



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

### **CARRERA DE BIOFÍSICA**

#### **“ESTUDIO DE TRAZAS NUCLEARES DE RADIONÚCLIDOS ALFA PRESENTES EN EL AMBIENTE USANDO DETECTORES DE POLICARBONATO CR-39”**

#### **Trabajo de Titulación**

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar el grado académico de:

### **BIOFÍSICA**

**AUTORA:** ANA ALEJANDRA CANTOS OLMEDO

**DIRECTORA:** Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDÓNEZ

Riobamba – Ecuador

2021

**© 2021, Ana Alejandra Cantos Olmedo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Ana Alejandra Cantos Olmedo, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 18 de marzo de 2021

**Ana Alejandra Cantos Olmedo**

**C.I. 180491454-5**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA DE BIOFÍSICA**

El Tribunal de Trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación; Tipo: Trabajo Experimental: **“ESTUDIO DE TRAZAS NUCLEARES DE RADIONÚCLIDOS ALFA PRESENTES EN EL AMBIENTE USANDO DETECTORES DE POLICARBONATO CR-39”**, realizado por la señorita ANA ALEJANDRA CANTOS OLMEDO, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Richard Willians Pachacama Choca <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-03-18
Dra. Jheny Del Carmen Orbe Ordóñez <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	_____	2021-03-18
Dra. Quím. Magdy Mileni Echeverría Guadalupe <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-03-18

## **DEDICATORIA**

A mis padres Gerardo y Ana y a mis hermanos Santiago y Fernando.

*Ana.*

## AGRADECIMIENTO

Me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mi directora del Proyecto de Titulación, el Dra. Jhenny Orbe, por sugerir este proyecto, su valiosa orientación y aliento durante el desarrollo del mismo. A la Biof. Gabriela Ureña, técnica del laboratorio de Técnicas Nucleares por su ayuda y atención en las distintas fases del proyecto.

Gracias también al grupo de investigación GIDAC-ESPOCH, quien me facilitó las muestras, equipos y materiales apropiados para la realización de la investigación.

A mis padres Gerardo y Ana quienes me alentaron a completar este trabajo ya que sin su sacrificio y amor no podría cumplir mi meta; a mis hermanos Santiago y Fernando, quienes creen siempre en mí y nunca me fallan impulsándome a mejorar y a mi abuelita por su apoyo incondicional.

Y a mis amigos por siempre estar dispuestos a ayudarme en todo lo que necesite.

A todos muchas gracias por ser parte de esto.

*Ana.*

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

U-238	Uranio 238
Th-232	Torio 232
K-40	Potasio 40
Cs-137	Cesio 137
Rb-87	Rubidio 87
Ra-226	Radio 226
Rn-222	Radón 222
Rn-220	Torón 220
Po-218	Polonio 218
Po-214	Polonio 214
DTNS	Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos
US EPA	United States Environmental Protection Agency
OMS	Organization Mundial de la Salud
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency
ARPACAL	Agenzia Regionale Protezione Ambientale Calabria
SCAN	Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares
IARC	Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer
CR-39	Columbia Resin #39
LET	Transferencia Lineal de Energía
NaOH	Hidróxido de Sodio

KOH	Hidróxido de Potasio
Bq	Bequerelio
pCi	PicoCurie
nm	Nanómetros
$\mu\text{m}$	Micrómetros
mm	Milímetros
d	Días
min	Minutos
kg	Kilogramo
Mev	Megaelectronvoltio
Z	Carga eléctrica de la partícula incidente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
V <sub>t</sub>	Tasa de grabado de la traza
V <sub>b</sub>	Tasa de grabado de las regiones no dañadas
$\eta$	Valor de eficiencia
C <sub>Rn</sub>	Concentración de Rn-222
$\rho$	Densidad de trazas
C <sub>f</sub>	Factor de calibración
t	Tiempo de exposición
N	Número total de trazas.
n	Número de campos de visión.
A	Área de campo de visión
FOV	Field of Vision (campo de visió)



$E_c$	Exposición de la concentración de Rn-222
$E_s$	Exhalación superficial de Rn-222
$E_m$	Exhalación másica de Rn-222
$V$	Volumen neto
$S$	Área superficial
$\lambda$	Constante de decaimiento del Rn-222
$m$	Masa de la muestra

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1 Radiación Ionizante .....	3
1.1.1 Fuentes naturales.....	3
1.1.2 Fuentes artificiales.....	3
1.1.3 Tipos de desintegraciones radiactivas .....	4
1.1.3.1 Desintegración alfa.....	5
1.1.3.2 Desintegración beta .....	5
1.1.3.3 Desintegración gamma .....	5
1.2 Series radioactivas.....	5
1.2.1 Series del uranio-238 .....	6
1.2.1.1 Radio.....	6
1.2.1.2 Radón.....	7
1.2.1.3 Progenie del radón.....	7
1.2.2 Series del uranio-235 .....	10
1.2.3 Series del torio-232.....	11
1.3 Detectores de radiación ionizante .....	12
1.3.1 Detectores activos .....	13
1.3.2 Detectores pasivos .....	13
1.4 Detector de trazas CR-39.....	13
1.4.1 Composición química.....	14
1.4.2 Mecanismos de formación de la traza nuclear.....	16
1.4.3 Metodología y geometría de grabado de la traza nuclear .....	20

1.4.4	<i>Evaluación de la concentración y exhalación de radón utilizando CR-39</i> .....	24
-------	--	----

## **CAPÍTULO II**

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	27
2.1	<b>Medición de radón indoor con cámaras estándar</b> .....	27
2.1.1	<i>Procedimiento Experimental</i> .....	29
2.2	<b>Evaluación de la tasa de exhalación de las muestras de alimentos y materiales</b>	29
2.2.1	<i>Preparación de las muestras</i> .....	29
2.2.2	<i>Procedimiento experimental</i> .....	31
2.3	<b>Baño químico de los detectores CR-39</b> .....	33
2.4	<b>Lectura de trazas</b> .....	34

## **CAPITULO III**

3.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	36
3.1	<b>Identificación y análisis de trazas nucleares</b> .....	36
3.2	<b>Concentración de gas radón indoor</b> .....	39
3.3	<b>Tasas de exhalación másica y superficial de radón</b> .....	40
3.3.1	<i>Tasa de exhalación másica de radón</i> .....	42
3.3.2	<i>Tasa de exhalación superficial de radón</i> .....	43

	<b>CONCLUSIONES</b> .....	44
--	---------------------------	----

	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	45
--	------------------------------	----

## **BIBLIOGRAFÍA**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Emisiones de energía (MeV) de la serie de desintegración Rn-222. ....	9
<b>Tabla 2-1:</b> Alcance de partículas alfa. ....	9
<b>Tabla 3-1:</b> Emisiones de energía (MeV) de la serie de desintegración Rn-220. ....	12
<b>Tabla 4-1:</b> Detectores Activos para medición de radón intramuros. ....	13
<b>Tabla 5-1:</b> Alcance en detector CR-39 del radón y sus productos. ....	17
<b>Tabla 6-1:</b> Coeficientes de calibración para detector CR-39. ....	25
<b>Tabla 1-2:</b> Información de colocación de detectores CR-39 para mediciones indoor en el laboratorio de Técnicas Nucleares y Búnker. ....	28
<b>Tabla 2-2:</b> Tiempo de exposición de los detectores CR-39 para mediciones indoor (Proyecto RadioLab). ....	28
<b>Tabla 3-2:</b> Tiempos de exposición del detector a las muestras de alimentos y las rocas estudiadas. ....	33
<b>Tabla 1-3:</b> Concentración de radón indoor, usando detectores CR-39. ....	39
<b>Tabla 2-3:</b> Concentración Rn-222 en el aire dentro de las cámaras de difusión. ....	40
<b>Tabla 3-3:</b> Tasa de exhalación másica de gas radón, usando detectores CR-39. ....	42
<b>Tabla 4-3:</b> Tasa de exhalación superficial de gas radón, usando detectores CR-39. ....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación. ....	4
<b>Figura 2-1:</b> Cadena de decaimiento del U-238. ....	6
<b>Figura 3-1:</b> Cadena básica de decaimiento del Rn-222. ....	8
<b>Figura 4-1:</b> Esquema de inhalación de progenie de radón. ....	10
<b>Figura 5-1:</b> Cadena de decaimiento del U-235. ....	11
<b>Figura 6-1:</b> Cadena de decaimiento del Th-232. ....	12
<b>Figura 7-1:</b> Estructura química del plástico CR-39. ....	15
<b>Figura 8-1:</b> Ejemplo de trazas nucleares vista desde un microscopio óptico. ....	16
<b>Figura 9-1:</b> Rayos delta producidos durante la inducción de traza latente. ....	18
<b>Figura 10-1:</b> Varios criterios de formación de pistas en función de la energía de iones pesados. ....	19
<b>Figura 11-1:</b> Carácter atómico de una traza en un polímero, ocasionado por una partícula cargada. ....	20
<b>Figura 12-1:</b> Cinética de ataque químico durante el proceso de revelado ....	21
<b>Figura 13-1:</b> Geometría de la formación de la traza. ....	21
<b>Figura 14-1:</b> Geometría de la formación de la traza $\theta$ con diferente $\alpha$ a $90^\circ$ . ....	22
<b>Figura 15-1:</b> Formas de las trazas de Rn-222 y su progenie. ....	23
<b>Figura 1-2:</b> Dimensiones del detector pasivo CR-39. ....	27
<b>Figura 2-2:</b> Sistema de detección, Izquierda: Cámara estándar. Derecha: Detector CR-39. ....	28
<b>Figura 3-2:</b> Izquierda: Tufo volcánico italiano (piedra entera). Derecha: Muestra triturada. ....	30
<b>Figura 4-2:</b> Pesaje de la muestra de zanahoria de granulometría 3mm. ....	31
<b>Figura 5-2:</b> a) Muestra de café, b) Muestra de tufo volcánico italiano, c) Muestra de zanahoria. ....	31
<b>Figura 6-2:</b> Soporte para el detector CR-39. ....	32
<b>Figura 7-2:</b> Esquema del sistema de detección cámara de difusión - detector CR-39. ....	32
<b>Figura 8-2:</b> Cámara de difusión no estándar antes de ser sellada. ....	32
<b>Figura 9-2:</b> Configuración experimental para realizar el baño químico de los detectores CR-39. ....	34
<b>Figura 10-2:</b> Esquema para lectura de trazas. ....	35
<b>Figura 11-2:</b> Campo de visión: a. Lente del microscopio, b. Cámara incorporada. ....	35
<b>Figura 1-3:</b> a. Imagen de alta densidad de trazas (tufo volcánico italiano) b. Imagen de baja densidad de trazas (zanahoria). ....	36
<b>Figura 2-3:</b> Superposición de trazas observada en el análisis del detector expuesto a la piedra de tufo volcánico italiano. ....	37

<b>Figura 3-3:</b>	Diversas formas de trazas del radón y su progenie observadas de la muestra de zanahoria.....	37
<b>Figura 4-3:</b>	Trazas nucleares circulares que superan los 30 $\mu\text{m}$ de diámetro. ....	38
<b>Figura 5-3:</b>	Trazas nucleares circulares con diámetros de 23 $\mu\text{m}$ (derecha) y de 15 $\mu\text{m}$ (izquierda).....	38
<b>Figura 6-3:</b>	Trazas nucleares de forma ovoide.....	38
<b>Figura 7-3:</b>	Defectos producidos en el baño químico. ....	39
<b>Figura 8-3:</b>	Defectos propios de fábrica de los detectores CR-39. ....	39

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-1:</b>	Dosis promedio anual que recibe una persona. ....	4
<b>Gráfico 1-3:</b>	Concentraciones de radón en interiores, utilizando detectores CR-39. ....	40
<b>Gráfico 2-3:</b>	Densidad de trazas de los detectores CR-39 expuestos a dos muestras de alimentos (zanahoria y café) y tres muestras de materiales (tufo volcánico italiano y piedras de uranio).....	41
<b>Gráfico 3-3:</b>	Concentración de radón en el aire dentro de la cámara de difusión para las dos muestras de alimentos (zanahoria y café) y las dos muestras de materiales (tufo volcánico italiano y piedras de uranio) estudiadas. ....	41
<b>Gráfico 4-3:</b>	Tasa de exhalación másica de gas radón para muestras de baja y alta exhalación, usando detectores CR-39. ....	42
<b>Gráfico 5-3:</b>	Tasa de exhalación superficial de gas radón para muestras de baja y alta exhalación, usando detectores CR-39.....	43

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

<b>Fórmula 1-1:</b> Poder de frenado.....	18
<b>Fórmula 2-1:</b> Longitud de traza grabada .....	22
<b>Fórmula 3-1:</b> Razón de formación de traza .....	22
<b>Fórmula 4-1:</b> Valor de eficiencia.....	23
<b>Fórmula 5-1:</b> Valor de eficiencia con ángulo constante .....	23
<b>Fórmula 6-1:</b> Valor de eficiencia con ángulo no constante .....	23
<b>Fórmula 7-1:</b> Concentración de Rn-222 .....	24
<b>Fórmula 8-1:</b> Densidad de trazas .....	24
<b>Fórmula 9-1:</b> Exposición de Rn-222 .....	25
<b>Fórmula 10-1:</b> Exhalación superficial .....	26
<b>Fórmula 11-1:</b> Exhalación másica .....	26



## RESUMEN

Este trabajo de titulación presenta un análisis de las trazas nucleares dejadas por las partículas alfa provenientes de radionúclidos presentes en el ambiente (indoor) y que provienen de muestras de alimentos (zanahoria y café) y tres tipos de rocas (tufo volcánico italiano ampliamente usado para la construcción en Italia y dos piedras con alto contenido de uranio-238), usando detectores de policarbonato CR-39 y un microscopio óptico de marca Motic de la serie BA210 para la lectura. Se utilizaron cámaras estándar para el monitoreo en interiores y se diseñaron cámaras de difusión no estándar donde se colocaron los detectores para su exposición a las muestras. La concentración de radón en interiores monitoreada en cuatro lugares de la ciudad de Riobamba y uno del cantón Colta, presentó un valor máximo de  $18,87 \pm 2,82 \text{ Bq/m}^3$  en el Bunker del laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH y un valor mínimo de  $9,04 \pm 1,83 \text{ Bq/m}^3$  en la Unidad Educativa Abya Yala de la parroquia Columbe. Las muestras de alimentos y materiales presentaron una importante variabilidad en términos de tasa de exhalación másica. El valor máximo ( $68,32 \pm 10,29 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponde a la piedra de uranio 1, de masa de 0,00071 kg. El valor mínimo ( $0,013 \pm 0,002 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponde a la muestra de zanahoria con una masa de 0,035 kg. Los resultados de la tasa de exhalación superficial de gas radón, calculada para las muestras trituradas de zanahoria, café y tufo volcánico italiano, muestran que el tufo volcánico presenta un valor muy alto ( $4,268 \pm 0,679 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) respecto a la zanahoria ( $0,121 \pm 0,024 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) y el café ( $0,197 \pm 0,035 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ). Se recomienda controlar el proceso de exposición, revelado y lectura de los detectores para la obtención de resultados confiables.

**Palabras Claves:** <FÍSICA DE RADIACIONES>, <DETECTOR DE TRAZAS NUCLEARES>, <CARBONATO DE ALIL DIGLICOL (CR-39)>, <TRAZA LATENTE>, <TRAZA GRABADA>, <RADÓN>, <PODER DE FRENADO>.



Firmado electrónicamente por:  
**ELIZABETH  
FERNANDA  
AREVALO  
MEDINA**



1038-DBRAI-UPT-2021

## SUMMARY

The current degree project presents an analysis of the nuclear traces left by alpha particles from radionuclides present in the environment (indoor) and coming from food samples (carrot and coffee) and three types of rocks (Italian volcanic tuff widely used for construction in Italy and two stones with high uranium-238 content), using CR-39 polycarbonate detectors and a Motic optical microscope of the BA210 series. Standard chambers were used for indoor monitoring and non-standard diffusion chambers were designed where the detectors were placed for exposure to the samples. The indoor radon concentration monitored in four locations in the city of Riobamba and one in the canton of Colta showed a maximum value of  $18,87 \pm 2,82 \text{ Bq/m}^3$  in the bunker of the Nuclear Techniques Laboratory of the ESPOCH and a minimum value of  $9,04 \pm 1,83 \text{ Bq/m}^3$  in the Abya Yala Educational Unit in the parish of Columbe. The food and material samples showed significant variability in terms of mass exhalation rate. The maximum value ( $68,32 \pm 10,29 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponds to uranium stone 1, with a mass of 0,00071 kg. The minimum value ( $0,013 \pm 0,002 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponds to the carrot sample with a mass of 0,035 kg. The results of the surface exhalation rate of radon gas, calculated for the crushed samples of carrot, coffee and Italian volcanic tuff, show that the volcanic tuff has a very high value ( $4,268 \pm 0,679 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) compared to carrot ( $0,121 \pm 0,024 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) and coffee ( $0,197 \pm 0,035 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ). It is recommended to control the process of exposure, development and reading of the detectors in order to obtain reliable results.

**Keywords:** <RADIATION PHYSICS>, <NUCLEAR TRACE DETECTOR>, <ALLYL DIGLYCOL CARBONATE (CR-39)>, <LATENT TRACE>, <ENGRAVED TRACE>, <RADON>, <STOPPING POWER>.

## INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta se encuentra constituido por distintos elementos radiactivos, la radiactividad natural es común en las rocas y el suelo, por lo tanto se encuentran en materiales para la construcción de viviendas y edificaciones (Ridha, 2001). Todos los materiales de construcción están compuestos principalmente de roca y tierra, y estos contienen isótopos de radiactividad natural como las series de descomposición de uranio-238 (U-238), torio-232 (Th-232), y potasio-40 (K-40).

El radio-226 (Ra-226) es el radionúclido más importante proveniente de la descomposición del U-238, las mediciones de concentración del mismo se considera como referencia en todas las investigaciones (Jebur, Nader y Subber, 2017). Las concentraciones medias mundiales en la corteza terrestre son de aproximadamente 35 Bq/kg para el radio, 30 Bq/kg para el torio y 400 Bq/kg para el potasio (Ridha, 2001).

Ciertos radionúclidos a determinadas concentraciones pueden causar un riesgo para la salud (Saint-Fort, 2016). Por consiguiente, es de interés mundial conocer los límites a los cuales la población se encuentra expuesta, estimando así niveles de radiación en suelos, agua, alimentos y aire dentro de edificaciones o lugares de escasa ventilación (Abojassim, 2017).

El Rn-222 tiende a acumularse en sitios con escasa ventilación, la Autoridad Reguladora, United States Environmental Protection Agency (US EPA) recomienda un valor en interiores máximo de 148 Bq/m<sup>3</sup> (4 pCi/L), niveles superiores pueden aumentar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón (EPA, 2016). Al inhalar al polonio-218 (Po-218) y el polonio-214 (Po-214), principales productos de descomposición de vida media corta de este radionúclido, los cuales los podemos encontrar libres o adheridas a partículas en aire o en distintas superficies; estos se depositan en el tracto respiratorio contribuyendo con la deposición de dosis no homogénea en el epitelio bronquial, causando daño a las células sanas por su alta Transferencia Lineal de Energía (LET por sus siglas en inglés) (Marsh y Bailey, 2013).

Siguiendo este orden de ideas es importante la detección del radón, mediante el uso de detectores capaces de monitorear las partículas alfa provenientes de este radionúclido y su progenie. Los detectores pueden ser pasivos o activos y su uso dependerá principalmente de las características de cada uno. Los *Detectores pasivos de Trazas Nucleares en Sólidos* (DTNS) son ampliamente utilizados para medir radionúclidos emisores alfa, debido a su bajo costo, alta sensibilidad,

uniformidad de respuesta y excelente calidad óptica (Cartwright, Shirk y Price, 1978). Estos detectores son usados principalmente para medir la presencia de gas Rn-222 (Wanabongse, 2009).

Los CR-39 son detectores de trazas nucleares son usados para medir niveles de radiactividad en productos alimenticios como cebolla, papa, tomate, arroz, café y entre otros (Ahmed y Samad, 2014; Farhood, 2015). Los detectores CR-39 también son utilizados para estimar la concentración de radio y las tasas de exhalación de radón de diferentes rocas las cuales son usadas como fuentes seguras en la fabricación de materiales de futuras construcciones (Abbas et al., 2020). Otra de las aplicaciones de este detector pasivo es el de medir la concentración de Rn-222 en interiores, estas mediciones de radón tienen un papel fundamental en el seguimiento de la salud y la seguridad humana, las características de estos detectores hacen posible la realización de campañas de monitoreo a gran escala (Koc et al., 2018; Hassanvand et al., 2019).

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo de titulación es estudiar las trazas nucleares de radionúclidos alfa presentes en el ambiente (indoor) y las provenientes de muestras de alimentos (zanahoria y café) y dos tipos de rocas, usando detectores de policarbonato CR-39, para ello se utilizarán cámaras de difusión estándar para el monitoreo en interiores y se diseñarán cámaras no estándar, donde se colocarán los detectores pasivos para su exposición a las muestras, posteriormente se analizarán las trazas nucleares de los detectores irradiados y finalmente se calcularán las concentraciones de radón indoor y las tasas de exhalación másica y superficial de los alimentos y rocas estudiadas.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Radiación Ionizante

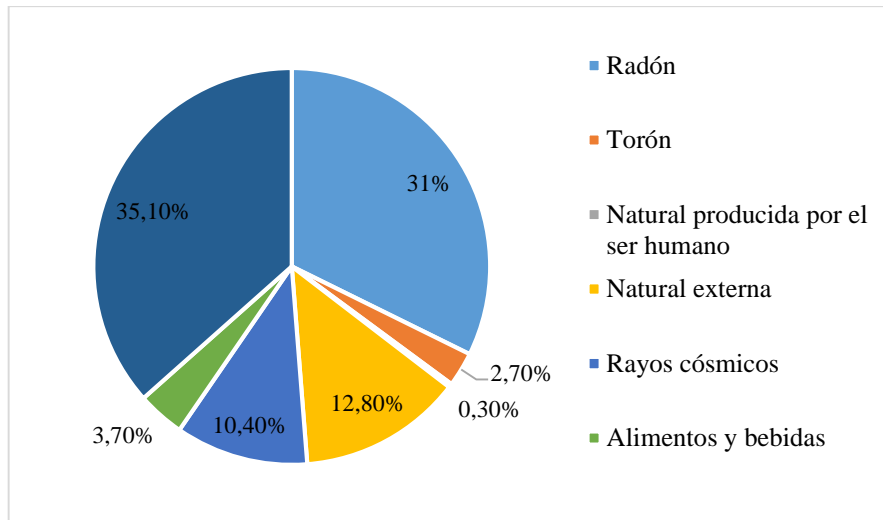
Este tipo de radiación posee energías altas que, al momento de interactuar con la materia, forma iones, es por ello que cuando la atraviesa puede producir cambios en la estructura atómica molecular de la misma (Aramburu y Bisbal, 2009). Esta es posible encontrarla presente en todas partes ya sea de manera natural o artificial, es decir, que la exposición a la radiación ionizante es constante.

#### *1.1.1 Fuentes naturales*

Las radiaciones de fuentes naturales se encuentran en la naturaleza por la descomposición radioactiva de materiales que se encuentran presentes en la corteza terrestre, la cantidad de la misma depende del lugar en el cual se encuentre, siendo diferente su concentración en todo el planeta (CSN, 2015), por ejemplo: Rb-87, K-40, Th-232, U-238 o Rn-222, algunas de estas fuentes se las puede encontrar más cerca de lo que se cree como en las viviendas, formando parte del material de construcción, en alimentos o agua que se consumen, incluso en el propio organismo debido a que se encuentra constituido por K-40. La radiación cósmica contribuye a la exposición dentro de las fuentes naturales ya que las ondas electromagnéticas y las partículas procedentes del espacio chocan con la tierra constantemente emitiendo esta radiación ionizante, pero de una menor magnitud ya que la atmósfera disminuye el impacto que tienen estas sobre la superficie terrestre y aumentándola con la altura (Cortez et al., 2014).

#### *1.1.2 Fuentes artificiales*

La radiación ionizante también puede ser producida de manera artificial a manos del hombre con distintas aplicaciones tanto en el ámbito médico, industrial, petróleos, minerías, fabricación de armas nucleares o reactores nucleares, etc., de manera tentativa la radiación anual recibida por el ser humano es la siguiente:



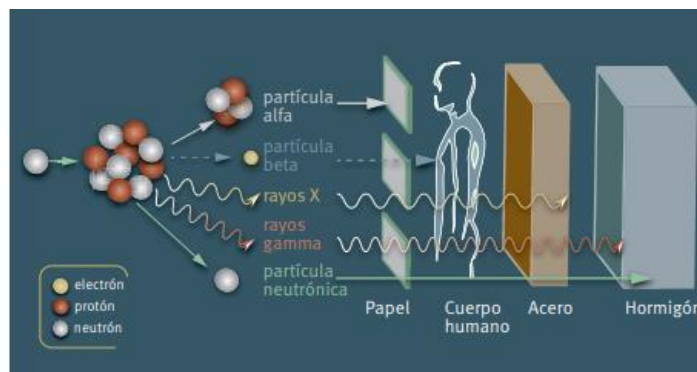
**Gráfico 1-1:** Dosis promedio anual que recibe una persona.

Fuente: (CSN, 2010).

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

### 1.1.3 Tipos de desintegraciones radiactivas

Como los radionúclidos son inestables necesitan emanar energía para estabilizarse siendo esta característica única de cada uno y el daño que produce dependerá del poder de penetración de cada emisión, teniendo así dos tipos: corpuscular y ondas electromagnéticas.



**Figura 1-1:** Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación.

Fuente: (Steiner, 2016).

Cada una produce efectos diferentes sobre el tejido vivo, siendo unas directamente ionizantes (partículas alfa y beta) y otras indirectamente ionizantes (rayos gamma y neutrones) de este modo el poder de penetración depende del tipo de radiación como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-1.**

### *1.1.3.1 Desintegración alfa*

Las partículas alfa ( $\alpha$ ) son núcleos ionizados de Helio conformados por dos protones y dos neutrones que se encuentran unidos fuertemente, estas partículas se emiten desde el núcleo de ciertos radioisótopos como una manera de estabilizarse, poseen carga positiva sin electrones y con un poder de penetración muy bajo por ende pueden ser detenidas de manera fácil con una hoja de papel o con la piel, pero al tener un poder de ionización alto cuando ingresa al organismo ya sea por la ingesta o por la inhalación, producen daños graves a nivel celular y molecular (Bravo, 2018).

Estas partículas son pesadas, lentas, de gran masa, causando múltiples ionizaciones a distancias pequeñas, por lo que el efecto negativo será mayor pues depositan grandes cantidades de energía en el tejido biológico (ARPANSA, 2019).

### *1.1.3.2 Desintegración beta*

Este tipo de radiación ocurre cuando el núcleo atómico del radioisótopo posee un desequilibrio entre la cantidad de protones y neutrones, expulsando partículas cargadas negativas y positivas, es decir, electrones y positrones respectivamente, estos son un poco más penetrantes que las partículas alfa pero menos ionizantes, este tipo de emisión es utilizado de manera más frecuente en el campo de la medicina, específicamente en la oncología a través de la tomografía por emisión de positrones (PET) (Welsh, 2006).

### *1.1.3.3 Desintegración gamma*

Como emisión de ondas electromagnéticas tenemos la radiación gamma los cuales son fotones o paquetes de energía que se mueven igual a la velocidad de la luz, este tipo de radiación se produce cuando un núcleo inestable pasa de su estado más excitado a uno de menor energía liberando ese exceso de energía en forma de radiación gamma llegando así a un estado más estable, a diferencia de las partículas alfa y beta, los rayos gamma al igual que los rayos X tienen mayor poder de penetración y poseen la energía suficiente para poder ionizar, es por ello que es empleado especialmente en medicina para tratamientos oncológicos ya sea de forma externa como interna (Robledo, 2017).

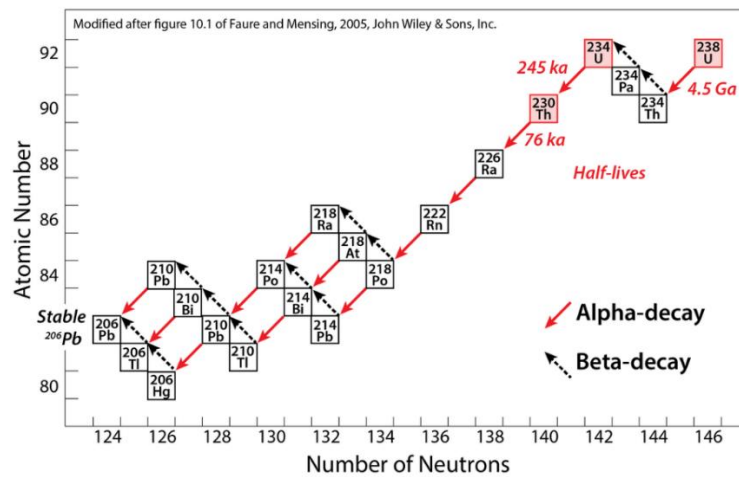
## **1.2 Series radioactivas**

Las principales series que podemos encontrar en la naturaleza son el uranio-238, torio-232 y uranio-235, caracterizados por ser de núcleos pesados e inestables que tienen vidas medias

comparables a la edad de los elementos; la serie proveniente del U-238 es la más estudiada por la presencia de radio-226 y radón-222, el cual es el gas más perjudicial en el medio ambiente para el ser humano debido a que estos productos de desintegración emiten radiación alfa, beta y gamma al igual que con los descendientes del Th-232 (Ridha, 2001).

### 1.2.1 Series del uranio-238

La serie U-238 es la más investigada, por ser una de las fuentes más abundantes de manera natural, en la Figura 2-1 se puede observar un diagrama esquemático de la serie de descomposición en el cual se aprecia cada producto secundario perteneciente a la descomposición del U-238; los isótopos radioactivos más estudiados en esta serie son Ra-226 y Rn-222 (Musa, 2003).



**Figura 2-1:** Cadena de decaimiento del U-238.  
Fuente: (Faure y Mensing, 2005).

La serie contiene siete isótopos radioactivos importantes, el comportamiento en el organismo sigue su propia química y al pertenecer al mismo grupo de metales pesados estos se acogen a ciertas generalidades como las contribuciones de dosis de emisión, vida media y energía. El ser humano se expone a la radiación de esta serie principalmente cuando inhala los productos de vida corta debido a la descomposición de la cadena, los productos sólidos incluidos los isótopos de uranio, torio, radio, bismuto y plomo, son metales pesados y tienden a acumularse en los huesos, incluso el polonio puede llegar a alcanzar a los tejidos blandos, en todo el proceso de decaimiento, los emisores alfa vendrían a ser las de mayor impacto en cuanto efectos en la salud (National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1991).

#### 1.2.1.1 Radio

El radio-226 es un elemento radiactivo proveniente de la serie de decaimiento del U-238, descubierto juntamente con el polonio por los esposos Curie, su principal característica lo



convierte en emisor de radiación alfa, precursor de los productos de decaimiento emisores alfa del Rn-222, Po-218 y del Po-214 (Aguilar, 2018).

#### 1.2.1.2 Radón

El radón es un gas noble con símbolo químico Rn, que no tiene color ni olor, además, es radiactivo, muy volátil y no reacciona con otros elementos químicos, su periodo de semidesintegración es de 3,8 días y surge de la descomposición de ciertos elementos presentes en la corteza terrestre como el U-238, Th-232 y U-235 (Garzon, Hincapie y Salazar, 2004).

Dichos elementos forman parte de rocas, del suelo o incluso se los encuentra en el agua subterránea. Este al ser un gas se difunde más rápido, por tanto, ciertos materiales de construcción contribuyen a la exposición en algunas áreas con baja ventilación, visto que son usados como bloques estructurales y ladrillos, de la misma manera, al utilizar arena con una cantidad de radionucleidos superior al promedio y que posteriormente serán mezclados con hormigón o para relleno (National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1991).

#### 1.2.1.3 Progenie del radón

En la desintegración del radio proveniente de las respectivas largas series, se producen los tres radioisótopos del radón: Rn-222 (radón) de U-238, Rn-220 (torón) de Th-232 y Rn-219 (actinon) de U-235, el actinon posee un periodo de semidesintegración más corta de 3,96 s y prácticamente siempre se produce en cantidades mucho más pequeñas que el radón cuyo periodo de semidesintegración es de 3,82 días, en vista de que la relación natural de U-235 / U-238 es 0,00719, el uranio-235 no es considerado, por otro lado el torón con un tiempo de vida media de 55,6 s es de corta duración en relación con el radón y cruza a una distancia mucho menor desde su fuente que el radón (Grabez y Markushev, 2006). A causa de eso, las hijas del gas se desintegran antes de salir del organismo haciendo que sea difícil su eliminación, lo que no pasa con el torón que es posible que la progenie del mismo no sea inhalado ya que solo una pequeña parte se difunde en el lugar antes de que decaiga en partículas metálicas (Andersén, 2015).

U-238 → ... → Ra-226 → Rn-222 (radón) → ...

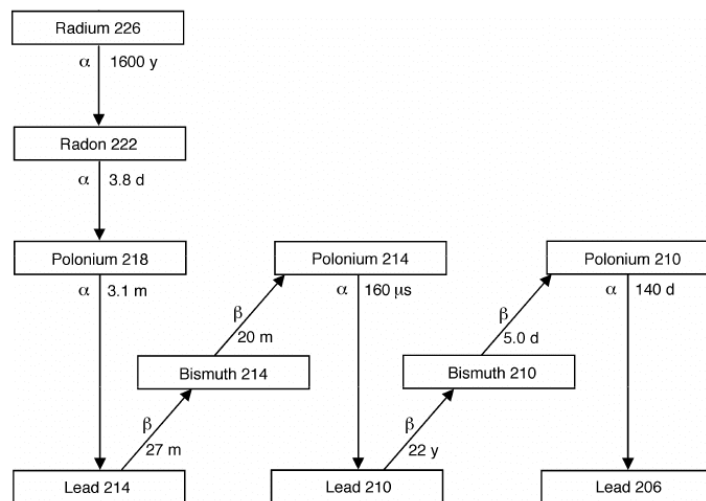
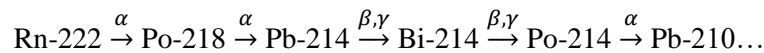
U-235 → ... → Ra-223 → Rn-219 (actinon) → ...

Th-232 → ... → Ra-224 → Rn-220 (torón) → ...

Hoy en día se conoce que el efecto principal que se considera de mayor riesgo no es la inhalación de radón propiamente dicho porque una vez inhalado éste es expulsado, sino que son los productos activos del decaimiento del radón (Po-218, Po-214) (Maged, Tsuruta y Durrani, 1993). El ser humano al inhalar las partículas adheridas a la progenie que están suspendidas en el aire se alojan en el

epitelio bronquial y se desintegran emitiendo partículas alfa altamente ionizantes, las cuales depositan dosis en el mismo, afectando seriamente la estructura del ADN y aumentando la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón (Andersén, 2015).

Esta progenie se puede encontrar en tres diferentes formas: la primera es el caso de que los productos resultantes del radón no se encuentren unidas, estas nano-partículas miden entre 0,5-5 nm, al descomponerse la serie, la progenie está cargada positivamente y forma de manera rápida grupos cargados o neutros con partículas de vapor de agua o gases presentes en el aire, por ende son importantes para la determinación de la dosimetría pulmonar; el siguiente caso es cuando la progenie de radón se encuentra unida a los aerosoles presentes en el aire, el tamaño de este caso va a depender de la distribución de tamaño de las moléculas del aire o cualquier gas presente y el coeficiente de fijación; y finalmente el caso de la progenie depositada, la cual comprende ambos casos anteriores, cualquiera de los dos pueden depositarse en las superficies, tal característica depende mucho de la superficie a la cual impactarán lo que puede ocasionar el retroceso alfa de la progenie de radón implantada en la superficie (W. Hofmann, H.S. Arvela, N.H. Harley, J.W. Marsh, J. McLaughlin, A. Röttger, 2015).



**Figura 3-1:** Cadena básica de decaimiento del Rn-222.  
Fuente: (Gillmore, Crockett y Przylibski, 2010).

En la Figura 3-1 se observa la cadena de decaimiento del Rn-222, con los respectivos tiempos de vida media, donde el decaimiento  $\alpha$  son las flechas verticales y las oblicuas el decaimiento  $\beta$ ; la Tabla 1-1 muestra las diferentes energías de cada producto de la serie de desintegración del radón,

lo cual es importante para poder determinar con el detector que tipo de isótopo se está considerando.

**Tabla 1-1:** Emisiones de energía (MeV) de la serie de desintegración Rn-222.

ISÓTOPO	TIPO DE DECAIMIENTO	ENERGÍA (MeV)
Radón-222	$\alpha$	5,49
Polonio-218	$\alpha$	6,00
Plomo-214	$\beta$	0,67 – 0,73
	$\gamma$	0,35 - 0,30 - 0,24
Bismuto-214	$\beta$	1,54 – 1,51 - 3,27
	$\gamma$	0,61 - 1,76 – 1,12
Polonio-214	$\alpha$	7,69
Plomo-210	$\beta$	0,06 – 0,02
	$\gamma$	0,05
Bismuto-210	$\beta$	1,16
	$\gamma$	0,27 – 0,30
Polonio-210	$\alpha$	5,30
Plomo-206	Estable	-

Fuente: (Robertson et al., 2013).

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

Dado a su energía, cada partícula posee un alcance diferente, la misma que en la

Tabla 2-1 se muestra del radón y su progenie.

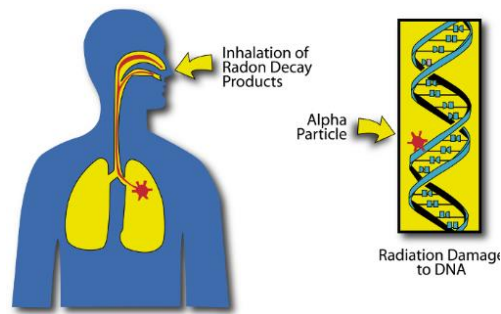
**Tabla 2-1:** Alcance de partículas alfa.

ISÓTOPO	ENERGÍA (MeV)	ALCANCE EN AIRE (cm)
Rn-222	5,49	4,0
Po-218	6,00	4,6
Po-214	7,69	6,9

Fuente: (Toribio, 2018).

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

La progenie del radón posee distintas características que los hacen especiales, ya que son sólidos, químicamente activos y poseen carga eléctrica para poder adherirse ya sea a partículas presentes en el aire, a ciertas superficies e incluso a las paredes del sistema respiratorio, por lo que los isótopos, Po-218, Po-214, Bi-212 y el Po-212, productos de la desintegración del radón y torón respectivamente, son aquellos que contribuyen una dosis considerable al pulmón (Toribio, 2018).



**Figura 4-1:** Esquema de inhalación de progenie de radón.  
**Fuente:** (MMC Radon Remediation, 2020).

El mayor riesgo se encuentra en lugares cerrados, como la progenie es sólida, al ingresar a los pulmones se fijan al tracto respiratorio emitiendo partículas alfa y depositando una gran cantidad de energía a nivel del ADN como se muestra en la Figura 4-1, incrementando así la probabilidad de la presencia de cáncer pulmonar, considerando el tiempo de exposición a los mismos es constante para el caso particular de mineros (Benés, 1999).

El radón y su progenie pertenecen al grupo 1 de sustancias cancerígenas, catalogado así por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), institución encargada en el estudio de posibles factores que son un riesgo cancerígeno para el ser humano (IARC, 1988). Es por ello que muchos países y organizaciones han implementado distintas normativas y recomendaciones al momento de que las personas se encuentren expuestas, ya sea en lugares de trabajo o en viviendas, los cuales deberán ser cumplidos de manera obligatoria. En aire la concentración del gas radón puede variar de entre  $5 \text{ Bq/m}^3$  y  $15 \text{ Bq/m}^3$ , pero en lugares cerrados tales concentraciones pueden variar de entre valores menores a  $10 \text{ Bq/m}^3$  a valores muy elevados de  $10\,000 \text{ Bq/m}^3$ ; de acuerdo a los estudios no existe aún un valor umbral que por debajo del mismo no implique algún riesgo, pero cuanto menor sea la exposición y la concentración el riesgo disminuye (ISTAS-CCOO, 2017).

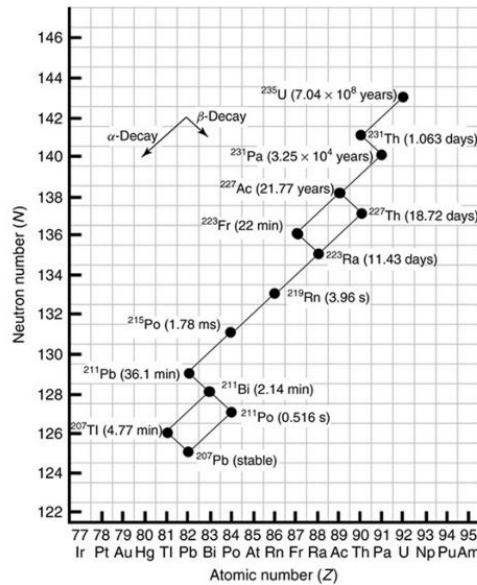
La región bronquial comprendida por los bronquios y los bronquiolos son aquellos que reciben la mayor cantidad de dosis provenientes de las partículas alfa por el decaimiento del radón debido a que son estructuras cuya masa es muy pequeña (Toribio, 2018).

### **1.2.2 Series del uranio-235**

Tanto el uranio-235 como el uranio-238 se presentan en muchos materiales propios del planeta como rocas o suelo, incluso pueden encontrarse en el agua; a diferencia del U-238 que es el más abundante, el U-235 se puede obtener mediante el enriquecimiento, por lo que su uso se enfoca como combustible de plantas nucleares o reactores nucleares de naves, sin olvidar que es utilizado

para la fabricación de armas nucleares, este que por sus características de ser extremadamente denso y radiactivo y de fácil fisión lo hace peligroso para el ser humano (CDC, 2018).

En la Figura 5-1 se muestra la serie de desintegración del U-235, el cual implica la emisión de siete partículas alfa sin tomar en consideración ciertas ramas de menor desintegración; debido a que la cantidad de este radionúclido es reducida, la dosis no se considera para realizar mediciones (Hussain y Hussain, 2014).



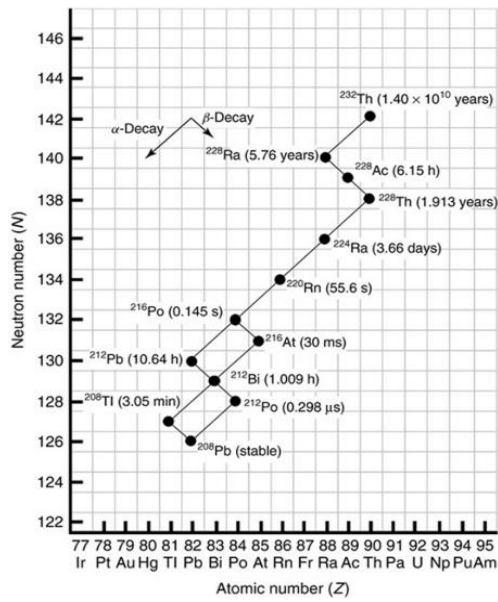
**Figura 5-1:** Cadena de decaimiento del U-235.  
Fuente: (Atwood, 2010).

### 1.2.3 Series del torio-232

Los nucleídos producto de la descomposición del torio-232 no son estables, siendo su descomposición compleja y difícil y más por la presencia de Rn-220 particularmente volátil; su progenie emite radiación alfa principalmente (Hussain y Hussain, 2014).

El producto de desintegración de mayor relevancia en esta cadena de desintegración es el radio-228, ya que este isótopo radioactivo es el responsable de muchos radionúclidos de periodo de semidesintegración corto, lo que hace que el espectro de radiación sea amplio teniendo emisores alfa, beta y gamma; el Ra-228 es empleado para realizar controles de calidad en suministros de agua, y además sirve para estimar la edad de formación del contaminante de compuestos de bario (radiobarita) relevante para el campo de la petrolera (NIST, 2018).

En la Figura 6-1, se aprecia seis partículas alfa durante la descomposición del torio-232.



**Figura 6-1:** Cadena de decaimiento del Th-232.  
Fuente: (Atwood, 2010).

La Tabla 3-1 muestra las energías de la serie de decaimiento del torón.

**Tabla 3-1:** Emisiones de energía (MeV) de la serie de desintegración Rn-220.

ISÓTOPO	TIPO DE DECAIMIENTO	ENERGÍA (MeV)
Toron-220	α	6,29
Polonio-216	α	6,78
Plomo-212	β	-
Bismuto-212	β (66.3%) a $^{212}\text{Po}$ α (33.7%) a $^{212}\text{Pb}$	- 6,1
Polonio-212	α a $^{208}\text{Pb}$	8,78
Talio-208	β a $^{208}\text{Pb}$	-
Plomo-208	Estable	-

Fuente: (Durrani y Bull, 1987).  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020

### 1.3 Detectores de radiación ionizante

Todos los radionúclidos mencionados anteriormente, en la mayoría de los casos, son detectables gracias al uso de distintos dispositivos los cuales se basan en el tipo de interacción de las partículas y la energía que es depositada en el mismo (Miglierini, 2004). De esta manera pueden ser clasificados de distintas maneras considerando el tiempo de exposición, el material del cual el detector está conformado, el tipo de energía que se desea detectar, entre otros, pero de manera habitual se suele dividir a los detectores en dos importantes categorías: activos y pasivos.

### 1.3.1 Detectores activos

En esta categoría, los detectores necesitan un sistema de alimentación, en ciertos casos con el uso de baterías para que puedan funcionar, es decir, que el detector toma una cierta cantidad de aire y mide la concentración de radón en el mismo por medio de la radiación alfa, utilizado para mediciones de corto tiempo (García y Carraza, 2018). Este tipo de detectores se caracterizan por dar una lectura directa realizando así medidas de manera puntual, su uso es más común para evaluar al personal o zonas específicas que requieran de un valor inmediato de los niveles de radón (Espinosa-García, 2016), algunos modelos más usados son los vistos en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Detectores Activos para medición de radón intramuros

	MARCA	MODELO	COMPAÑÍA	RANGO (Bq/m <sup>3</sup> )
a.	AlphaGUARD	PQ2000 PRO	Saphimo	2 – 2 M
b.	Rad'7	-	Durrige	4 – 740 K
c.	SARAD	RTM-1688	SARAD	1 – 10 M
d.	Sun Nuclear	1027	Sun Nuclear Co	3,7 – 37 K
e.	DOSEMAN	-	SARAD	0 – 4 M

Fuente: (Espinosa-García, 2016).

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

### 1.3.2 Detectores pasivos

Los detectores pasivos son aquellos dispositivos que no requieren estar conectados a una corriente y tampoco necesitan de una bomba para hacer que el aire ingrese dentro del mismo (OMS, 2015). Este tipo de detectores necesitan de un mayor tiempo de exposición, razón por la cual, es el método preferido para un control en el área laboral, ya que se obtiene un valor de promedio de concentración de radón en aire de una construcción en particular incluso se puede hacer mediciones de manera masiva (García y Carraza, 2018). Los instrumentos de medición más conocidos son: Carbón activado, Electret (E-PERM), Trazas nucleares en sólidos y de termoluminiscencia (Espinosa-García, 2016).

A continuación, se detallará características esenciales del detector de trazas nucleares en sólidos los cuales pertenecen a esta categoría y es centro de estudio.

## 1.4 Detector de trazas CR-39

Estos dispositivos son detectores pasivos los cuales perciben las partículas alfa, son usados principalmente para medir la presencia del gas radón, en vista que, el gas radón cuando decae

emite partículas alfa, estas dejan un rastro en la película de plástico del detector que posteriormente serán leídas mediante revelados químicos como solución cáustica (NaOH o KOH) y electroquímicos (Howarth, 2015), estos detectores se encuentran elaborados comúnmente de tres plásticos poliméricos dieléctricos: nitrato de celulosa como el LR-115 y el CN-85 (actualmente discontinuado), de carbonato de polialil-diglicol (CR-39) y el policarbonato (PC) conocido comercialmente como Makrofol y Lexan (IAEA, 2013). Estos tipos de detector proporciona información de la cantidad de partículas alfa, producto de la descomposición del Rn-222, el periodo de tiempo que tarda para la medición se encuentra entre 1 a 12 meses (Health Canada, 2008). A causa de su alta sensibilidad se necesita que la película este expuesto al menos 3 meses o más para tener un valor significativo de trazas, por otro lado, a diferencia de los cartuchos de carbón, no se pierde la información con el paso del tiempo, es decir, se puede guardar de forma indefinida (Atwood, 2010).

Estos detectores poseen una alta sensibilidad, estabilidad a la ionización y alto grado de claridad óptica, además de ser tolerante a condiciones ambientales diferentes, el CR-39 con el paso del tiempo se ha convertido en el detector más utilizado para el monitoreo ambiental del radón (Campos y Martins, 2007).

Sin embargo, existen ciertos aspectos que atribuyen pequeñas desventajas con el mismo y es que no admite una dosimetría de forma “on-line” durante la realización del experimento que se está irradiando, otro aspecto a considerar es la superposición de las trazas cuando se encuentra frente a grandes flujos de partículas, es decir, que se encuentren en un rango  $\geq 10^9$  iones/cm<sup>2</sup>, ya que a causa de esto dificulta la lectura de trazas de manera individual y por ende no se puede obtener la dosimetría de manera más fácil y rápida (Saint Martín, 1999). Otra importante desventaja es la de requerir un recuento de trazas individual, es decir, el conteo de las trazas son a mano lo cual hace de este proceso tedioso y por tal motivo consume mucho tiempo y más si se desea registrar una gran cantidad de trazas para obtener una precisión estadística, a pesar de que se han desarrollado algunos software o adaptaciones con el microscopio para que el conteo sea automático esto implican una inversión considerable en costos y complicaciones (Knoll y Kraner, 1981).

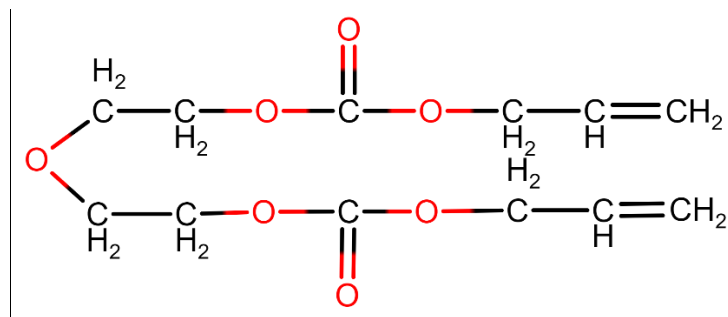
#### ***1.4.1 Composición química***

En 1940, químicos de la PPG desarrollaron un polímero llamado CR-39, abreviatura que significa "Columbia Resin #39", el mismo que se encuentra compuesto de carbonato de polialil-diglicol o también conocido como di etilenglicol bis alil carbonato el cual es una resina que se puede copolimerizar con otros monómeros insaturados como el acetato de vinilo, metacrilato de metilo, entre otros, mejorando ciertas propiedades como la resistencia al impacto lo cual hace que posea



una mejor resistencia a rasguños (Chemical Retrieval on the Web, 2019), esta resina es transparente, resistente a agentes externos que puedan ser abrasivos, producir golpes, presión o rasguños, incluso frente a solventes químicos puede conservar sus propiedades ópticas (Díaz Aguilar, 2015), también es más liviano que el vidrio con un índice de refracción correspondiente a un valor semejante al mismo, debido a lo anterior su uso particular es la fabricación de lentes y gafas, cubiertas protectoras, filtros fotográficos, pero además es empleado para detectar distintos tipos de radiación al ser muy sensible a estas (Sagheer et al., 2016).

Este tipo de plástico es elaborado a partir de la polimerización del éster oxidodi-2,1-etanodiil-di-2-propenílico de ácido carbónico, al contener dos grupos funcionales alilo [ $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-$ ] como se observa la estructura en la Figura 7-1, estos pueden formar una red lo cual hace que este tipo de plástico sea termoestable, esto quiere decir que, mantiene una forma fija después de haber sido moldeado con una temperatura alta teniendo mejor resistencia a distintos factores (Cassou y Benton, 1978).



**Figura 7-1:** Estructura química del plástico CR-39.

**Fuente:** (Cassou y Benton, 1978).

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

Para que este polímero sea utilizado con fines de detección de radiación debe cumplir con ciertas atribuciones como una alta homogeneidad, uniformidad, debe ser isotrópico, altamente sensible a la radiación, alta diafanidad óptica y además que la cadena polimérica interfacial se debe degradar frente a un reactivo químico estable y no solvente, que actúa como grabador de la traza, cada una de estas importantes características convierte a este plástico en el favorito para detectar partículas ionizadas por su alta sensibilidad, resolución y sobretodo bajo costo (Cartwright, Shirk y Price, 1978).

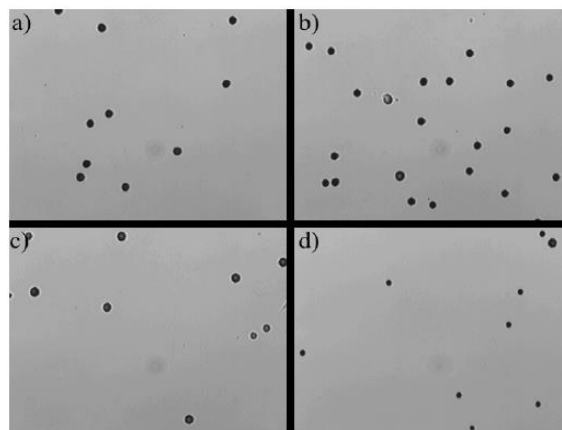
Debido al corto alcance de estos retrocesos, la sensibilidad de una sola capa del CR-39 es baja en comparación con los detectores de neutrones tradicionales, es importante mencionar que el comportamiento específico de cualquier material de grabado de trazas puede variar según la fuente y pureza de la muestra, el manejo antes y después de la exposición y las diferentes condiciones de grabado (Knoll y Kraner, 1981).

Además, cabe mencionar que los detectores de traza son ampliamente usados en otros campos tecnológicos y científicos, tales aplicaciones las tenemos en Física Nuclear para visualización de ciertas reacciones en el ámbito nuclear, también para el estudio de monopolos magnéticos, elementos superpesados, fotofisiones de componentes medianos con energías muy elevadas, entre otras más; en la Geología y Arqueología aprovechan el hecho de que ciertos materiales geológicos contienen una porción de uranio lo cual hace posible el uso de estos detectores para poder determinar la edad del material, método conocido como “datación por trazas de fisión”, en otra área comúnmente utilizada es en Cosmología para la indagación del flujo de rayos cósmicos en la superficie de la luna y como último ejemplo también es usado en Biología para poder fabricar microfiltros que pueda filtrar la sangre de células cancerígenas, incluso filtrar polvo o cualquier otro tipo de aerosoles presentes en el aire (Saint Martín, 1999).

#### ***1.4.2 Mecanismos de formación de la traza nuclear***

Las trazas nucleares sólo pueden ser grabadas en sólidos dieléctricos como: polímeros, vidrios inorgánicos, cristales minerales y ciertos semiconductores pobres, por otro lado en materiales conductores o semiconductores las trazas latentes no son estables y por ende no serían visibles, lo cual hace que estos materiales no sean usados en el detector (Grabez y Markushev, 2006).

Por las características antes mencionadas de la partícula alfa, ésta tiene el poder de ionizar a todas las moléculas que se encuentren cercanas a ella, lo cual provoca una serie de procesos químicos dando como resultado a los radicales libres, ese camino alterado es conocido como “traza latente” que al ser expuesto a soluciones acuosas de NaOH o KOH (las más comunes), éstas graban la superficie del detector, formando la traza visible para el microscopio óptico (Nikezic y Yu, 2004), como se puede observar en la Figura 8-1.



**Figura 8-1:** Ejemplo de trazas nucleares vista desde un microscopio óptico.

**Fuente:** (Aranzulla, 2005).

Esta traza latente se encuentra en el orden de decenas de nanómetros, y una vez que pasa por el revelado químico cambiando así de trazas latentes a grabadas puede alcanzar un diámetro en el orden de los  $\mu\text{m}$  haciendo posible poder observarlos bajo un microscopio óptico, el grosor de estos detectores dependen del material del cual están constituidos, para los detectores CR-39 y PC varía entre 0,1 a 1 mm a diferencia de los detectores de nitrato de celulosa los cuales consisten en una película delgada de 12 a 13  $\mu\text{m}$  sobre un soporte de poliéster de 100  $\mu\text{m}$  de grosor (IAEA, 2013).

De manera más específica, la Tabla 5-1 presenta los valores de alcance que tiene el radón y sus productos de decaimiento en el detector CR-39.

**Tabla 5-1:** Alcance en detector CR-39 del radón y sus productos.

Radionúclido	Vida media	Energía (MeV)	Alcance en CR-39 ( $\mu\text{m}$ )
Rn-222	3,82 d	5,49	35,5
Po-218	3,04 min	6,00	40,7
Po-214	162,3 $\mu\text{s}$	7,69	59,8

Fuente: IAEA, 2013.

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

Es evidente entonces que todo el proceso inicia con la transferencia de energía entre las partículas alfa y el material del detector, donde se producirá una cascada de interacciones y deposición de energía en el mismo, este primer paso es conocido como la etapa física y la duración de esta etapa se encuentra aproximadamente en el orden de los  $10^{-13}$  segundos, la siguiente fase viene a ser la físico-química, ya que en ella ocurren reacciones entre dos grupos; el grupo uno viene a estar conformado por aquellos que son producto de interacciones entre sí y el segundo grupo son el resultado del producto de reacciones con el ambiente (Saint Martín, 1999).

Generalmente, las únicas partículas que pueden formar estas trazas son las partículas cargadas pesadas iniciales que al incidir con la superficie del detector pierden su energía por la interacción con los electrones del material del detector y una pequeña parte con los núcleos, naturalmente estas pérdidas energéticas se da por las interacciones de las fuerzas de Coulomb con partículas cargadas como son los electrones de las órbitas de los átomos de interés, estas partículas alfa pierden su energía lentamente y al ser más pesadas que los electrones la dirección de impacto es casi una línea recta, algunas desviaciones puede suceder cuando la energía de la partícula es muy baja cerca del final del rango de partículas, a esta pérdida de energía se lo conoce como el poder de frenado descrita en la fórmula (1) de Bethe-Bloch (García y Carraza, 2018):

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_0 v^2} N \left[ \ln \left( \frac{2m_0 v^2 W_{max}}{I^2 (1 - \beta^2)} \right) - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad (1)$$

Donde:

$\frac{-dE}{dx}$ : Poder de frenado  $\left[ \frac{J}{m}, \frac{KeV}{\mu m} \right]$ .

$z$ : Carga eléctrica de la partícula incidente.

$v$ : Velocidad de la partícula.

$$\beta = v/c$$

$m_0$ : Masa en reposo del electrón.

$N$ : Número de electrones por unidad de volumen.

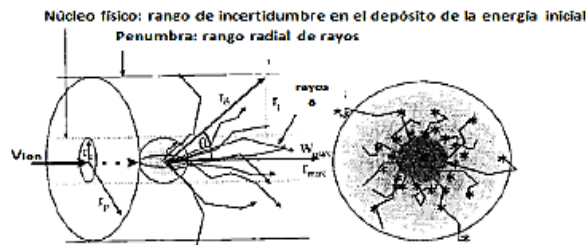
$I$ : Potencial de ionización en el medio.

$W_{max}$ : Valor máximo de transferencia de energía al electrón.

$\delta$ : Corrección por polarización de los medios para velocidades relativistas.

$U$ : Corrección para pequeñas velocidades.

De este modo, la ionización y excitación primarias ocurren cerca del camino del ion, mientras que la ionización y excitación secundarias se extienden a distancias radiales más grandes desde el núcleo de la traza, como se puede apreciar en la Figura 9-1, entonces cuando sucede la ionización de los electrones esta será la responsable de crear centros de carga, sin olvidar que los electrones expulsados (rayo delta), dependiendo de cuanta energía transportan aún pueden causar procesos de excitación e ionización (Fleischer, Price y Walker, 1975).



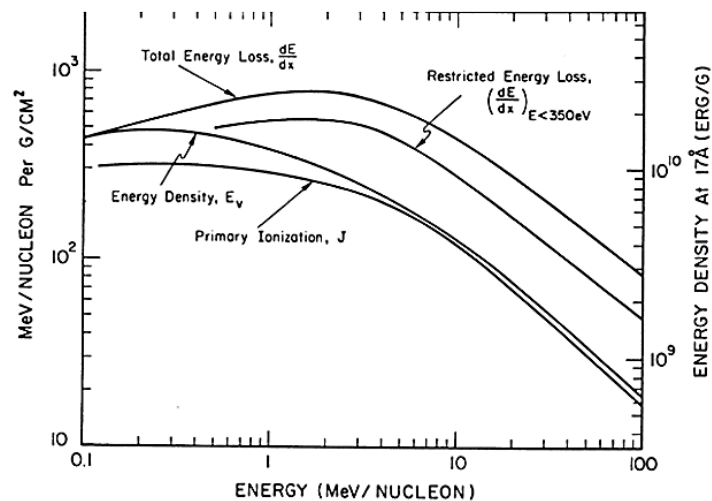
**Figura 9-1:** Rayos delta producidos durante la inducción de traza latente.

Fuente: (Díaz Aguilar, 2015).

Los electrones secundarios favorecen la formación de las trazas en materiales como los polímeros, dichas trazas son cilíndricas cuando son latentes (antes del revelado químico), aunque pueden

tener distintas formas lo cual dependerá del ángulo de incidencia de la partícula que la incide, el tipo, la energía y la manera de revelarla (Díaz Aguilar, 2015), el rango de los rayos delta puede extenderse aproximadamente 5 nm en cualquier dirección alejándose de la posición de la partícula, de manera que se cree que el radio de la traza de daño primario tiene aproximadamente esta dimensión, pero después del proceso de grabado las trazas se agrandan (Knoll y Kraner, 1981).

El poder de frenado es una de las características principales para la formación de la traza, ya que depende de una cantidad de energía depositada por unidad de longitud del camino por ion incidente, una vez que estas pérdidas de energía sobrepasan un cierto valor crítico de la forma empírica  $(dE/dx)_{Eb}$  que se puede observar en la Figura 10-1 es posible la formación de la traza en la superficie del detector, en el caso de que las partículas que vayan a incidir en el detector son muy energéticas, producirán una gran cantidad de electrones secundarios lo cual hace difícil el grabado de la traza en la misma (Grabez y Markushev, 2006). Razón por la cual aparece una nueva cantidad llamada Pérdida de Energía Restringida (REL)  $(-dE/dx)_{Eb}$ , se deduce que la formación de estos electrones es por colisiones con transferencia de energía mayor que  $E_b$ , dicha energía se disipará lejos del camino de las partículas, por lo que no contribuirán con la formación de la traza, el valor de  $E_b$  no es único puesto que variará en distintos materiales, por todo lo anterior es conveniente utilizar la energía lineal (Nikezic y Yu, 2004).

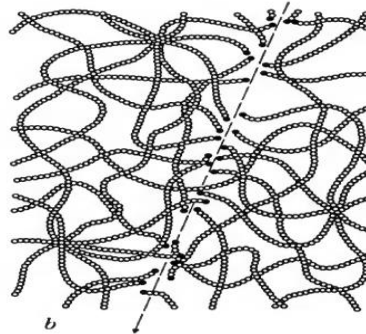


**Figura 10-1:** Varios criterios de formación de pistas en función de la energía de iones pesados.

**Fuente:** (Grabez y Markushev, 2006).

Después de las consideraciones anteriores, la traza en el material del detector, además de encontrarse relacionado con los electrones secundarios producidos a lo largo de la exposición del detector, la formación propiamente dicha de la traza se debe al proceso de ruptura química de las moléculas que conforman el material del detector, es decir, la partícula alfa viene a ser un tipo de

proyector que rompe dichos enlaces del polímero provocando con ellos una redistribución de cargas en el plástico del material (ver Figura 11-1), dando como resultado una reorganización en la estructura por entrecruzamiento de las cadenas del polímero y el comienzo de nuevas uniones químicas no saturadas, este tipo de daño viene a ser entonces una degradación continua e irreversible del polímero el cual se encuentra formado el detector (Saint Martín, 1999).



**Figura 11-1:** Carácter atómico de una traza en un polímero, ocasionado por una partícula cargada.  
**Fuente:** (Fleischer, Price y Walker, 1975)

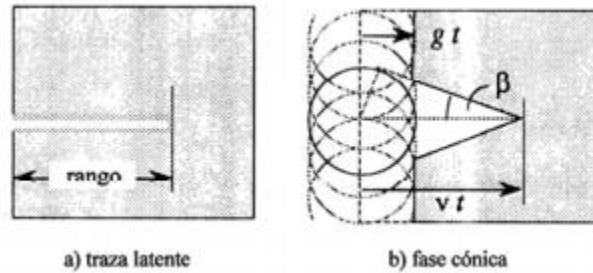
Es preciso mencionar que existe una región en todo este proceso de formación de la traza latente llamada pico térmico, donde se produce una intensa ionización y excitación a lo largo de toda la trayectoria por donde pasa la partícula cargada, provocando que se caliente de manera rápida alcanzando temperaturas altas para luego apagarse velozmente por conducción térmica hacia la matriz circundante, lo que hace que posiblemente sea alterado el material (Fleischer, Price y Walker, 1975).

#### **1.4.3 Metodología y geometría de grabado de la traza nuclear**

El grabado o revelado químico es comúnmente utilizado en este tipo de detectores con el fin de amplificar la traza latente y poder observarla bajo un microscopio óptico, no obstante su proceso es complejo y la información con respecto al mismo no se encuentra totalmente definido (Saint Martín, 1999), por lo que a continuación se tratará de abarcar algunos parámetros o características esenciales que se consideran.

Cuando el CR-39 pasa por la hidrólisis como primera etapa, la cual es responsable de la degradación de las trazas y la superficie del detector; un ion hidróxido ataca al átomo del carbono central del grupo éster dando como resultado un producto intermediario el mismo que produce un rompimiento en la cadena del polímero, un ataque exitoso del ion hidróxido viene a ser con los monómeros terminales o extremos que con los que se encuentran en el centro de la cadena por la facilidad de los mismos para colocarse de forma correcta para la interacción, adicionalmente se da la conformación de orificios formados dentro de la traza de partículas mediante la liberación

de productos gaseosos de reacciones posteriores a la irradiación y estos son para el caso del CR-39, se da el  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  (Lück, 1982). En la Figura 12-1 se puede apreciar como la traza después de ser expuesta a un baño químico, se produce un desgaste superficial especialmente donde está el daño, formando un cono que vendría a ser la traza grabada por toda la trayectoria por donde la partícula incidió.

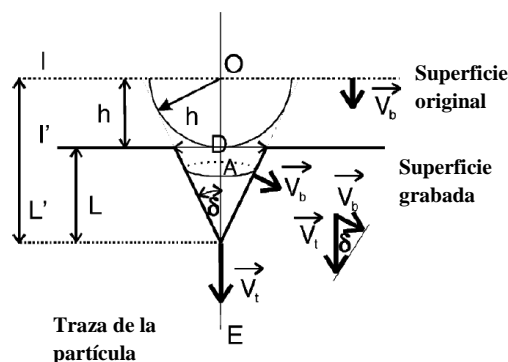


**Figura 12-1:** Cinética de ataque químico durante el proceso de revelado

Fuente: (G. et al., 2007).

Cuando se expone el detector a la radiación ionizante, esta pasa dejando una traza característica asignada por los dos procesos siguientes; el primero como la disolución química a lo largo de la pista de partículas a una tasa de velocidad lineal  $V_t$  y el siguiente proceso viene a ser ataque general a la superficie grabada y a la superficie interior de la pista grabada a una tasa de velocidad menor  $V_b$  (Fleischer, Price y Walker, 1975).

Para la geometría de las trazas se considera el caso más sencillo en donde el ángulo incidente es normal a la superficie y los parámetros mencionados son constantes, como se observa en la Figura 13-1.



**Figura 13-1:** Geometría de la formación de la traza.

Fuente: (García y Carraza, 2018).

En la Figura 13-1 se observa claramente un caso ideal, en donde  $V_b$ ,  $V_t$  son constantes y el material del detector es isotrópico, donde el ataque preferentemente va en la misma trayectoria que el de la partícula se tiene así: el diámetro de la traza como  $D$ , la longitud de la traza que fue grabada como  $L$ , teniendo así la fórmula (2), donde  $t$  viene a ser el tiempo de grabado (Espinosa, 1994):

$$L = (V_t - V_b) \cdot t \quad (2)$$

Se debe considerar que las trazas pueden tener otros tipos de formas debido a que no todas tienen el mismo ángulo de incidencia, energía e incluso puede existir una diferencia al aplicar métodos de revelados distintos, volviendo al caso básico de la Figura 13-1, cuando pasa por procesos de revelado la traza varía y podemos encontrar dos efectos en donde la superficie no afectada que recubre el detector se separa a menor velocidad que en donde se encuentra la parte dañada, lo que hace que el diámetro  $D$  y la longitud  $l$  de la traza sean productos de la diferencia entre estas dos velocidades presentes (Díaz Aguilar, 2015).

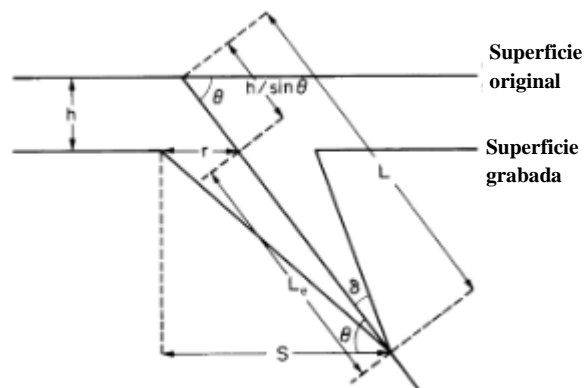
Por lo anterior mencionado, la formación de la traza se encuentra dada principalmente por la siguiente relación (García y Carraza, 2018):

$$V = \frac{V_t}{V_b} \quad (3)$$

Donde:

$V_t$ : es la tasa de grabado a lo largo de la trayectoria de la partícula (tasa de grabado de la traza).

$V_b$ : es la tasa de grabado de las regiones no dañadas del material detector.



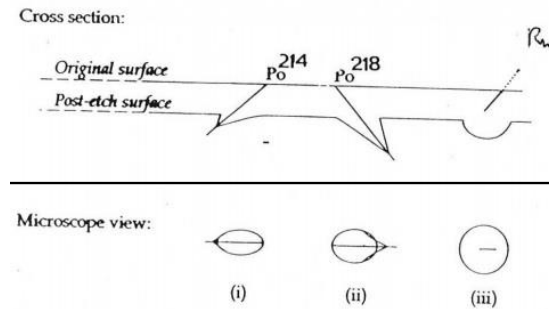
**Figura 14-1:** Geometría de la formación de la traza  $\theta$  con diferente a  $90^\circ$ .

**Fuente:** (Durrani y Bull, 1987).

Lo cual ayuda a la identificación de las partículas cargadas en los detectores, además proporciona parámetros como la eficiencia de grabado y el ángulo crítico de grabado  $\theta_c$ . Cuando el ángulo incidente de los iones es inferior a  $90^\circ$ , el componente de  $V_t$  es perpendicular a la superficie,  $V_t \sin \theta$ , debe exceder  $V_b$  para producir una traza como se observa en la Figura 14-1. Esto significa que existe un ángulo crítico de grabado  $\theta_c$  que por debajo del mismo no es posible que desarrolle una traza (Grabez y Markushev, 2006).



Esta dependencia angular es considerada en muchos modelos propuestos por distintos autores con el fin de poder predecir cómo se formará la traza y cómo será su grabado, aunque el gran inconveniente de estos modelos es que no representan lo que en verdad ocurre de manera experimental en muchos materiales (Espinosa, 1994). A pesar de lo antes mencionado muchas veces las formas de las trazas del Rn-222 y de su progenie de manera experimental pueden ser distinguidos (ver Figura 15-1), siempre y cuando la densidad de trazas no sea alta lo cual pueda facilitar su diferenciación.



**Figura 15-1:** Formas de las trazas de Rn-222 y su progenie.  
Fuente: (Naik, 2013).

Para el año de 1975, Fleischer y Walker encuentran de manera experimental, el valor de la eficiencia la cual estaba relacionada con el ángulo de incidencia de la partícula, lo cual se puede considerar dos casos típicos para el valor de la eficiencia  $\eta$  en función del ángulo de incidencia (Fleischer, Price y Walker, 1975).

$$\eta = \frac{\text{número de trazas reveladas en la superficie}}{\text{número de impactos en la superficie}} \quad (4)$$

1. Si el ángulo de incidencia es constante y las trazas aleatorias en todo el volumen, la eficiencia está dada por:

$$\eta = \cos^2 \theta \quad (5)$$

2. Si las trazas están orientadas de una fuente radiactiva externa y delgada, se tiene:

$$\eta = 1 - \sin \theta \quad (6)$$

Cada valor de eficiencia depende mucho de características como el tipo de químico usado para el revelado de las trazas, la concentración, temperatura incluso si el material fue tratado previa a la exposición, para el caso del CR-39 se tiene un 90% de eficiencia cuando las partículas inciden a  $90^\circ$  con específicas condiciones de grabado, aunque otros parámetros que se pueden considerar

son los efectos ambientales, térmicos, químicos, manejo y almacenamiento, características del material como espesor, impurezas, entre los principales, con el fin de normalizar dichos parámetros y obtener valores más confiables (Espinosa, 1994).

La teoría anteriormente mencionada puede representar el perfil de la traza grabada desde la traza latente como un cilindro y cómo esta va a ir cambiando en los distintos procesos.

#### **1.4.4 Evaluación de la concentración y exhalación de radón utilizando CR-39**

Para la determinación de concentración de radón o torón presente en el aire tanto para lugares abiertos como en lugares cerrados, normalmente la unidad de dicho valor es expresada en pico Curies por litro (pCi/L) en Estados Unidos o Becquerel por metro cúbico (Bq/m<sup>3</sup>) para los demás países (National Research Council (US), 1999), teniendo así la siguiente relación:

$$1 \frac{pCi}{L} = 37 \frac{Bq}{m^3}$$

El cual quiere decir que, un becquerel es la actividad de una determinada cantidad de material radioactivo (en nuestro caso gas radón) en un metro cúbico presente en el aire (Maestre y Yepes, 2016).

Antes de realizar el cálculo de concentración de Rn-222 se debe considerar cada factor por el cual está formada la ecuación (7):

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{C_f * t} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] \quad (7)$$

Donde:

$C_{Rn}$ : es la concentración de Rn-222  $\left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

$\rho$ : es la densidad de trazas  $\left[ \frac{trazas}{cm^2} \right]$ .

$C_f$ : es el factor de calibración  $\left[ \frac{trazas * m^3}{Bq * cm^2 * h} \right]$ .

$t$ : es el tiempo de exposición [h].

La densidad de trazas ( $\rho$ ) viene dado por el promedio de trazas del campo de visión del detector y el área del mismo como se puede apreciar en la siguiente ecuación (8):

$$\rho = \frac{N}{nA} \left[ \frac{trazas}{cm^2} \right] \quad (8)$$

Donde:

$\rho$ : es la densidad de trazas  $\left[\frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2}\right]$ .

$N$ : es el número total de trazas.

$n$ : es el número de campos de visión.

$A$ : es el área de campo de visión (FOV).

El campo de visión o FOV por sus singlas en ingles Field of Vision es la parte del campo de imagen, en donde la imagen se refleja en la retina de quien se encuentra observando, lo cual hace posible verlo en cualquier momento (Motic, 2019). El tamaño del campo de visión depende del aumento del objetivo de resolución de cámara M y CCD (De Felice et al., 2013).

El coeficiente de calibración ( $C_f$ ) es aquel factor que ayuda a convertir la densidad de trazas ( $\text{tr}/\text{cm}^2$ ) a exposición de concentración de radón ( $\text{Bq h}/\text{m}^3$ ) lo cual lo hace indispensable para el cálculo correcto de concentración, dicho coeficiente es calculado bajo ciertas condiciones usando una fuente estándar de Ra-226 y un instrumento electrónico para medir la concentración de actividad en el espacio mediante una cámara de radón bien sellada (Jebur, Subber Abdul y Tuama Saadon, 2019). En la Tabla 6-1 se tiene los distintos valores de los coeficientes de calibración para diferentes alturas del detector con respecto a la muestra.

**Tabla 6-1:** Coeficientes de calibración para detector CR-39

<b>h (cm)</b>	<b>Cf (tr cm<sup>2</sup>/día Bq m<sup>-3</sup>)</b>
5	0,360 ± 0,032
10	0,336 ± 0,030
15	0,326 ± 0,029
20	0,312 ± 0,028
25	0,302 ± 0,027
30	0,272 ± 0,025
35	0,262 ± 0,024
40	0,252 ± 0,023
45	0,242 ± 0,021

**Fuente:** Jebur, Subber Abdul y Tuama Saadon, 2019.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

Una vez determinado la densidad de trazas y definido el coeficiente correcto para el estudio es posible el cálculo de la exposición de la concentración de radón ( $E_c$ ) la cual viene dada en la ecuación (9):

$$E_c = \frac{\rho}{C_f} \left[ \frac{\text{Bq} \cdot \text{h}}{\text{m}^3} \right] \quad (9)$$

Donde:

$\rho$ : es la densidad de trazas  $\left[\frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2}\right]$ .

$C_f$ : es el factor de calibración  $\left[\frac{\text{trazas} * \text{m}^3}{\text{Bq} * \text{cm}^2 * \text{h}}\right]$ .

Por consiguiente, el cálculo para la exhalación superficial y másica de radón se calcula siguiendo la ecuación (10) y (11) respectivamente (Jebur, Subber Abdul y Tuama Saadon, 2019):

$$E_s = \frac{C_{Rn} * t * V * \lambda}{S(t + \lambda^{-1} * (e^{-\lambda t} - 1))} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{ h}}\right] \quad (10)$$

Donde:

$E_s$ : Exhalación superficial de radón  $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{ h}}\right]$ .

$C_{Rn}$ : es la concentración de Rn-222  $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$ .

$t$ : es el tiempo de exposición  $[\text{h}]$ .

$V$ : es el volumen neto  $[\text{m}^3]$ .

$\lambda$ : constante de decaimiento del Rn-222  $[\text{h}^{-1}]$

$S$ : es el área superficial de la muestra  $[\text{m}^2]$ .

Y para la exhalación dependiente de la masa se tiene:

$$E_m = \frac{C_{Rn} * t * V * \lambda}{m(t + \lambda^{-1} * (e^{-\lambda t} - 1))} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg h}}\right] \quad (11)$$

Donde:

$E_m$ : Exhalación másica de radón  $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{Kg h}}\right]$ .

$C_{Rn}$ : es la concentración de Rn-222  $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$ .

$t$ : es el tiempo de exposición  $[\text{h}]$ .

$V$ : es el volumen neto  $[\text{m}^3]$ .

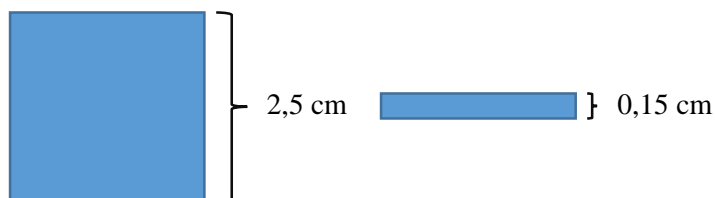
$\lambda$ : constante de decaimiento del Rn-222  $[\text{h}^{-1}]$

$m$ : es la masa total de la muestra  $[\text{kg}]$ .

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En el presente estudio se utilizaron detectores CR-39 (carbonato de polialil-diglicol) con dimensiones de 2,5 cm de lado y un espesor de 0,15 cm (ver Figura 1-2), estos fueron colocados en cámaras estándar para mediciones en aire y en cámaras de difusión no estándar, para analizar las trazas nucleares de las partículas alfa exhaladas por varias muestras. En total se monitorearon 5 lugares, 2 muestras de alimentos (zanahoria y café con granulometría de 3mm), 1 muestra de tufo volcánico italiano y dos piedras altamente radiactivas, una de las cuales fue medida en enero de 2019, en el laboratorio de Análisis de Radiactividad de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) perteneciente al Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables del Ecuador, presentando una concentración de la actividad de uranio-238 de 1800 kBq/g (SCAN, 2019). Adicional al estudio de las trazas nucleares se realizó el cálculo de la concentración de radón indoor y las tasas de exhalación de las muestras de alimentos, el tufo volcánico italiano y las dos piedras radiactivas que de ahora en adelante se llamarán “*piedras de uranio*”.



**Figura 1-2:** Dimensiones del detector pasivo CR-39.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020.

#### 2.1 Medición de radón indoor con cámaras estándar.

Para la medición de radón indoor se utilizó el sistema de detección cámara estándar - detector CR-39 (Figura 2-2). De los cinco lugares monitoreados, la autora de este estudio colocó y realizó el seguimiento solamente de dos detectores, el uno fue colocado en el laboratorio de Técnicas Nucleares durante 90 días y el otro dentro del Búnker del mismo laboratorio. La Tabla 1-2 muestra el código único del detector, lugar y fechas de inicio y fin de la medida.



**Figura 2-2:** Sistema de detección, Izquierda: Cámara estándar.  
Derecha: Detector CR-39.  
**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

**Tabla 1-2:** Información de colocación de detectores CR-39 para mediciones indoor en el laboratorio de Técnicas Nucleares y Búnker.

CODIGO DEL DETECTOR		LOCACIÓN	FECHA Y HORA INICIAL	FECHA Y HORA FINAL
1	97793	Bunker- Laboratorio de Técnicas Nucleares	09/07/2020 - 10h46	07 /10/2020 – 09h35
2	97831	Laboratorio de Técnicas Nucleares	09/07/2020 - 11h50	7/10/2020 – 09h19

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020.

Los otros tres detectores fueron colocados y retirados por los estudiantes de RadioLab (Grupo Ecuador). RadioLab es un proyecto del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) de Italia, diseñado para la divulgación científica. El proyecto está dirigido a estudiantes de secundaria y participan nueve regiones de Italia. El objetivo es introducir a los estudiantes a la investigación científica sobre radiactividad con énfasis en el radón. En el ciclo RadioLab 2017-2019, la Unidad Educativa Andes Collage de la ciudad de Riobamba participó en el proyecto, como grupo externo, y se realizó las medidas indoor antes indicadas. Los detectores fueron colocados en tres edificios de la ciudad de Riobamba por un periodo de 90 días como se detalla en la Tabla 2-2. Los detectores luego de ser expuestos fueron cubiertos en papel de aluminio y guardados en refrigeración debido a que en el laboratorio no se contaba con el método de análisis.

**Tabla 2-2:** Tiempo de exposición de los detectores CR-39 para mediciones indoor (Proyecto RadioLab).

CODIGO DEL DETECTOR		LOCACIÓN	FECHA Y HORA INICIAL	FECHA Y HORA FINAL
3	97893	Municipalidad de Riobamba	09/02/2019 - 11h00	9/05/2019 – 11h05
4	97884	Hospital general docente de Riobamba	10/02/2019 - 11h40	10/05/2019 – 12h00
5	97840	Unidad Educativa Aya Yala	11/02/2019 - 11h50	11/05/2019 – 12h00

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

### ***2.1.1 Procedimiento Experimental***

El detector se colocó en un lugar seguro (sin riesgo de golpes, manipulación, etc.), al menos a 30 cm de las paredes y al menos a 1,5 metros del piso y el techo, a 1 metro de puertas y ventanas. Se registró la fecha y la hora de inicio de la medida y el número del detector.

Al final del período de exposición (90 días), se cubrió el sistema de detección (cámara-detector CR-39) con papel aluminio y se conservó en refrigeración. Se registró la fecha y la hora de fin de la medida.

Es importante señalar que los lugares donde fueron posicionados los detectores no estuvieron cerca de fuentes de calor (estufas, calefactores) ni ventiladores y los rayos del sol no daban directamente.

## **2.2 Evaluación de la tasa de exhalación de las muestras de alimentos y materiales**

### ***2.2.1 Preparación de las muestras***

Las muestras de café y de zanahoria utilizadas estuvieron disponibles en el Laboratorio de Técnica Nucleares, como parte del proyecto de investigación denominado “Evaluación de elementos radiactivos de la serie del uranio 238 en el ambiente en pacientes con cáncer” del Instituto de Investigaciones ESPOCH (enero 2020-marzo 2022), ejecutado por el Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático GIDAC. A continuación, se detalla el origen y preparación de las muestras.

- **Tufo Volcánico Italiano**

La toba o tufo volcánico es ampliamente utilizado en Italia para la construcción de viviendas porque es una roca bastante resistente, ligera y manejable, pero también por razones estéticas. La muestra estudiada procede de la región de Lazio (capital Roma, que también es la capital del país), ubicada en Italia central, limitada al norte con la Toscana y Umbría. El tufo de Lazio es principalmente el resultado de la acción del volcán Sabatino en el período aproximadamente entre 600 000 y 300 000 años atrás (Beck et al., 2006).

La muestra fue transportada al laboratorio de Técnicas Nucleares en el 2018, para realizar una comparación entre mediciones de laboratorio (UNICAL-ESPOCH). Antes de ser transferida fue evaluada en la Agencia Regional para la Protección del Ambiente de la Calabria- Cosenza, Italia en ARPACAL (Agenzia Regionale Protezione Ambientale Calabria), dentro del convenio de

colaboración científica ARPACAL-UNICAL, usando Espectrometría Gamma, la muestra presentó una concentración de la actividad de radio-226 de 269,49 Bq/kg (ARPACAL, 2019).

Para este estudio, se trituró una pequeña parte de la roca, la Figura 3-2 presenta a la izquierda la muestra entera y a la derecha la muestra triturada. La muestra analizada fue tufo volcánico italiano triturado de 35 g.



**Figura 3-2:** Izquierda: Tufo volcánico italiano (piedra entera).  
Derecha: Muestra triturada.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020

- **Café**

La muestra utilizada es café ecuatoriano proveniente de la provincia de Orellana, el grano de café pasó por un proceso de secado en horno casero, posteriormente pelado de forma manual y finalmente molido a una granulometría de 3mm.

- **Zanahoria**

La muestra de zanahoria, originaria de la Sierra ecuatoriana, fue pelada y cortada en rebanadas muy delgadas, luego cada una de las rebanas fueron colocadas de forma separada en una bandeja, para luego ser introducidas en un horno industrial a la temperatura de 56°C durante 48 horas, una vez deshidratadas se trituraron a granulometría de 3mm.

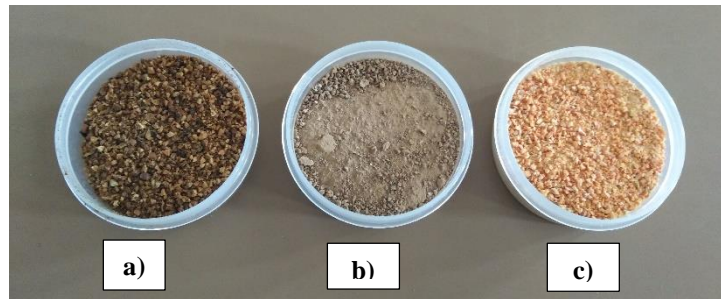
Las muestras de café y zanahoria se pesaron con una balanza de sensibilidad de 1 gramo. Se tomó 35 gramos de cada producto (ver Figura 4-2) y se colocó en envases pequeños de 50 ml, como se puede apreciar en la Figura 5-2.





**Figura 4-2:** Pesaje de la muestra de zanahoria de granulometría 3mm.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020



**Figura 5-2:** a) Muestra de café, b) Muestra de tufo volcánico italiano, c) Muestra de zanahoria.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

- **Piedras de uranio**

Las piedras de uranio son propiedad del laboratorio de Técnicas Nucleares, su origen es desconocido, para el estudio se utilizó dos piedras de 0,34 y 0,71 gramos respectivamente, medidas con una balanza de sensibilidad de 0,01 g.

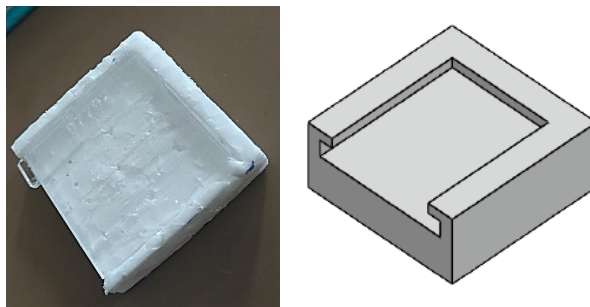
### **2.2.2 Procedimiento experimental**

Para la medición de radón-222 en los alimentos y materiales estudiados, se utilizó el método de *cámara de difusión sellada*. La configuración experimental consiste en el detector pasivo CR-39 desmontable y la cámara de difusión. Cinco recipientes herméticos de plástico de polipropileno de medio litro de capacidad con tapas herméticas, cuyo radio de la base es 4 cm y el radio superior es de 6 cm con una altura de 7 cm, las mismas utilizadas como cámaras de difusión.

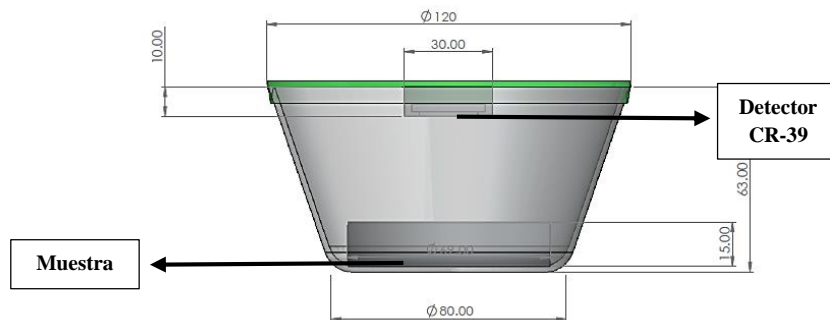
Las muestras de 35 gramos (café y zanahoria) se colocaron en envases plásticos de 3 cm de radio, 1,5 cm de altura y un volumen aproximado de 50 ml. En la tapa de la cámara de difusión se colocó

el detector CR-39 de 2,5 cm x 2,5 cm en un soporte elaborado con una lámina de espuma Flex de dimensiones 3 cm x 3 cm con un espesor de 1 cm como se puede apreciar en la Figura 6-2. Para mayor hermeticidad se colocó un plástico (stretch film) en la embocadura de la cámara antes de situar la tapa. La Figura 7-2 ilustra un esquema del sistema de detección y la Figura 8-2 a la izquierda se observa la cámara de difusión antes de cerrarla y la derecha la tapa de la cámara con el detector incorporado.

Los detectores CR-39 fueron expuestos a cada muestra por un tiempo de 90 días, con excepción de las piedras de uranio que fueron expuestas por 22 días como se reporta en la Tabla 3-2.



**Figura 6-2:** Soporte para el detector CR-39.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020



**Figura 7-2:** Esquema del sistema de detección cámara de difusión - detector CR-39.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020



**Figura 8-2:** Cámara de difusión no estándar antes de ser sellada.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2020

**Tabla 3-2:** Tiempos de exposición del detector a las muestras de alimentos y las rocas estudiadas

EXPERIMENTO/NÚMERO DEL DETECTOR		MUESTRA	FECHA Y HORA INICIO DEL EXPERIMENTO	FECHA Y HORA FIN DEL EXPERIMENTO
1	97832	Tufo volcánico italiano	9 de julio de 2020 - 10h53	7 de octubre de 2020 – 09h12
2	97790	Café	9 de julio de 2020 - 11h15	7 de octubre de 2020 – 09h15
3	97839	Zanahoria	9 de julio de 2020 - 11h33	7 de octubre de 2020 – 09h13
4	97792	Piedra de uranio 1 (0,71 g)	5 de noviembre de 2020 - 10h05	27 de noviembre de 2020 – 11h05
5	97871	Piedra de uranio 2 (0,34 g)	5 de noviembre de 2020 - 10h05	27 de noviembre de 2020 – 11h05

Realizado por: Cantos, Ana, 2020

Para el cálculo de la concentración de radón se utilizó la Ecuación (7), donde se consideró el factor de calibración para una altura aproximada de 5 cm como se muestra en la Tabla 6-1 que corresponde a  $0,360 \pm 0,032 \text{ tr cm}^{-2}/\text{día Bq m}^{-3}$ ; mientras que, para la exhalación superficial y másica de radón se empleó las Ecuación (10) y (11) respectivamente.

### 2.3 Baño químico de los detectores CR-39

Transcurrido el tiempo de exposición planificado, los detectores CR-39 de las diferentes matrices fueron retirados y sometidos al baño químico, empleando una solución de hidróxido de sodio.

Para preparar la solución se mezclaron 500 g de hidróxido de sodio (NaOH) al 25% peso/volumen 6,25 M en dos litros de agua destilada, se procedió a agregar 600ml de la solución en un matraz con agitador magnético, cada detector fue colocado en un soporte hecho con alambre de acero inoxidable y se insertaron cuatro soportes por matraz. Cada matraz fue expuesto a la solución por un lapso de 60 minutos, dicha solución fue calentada a una temperatura aproximada de 98°C, la cual fue controlada constantemente a través de un termómetro mientras la solución era agitada (ver Figura 9-2).



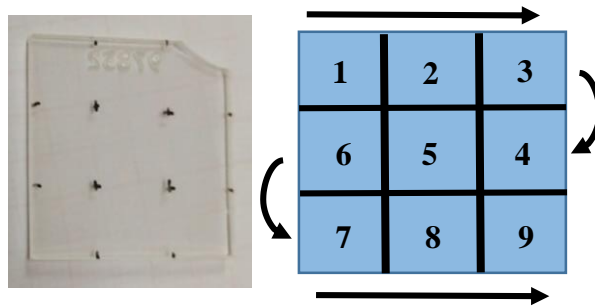
**Figura 9-2:** Configuración experimental para realizar el baño químico de los detectores CR-39.  
**Realizado por:** Cantos, Ana, 2020

Una vez transcurrido los 60 minutos, los detectores fueron extraídos cuidadosamente del matraz, y se procedió a lavarlos con agua destilada para posteriormente sumergirlos en 50 ml de solución de ácido acético al 2% por un tiempo de 30 minutos. Finalmente, los detectores se lavaron con agua destilada para eliminar cualquier residuo de la solución de hidróxido de sodio, y se secaron al aire libre encima de un paño de cocina.

#### **2.4 Lectura de trazas**

El conteo de trazas es posible una vez realizado el baño químico; el número de trazas ayuda a cuantificar y calcular la concentración de radón presente en las muestras y en el ambiente, para esto se utilizó un microscopio óptico de marca Motic de la serie BA210 previamente calibrado el cual cuenta con una cámara de video CMOS incorporada que trabaja en conjunto con el software Motic Images Plus 3.0, propio del microscopio, instalado en un computador, facilitó el estudio de distintas trazas presentes en cada detector.

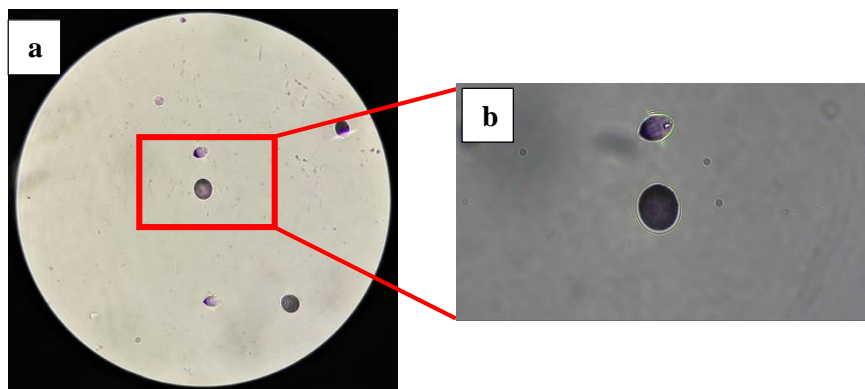
Para el conteo de las trazas primero se dividió a cada detector en 9 sectores de aproximadamente  $0,68 \text{ cm}^2$  debido a que de esta manera se logra realizar un escaneo de forma sistemática como se ve en el esquema de la Figura 10-2, para esto es necesario mover el plano del microscopio siguiendo el orden de izquierda a derecha a lo largo del detector contando en cada sector el número de trazas, luego descendemos y continuamos con el conteo de derecha a izquierda con el fin de evitar un recuento de las trazas ubicadas en los bordes del campo de visión (FOV).



**Figura 10-2:** Esquema para lectura de trazas.  
**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021

Es importante determinar el área del campo de visión para el aumento utilizado ya que varía según el objetivo (10x, 40x, 100x) del microscopio, para el presente estudio de las trazas se utilizó un objetivo de 40x cuya área del campo de visión es 0,0079 cm<sup>2</sup> de esta manera mantenemos un área constante durante cada medición.

Se realizó un total de 10 medidas, una por cada sector siguiendo el orden indicado en la Figura 10-2, la décima medida fue tomada de manera aleatoria, este proceso fue realizado de forma manual ya que la cámara incorporada en el microscopio no abarcaba en totalidad el área del campo de visión como se observa en la Figura 11-2.



**Figura 11-2:** Campo de visión: a. Lente del microscopio, b. Cámara incorporada.  
**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021

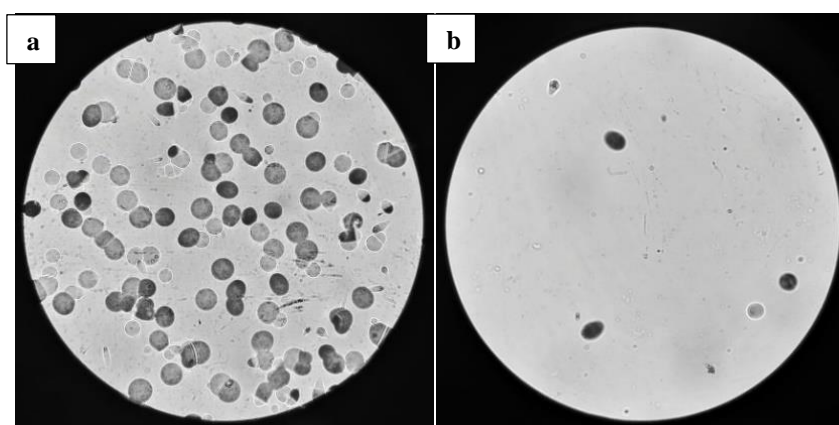
## CAPITULO III

### 3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Identificación y análisis de trazas nucleares

El poder ionizante de las partículas  $\alpha$  provenientes de las muestras analizadas, dañan las moléculas del detector CR-39 a lo largo de su trayectoria y dejan huellas de dimensiones nanométricas (trazas).

Después del tratamiento químico de los detectores, las trazas se pueden visualizar a través del microscopio óptico ya sea de forma manual o automática. La Figura 1-3 a la izquierda, muestra un caso de a densidad alta de trazas (tufo volcánico italiano), mientras que a la derecha se observa un caso de densidad baja de trazas (zanahoria).

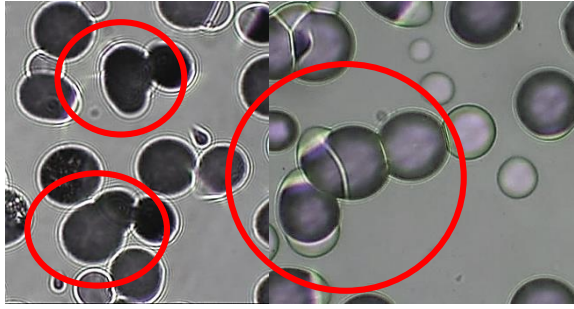


**Figura 1-3:** a. Imagen de alta densidad de trazas (tufo volcánico italiano) b. Imagen de baja densidad de trazas (zanahoria).

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021.

Una densidad alta conllevó a que las trazas se superpongan de manera que no se lograron distinguir de forma individual, dificultando su conteo, este caso es claramente visible en la Figura 2-3, que corresponde a la piedra de tufo volcánico italiano.

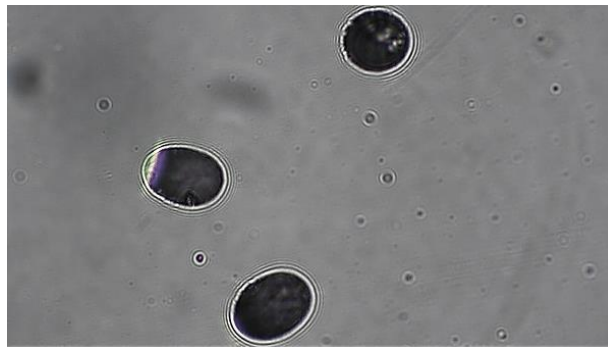
Es importante puntualizar que una densidad alta implica un número alto de partículas alfa que golpean el detector y producen las trazas; por lo tanto, la densidad de trazas depende de la radiactividad de la muestra, así como de las propiedades físicas y químicas y por supuesto del tiempo de exposición.



**Figura 2-3:** Superposición de trazas observada en el análisis del detector expuesto a la piedra de tufo volcánico italiano.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021.

La forma y el tamaño de las trazas varían considerablemente de una huella a otra, generalmente las partículas  $\alpha$  golpean de manera perpendicular la superficie del detector causando trazas circulares, sin embargo, se pudo observar trazas en forma elíptica u ovoide, esto se debe a que las partículas golpean el detector con una incidencia oblicua como se puede ver en la Figura 3-3, observadas con la muestra de zanahoria.

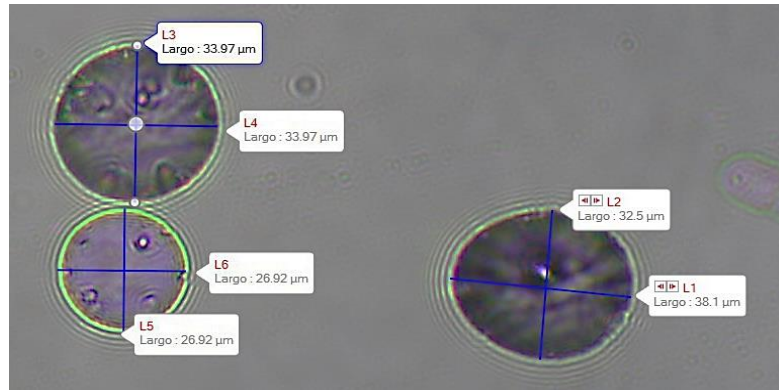


**Figura 3-3:** Diversas formas de trazas del radón y su progenie observadas de la muestra de zanahoria.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021

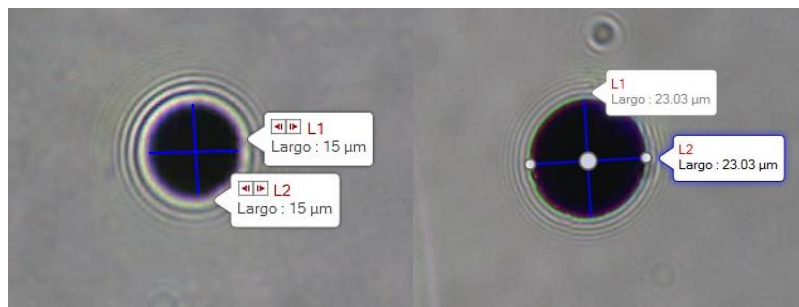
Las trazas que se forman después de haber pasado por el proceso de revelado químico pueden tener un diámetro en el rango de micrómetros, no obstante, se determinó un límite inferior del diámetro debajo del cual la traza no se cuenta, siendo este de 20  $\mu\text{m}$  para las trazas circulares y 30  $\mu\text{m}$  para ovoides y elipses.

A manera de ejemplo, en la Figura 4-3 se muestran trazas circulares que superaron los 30  $\mu\text{m}$  y en la Figura 5-3 trazas circulares con diámetros de 23  $\mu\text{m}$  y de 15  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4-3:** Trazas nucleares circulares que superan los 30  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Realizado por: Cantos, Ana, 2021



**Figura 5-3:** Trazas nucleares circulares con diámetros de 23  $\mu\text{m}$  (derecha) y de 15  $\mu\text{m}$  (izquierda).

Realizado por: Cantos, Ana, 2021.

En la Figura 6-3 se aprecian dos ovoides de longitudes ( $L_2$  y  $L_1$ ) diferentes (34,64  $\mu\text{m}$  y 23,4  $\mu\text{m}$ ) posibles trazas del Polonio-214 (ver Figura 15-1). En este estudio, con el fin de realizar un conteo uniforme en todos los detectores, se descartaron las trazas ovoides o elípticas cuyo largo (de la cabeza a la cola) sea inferior a 20  $\mu\text{m}$ .



**Figura 6-3:** Trazas nucleares de forma ovoide.

Realizado por: Cantos, Ana, 2021.

En la Figura 7-3 se aprecian burbujas secas que son rastros del ácido acético, probablemente debido a un mal enjuague post-baño térmico, es decir, no son trazas nucleares. Es evidente que esta técnica depende en gran medida de las condiciones en las que se realice el baño químico.





**Figura 7-3:** Defectos producidos en el baño químico.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2021.

Del mismo modo es importante mencionar que se identificó y se descartó cualquier defecto de fábrica que se pudo observar, ya que al igual que las trazas al pasar por el baño químico dichos defectos se agrandan de tal manera que pueden ser visualizados en el microscopio, como se aprecian en la Figura 8-3, los cuales ninguno representa una traza.



**Figura 8-3:** Defectos propios de fábrica de los detectores CR-39.  
Realizado por: Cantos, Ana, 2021.

### 3.2 Concentración de gas radón indoor

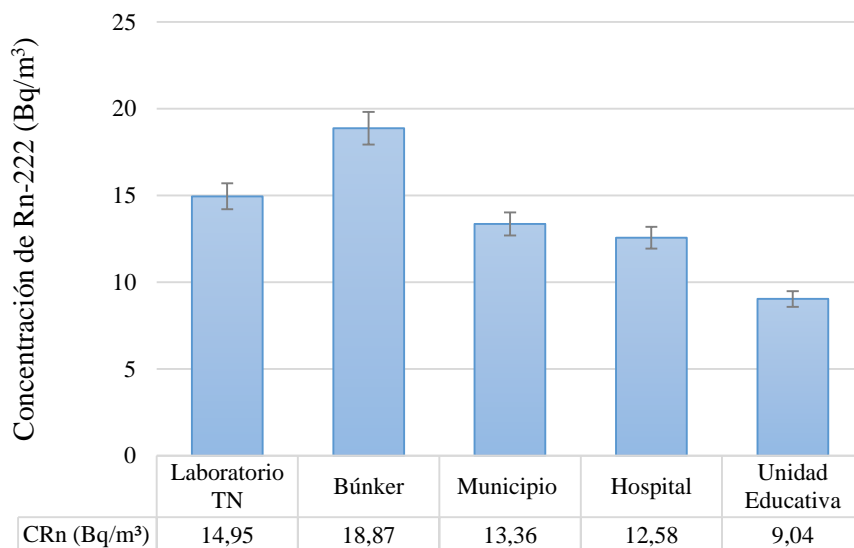
Los resultados de la concentración de radón en cuatro lugares monitoreados en la ciudad de Riobamba y la Unidad Educativa Abya Yala de la parroquia de Columbe, cantón Colta, se muestran en la Tabla 1-3.

**Tabla 1-3:** Concentración de radón indoor, usando detectores CR-39.

Lugar	Tiempo de exposición (h)	Densidad de trazas (Tr/cm <sup>2</sup> )	Concentración de radón (Bq/m <sup>3</sup> )
Laboratorio Técnicas Nucleares	2157	483,83	14,95 ± 2,42
Bunker Laboratorio Técnicas Nucleares	2158	611,16	18,87 ± 2,82
Municipalidad de Riobamba	2160	432,90	13,36 ± 1,98
Hospital General Docente-Riobamba	2160	407,44	12,58 ± 1,86
Unidad Educativa Abya Yala	2160	292,85	9,04 ± 1,83

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

El Gráfico 1-3 presenta los valores de la concentración de radón de la Tabla 1-3, el valor máximo se observa en el Bunker ( $18,87 \pm 2,82 \text{ Bq/m}^3$ ) y el valor mínimo de  $9,04 \pm 1,83 \text{ Bq/m}^3$  en la Unidad Educativa Abya Yala.



**Gráfico 1-3:** Concentraciones de radón en interiores, utilizando detectores CR-39.

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

### 3.3 Tasas de exhalación másica y superficial de radón

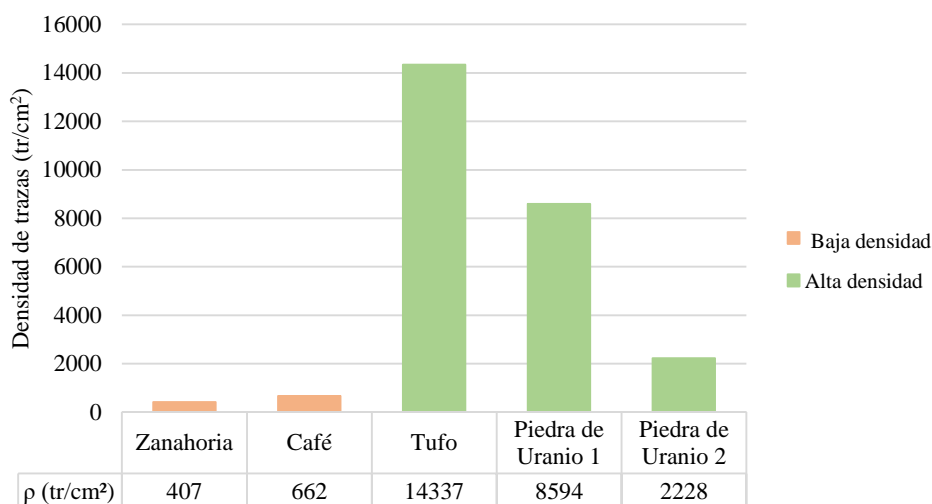
La Tabla 2-3 presenta la concentración de radón en el aire dentro de la cámara de difusión, parámetro necesario para la determinación de las tasas de exhalación másica y superficial de las cinco muestras analizadas.

**Tabla 2-3:** Concentración Rn-222 en el aire dentro de las cámaras de difusión.

Muestra	Tiempo de exposición (h)	Densidad de trazas (Tr/cm²)	Concentración de radón (Bq/m³)
Zanahoria	2158	407,44	$12,59 \pm 2,15$
Café	2158	662,09	$20,45 \pm 3,10$
Tufo	2158	14336,68	$442,84 \pm 56,73$
Piedra de uranio 1	529	8594,37	$1083,10 \pm 140,97$
Piedra de uranio 2	529	2228,17	$280,80 \pm 38,35$

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

En el Gráfico 2-3 se observa claramente la diferencia entre las densidades de trazas de las muestras (ver Tabla 2-3), la máxima de  $14336,678 \text{ tr/cm}^2$  correspondiente al tufo volcánico italiano, mientras que la mínima corresponde a la zanahoria  $407,437 \text{ tr/cm}^2$ .

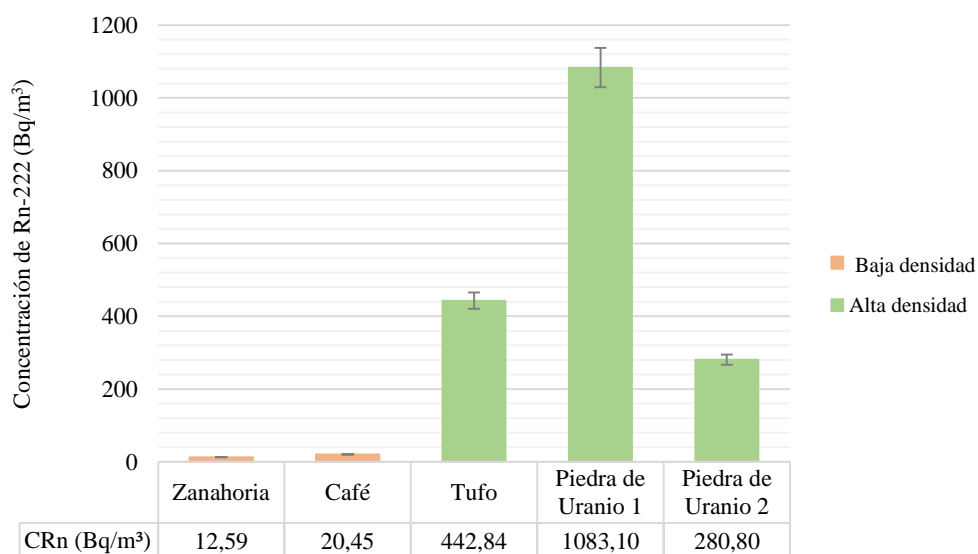


**Gráfico 2-3:** Densidad de trazas de los detectores CR-39 expuestos a dos muestras de alimentos (zanahoria y café) y tres muestras de materiales (tufo volcánico italiano y piedras de uranio).

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021

El Grafico 3-3 ilustra los resultados de la concentración de radón, presentando una inmensa variabilidad entre muestras. La zanahoria presentó las concentraciones más bajas de radón  $12,59 \pm 2,15$  Bq/m<sup>3</sup> con un tiempo de exposición de tres meses. La piedra de uranio 1 presentó la más alta concentración  $1083,10 \pm 140,97$  Bq/m<sup>3</sup> con un tiempo de exposición de 22 días.

En términos de concentración, la piedra de uranio 1, muestra un valor más alto que el tufo volcánico italiano a pesar de tener una densidad de trazas menor, esto debido a que el tiempo de exposición es mucho menor.



**Gráfico 3-3:** Concentración de radón en el aire dentro de la cámara de difusión para las dos muestras de alimentos (zanahoria y café) y las dos muestras de materiales (tufo volcánico italiano y piedras de uranio) estudiadas.

**Realizado por:** Cantos, Ana, 2021

### 3.3.1 Tasa de exhalación másica de radón

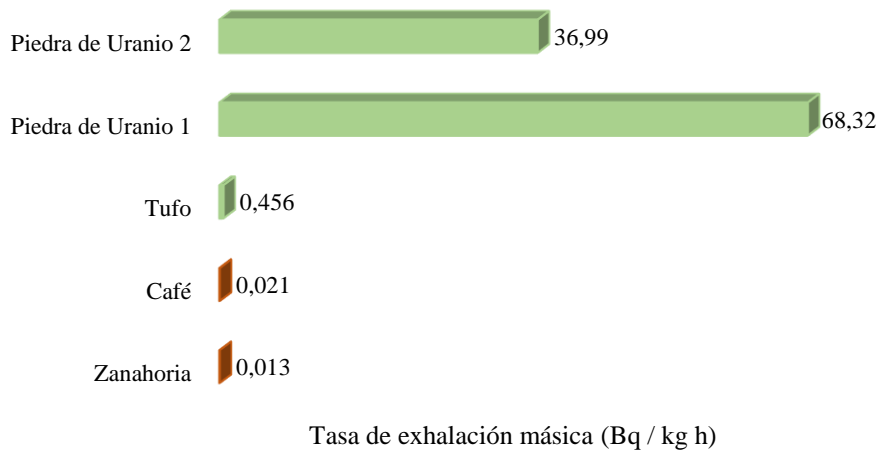
Las muestras analizadas en este trabajo de titulación presentan una gigantesca variabilidad de la tasa de exhalación másica de acuerdo su naturaleza. En la Tabla 3-3 se observa que el valor máximo ( $68,32 \pm 10,29$  Bq /kg h) corresponde a la piedra de uranio 1, de masa de 0,00071 kg. El valor mínimo ( $0,013 \pm 0,002$  Bq /kg h) corresponde a la muestra de zanahoria con una masa de 0,035 kg.

**Tabla 3-3:** Tasa de exhalación másica de gas radón, usando detectores CR-39.

Muestra	Tiempo de exposición (h)	Masa (kg)	Concentración de radón (Bq /m <sup>3</sup> )	Tasa de exhalación másica (Bq /kg h)
Zanahoria	2158	0,035	$12,59 \pm 2,15$	$0,013 \pm 0,002$
Café	2158	0,035	$20,45 \pm 3,10$	$0,021 \pm 0,004$
Tufo	2158	0,035	$442,84 \pm 56,73$	$0,456 \pm 0,068$
Piedra de uranio 1	529	0,00071	$1083,10 \pm 140,97$	$68,32 \pm 10,29$
Piedra de uranio 2	529	0,00034	$280,80 \pm 38,35$	$36,99 \pm 5,85$

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

La Gráfica 4-3 visualiza las muestras con alta y baja tasa de exhalación de gas radón, en verde se muestra los resultados de los materiales y en café de los alimentos.



**Gráfico 4-3:** Tasa de exhalación másica de gas radón para muestras de baja y alta exhalación, usando detectores CR-39.

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

### 3.3.2 Tasa de exhalación superficial de radón

La Tabla 4-3 muestra los resultados de la tasa de exhalación superficial para la zanahoria, café y tufo volcánico italiano, todas trituradas y con una superficie de exhalación de  $0,00374 \text{ m}^2$ . El tufo volcánico presenta una tasa de exhalación superficial muy alta respecto a la zanahoria y café, resultado esperado teniendo en cuenta su alta concentración de radio-226, mencionada en la sección (2.2.1).

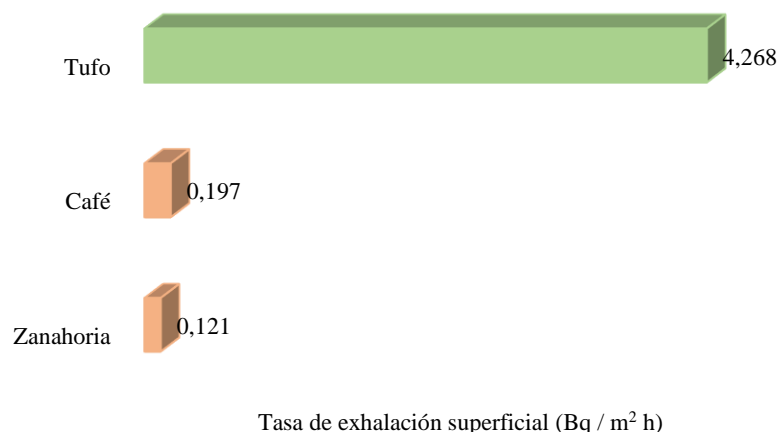
Para las piedras de uranio no fue posible realizar el cálculo de la superficie de exhalación debido a la irregularidad de las superficies y la peligrosidad de estas muestras.

**Tabla 4-3:** Tasa de exhalación superficial de gas radón, usando detectores CR-39.

Muestra	Tiempo de exposición (h)	Superficie de exhalación ( $\text{cm}^2$ )	Concentración de radón ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Tasa de exhalación superficial ( $\text{Bq}/\text{m}^2 \text{ h}$ )
Zanahoria	2157,667	37,4	$12,59 \pm 2,15$	$0,121 \pm 0,024$
Café	2158,000		$20,45 \pm 3,10$	$0,197 \pm 0,035$
Tufo	2158,317		$442,84 \pm 56,73$	$4,268 \pm 0,679$

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

Cabe señalar que con el propósito de visualizar la dependencia de la tasa de exhalación superficial con las propiedades y el contenido de radio-226 de las muestras, los tres experimentos fueron diseñados con el mismo tiempo de exposición de los detectores y la misma superficie de exhalación. La Gráfica 5-3 presenta los valores de la Tabla 4-3 y evidencia que la tasa de exhalación depende de las particularidades de la muestra.



**Gráfico 5-3:** Tasa de exhalación superficial de gas radón para muestras de baja y alta exhalación, usando detectores CR-39.

Realizado por: Cantos, Ana, 2021

## CONCLUSIONES

- La técnica de cámara sellada desarrollada en el laboratorio de Técnica Nucleares-ESPOCH, usando detectores pasivos CR-39, permitió la caracterización de las trazas dejadas por las partículas alfa presentes en ambientes indoor y provenientes de las muestras de café, zanahoria, tufo volcánico italiano y las dos piedras de uranio.
- La concentración de radón en interiores, monitoreada con CR-39, en cinco lugares de la ciudad de Riobamba y el cantón Colta, presentó un valor máximo de  $18,87 \pm 2,82 \text{ Bq/m}^3$  en el Bunker del laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH y un valor mínimo de  $9,04 \pm 1,83 \text{ Bq/m}^3$  en la Unidad Educativa Abya Yala de la parroquia Columbe, cantón Colta. El valor medio de la concentración fue de  $14 \text{ Bq/m}^3$ .
- Las muestras de alimentos y materiales analizadas en este trabajo de titulación presentan una importante variabilidad en términos de tasa de exhalación másica. El valor máximo ( $68,32 \pm 10,29 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponde a la piedra de uranio 1, de masa de  $0,00071 \text{ kg}$ . El valor mínimo ( $0,013 \pm 0,002 \text{ Bq /kg h}$ ) corresponde a la muestra de zanahoria con una masa de  $0,035 \text{ kg}$ .
- Los resultados de la tasa de exhalación superficial de gas radón, calculada para las muestras trituradas de zanahoria, café y tufo volcánico italiano, muestran que el tufo volcánico presenta un valor muy alto ( $4,268 \pm 0,679 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) respecto a la zanahoria ( $0,121 \pm 0,024 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ) y el café ( $0,197 \pm 0,035 \text{ Bq / m}^2 \text{ h}$ ).

## RECOMENDACIONES

- Al realizar el baño térmico es importante el control constante de la temperatura durante el proceso, puesto que las temperaturas útiles para los detectores de policarbonato CR-39 están entre 70 °C y 110 °C.
- Se recomienda seguir correctamente cada paso del lavado, ya que es una parte importante para la formación de la traza, ya sea durante el baño térmico como en el enjuague y posterior secado del detector, ya que de esto dependerá la visibilidad de las trazas en el microscopio.
- La solución de hidróxido de sodio debe estar en constante agitación durante todo el proceso del baño térmico, puesto que la solución tiende a sedimentarse en el fondo.
- Se recomienda el uso de un microscopio con cámara de video CCD para poder tomar con mejor resolución fotos.

## BIBLIOGRAFÍA

**ABBAS, Y.M., HEGAZY, T.M., NASSIF, M.S., SHOEIB, M.Y. & ABD-ELRAHEEM, A.F.** "Measurement of <sup>226</sup>Ra concentration and radon exhalation rate in rock samples from Al-Qusair area using CR-39". *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* [en línea], 2020, vol. 13, no. 1, pp. 102-110. [Consulta: 14 febrero 2021]. ISSN 1687-8507. DOI 10.1080/16878507.2019.1706264. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/16878507.2019.1706264>.

**ABOJASSIM, A.A.** "Estimation of Human Radiation Exposure from Natural Radioactivity and Radon Concentrations in Soil Samples at Green Zone in Al-Najaf, Iraq". *Iranian Journal of Energy & Environment* [en línea], 2017, vol. 8, no. 3, pp. 239-248. [Consulta: 14 febrero 2021]. DOI 10.5829/IJEE.2017.08.03.10. Disponible en: [http://www.ijee.net/article\\_64689.html](http://www.ijee.net/article_64689.html).

**AGUILAR, A.J.** Determinación de los niveles de Radón-222 presentes en la mina subterránea «El Señor de Roma» en el cantón Zaruma-El Oro, Ecuador (Tesis de Licenciatura) Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Carrera de Ingeniería Ambiental. Cuenca-Ecuador. 2018. pp. 25-31. [Consulta: 2020-11-12]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16203>

**AHMED, A.H. & SAMAD, A.I.** "Measurement of Radioactivity Levels in Daily Intake Foods of Erbil City Inhabitants". *Journal of Zankoy Sulaimani - Part A* [en línea], 2014, vol. 16, no. 4, pp. 111-121. [Consulta: 10 enero 2021] ISSN 18124100. DOI 10.17656/jzs.10351.

**ANDERSÉN, C.** Time-resolved measurements of radon concentration in the stockholm subway tunnels. (Trabajo de titulación) (Maestría). University of Gothenburg The Sahlgrenska Academy. Department Of Radiation Physics. Gotenburgo-Suecia. 2015. pp. 5-7. [Consulta: 2020-06-23]. Disponible en: [https://radfys.gu.se/digitalAssets/1568/1568221\\_time-resolved-measurements-of-radon-concentration-in-the-stockholm-subway-tunnels.pdf](https://radfys.gu.se/digitalAssets/1568/1568221_time-resolved-measurements-of-radon-concentration-in-the-stockholm-subway-tunnels.pdf)

**ARAMBURU, X.O. & BISBAL, J.J.** *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos I* [en línea]. Barcelona: Editions UPC, 2009. [Consulta: 19 abril 2020]. ISBN 8483010887. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Q5vG3UIIYm4C&oi=fnd&pg=PA17&dq=RADIACIONES+IONIZANTES.+UTILIZACION+Y+RIESGOS&ots=8TJ3GMH2Zz&sig=h3A0NGq1Y19TEc6ZxuJmGuIg8ZM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=RADIACIONES+IONIZANTES.+UTILIZACION+Y+RIESGOS&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Q5vG3UIIYm4C&oi=fnd&pg=PA17&dq=RADIACIONES+IONIZANTES.+UTILIZACION+Y+RIESGOS&ots=8TJ3GMH2Zz&sig=h3A0NGq1Y19TEc6ZxuJmGuIg8ZM&redir_esc=y#v=onepage&q=RADIACIONES+IONIZANTES.+UTILIZACION+Y+RIESGOS&f=false).

**ARANZULLA, M.** Misura di Radon con la tecnica dei rivelatori a tracce CR-39. Progettazione ed applicazioni. (Tesis Doctoral). Università degli Studi di Catania. Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche E Naturali. Corso di Laurea in Fisica. Catani-Italia. 2005. [Consulta: 2020-06-13]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Massimo-Aranzulla/publication/280576192\\_Misure\\_di\\_Radon\\_con\\_la\\_tecnica\\_dei\\_rivelatori\\_a\\_tracce\\_nucleari\\_CR-39\\_Progettazione\\_ed\\_applicazioni/links/55bb7acd08aec0e5f4416f9e/Misure-di-Radon-con-la-tecnica-dei-rivelatori-a-tracce-nucleari-CR-39-Progettazione-ed-applicazioni.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Massimo-Aranzulla/publication/280576192_Misure_di_Radon_con_la_tecnica_dei_rivelatori_a_tracce_nucleari_CR-39_Progettazione_ed_applicazioni/links/55bb7acd08aec0e5f4416f9e/Misure-di-Radon-con-la-tecnica-dei-rivelatori-a-tracce-nucleari-CR-39-Progettazione-ed-applicazioni.pdf)

**ARPACAL.** Rapporto di prova N.R.:2038. Reggio Calabria. 2019.

**ARPANSA.** Alpha particles. [en línea]. 2019 [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles>.

**ATWOOD, D.A.** *Radionuclides in the Environment - Google Libros* [en línea]. Primera. New York: John Wiley & Sons Inc. 2010 [Consulta: 1 marzo 2020]. ISBN 0470714344. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=R5ATOUAFRIYC&pg=RA1-PT364&lpg=RA1-PT364&dq=cr-39+radionuclides&source=bl&ots=koDrb857lB&sig=ACfU3U0ZLeNEsHvr\\_6iWBVWhkq6SpFInA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjYtflLjj\\_fnAhWlm-AKHcVYCA0Q6AEwDXoECAsQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=R5ATOUAFRIYC&pg=RA1-PT364&lpg=RA1-PT364&dq=cr-39+radionuclides&source=bl&ots=koDrb857lB&sig=ACfU3U0ZLeNEsHvr_6iWBVWhkq6SpFInA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjYtflLjj_fnAhWlm-AKHcVYCA0Q6AEwDXoECAsQAQ#v=onepage&q&f=false).

**BECK, K., ROZENBAUM, O., RAUTUREAU, M., BECK, K., ROZENBAUM, O. & CHARACTERIZATION, M.R.** "Characterization , water transfer properties and deterioration in tuffeau : building material in the Loire valley-



- France". *Building and environment* [en línea], 2003, vol. 38, no 9-10, p. 1151-1162. [Consulta: 1 marzo 2020]. ISSN 0360-1323, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00074-X). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230300074X>
- BENÉS, A.P.** *NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud*. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. 1999.
- BRAVO, Á.R.A.** Analizar la exposición al radón por los trabajadores y usuarios de dos balnearios de aguas termales de la parroquia Baños, considerando las propiedades físico - químicas del agua y las variables meteorológicas de la zona. (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Carrera de Ingeniería Ambiental. Cuenca-Ecuador. 2018. [Consulta: 2020-06-23]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15270>.
- CAMPOS, M.P. De & MARTINS, E.W.** "Calibration of the Solid State Nuclear Track Detector CR-39 for Radon Measurements". *2007 International Nuclear Atlantic Conference* [en línea], 2007, pp. 3-6. [Consulta: 10 febrero 2020]. ISBN 978-85-99141-02-1. Disponible en: <https://www.ipen.br/biblioteca/2007/inac/12018.pdf>.
- CARTWRIGHT, B.G., SHIRK, E.K. & PRICE, P.B.** "A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution". *Nuclear Instruments and Methods* [en línea], 1978, vol. 153, no. 2-3, pp. 457-460. [Consulta: 1 marzo 2020] ISSN 0029554X. DOI 10.1016/0029-554X(78)90989-8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X78909898>.
- CASSOU, R.M. & BENTON, E. V.** "Properties and applications of CR-39 polymeric nuclear track detector". *Nuclear Track Detection* [en línea], 1978, vol. 2, no. 3, pp. 173-179. [Consulta: 11 marzo 2020] ISSN 0145224X. DOI 10.1016/0145-224X(78)90021-2. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0145224X78900212>.
- CDC.** Radioisotope Brief: Uranium-235 (U-235) and Uranium-238 (U-238). [en línea], 2018. [Consulta: 2 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/isotopes/uranium.htm>.
- CHEMICAL RETRIEVAL ON THE WEB.** Polymer Properties Database. [en línea], 2019. [Consulta: 9 junio 2020]. Disponible en: <https://polymerdatabase.com/Polymer Brands/ADC.html>.
- CORTEZ, G.L., CAMINO, N., LACOLLA, L., MELCHIORRE, M.L., HUARANCA, M.E. & CURELL, M.** *Radiaciones: una mirada multidimensional* [en línea]. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2014. ISBN 9789500010467. [Consulta: 26 enero 2020]. Disponible en: <http://repositorio.educacion.gov.ar:8080/dspace/handle/123456789/110430>
- CSN.** *Dosis de Radiación*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear, 2010. [Consulta: 20 enero 2020]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci%C3%B3n#:~:text=Radiaci%C3%B3n%20c%C3%B3smica&text=La%20dosis%20media%20es%200,exposici%C3%B3n%20a%20los%20rayos%20c%C3%B3smicos>.
- CSN.** Radiación natural y artificial. [en línea], 2015. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>.
- DE FELICE, P., COTELLESA, G., CAPOGNI, M., CARDELLINI, F., PAGLIARI, M. & SCIOCCHETTI, G.** "The novel track recording apparatus from SSNTD for radon measurement". *Romanian Reports of Physics* [en línea], 2013, vol. 58, no. SUPPL., pp. 115-125. [Consulta: 15 abril 2020] ISSN 1221146X. Disponible en: [https://www.nipne.ro/rjp/2013\\_58\\_Suppl/0115\\_0125.pdf](https://www.nipne.ro/rjp/2013_58_Suppl/0115_0125.pdf).
- DÍAZ AGUILAR, C.E.** Evaluación del campo de neutrones térmicos y epitérmicos producido en un Acelerador Lineal de 15-20 Mv de Radioterapia empleando Detectores Pasivos Poly-allyl-diglycol-carbonate PADC [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría), Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias y Medicina. Venezuela. 2015. pp. 54-67. [Consulta: 2020-04-12]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/18170>.
- DURRANI, S.A. & BULL, R.K.** *Solid State Nuclear Track Detection - 1st Edition* [en línea]. 1st. S.l.: Pergamon. 1987. [Consulta: 20 junio 2020]. ISBN 9781483147512. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/solid-state-nuclear-track-detection/durrani/978-0-08-020605-9>.
- EPA.** A Citizen's Guide to Radon The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon Indoor Air Quality

(IAQ). [en línea], 2016, no. EPA402/K-12/002. [Consulta: 15 junio 2020]. Disponible en: [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon).

**ESPINOSA-GARCÍA, G.C.** *Gas radon en cuevas. Su origen, medición, distribución y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública*. México: Instituto de Física, UNAM [en línea], 2016. ISBN 9786070278228. Disponible en: [https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/2017/2016-Radon\\_en\\_Cuevas-G\\_Espinoza.pdf](https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/2017/2016-Radon_en_Cuevas-G_Espinoza.pdf)

**ESPINOSA, G.** *Trazas nucleares en sólidos*. México: Nat. Auton. Univ [en línea], 1994. ISBN 9683642195. Disponible en: [https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/1994-LIBRO-Trazas\\_Nucleares\\_en\\_Solidos.pdf](https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/1994-LIBRO-Trazas_Nucleares_en_Solidos.pdf)

**FARHOOD, A.K.** "Assessment of radon concentrations and effective radium content in Samawa desert truffles-Iraq". *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research* [en línea], 2015, vol. 6, no. 12, pp. 131-143. [Consulta: 15 junio 2020]. Disponible en: <https://www.imedpub.com/abstract/assessment-of-radon-concentrations-and-effective-radium-content-in-samawa-desert-truffles-iraq-13932.html>

**FAURE, G. & MENSING, T.M.** *Principles and Applications*. Third edit. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

**FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. & WALKER, R.M.** *Nuclear Tracks in Solids: Principles & Applications*. Illustrated. Berkeley and Los Angeles. 1975. ISBN 0520026659.

**SAINT MARTIN, G., et al G.** "Technical aspects in the obtention of tissue Autoradiography". *Annual meeting of the Argentine Association of Nuclear Technology: Nucleo electricity: the solution*, 2007, vol. 40, no. 12. [Consulta: 15 junio 2020]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/21152610>.

**GARCÍA, G.C.E. & CARRAZA, A.Á.**, 2018. *Radón Intramuros y Salud Pública*. Primera. México: Universidad Nacional Autónoma de México [en línea]. 2018. [Consulta: 10 febrero 2020] ISBN 9786073003315. Disponible en: [https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/2018/2018-03-07\\_LIBRO\\_Radon\\_intramuros\\_y\\_salud\\_publica-Espinoza\\_y\\_Angeles\\_16p.pdf](https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/2018/2018-03-07_LIBRO_Radon_intramuros_y_salud_publica-Espinoza_y_Angeles_16p.pdf).

**GARZON, G., HINCAPIE, W. & SALAZAR, S.** "El gas radón: una amenaza radiactiva natural". *Boletín de Geología* [en línea], 2004, vol. 26, no. 42, pp. 87-93. [Consulta: 2 agosto 2020]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/8252>

**GILLMORE, G.K., CROCKETT, R. & PRZYLIBSKI, T.** "IGCP Project 571: Radon, Health and Natural Hazards" Preface. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [en línea], 2010, vol. 10, no. 10, pp. 2051-2054. [Consulta: 27 diciembre 2019] DOI 10.5194/nhess-10-2051-2010. Disponible en: <https://nhess.copernicus.org/articles/10/2051/2010/nhess-10-2051-2010.pdf>

**GRABEZ, B. & MARKUSHEV, D.** "Indoor radon measurements by nuclear track detectors: Applications in secondary schools". *Physics, Chemistry and Technology* [en línea], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 93-100. [Consulta: 14 agosto 2020] DOI 10.2298/FUPCT0601093B. Disponible en: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0354-46560601093B>

**HASSANVAND, H., BIRJANDI, M., AMIRI, A., HASSANVAND, M.S. & KAMAREHIE, B.** "Investigation of indoor radon concentration in dwellings of Aleshtar (western part of Iran) and estimation of the annual effective dose from exposure to radon". *International Journal of Radiation Research* [en línea], 2019, vol. 17, no. 4, pp. 659-666. [Consulta: 15 junio 2020]. ISSN 23454229. DOI 10.18869/acadpub.ijrr.17.3.659. Disponible en: <https://lu.ac.ir/usersfiles/51241012400927807442245377.pdf>

**HEALTH CANADA.** "Guide for Radon Measurements in Residential Dwellings (Homes)". *Environmental and Workplace Health* [en línea], 2008. [Consulta: 15 diciembre 2019]. Disponible en: [http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/radon\\_homes-maisons/index-eng.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/radon_homes-maisons/index-eng.php).

**HOWARTH, C.B.** *Results of the 2014 PHE Intercomparison of Passive Radon Detectors*. London: Wellington House [en línea] 2015. [Consulta: 28 agosto 2020]. Disponible en: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/471195/PHE-CRCE-022.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/471195/PHE-CRCE-022.pdf)

**HUSSAIN, R.O. & HUSSAIN, H.H.** "Natural Occurring Radionuclide Materials". *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences* [en línea]. 2011. [Consulta: 15 junio 2020]. DOI: 10.5772/20562 Disponible en:

<https://www.intechopen.com/books/radioisotopes-applications-in-physical-sciences/natural-occurring-radionuclide-materials>

**IAEA.** "National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings". *IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications* [en línea], 2013, no. 33, pp. 35. Disponible en: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10646/National-and-Regional-Surveys-of-Radon-Concentration-in-Dwellings-Review-of-Methodology-and-Measurement-Techniques>.

**IARC.** *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans* [en línea]. Lyon: France. 1988. ISBN 978-92-832-1243-0. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/61>.

**ISTAS-CCOO.** *Exposición laboral al radón Guía para la prevención* [en línea]. España: QAR Comunicación, SA. 2017. Disponible en: [https://istas.net/sites/default/files/2019-04/Guia\\_Radon\\_2019.pdf](https://istas.net/sites/default/files/2019-04/Guia_Radon_2019.pdf).

**JEBUR, J., NADER, A.F. & SUBBER, A.** "Radon Exhalation and Natural Radioactivity Levels of Raw Materials Used Building Industry in Basra Governorate in Iraq". *Advances in Applied Science Research* [en línea], 2017, vol. 8, no. 1, pp. 76-84. [Consulta: 14 febrero 2021]. ISSN : 0976-8610. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/315811936\\_Radon\\_Exhalation\\_and\\_Natural\\_Radioactivity\\_Levels\\_of\\_Raw\\_Materials\\_Used\\_Building\\_Industry\\_in\\_Basra\\_Governorate\\_in\\_Iraq](https://www.researchgate.net/publication/315811936_Radon_Exhalation_and_Natural_Radioactivity_Levels_of_Raw_Materials_Used_Building_Industry_in_Basra_Governorate_in_Iraq)

**JEBUR, J.H., SUBBER ABDUL, R.H. & TUAMA SAADON, W.** "Calibration of CR-39 for different heights of radon dosimeters and application of radon concentration in Mahajran River sediment in Basra Governorate, Iraq". *Journal of Physics: Conference Series* [en línea], 2019, vol. 1294, no. 2. [Consulta: 2 febrero 2021]. ISSN 17426596. DOI 10.1088/1742-6596/1294/2/022013. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1294/2/022013/pdf>

**KNOLL, G.F. & KRANER, H.W.** *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 1981. ISBN 9780470131480.

**KOC, P., EKINCI, N., CINAN, E. & KAVAZ, E.** "Determination of radon concentration by using CR-39 plastic track detectors in dwellings of Bingöl and Mus provinces of Turkey". *Asian Journal of Chemistry* [en línea], 2018, vol. 30, no. 1, pp. 226-230. [Consulta: 2 febrero 2021]. ISSN 09707077. DOI 10.14233/ajchem.2018.21094. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/321410167\\_Determination\\_of\\_Radon\\_Concentration\\_by\\_Using\\_CR-39\\_Plastic\\_Track\\_Detectors\\_in\\_Dwellings\\_of\\_Bingol\\_and\\_Mus\\_Provinces\\_of\\_Turkey](https://www.researchgate.net/publication/321410167_Determination_of_Radon_Concentration_by_Using_CR-39_Plastic_Track_Detectors_in_Dwellings_of_Bingol_and_Mus_Provinces_of_Turkey).

**LÜCK, H.B.** "Mechanism of particle track etching in polymeric nuclear track detectors". *Nuclear Instruments and Methods* [en línea], 1982, vol. 202, pp. 497-501. [Consulta: 28 junio 2020]. DOI [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(82\)90547-6](https://doi.org/10.1016/0167-5087(82)90547-6). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167508782905476>.

**MAESTRE, C.R. & YEPES, S.C.** "Detection and importance of the presence of Radon Gas in Buildings". *International Journal of Engineering and Technical Research* [en línea]. 2016, vol. 0869, no. 1, pp. 67-70. [Consulta: 15 junio 2020]. ISSN: 2321-0869. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/53945>.

**MAGED, A.F., TSURUTA, T. & DURRANI, S.A.** "Experimental and theoretical considerations on the calibration factor K between  $\alpha$ -activity concentration and track density for application in radon dosimetry". *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* [en línea]. 1993, vol. 170, no. 2, pp. 423-431. [Consulta: 19 abril 2020]. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02041478>. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02041478>.

**MARSH, J.W. & BAILEY, M.R.** "A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny". *Radiation Protection Dosimetry* [en línea], 2013, vol. 157, no. 4, pp. 499-514. [Consulta: 12 noviembre 2020]. ISSN 01448420. DOI 10.1093/rpd/nct179. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23887272/>.

**MIGLIERINI, M.** *Detectors of Radiation*. Slovak University of Technology. Bratislava-Slovakia. 2004, pp. 1-14.

**MMC RADON REMEDIATION** What Is Radon? [en línea], 2020. [Consulta: 28 junio 2020]. Disponible en: <https://mmcradonremedy.com/what-is-radon/>.

**MOTIC.** *BA210 Basic Biological Microscope Instruction Manual*. 2019. Motic Incorporation Ltd. Disponible en: <https://www.microscopeworld.com/images/Manuals/BA210%20Manual.pdf>

**MUSA, I.S.M.** Radon in natural waters Analytical Methods; Correlation to Environmental Parameters; Radiation Dose Estimation; and GIS Applications [en línea]. (Doctoral Thesis) Linköping University. Faculty of Health Sciences. Sweden. 2003. [Consulta: 2020-06-23]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/267512664\\_RADON\\_IN\\_NATURAL\\_WATERS\\_Analytical\\_Methods\\_Correlation\\_to\\_Environmental\\_Parameters\\_Radiation\\_Dose\\_Estimation\\_and\\_GIS\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/267512664_RADON_IN_NATURAL_WATERS_Analytical_Methods_Correlation_to_Environmental_Parameters_Radiation_Dose_Estimation_and_GIS_Applications)

**NAIK, A.S.** *CR-39 for Measuring Exposure to Radon (222 Rn)*. 2013. Mortara: s.n. Disponible en: <https://ardent.web.cern.ch/dl/outreach/Experimental%20session%20Radon%20measurements%20with%20CR-39%20-%20Alvin%20Sashala%20Naik.pdf>

**NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP).** *NCRP Report No. 77: Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters*. NCRP Report No. 77, 1991. ISBN 0913392677. Disponible en: <https://jnm.snmjournals.org/content/25/11/1273.3>.

**NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US).** *Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* [en línea]. Washington (DC): National Academy Press. 1999. [Consulta: 16 enero 2020]. ISBN 0-309-06297-7. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230646/>.

**NIKEZIC, D. & YU, K.N.** "Formation and growth of tracks in nuclear track materials". *Materials Science and Engineering R: Reports* [en línea], 2004, vol. 46, no. 3-5, pp. 51-123. [Consulta: 6 junio 2020]. ISSN 0927796X. DOI 10.1016/j.mser.2004.07.003. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X04000579>

**NIST.** New Standardization of Ra-228. [en línea]. 2018. [Consulta: 2 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.nist.gov/programs-projects/new-standardization-ra-228>.

**OMS.** *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de Salud Pública*. [en línea]. 2015. Disponible en: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671\\_spa.pdf;jsessionid=A4670612B6331DC095D298D61E5764C2?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=A4670612B6331DC095D298D61E5764C2?sequence=1).

**RIDHA, A.A.** Determination of Radionuclides Concentrations in Construction Materials Used in Iraq [en línea]. (Trabajo de titulación). (Maestría). University of Al-Mustansiriyah. 2001. [Consulta: 2020-08-05]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Ali\\_Ridha5/publication/304677185\\_Determination\\_of\\_Radionuclides\\_Concentrations\\_in\\_Construction\\_Materials\\_Used\\_in\\_Iraq/links/57770b6008aeb9427e2794df/Determination-of-Radionuclides-Concentrations-in-Construction-Materials-Used-in-Iraq.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ali_Ridha5/publication/304677185_Determination_of_Radionuclides_Concentrations_in_Construction_Materials_Used_in_Iraq/links/57770b6008aeb9427e2794df/Determination-of-Radionuclides-Concentrations-in-Construction-Materials-Used-in-Iraq.pdf)

**ROBERTSON, A., ALLEN, J., LANEY, R. & CURNOW, A.** "The cellular and molecular carcinogenic effects of radon exposure: A review". *International journal of molecular sciences* [en línea], 2013, vol. 14, no 7, p. 14024-14063. [Consulta: 15 junio 2020]. ISBN 4418722564. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1422-0067/14/7/14024>

**ROBLEDO, F.H.** *Riesgos Físicos II: Iluminación*. Primera. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2017. ISBN 9789586484831.

**SAGHEER, R., RAFIQUE, M.S., SALEEMI, F., ARIF, S., NAAB, F., TOADER, O., MAHMOOD, A., RASHID, R. & HUSSAIN, I.** "Modification in surface properties of poly-allyl-diglycol-carbonate (CR-39) implanted by Au+ ions at different fluences". *Materials Science- Poland*, 2016, vol. 34, no. 2, pp. 468-478. ISSN 2083134X. DOI 10.1515/msp-2016-0067.

**SAINT-FORT, R.** "Understanding Sorption Behavior and Properties of Radionuclides in the Environment". *Principles and Applications in Nuclear Engineering - Radiation Effects, Thermal Hydraulics, Radionuclide Migration in the Environment* [en línea]. 2016, vol. 121, pp. 13. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.

**SAINT MARTÍN, M.L.G.** Evaluación de la sensibilidad en detectores de trazas nucleares [en línea]. (Tesis Doctoral) Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Argentina. 1999. [Consulta: 2020-06-05]. Disponible en: [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_3231\\_SaintMartin.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3231_SaintMartin.pdf).

**SCAN,** 2019. Análisis de contenido radioactivo - ARAD-2019-632.01. Quito.

**STEINER, A.** *Radiación: efectos y fuentes, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. S.I.: s.n. 2016. ISBN 9789280735994.

**TORIBIO, J.** Medición de la progenie del radón en muestras de polvo ambiental [en línea]. (Trabajo de titulación). (Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de Postgrado. 2018. [Consulta: 2020-10-15]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/12135>

**W. HOFMANN, H.S. ARVELA, N.H. HARLEY, J.W. MARSH, J. MCLAUGHLIN, A. & RÖTTGER, S.T.** 4 . "Characteristics and Behavior of Radon and Radon Progeny". *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements* [en línea], 2015, vol. 12, no. 2, pp. 55-70. DOI 10.1093/jicru/ndv007. Disponible en: <https://academic.oup.com/jicru/article/12/2/55/2378918>

**WANABONGSE, P.** "Calibration of CR-39 solid state nuclear track detector". *Indian Journal of Physics* [en línea], 2009, vol. 83, no 6, p. 833-837. [Consulta: 28 junio 2020]. DOI 10.1007/s12648-009-0036-9. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12648-009-0036-9>

**WELSH, J.S.** "Beta Radiation". *The Oncologist* [en línea], 2006, vol. 11, no. 2, pp. 181-183. [Consulta: 27 diciembre 2019]. ISSN 1083-7159. DOI 10.1634/theoncologist.11-2-181. Disponible en: <https://theoncologist.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1634/theoncologist.11-2-181>.




**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE**



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 06 / 05 / 2021

<b>INFORMACIÓN DE LA AUTORA</b>	
<b>Nombres – Apellidos:</b> ANA ALEJANDRA CANTOS OLMEDO	
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>	
<b>Facultad:</b> CIENCIAS	
<b>Carrera:</b> BIOFÍSICA	
<b>Título a optar:</b> BIOFÍSICA	
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>ELIZABETH FERNANDA AREVALO MEDINA</b>

