primer enfoque está señalado con el número 1 y el último enfoque con el número 4.



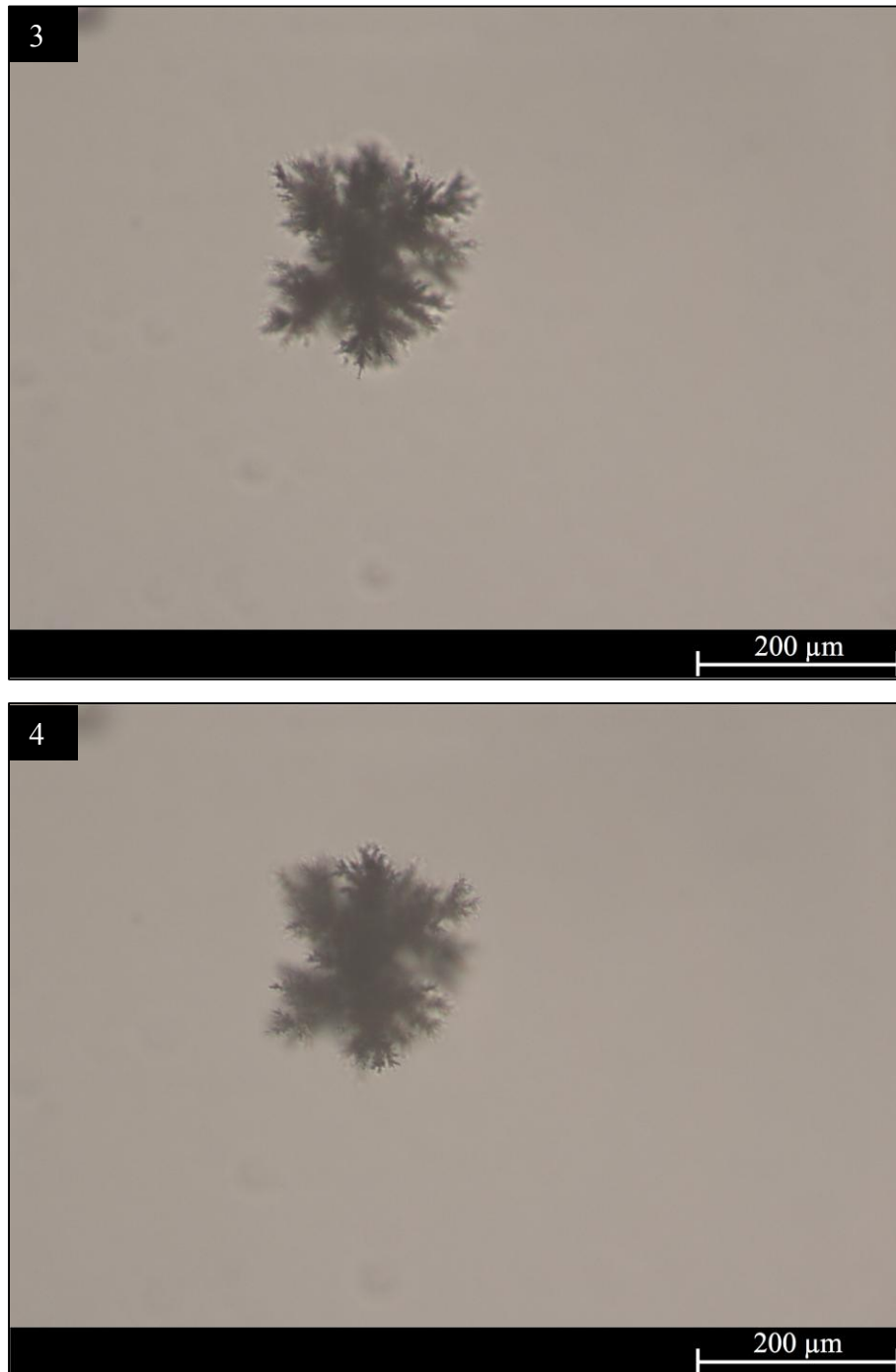


Figura 5.27. Número de campos que son necesarios fotografiar para poder observar nítidamente todas las ramificaciones que conforman una arborescencia eléctrica.

Por último, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la posible correlación entre el tamaño del diámetro de las trazas y la dimensión fractal de Hausdorff de las arborescencias eléctricas.

La tabla 5.1 presenta los resultados obtenidos después de comparar el valor del diámetro de las 7 trazas seleccionadas y el cálculo de la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de las arborescencias eléctricas que se formaron debajo de estas 7 trazas, después de haber grabado electroquímicamente el CR-39 durante 20 horas.

Tabla 5.1. Comparación entre el valor del diámetro de las 7 trazas seleccionadas y la dimensión de Hausdorff obtenida de las arborescencias eléctricas generadas.

Número de traza	Diámetro de la traza (μm)	Dimensión de Hausdorff-Besicovitch (N/A)
01	1.4275	8.13
02	1.4288	8.18
03	1.4388	8.62
04	1.4615	9.38
05	1.4855	9.42
06	1.5007	15.56
07	1.6036	18.32

Como se puede observar en la tabla 5.1, estos primeros resultados confirman la hipótesis propuesta: entre mayor es el diámetro de la traza, mayor será la dimensión de Hausdorff-Besicovitch de la arborescencia formada.

Una posible explicación de los resultados obtenidos es la siguiente: como se explicó anteriormente, un mayor diámetro de la traza representa una mayor altura del cono formado, es decir, la partícula ionizante penetró más profundamente la superficie del detector. Si la formación del cono se produce por efecto del ataque de la sustancia química y el espesor del material ha disminuido en esa zona, entonces se tiene que, a mayor diámetro de la traza menor será el espesor del material en esa zona. Cuando ambas superficies del policarbonato son sumergidas en las sustancia electrolíticas, el potencial eléctrico que se generará en la superficie del detector será mayor en todas aquellos espacios donde el espesor del material haya disminuido por que la corriente eléctrica siempre seguirá el camino que menor resistencia a su paso presente. De esta manera, entre mayor sea el diámetro de la traza, mayor será el potencial eléctrico y, por lo tanto, cuando la fuente de alto voltaje suministré la corriente eléctrica a la cámara electroquímica la energía atacará, preferentemente, las trazas de mayor diámetro.

Por otra parte, un mayor rompimiento dieléctrico significa que se han formado más canales de

degradación en el material, es decir, la rugosidad de la arborescencia será mayor y, como consecuencia, su dimensión fractal también será mayor. Esto se puede comprender si se recuerda una de las observaciones que hizo el matemático Mandelbrot al analizar los fractales: entre mayor sea la rugosidad de la estructura, mayor será su dimensión fractal.

En base a estos resultados se observa que existe cierta evidencia de que la energía de la partícula ionizante incidente puede influir en la formación de las arborescencias eléctricas. El siguiente paso para el desarrollo del método será irradiar detectores CR-39 con fuentes de diferentes energías con la finalidad de observar a que rango de valores de dimensión fractal de Hausdorff corresponde un determinado tipo de isótopo radiactivo. La única condición que se requiere para obtener resultados certeros será que las condiciones y tiempo del grabado químico y electroquímico sean las mismas para todos los experimentos.

"Solo hay dos errores que se cometen en el camino a la verdad: No empezar, y no llegar hasta el final".

Siddharta Gautama

CONCLUSIONES

Conclusiones del primer caso de estudio: Medición de la concentración de radón intramuros en los túneles de la pirámide de Cholula mediante la metodología de trazas nucleares.

1. La Gran Pirámide de Cholula es uno de los edificios prehispánicos más importantes de Mesoamérica y está constituido por al menos 8 etapas constructivas que fueron erigidas por diversas culturas, la última etapa consistió en la construcción de una gigantesca estructura de barro que cubrió a todas las etapas constructivas anteriores. A mediados del siglo XX, el arquitecto Ignacio Marquina excavó túneles con la finalidad de penetrar la pirámide y estudiar sus diferentes etapas constructivas, los diferentes proyectos de exploración mediante la construcción de túneles terminaron en 1971, generando como resultado cerca de 10 kilómetros de túneles que cruzan de forma sinuosa el interior de la pirámide. Dentro de estos túneles, existen espacios dónde no existe una correcta circulación de aire y, como consecuencia, tiende a concentrarse el Rn^{222} que emana del subsuelo.
2. Para medir los niveles de concentración de Rn^{222} que existen en algunos espacios dentro de los túneles, se colgaron 20 dispositivos medidores en los techos de diferentes cavidades que no presentan una adecuada circulación de aire. Estos dispositivos fueron desarrollados por el PAD-IFUNAM en base a los principios de la Metodología de Trazas Nucleares, utilizando como detector el policarbonato CR-39. Los resultados obtenidos, después de 3 meses de medición, mostraron que todos los dispositivos colocados registraron niveles de concentración de Rn^{222} por encima de lo límites recomendados por la US-EPA ($148 \text{ Bq} / \text{m}^3$), de manera que todas las personas que pasen muchas horas trabajando dentro de estos espacios estarán sometidas a dosis innecesarias de radiación por radón. El dispositivo que registró la mayor concentración de radón registró un valor de $1197 \pm 76 \text{ Bq} / \text{m}^3$, mientras que el dispositivo que registró la menor concentración registró un valor de $717 \pm 48 \text{ Bq} / \text{m}^3$.
3. Por lo tanto se recomienda mitigar el radón en todos los espacios que no presenten una adecuada ventilación, especialmente cuando sea necesario que arqueólogos, antropólogos y demás trabajadores pasen mucho tiempo trabajando en estos lugares. Esta mitigación puede realizarse haciendo uso de ventiladores que permitan la correcta circulación del aire o con mitigadores especiales como el desarrollado por el PAD-IFUNAM.

Conclusiones del segundo caso de estudio: Simulaciones computacionales de la expansión y depósito de dosis de energía de partículas alfa emitidas por radón-222 contenido en el agua de un manantial mediante el programa Geant4.

1. El Rn^{222} contenido en agua representa un doble riesgo para la población, por un lado puede generar cáncer de pulmón a quien inhale altas concentraciones y por otro puede generar cáncer de estomago a quien lo ingiera, por esta razón es importante medir su concentración en pozos y manantiales cuya agua es utilizada con distintos objetivos. Sin embargo, si sus concentraciones se encuentran por debajo de los límites recomendados por la OMS (100 Bq / L), el agua puede ser utilizada con fines de Hormesis. Adicionalmente, es recomendable realizar análisis para comprender cómo se expande el radón en los alrededores del lugar (tanto como gas como en forma de partículas), sólo de esta manera podrá descartarse un riesgo por radiación ionizante para las personas que nadan o habitan cerca del manantial. El manantial donde fue realizado el análisis esta localizado en el estado de Puebla y tiene la apariencia de una alberca común debido a que fueron construidas estructuras de concreto a sus alrededores, sus dimensiones son de 10 x 15 m y tiene una profundidad de 5 m. El agua con radón ingresa al lugar mediante unas diminutas cavidades que se localizan en el fondo del manantial y su caudal presenta un flujo de 300 L / s. La concentración de radón obtenida en el agua después de realizar 4 mediciones, en diferentes periodos de tiempo, con un sistema de medición dinámico fue de 70 Bq / L y un análisis del espectro de energía de la radiación gamma emitida por el agua revelo que el líquido no contiene isótopos de uranio, por lo tanto, el agua del manantial no representa un riesgo para la población.
2. En este trabajo se desarrollaron dos simulaciones computacionales en Geant4 para comprender cómo se expande la radiación por partículas α que emite el radón contenido en el agua y en qué zona depositan su dosis de energía. La primera simulación demostró que las partículas α son mitigadas por completo a una altura de 1 metro, sin embargo, estas partículas al interactuar con el aire generan una considerable cantidad de partículas secundarias (fotones, electrones, etc.). La producción de partículas secundarias alcanza su punto máximo, aproximadamente, a los 7 metros de altura y a partir de esta altura, las partículas secundarias comenzarán a ser mitigadas lentamente. Además, sólo después de los 20 metros de altura, la mayor concentración de partículas secundarias se expandirá más allá del área superficial que tiene el manantial (10 x 15 m).
3. La segunda simulación demostró que la dosis de energía que la radiación por partículas deposita en el aire se produce a los 7.5 metros de altura y dentro de un área de 10 x 5 m, es decir, dentro del área superficial que tiene el manantial. En base al resultado obtenido en las dos simulaciones y observando que no existe ninguna edificación arriba del manantial, se puede concluir que no existe riesgo por radiación de partículas para las personas que nadan o trabajan en el manantial o que viven cerca de este lugar.

Conclusiones del tercer caso de estudio: Análisis de la concentración de neutrones secundarios en un cuarto de tratamientos médicos donde opera un acelerador lineal (LINAC) mediante la Metodología de Trazas Nucleares.

1. Los aceleradores lineales (LINAC), utilizados para aplicaciones médicas, producen fotoneutrones cuando se utilizan energías por encima de los 10 MeV. A su vez, estos fotoneutrones al interactuar con los materiales que se encuentran en las proximidades de la fuente de radiación generan, por efecto de dispersión inelástica, neutrones secundarios. Por tanto, es importante realizar proyectos que permitan comprender el comportamiento y los efectos nocivos que producen tanto los fotoneutrones como los neutrones secundarios y buscar métodos para su mitigación, con el objetivo de proteger a los pacientes, técnicos y médicos que trabajan dentro de estas habitaciones. En este trabajo se colocaron estratégicamente 16 dispositivos detectores dentro de un cuarto donde opera un LINAC, con la finalidad de conocer como es la concentración de neutrones secundarios dentro del cuarto, qué factores influyen en la manera en cómo se distribuirán los neutrones secundarios dentro del cuarto y, además, observar si existe un posible riesgo radiológico para con las personas que permanecen mucho tiempo dentro del lugar. El dispositivo fue desarrollado por el PAD-IFUNAM en base a los principios de la Metodología de Trazas Nucleares y utilizando como detector el CR-39. Presenta dos áreas sensibles a la radiación (superficie frontal y posterior), por lo que permite medir no solo los neutrones secundarios que impactan por el frente del dispositivo, sino también los neutrones que se generan en las paredes y superficies donde es colocado. El dispositivo fue calibrado con una fuente de Am-Be²¹⁴ obteniendo una eficiencia de $4.91 \times 10^{-5} \pm 2.53 \times 10^{-6}$ trazas / neutrón.
2. Los resultados obtenidos, después de 1 mes de medición, mostraron una elevada concentración de neutrones secundarios en los 16 dispositivos colocados, tanto en su superficie frontal como en su superficie posterior. La mayor concentración de neutrones, en ambas superficies, se localizo en el cabezal del equipo y en la zona dónde los pacientes colocan su cabeza y la menor concentración en la pared que se encuentra en la parte posterior del cabezal del LINAC. Estos resultados también mostraron que la forma en como se distribuirán los neutrones secundarios dentro de una habitación dependerá de las dimensiones y de la geometría de la habitación, de los materiales de los que estén fabricadas las paredes y techos de la habitación, de la posición del acelerador lineal con respecto a las paredes, de todos los muebles y materiales que se encuentren dentro de la habitación, de la posición del LINAC y de la camilla cuando se suministren los tratamientos y del número de tratamientos que se proporcionen y de las energías que se utilicen en cada tratamiento.
3. En base a estos resultados se recomienda mitigar los neutrones secundarios colocando en las paredes de la habitación un material que los absorba, como por ejemplo parafina, con la finalidad de evitar que los pacientes, médicos y técnicos sean innecesariamente irradiados por estas partículas. Además, se recomienda realizar mediciones similares en todas las salas de tratamiento equipadas con un LINAC y mitigarlos si se obtienen resultados similares a los de este trabajo.

Conclusiones del cuarto caso de estudio: Análisis de una posible correlación entre las trazas formadas en detectores CR-39 y las arborescencias eléctricas que se generan en el policarbonato mediante el grabado electroquímico.

1. El grabado electroquímico permite generar rupturas dieléctricas en los materiales que son sometidos a un estrés eléctrico, previo a esta ruptura, en el material se formaran unas estructuras denominadas arborescencias eléctricas. En materiales utilizados para detectar partículas ionizantes, las arborescencias iniciarán su formación exactamente en dónde terminó el daño por radiación, es decir, en la punta del cono. Las arborescencias permiten que el daño por radiación se haga más grande y, por tanto, más visible y cuantificable, esto permite que se pueda reducir el tiempo de exposición del detector a la fuente de radiación. Sin embargo, debido a los múltiples canales de degradación que se formarán debajo de la traza, las arborescencias evitarán que puedan observarse las trazas, perdiendo la posibilidad de conocer el isótopo radiactivo o energía de la partícula que incidió en el detector. Para generar arborescencias en detectores de trazas, es necesario realizar un procedimiento denominado grabado electroquímico, este procedimiento requiere de dos equipos para su realización: una cámara electroquímica y una fuente de alto voltaje de CA. La cámara electroquímica utilizada en este trabajo fue diseñada y manufacturada de polietileno TIVAR® 1000 y los cauchos para sellar la cámara fueron construidos de EPDM. La fuente de alto voltaje de CA construida esta conformada por un oscilador de señal senoidal basado en el temporizador 555 en modo astable, un pre-amplificador, un amplificador de potencia, dos fuentes de potencia (una regulada y una simétrica) y un transformador elevador de voltaje con una relación de vueltas de 1:75. Adicionalmente, se utilizó un divisor de voltaje y un osciloscopio para medir el voltaje, la señal y la frecuencia a la salida del devanado secundario del transformador. El polietileno y el EPDM resistieron el alto voltaje de la corriente eléctrica y la abrasión de la sustancia alcalina utilizada y la fuente de alto voltaje suministró una corriente eléctrica estable y continua.
2. Fue posible obtener arborescencias eléctricas en detectores CR-39 después de haber sido irradiados con una fuente de uranio durante 5 segundos. Para obtener estas estructuras al detector se le suministró una corriente con señal senoidal de 3000 voltios a 2000 Hz, utilizando como electrolitos una solución de NaOH 6.25 molar y agua saturada con sal. Los experimentos mostraron que los rompimientos dieléctricos comienzan a generarse, en algunas trazas, después de 5 horas de grabado electroquímico y se forman completamente, en la mayoría de las trazas, después de 20 horas de grabado. Es posible que algunas burbujas de aire impidieran la formación de arborescencias en toda la superficie del CR-39.
3. Fue posible medir la dimensión fractal de Hausdorff-Besicovitch de las arborescencias eléctricas eliminando el fondo de las imágenes obtenidas en el microscopio óptico con el programa Photoshop y mediante un código, basado en el método de "*Box counting*", descargado para el programa MATLAB. Por último, para comprobar si es posible correlacionar el diámetro de la traza y la fractalidad de la arborescencia, un detector CR-39 fue irradiado durante 5 segundos con la fuente de uranio, luego se seleccionaron 7 trazas al azar y después el detector fue grabado electroquímicamente durante 20 horas. Los resultados

mostraron que entre mayor fue el diámetro de la traza, mayor fue la dimensión de Hausdorff-Besicovitch obtenida, por lo tanto, estos primeros resultados muestran que es posible desarrollar un método de detección de partículas ionizantes a partir de la caracterización de las arborescencias eléctricas.

*"Si estas deprimido, estás viviendo en el pasado. Si estás ansioso, estás viviendo en el futuro.
Si estás en paz, estás viviendo en el presente".*

Lao-Tse

REFERENCIAS

1. McDougall, I., Brown, F., H., Fleagle, J., G. (2005). Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia. *Nature*, 433(7027), 733-736.
2. Heier, K., S. (1965). Radioactive Elements in the Continental Crust. *Nature*, 208, 479-480.
3. Anderson, W., Turner, R., C. (1956). Radon Content of the Atmosphere. *Nature*, 178, 203-204.
4. Weaver, C., M. (2013). Potassium and Health. *Advances in Nutrition*, 4(3), 368S-377S. DOI: 10.3945/an.112.003533.
5. Shahbazi-Gahrouei, D., Gholami, M., Setayandeh, S. (2013). A review on natural background radiation. *Adv. Biomed. Res.*, 2(65), DOI: 10.4103/2277-9175.115821.
6. Dubois, G., Bossew, P., Tollefsen, T., De Cort, M. (2010). First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. *J. Environ. Radioact.*, 101(10), 786-798. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.03.007.
7. McConnell, M., *et al.* (1993). Complete observations of solar flare gamma-rays. *Adv. Space Res.*, 13(9), 245-248.
8. Ghosh, D., Deb, A., Sengupta, R. (2009). Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *J. Appl. Geophys.*, 69(2), 67-81.
9. O'Sullivan, D. (1999). Cosmic rays and dosimetry at aviation altitudes. *Radiat. Meas.*, 31(1-6), 579-584.
10. Rossnerova, A., *et al.* (2017). Adaptation of the human population to the environment: Current knowledge, clues from Czech cytogenetic and "omics" biomonitoring studies and possible mechanisms. *Mutat. Res-Rev. Mutat.*, 773, 188-203.
11. Calabrese, E., J. (2015). Hormesis: principles and applications. *Homeopathy*, 104(2), 69-82. DOI: 10.1016/j.homp.2015.02.007.
12. Sanders, C., L. (2017). *Radiobiology and Radiation Hormesis, new evidence and its implications for medicine and society*. Cham, Zug: Springer.
13. Mattson, M., P., Calabrese, E., J. (2010). *Hormesis, a revolution in biology, toxicology and medicine*. New York, NY: Humana Press.
14. Durante, M. (2009). *Biological Effects of Densely Ionizing Radiation*. World Congress on

- Medical Physics and Biomedical Engineering, 25(3), 255-257.
15. Mundy, J.N., Rothman, S.J. (1983). 1.2. Production of Radioisotopes. *Methods in Experimental Physics*, 21, 11-26.
 16. Wiedemann, H., Brandt, D., Perevedentsev, E., A., Kurokawa, S. (2002). *Physics and Technology of Linear Accelerator Systems*. Singapore: World Scientific.
 17. Mitchell, E., L., Furey, P. (2011). Prevention of radiation injury from medical imaging. *J. Vasc. Surg.*, 53(1), 22S-27S.
 18. Elgazzar, A.H., Kazem, N. (2006). *Biological Effects of Ionizing Radiation. The Pathophysiologic Basis of Nuclear Medicine*. Heidelberg, Berlin: Springer.
 19. ICRP Activities. (2018, January). Retrieved from <http://www.icrp.org/page.asp?id=3>
 20. Annals of the ICRP. (2018, January). Retrieved from <http://www.icrp.org/publications.asp>
 21. Cothorn, C., R., Smith, J., E. (1987). *Environmental Radon*. New York, NY: Springer Science + Business Media, LLC.
 22. Health Risk of Radon. (2018, February 23). Retrieved from <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>
 23. Radon in Drinking Water. (2012, March 06). Retrieved from <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/index-9.html>
 24. A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. (2017, April 19). Retrieved from <https://www.epa.gov/radon/citizens-guide-radon-guide-protecting-yourself-and-your-family-radon>
 25. Find a Radon Test Kit or Measurement and Mitigation Professional. (2018, March 22). Retrieved from <https://www.epa.gov/radon/find-radon-test-kit-or-measurement-and-mitigation-professional>
 26. EPA Map of Radon Zones. (2017, April 19). Retrieved from <https://www.epa.gov/radon/epa-map-radon-zones>
 27. Scislewski, A., Zuddas, P. (2013). Risk Evaluation of Uranium Mining: A New Kinetic Approach. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 778-781.
 28. Parker, L., Craft, A.W. (1996). Radon and childhood cancers. *Eur. J. Cancer*, 32(2), 201-204.
 29. Clark, R.E.H., Reiter, D.H. (2004). *Nuclear Fusion Research, Understanding plasma-surface interactions*. Heidelberg, Berlin: Springer.

30. Aasen, A. Olsson, P. (2009). Nuclear Reactor, Nuclear Fusion and Fusion Engineering. New York, NY: Nova Science Publishers, Inc.
31. Kicking Out Toxic Chemicals. (2018, January). Retrieved from <https://environmentaldefence.ca/campaign/toxics/>
32. Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health. (2007, March 21). Retrieved from https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_007.pdf
33. Introduction to the Electromagnetic Spectrum. (2010). Retrieved from https://science.nasa.gov/ems/01_intro
34. Udías A. (1997). Fundamentos de geofísica. Madrid: Alianza Universidad Textos.
35. Feischer, R.L., Price, P.B., Walker, R.M. (1975). Nuclear tracks in solids, principles and applications. Berkeley, California: University of California Press.
36. Espinosa, G., Griffith, R., V., Tommasino, L., Durrani, S.A., Benton, E.V. (1984). Nuclear tracks and radiation measurements. Oxford: Pergamon Press.
37. Feischer, R.L. (1991). Tracks to Innovation, Nuclear Tracks in Science and Technology. New York, NY: Springer.
38. Espinosa, G., Amero, C., Gammage, R., B. (2002). Measurements of alpha particle energy using nuclear track in solids methodology. Radiat. Prot. Dosim., 101(1-4), 561-564.
39. Tommasino L. (1970). Electrochemical etching of damage track detectors by H.V. pulse and sinusoidal wave forms. CNEN Report RT/PROT., 71, 1.
40. Tommasino L., Armellini, G. (1973). A new etching technique for damage track detectors. Radiat. Eff., 20, 253-255.
41. Tommasino, L., Zapparoli, G., Griffith, R.V. (1980). Electrochemical etching—I: Mechanisms. Nucl. Tracks, 4(3), 191-196.
42. Espinosa, G., Golzarri, J., I., Tommasino, L., Raponi, F. (1982). Electrochemical Etching Registration and Track Formation Time. Proc. 11th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track Detectors, 7-12, 241-244.
43. Kenawy, M.A., El-Fiki, M.A., Eissa, H.M., Sharaf, M.A., Gomma, M.A. (1984). Electrochemical etching in polycarbonate neutron track detectors. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 8(1-4), 621-625.
44. Vahlstrom, W. (1972). Investigation of Insulation Deterioration in 15 KV and 22 KV Polyethylene Cables Removed from Service. IEEE Transactions on Power Apparatus and

- Systems, PAS-91(3), 1023-1035.
45. Lawson, J. H., Vahlstrom, W. (1973). Investigation of Insulation Deterioration in 15 KV and 22 KV Polyethylene Cables Removed from Service - Part II. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-92(2), 824-835.
 46. Hozumi, N., Okamoto, T., Fukagawa, H. (1988). TEM observation of electrical tree paths and micro-structures in polyethylene. Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 331-334. DOI: 10.1109/ELINSL.1988.13934
 47. Moreau, E., Mayoux, C., Laurent, C., Boudet, A. (1993). The structural characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens. IEEE Trans. Electr. Insul., 28, 54-64.
 48. Weigand, F., Spiess, H., W., Blumich, B., Salge, G., Moller, K. (1997). Nuclear magnetic resonance imaging of electrical trees in PE. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 4, 280-285.
 49. Dissado, L., A. (2002). Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 9, 483-497.
 50. Dodd, S., J. (2003). A deterministic model for the growth of non-conducting electrical tree structures. J. Phys. D: Appl. Phys., 36, 129-141.
 51. Kida, S., Murakami, Y., Nagao, M., Hozumi, N. (2011). Visualization of electrical trees by 80 MHz-band pulsed ultrasound. IEEJ Trans. Fundamentals and Materials, 131, 792-796.
 52. Schurch, R., Rowland, S., M., Starborg, T. (2013). Serial Block-Face Scanning Electron Microscopy for Three- Dimensional Imaging of Electrical Trees. Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 271-274. DOI: 10.1109/ICSD.2013.6619714
 53. Schurch, R., *et al.* (2014). Imaging and Analysis Techniques for Electrical Trees using X-ray Computed Tomography. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 21, 53-63.
 54. Vaughan, A., S., Hosier, I., L., Dodd, S., J., Sutton, S., J. (2006). On the structure and chemistry of electrical trees in polyethylene. J. Phys D: Appl. Phys., 39, 962-977.
 55. Du, B., X., Ma, Z., L., Gao, Y., Han, T. (2011). Effect of ambient temperature on electrical treeing characteristics in silicone rubber. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 18, 401-407.
 56. Wu, J., Iizuka, T., Monden, K., Tanaka, T. (2012). Characteristics of initial trees of 30 to 60 um length in epoxy/silica nanocomposite. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 19, 312-320.

57. Tommasino, L., Zapparoli, G., Griffith, R.V., Mattei, A. (1980). Electrochemical etching—II: Methods, apparatus and results. *Nucl. Tracks*, 4(3), 197-201.
58. Espinosa, G., Fernández, F., Castaño, V.M. (1992). Design and construction of an electrochemical etching power supply. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 20(2), 383-387.
59. Solis, F., R., Uruela, M., G., Plunket, P., Cruz, M. (2007). *La Gran Pirámide de Cholula*. Distrito Federal: Grupo Azabache.
60. Humboldt, A. (1995). *Vistas de las cordilleras y monumentos de los pueblos indígenas de América*. Distrito Federal: Siglo XXI Editores.
61. Reyes, C. (2000). *El altepetl, origen y desarrollo. Construcción de la identidad regional náhuatl*. Michoacán: El Colegio de Michoacán.
62. Merlo, E. (2012, May). Cholula, la Roma de Mesoamérica. *Arqueología Mexicana*, 115, 24-30.
63. Jiménez, W. (1942). *El Enigma de los Olmecas*. Distrito Federal: Cuadernos Americanos.
64. Childs, E. (2001). *Teotihuacan ceramics, chronology and cultural trends*. Distrito Federal: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
65. Uruela, M. G., de Guevara, L., Robles, M., A. (2012, May). Los túneles de la Gran Pirámide de Cholula, Puebla. *Arqueología Mexicana*, 115, 36-41.
66. Matos, E. (2012, May). Excavaciones en la Gran Pirámide de Cholula (1931-1970). *Arqueología Mexicana*, 115, 31-35.
67. Dyck, W., Jonasson, I.R. (2000). Chapter 11 Radon. *Handbook of Exploration Geochemistry*, 7, 353-394.
68. Al-Zoughool, M., Krewski, D. (2009). Health effects of radon: a review of the literature. *Int. J. Radiat. Biol.*, 85(1), 57-69.
69. Cavallo, A., Gadsby, K., Reddy, T.A. (1996). Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses. *Environ. Int.*, 22(1), 1073-1078.
70. Groves-Kirkby, C.J., *et al.* (2006). Radon mitigation in domestic properties and its health implications—a comparison between during-construction and post-construction radon reduction. *Environ. Int.*, 32(4), 453-443.
71. Espinosa, G., Gammage, R.B. (1993). Measurements methodology for indoor radon using passive track detectors. *Appl. Radiat. Isot.*, 4, 719-723.
72. Espinosa, G., Manzanilla, L., Gammage, R.B. (1997). Radon Concentration in the Pyramid

- of the Sun at Teotihuacan. *Radiat. Meas.* 28, 667-670.
73. Cruz, M. (2002). Levantamiento topográfico de los túneles de la Gran Pirámide de Cholula. Proyecto de Integración Arqueológico, Histórico y Urbano de Cholula. Puebla, Puebla: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
74. Gammage, R.B., Espinosa, G. (1997). Digital Imaging System for Track Measurements. *Radiat. Meas.* 28(1-6), 835-838.
75. How much water is there on, in, and above the Earth? (2016, December, 02). Retrieved from <https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>
76. Auvinen, A. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: a case-cohort study in Finland. *Int. J. Cancer*, 114(1), 109-113.
77. Agostinelli, S., *et-al.* (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A.*, 506(3), 250-303.
78. Amako, K., *et-al.* (2006). Geant4 and its validation. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 150, 44-49.
79. Allison, J., *et-al.* (2016). Recent developments in Geant4. *Nucl. Instrum. Meth. A.*, 835, 186-225.
80. Antcheva, I., *et-al.* (2009). ROOT — A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Comput. Phys. Commun.*, 180(12), 2499-2512.
81. AlphaGUARD, Portable Radon Monitor, user manual. (2012, August). Retrieved from https://www.bertin-instruments.com/wp-content/uploads/secured-file/ALGU_Manual_2012-08_E.pdf.
82. AQUAKIT, Fast method for the determination of Radon in water. (2015, November). Retrieved from <https://www.bertin-instruments.com/wp-content/uploads/2016/06/Data-Sheet-AquaKIT.pdf>.
83. Fulbright, H.W. (1979). Ionization chambers. *Nucl. Instrum. Meth.*, 162(1-3), 21-28.
84. Gilmore, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. Warrington, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
85. Sudprasert, W., Navasumrit, P., Ruchirawat, M. (2006). Effects of low-dose gamma radiation on DNA damage, chromosomal aberration and expression of repair genes in human blood cells. *Int. J. Hyg. Envir. Heal.*, 209(6), 503-511.
86. Dubrova, Y., E., *et al.* (2002). Elevated Minisatellite Mutation Rate in the Post-Chernobyl Families from Ukraine. *Am. J. Hum. Genet.*, 71(4), 801-809.

87. Ma, A., Awotwi-Pratt, J., Alghamdi, A., Alfuraih, A., Spyrou, N.M. (2008). Monte Carlo study of photoneutron production in the Varian Clinac 2100C linac. *J. Radioanal. Nucl. Ch.* 276(1), 119–123.
88. Al-Ghamdi, H., Fazal-ur-Rehman, Al-Jarallah, M.I., Maalej, N. (2008). Photoneutron intensity variation with field size around radiotherapy linear accelerator 18-MeV X-ray beam. *Radiat. Meas.*, 43(1), S495–S499.
89. Bedogni, R. *et al.* (2013). Calibration of PADC-based neutron area dosimeters in the neutron field produced in the treatment room of a medical LINAC. *Radiat. Meas.*, 50, 78–81. DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.04.009
90. Huang, W.L., Li, Q.F., Lin, Y.Z., Su, Q., Luo, Y.S. (2006). Measurements of photoneutrons produced by a 15 MeV electron linac for radiography applications. *Nucl. Instrum. Meth. B*, 251(2), 361-366. DOI: 10.1016/j.nimb.2006.07.018
91. Naseri, A., Mesbahi, A. (2010). A review on photoneutrons characteristics in radiation therapy with high-energy photon beams. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 15(5), 138-144.
92. Followill, D.S., Nusslin, F., Orton, C.G. (2007) IMRT should not be administered at photon energies greater than 10 MV. *Med. Phys.*, 34(6), 1877-1879. DOI: 10.1118/1.2734751
93. Hall, E.J., Wu, C.S. (2003). Radiation-induced second cancer: the impact of 3D-CRT and IMRT. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 56(1), 83–88.
94. Imae, T., Kanaya, T., Furusaka, M., Torikai, N. (2011). *Neutrons in Soft Matter*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
95. Karzmark, C.J., Morton, R.J. (1989). *A Primer on Theory and Operation of Linear Accelerators in Radiation Therapy*. Madison, Wisconsin: Medical Physics Publishing Corporation.
96. Valkovic, V. (2016). *14 MeV Neutrons, Physics and Applications*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
97. Khan, F.M. (2003). *The Physics of Radiation Therapy*. Philadelphia, Pennsylvania: Lippincott Williams and Wilkins.
98. Szydłowski, A. *et al.* (2013). Application of nuclear track detectors as sensors for photoneutrons generated by medical accelerators. *Radiat. Meas.*, 50, 74–77.
99. Inside a Varian linear accelerator. (2018, January). Retrieved from <https://www.varian.com/fi/about-varian/newsroom/image-gallery/inside-varian-linear-accelerator>
100. Yu., P., Popov, W. I. Furman. (2000). *Low Energy Neutrons and their Interaction with*

- Nuclei and Matter 1. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
101. Hall, E., J., Martin, G., S., Amols, H., Hei, T., K. (1995). Photoneutrons from medical linear accelerators—Radiobiological measurements and risk estimates. *International journal of radiation oncology, biology, physics*, 33(1), 225-230.
 102. W. Gonzales. *et al.* (2014). PADC Detected External Neutron Field by Nuclear Tracks at RFX-mod. *J. Nucl. Phy. Mat. Rad. A.*, 2(1). DOI: 10.15415/jnp.2014.21006
 103. Espinosa G., Golzarri, J.I., Arredondo-Raya, R., Cruz-Galindo, S., Bohus-Sajo, L. (2015). Neutron detection of the Triga Mark III reactor, using Nuclear Track Methodology. *AIP Conference Proceedings*, 1671(1). DOI: 10.1063/1.4927182
 104. Barile, D.T., Booz, J. Harrison, K. G. (1987). *Etched Track Neutron Dosimetry*. Ashford: Nuclear Technology Publishing.
 105. Castillo, F. (2013). Fast neutron dosimetry using CR-39 track detectors with polyethylene as radiator. *Radiat. Meas.*, 50, 71-73. DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.09.007
 106. Ipe, N.E., Liu, J.C., Buddemeier, B.R., Miles, C.J., Yoder, R.C. (1992). A Comparison of the Neutron Response of CR-39 Made by Different Manufacturers. *Radiat. Prot. Dosim.*, 44 (1-4), 317–321.
 107. Khan, A.H., Khan, A.N. (1980). A new plastic track detector for fast neutron dosimetry. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 31(12), 775–779. DOI: 10.1016/0020-708X(80)90068-X
 108. Gomory, R. (2010, November 18). Benoît Mandelbrot (1924–2010). Retrieved from <https://www.nature.com/articles/468378a>
 109. J., Mishra, S.N., Mishra. (2007). Chapter 1 Introduction to fractals. *Mathematics in Science and Engineering*, 209, 23-47.
 110. J., Mishra, S.N., Mishra. (2007). Chapter 7 Fractal dimension. *Mathematics in Science and Engineering*, 209, 167-218.
 111. Espinosa, G., Castaño, V.M. (1990). Fractals analysis of SSNTD detectors and materials. *Radiation Protection Dosimetry*. 34, 29-30.
 112. Castaño, V.M., Espinosa, G. (1991). High voltage effects in SSNTD materials and its consequences on the fractality. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 19, 149-150.
 113. Peitgen, H., Jürgens, H., Saupe, D. (2004). *Chaos and Fractals, New Frontiers of Science*. New York, NY: Springer-Verlag New York, Inc.
 114. Mandelbrot, B. (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science New Series*, 156(3775), 636-638.

115. Mandelbrot B. (2009). Los objetos fractales; forma, azar y dimensión. Barcelona: Tusquets Editores.
116. Mandelbrot B. (2009). La geometría fractal de la naturaleza. Barcelona: Tusquets Editores.
117. TASTRAK PADC. (2015). Retrieved from <http://www.tasl.co.uk/plastics.php>
118. Cuvier, A., *et al.* (2015). Uranium decay daughters from isolated mines: Accumulation and sources. *J. Environ. Radioactiv.*, 149, 110-120.
119. TASTRAK performance sheet Alpha-particles. (2015). Retrieved from http://www.tasl.co.uk/brochures/TASTRAK_specification_sheetAlphaParticles.pdf
120. TIVAR® 1000, Product data sheet. (2011). Retrieved from https://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/PE/TIVAR_1000_PDS_E_31052011.pdf
121. OVERVIEW ON EPDM RUBBER. (2013, August). Retrieved from <http://www.ramcharan.org/pdf/August%202013%20%20Overview%20on%20EPDM%20Rubber.pdf>
122. Acosta, A. (2013, December 18). Hausdorff (Box-Counting) Fractal Dimension. Retrieved from: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30329-hausdorff--box-counting--fractal-dimension>
123. Green, B. (2002). Canny Edge Detection Tutorial. (2002). Retrieved from http://dasl.unlv.edu/daslDrexel/alumni/bGreen/www.pages.drexel.edu/_weg22/can_tut.html
124. Foroutan-pour, K., Dutilleul, P., Smith, D.L. (1999). Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation. *Apple. Math. Comput.*, 105(2-3), 195-210.

BIBLIOGRAFÍA

1. Espinosa, G. (1994). Trazas Nucleares en Sólidos. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Ferrer, A. (2015). Física Nuclear y de Partículas [Kobo Version]. Retrieved from <http://www.gandhi.com.mx>.
3. Brosed, A. (2011). Fundamentos de Física Médica, Volumen 1: Medida de la radiación [PDF Version]. Retrieved from <http://sefm.es>
4. Bushong, S., C. (2010). Manual de Radiología para Técnicos. Barcelona, España: ELSEVIER.
5. Herbert, F. (2004). Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Tsoulfanidis N. (2015). Measurement and detection of radiation. Florida: CRC press Taylor & Francis group.
7. Knoll G. (2010). Radiation detection and measurement. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
8. Turner, J. (2007). Atoms, Radiation and Radiation Protection. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

"Cuando la mente está completamente silenciosa, tanto en los niveles superficiales como en los profundos; lo desconocido, lo inconmensurable puede revelarse".

Jiddu Krishnamurti

ANEXO I

CÓDIGO DESARROLLADO EN EL PROGRAMA GEANT4 PARA SIMULAR LA EXPANSIÓN DE PARTÍCULAS ALFA

Para compilar y ejecutar el siguiente código, es necesario tener instalado Linux, C++ y CMake.

```
#ifndef G4MULTITHREADED
#include "G4MTRunManager.hh"
#else
#include "G4RunManager.hh"
#endif
#include "G4UImanager.hh"
#include "Randomize.hh"
#include "DetectorConstruction.hh"
#include "PhysicsList.hh"
#include "ActionInitialization.hh"
#include "G4ScoringManager.hh"
#ifdef G4VIS_USE
#include "G4VisExecutive.hh"
#endif
#ifdef G4UI_USE
#include "G4UIExecutive.hh"
#endif
int main(int argc,char** argv) {

    G4int myseed = G4UImanager::ConvertToInt(argv[2]);
    G4Random::setTheEngine(new CLHEP::RanecuEngine);
    G4Random::setTheSeed(myseed);

#ifdef G4MULTITHREADED
    G4MTRunManager* runManager = new G4MTRunManager;
```

```
G4int nThreads = G4Threading::G4GetNumberOfCores();
runManager->SetNumberOfThreads(nThreads);
#else
G4RunManager* runManager = new G4RunManager;
#endif

G4ScoringManager * scManager = G4ScoringManager::GetScoringManager();
scManager->SetVerboseLevel(1);

DetectorConstruction* det = new DetectorConstruction;
runManager->SetUserInitialization(det);

PhysicsList* phys = new PhysicsList;
runManager->SetUserInitialization(phys);

runManager->SetUserInitialization(new ActionInitialization(det, phys));

G4UImanager* UI = G4UImanager::GetUIpointer();

if (argc!=1) // batch mode
{
    G4String command = "/control/execute ";
    G4String fileName = argv[1];
    UI->ApplyCommand(command+fileName);
}
else //define visualization and UI terminal for interactive mode
{
#ifdef G4VIS_USE
    G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;
    visManager->Initialize();
#endif
#ifdef G4UI_USE
    G4UIExecutive * ui = new G4UIExecutive(argc,argv);
    ui->SessionStart();
#endif
}
```

```
        delete ui;
    #endif
    #ifdef G4VIS_USE
        delete visManager;
    #endif
    }

    delete runManager;

    return 0;
}
```


ANEXO II

CÓDIGO DESARROLLADO EN EL PROGRAMA GEANT4 PARA SIMULAR EL DEPÓSITO DE DOSIS DE ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS ALFA EN EL AIRE

Para compilar y ejecutar el siguiente código, es necesario tener instalado Linux, C++ y CMake.

```
#ifdef G4MULTITHREADED
#include "G4MTRunManager.hh"
#else
#include "G4RunManager.hh"
#endif
#include "G4UImanager.hh"
#include "Randomize.hh"
#include "DetectorConstruction.hh"
#include "PhysicsList.hh"
#include "ActionInitialization.hh"
#include "G4ScoringManager.hh"
#ifdef G4VIS_USE
#include "G4VisExecutive.hh"
#endif
#ifdef G4UI_USE
#include "G4UIExecutive.hh"
#endif

int main(int argc, char** argv) {

/* G4int myseed = G4UImanager::ConvertToInt(argv[2]);
   G4Random::setTheEngine(new CLHEP::RanecuEngine);
   G4Random::setTheSeed(myseed);*/

#ifdef G4MULTITHREADED
   G4MTRunManager* runManager = new G4MTRunManager;
```

```
G4int nThreads = G4Threading::G4GetNumberOfCores();
runManager->SetNumberOfThreads(nThreads);
G4cout << "##### " << G4Threading::G4GetNumberOfCores()
        << " ####" << G4endl;

#else
  G4RunManager* runManager = new G4RunManager;
#endif

G4ScoringManager * scManager = G4ScoringManager::GetScoringManager();
scManager->SetVerboseLevel(1);

DetectorConstruction* det = new DetectorConstruction;
runManager->SetUserInitialization(det);

PhysicsList* phys = new PhysicsList;
runManager->SetUserInitialization(phys);

runManager->SetUserInitialization(new ActionInitialization(det, phys));

G4UImanager* UI = G4UImanager::GetUIpointer();

if (argc!=1) // batch mode
{
  G4String command = "/control/execute ";
  G4String fileName = argv[1];
  UI->ApplyCommand(command+fileName);
}
else //define visualization and UI terminal for interactive mode
{
#ifdef G4VIS_USE
  G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;
  visManager->Initialize();
#endif
#endif
```

```
#ifdef G4UI_USE
    G4UIExecutive * ui = new G4UIExecutive(argc,argv);
    ui->SessionStart();
    delete ui;
#endif

#ifdef G4VIS_USE
    delete visManager;
#endif
}

delete runManager;

return 0;
}
```


ANEXO III

CÓDIGO DESARROLLADA EN EL PROGRAMA MATLAB PARA GRAFICAR LAS INTERACCIONES QUE SE PRODUJERON ENTRE EL DETECTOR CR-39 Y LOS PROTONES DE RETROCESO

```
% Superficies de la forma:  $z=\exp[-(ax)^2-(ay)^2]$ 
```

```
datos=importdata('DatosLINAC.txt');  
h=datos(1:16,1);  
k=datos(1:16,2);  
I=datos(1:16,3);
```

```
[x,y]=meshgrid(-100:0.3:800);  
lx=length(x);  
ly=length(y);
```

% En la ecuación $z=\exp[-(ax)^2-(ay)^2]$, a debe ser igual a 0.0715 para que la curva de nivel que corresponde a $z=1/100$ (muy cercana a cero) tenga un radio de 30.

```
f=0.0715; % a=0.0715
```

```
r_cuad=900; % Proporciona un radio de 30 para
```

```
for i=1:lx
```

```
    for j=1:ly
```

```
        if (((x(i,j)-h(1))^2)+((y(i,j)-k(1))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(1)*exp(-((f*(x(i,j)-h(1)))^2)-((f*(y(i,j)-k(1))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(2))^2)+((y(i,j)-k(2))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(2)*exp(-((f*(x(i,j)-h(2)))^2)-((f*(y(i,j)-k(2))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(3))^2)+((y(i,j)-k(3))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(3)*exp(-((f*(x(i,j)-h(3)))^2)-((f*(y(i,j)-k(3))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(4))^2)+((y(i,j)-k(4))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(4)*exp(-((f*(x(i,j)-h(4)))^2)-((f*(y(i,j)-k(4))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(5))^2)+((y(i,j)-k(5))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(5)*exp(-((f*(x(i,j)-h(5)))^2)-((f*(y(i,j)-k(5))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(6))^2)+((y(i,j)-k(6))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(6)*exp(-((f*(x(i,j)-h(6)))^2)-((f*(y(i,j)-k(6))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(7))^2)+((y(i,j)-k(7))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(7)*exp(-((f*(x(i,j)-h(7)))^2)-((f*(y(i,j)-k(7))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(8))^2)+((y(i,j)-k(8))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(8)*exp(-((f*(x(i,j)-h(8)))^2)-((f*(y(i,j)-k(8))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(9))^2)+((y(i,j)-k(9))^2))<=r_cuad  
            z(i,j)=I(9)*exp(-((f*(x(i,j)-h(9)))^2)-((f*(y(i,j)-k(9))))^2));  
        elseif (((x(i,j)-h(10))^2)+((y(i,j)-k(10))^2))<=r_cuad
```

```

    z(i,j)=I(10)*exp(-((f*(x(i,j)-h(10)))^2)-((f*(y(i,j)-k(10)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(11))^2)+((y(i,j)-k(11))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(11)*exp(-((f*(x(i,j)-h(11)))^2)-((f*(y(i,j)-k(11)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(12))^2)+((y(i,j)-k(12))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(12)*exp(-((f*(x(i,j)-h(12)))^2)-((f*(y(i,j)-k(12)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(13))^2)+((y(i,j)-k(13))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(13)*exp(-((f*(x(i,j)-h(13)))^2)-((f*(y(i,j)-k(13)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(14))^2)+((y(i,j)-k(14))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(14)*exp(-((f*(x(i,j)-h(14)))^2)-((f*(y(i,j)-k(14)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(15))^2)+((y(i,j)-k(15))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(15)*exp(-((f*(x(i,j)-h(15)))^2)-((f*(y(i,j)-k(15)))^2));
elseif (((x(i,j)-h(16))^2)+((y(i,j)-k(16))^2))<=r_cuad
    z(i,j)=I(16)*exp(-((f*(x(i,j)-h(16)))^2)-((f*(y(i,j)-k(16)))^2));
else
    z(i,j)=0;
end
end
end
end

mesh(x,y,z);
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');

```

ANEXO IV

CÓDIGO DESCARGADO PARA EL PROGRAMA MATLAB PARA CALCULAR LA DIMENSIÓN DE HAUSDORFF-BESICOVITCH DE UNA ESTRUCTURA FRACTAL

```
function [ A ] = hausDim ( i )

clear
clc
table =[,2];

% cargar la imagen original y convertirla a escala de grises

p = imread('ESTRUCTURA FRACTAL.png');
p = rgb2gray(p);

figure(1)
imshow(p)

% detectar el borde de la imagen 'p' usando el algoritmo de Canny, esto entrega el borde como
'e2', bw = im2bw(p, graythresh(p));

e = edge(double(p));
fi = imfill(p, 'holes');
op = imerode(fi, strel('disk',4));
e2 = edge(double(op));
figure(2)
imshow(e2)

% una vez que tengamos e2, configure una cuadrícula de bloques en toda la imagen y escanee
cada bloque para ver si el borde ocupa alguno de los bloques. Si un bloque está ocupado,
márquelo y grábelo en boxCount: almacene tanto el tamaño de los bloques (numBlocks) como
el de los recuadros ocupados (boxCount) en la tabla ()

Nx = size(e2,1);
Ny = size(e2,2);

for numBlocks = 1:25

    sizeBlocks_x = floor(Nx./numBlocks);
    sizeBlocks_y = floor(Ny./numBlocks);
```

```

flag = zeros(numBlocks,numBlocks);
for i = 1:numBlocks
    for j = 1:numBlocks
        xStart = (i-1)*sizeBlocks_x + 1;
        xEnd   = i*sizeBlocks_x;

        yStart = (j-1)*sizeBlocks_y + 1;
        yEnd   = j*sizeBlocks_y;

        block = e2(xStart:xEnd, yStart:yEnd);

        flag(i,j) = any(block(:)); % marcar esto si CUALQUIER parte del bloque es
verdadero
    end
end
boxCount = nnz(flag);
table(numBlocks,1) = numBlocks;
table(numBlocks,2) = boxCount;
end

% de la tabla anterior de puntos discretos, tome una línea de mejor ajuste y trace los datos (ro)
y la línea de mejor ajuste (r-)

x = table(:,1); % x es numBlocks
y = table(:,2); % y es boxCount

p = polyfit(x,y,1);
BestFit = polyval(p,x);

figure(3)
hold on
grid on
plot(x,y, 'ko','LineWidth',1)
plot(x,BestFit, 'k-', 'LineWidth',2)
xlabel('Number of blocks, N','FontSize',12)
ylabel('Box Count, N(s)','FontSize',12)

% calcule la dimensión de Hausdorff-Besicovitch

x2 = log(x);
y2 = log(y);

p2 = polyfit(x2,y2,1);
BestFit2 = polyval(p2,x2);

```

```
figure(4)
hold on
grid on
plot(x2,y2, 'bo','LineWidth',1)
plot(x2,BestFit2, 'b-','LineWidth',2)
xlabel('Number of blocks, log N','FontSize',12)
ylabel('Box Count, log N(s) ', 'FontSize',12)

HausdorffDimension = p2(:,1)

end
```

