



Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

**VALIDACIÓN DEL MÉTODO *ELECTRET ION CHAMBER* EN AIRE
USADO PARA LA MEDICIÓN DE Rn^{222} EN INTERIORES DE HOGARES**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Magallanes Montero Miguel Humberto

ASESOR

Msc. Bruna Mercado Rubén

JURADOS

Mg. Ávila López Juan A.

Dra. Nery Luján Lidia G.

Dra. Guzmán Calcina Carmen S.

Dr. Arbulú Chanduvi Luis S.

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres

Por su apoyo incondicional y sus enseñanzas, ustedes son el principal motor de mi vida, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos

Por el ejemplo que me dan día a día.

Aquellos que se enamoran solo de la práctica, sin cuidar de la exactitud o de la ciencia, son como el piloto que se embarca sin tomín ni aguja, y nunca sabrá dónde va a parar.

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMIENTOS

Al MSc. Rubén Bruna, por ser un buen asesor de tesis, por mostrarse como una persona servicial para esta investigación y para muchos otros jóvenes que quieren salir adelante en la escuela de física de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

Al PhD. Daniel Palacios, por sus enseñanzas, por creer en mí de manera profesional y por el apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo.

A Andrea Ovalle, por su apoyo en la mayor parte de mi carrera.

A Alvaro Díaz, por su compañerismo y el apoyo profesional como analista durante todo el proceso de este trabajo.

Al Dr. Rolando Paucar, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
GLOSARIO	XIV
CAPÍTULO I INTRODUCCION	1
1.1. Descripción y Formulación del problema	2
1.1.1. Descripción	2
1.1.2. Formulación del problema	2
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Justificación	4
1.5. Hipótesis	5
1.6. Alcance de la investigación	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	7
2.1. Radiación	7
2.1.1. Radiación Natural y Artificial	7
2.1.2. Radiación ionizante e indirectamente ionizante	8
2.1.3. Radiación Alfa	8
2.1.4. Radiación Beta	9
2.1.5. Radiación gamma	9
2.1.6. Magnitudes y unidades	9
2.1.7. Interacción de partículas alfa con la materia	12
2.1.8. Cadenas de desintegración	15
2.1.9. Efectos estocásticos de la radiación	17
2.2. Radón	17
2.2.1. Efectos a la salud	17
2.2.2. Niveles de acción	19
2.2.3. Transporte de Radón	19
2.2.4. Progenie del gas radón	20
2.3. Métodos para medir radón	20
2.3.1. Métodos activos	20

2.3.2.	Métodos pasivos	21
2.4.	Electret Ion Chamber (EIC)	22
2.4.1.	Cámara de ionización	23
2.4.2.	<i>Electret</i>	24
2.4.3.	Lector de <i>electrets</i> (SPER-1)	26
2.4.4.	Determinación de la concentración por <i>electrets</i>	29
2.4.5.	Efectos del ambiente en la medición por EIC	30
2.4.6.	Especificaciones	32
2.5.	Validación de Métodos Analíticos	32
2.5.1.	Definición	32
2.5.2.	Tipos de validación	33
2.5.3.	Prueba de aptitud	33
2.6.	Distribuciones de probabilidad	33
2.6.1.	Distribución normal	33
2.6.2.	Distribución rectangular	34
2.6.3.	Distribución triangular	35
2.7.	Parámetros Analíticos	36
2.7.1.	Veracidad	36
2.7.2.	Precisión	36
2.7.3.	Selectividad/Especificidad	36
2.7.4.	Rango	37
2.7.5.	Linealidad	37
2.7.6.	Límite de detección	38
2.7.7.	Límite de cuantificación	38
2.7.8.	Incertidumbre	38
2.7.9.	Sensibilidad	40
2.7.10.	Robustez	40
2.7.11.	Errores	41
 CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		 42
3.1.	Tipo de Investigación	42
3.2.	Ámbito temporal y espacial	42
3.3.	Variables	42
3.4.	Población y muestra	43
3.5.	Instrumentos	44
3.6.	Procedimientos	44
3.6.1.	Evaluación de los Preliminares	44
3.6.2.	Prueba de aptitud	44
3.6.3.	Determinación de los parámetros analíticos	46
3.7.	Análisis de datos	54
3.7.1.	Técnicas de recolección de datos	54
3.7.2.	Técnicas de análisis y procesamiento de datos	55

3.7.3. Aseguramiento de la calidad de los resultados	55
3.8. Consideraciones éticas	56
CAPÍTULO IV RESULTADOS	57
4.1. Exámenes Preliminares	57
4.2. Prueba de Aptitud	57
4.3. Parámetros analíticos	58
4.3.1. Veracidad	58
4.3.2. Precisión	59
4.3.3. Linealidad, Rango y Sensibilidad	62
4.3.4. Límite de detección y cuantificación	65
4.3.5. Selectividad y Especificidad	66
4.3.6. Robustez	67
4.4. Estimación de la incertidumbre	68
4.4.1. Incertidumbre asociada al método	68
4.4.2. Incertidumbre asociada al sesgo	69
4.4.3. Incertidumbre asociada al analista	70
4.4.4. Incertidumbre Combinada	70
4.4.5. Incertidumbre expandida	70
4.4.6. Resultados	71
CAPÍTULO V DISCUSIONES	73
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES	78
CAPÍTULO VII RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS	81
ANEXOS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de algunos métodos de medición de radón	4
Tabla 2. Resultados de la intercomparación de la IAEA	5
Tabla 3. Factores de ponderación de los tejidos y órganos	11
Tabla 4. Factores de ponderación de la radiación	12
Tabla 5. Alcance de partículas alfa en función de la energía	14
Tabla 6. Cadena de desintegración U^{238}	16
Tabla 7. Niveles de acción de diferentes organizaciones	19
Tabla 8. Tabla de eficiencia del lector de electrets SPER-1	29
Tabla 9. Efecto de parámetros ambientales en el método EIC	31
Tabla 10. Especificaciones técnicas del método EIC	32
Tabla 11. Concentraciones y exposiciones de radón	43
Tabla 12. Instrumentos usados en el presente trabajo	44
Tabla 13. Datos de la prueba de aptitud	45
Tabla 14. Condiciones ambientales de almacenamiento de blancos	46
Tabla 15. Modelo para calcular robustez por el método de Youden y Steiner	52
Tabla 16. Detalles del software estadístico	55
Tabla 17. Resultados de los ensayos preliminares	57
Tabla 18. Resultados de la prueba de aptitud	57
Tabla 19. Resultados promedios de la prueba de aptitud	57
Tabla 20. Datos utilizados para la prueba T en 1	58
Tabla 21. Resultados de prueba T en 1 para estudio de veracidad	58
Tabla 22. Pruebas realizadas para el estudio de precisión	59
Tabla 23. Resultados estadísticos de la precisión	60
Tabla 24. Desviaciones estándar: Repetibilidad, intralaboratorio y reproducibilidad	60
Tabla 25. RSD de repetibilidad (RSD_r) y de reproducibilidad (RSD_R)	60
Tabla 26. Datos para el cálculo de linealidad	62
Tabla 27. Resultados de la regresión	62
Tabla 28. Análisis de varianza	63
Tabla 29. Pronóstico de "Y" y residuos	63
Tabla 30. Resultados de los blancos del primer grupo	65
Tabla 31. Resultados de los blancos del segundo grupo	65
Tabla 32. Resultados de los blancos del tercer grupo	65
Tabla 33. Límites de detección y cuantificación	66
Tabla 34. Datos para la selectividad	66
Tabla 35. Datos para el estudio de Robustez	67
Tabla 36. Promedios por variable de análisis (analista y tiempo)	67
Tabla 37. Resultados finales para el análisis de robustez	68
Tabla 38. Resumen de los resultados finales	76
Tabla 39. Factores de corrección de elevación para las cámaras "S"	90
Tabla 40. Riesgo de contraer cáncer personas fumadoras expuestas al radón	91
Tabla 41. Riesgo de contraer cáncer personas no fumadoras expuestas al radón	92
Tabla 42. Propiedades eléctricas del PTFE	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gas radiactivo radón en nuestros hogares	7
Figura 2. Tipos de radiación y su capacidad de penetración	8
Figura 3. Partícula alfa observada en una cámara de niebla	12
Figura 4. Ionización específica de las partículas alfa en función de su alcance	13
Figura 5. Cadena de desintegración del U^{238}	16
Figura 6. Respiración del gas Rn^{222}	17
Figura 7. Comparación de muertes causadas por el radón	18
Figura 8. Progenie del radón	20
Figura 9. Componentes del sistema de medición	22
Figura 10. Configuración cerrada (izquierda) y abierta (derecha) de S-chamber	23
Figura 11. Comparación del electret y un magnet	24
Figura 12. Electret	24
Figura 13. Vista explorada de un electret	25
Figura 14. Orientación de los dipolos internos del teflón	25
Figura 15. Funcionamiento del método EIC para medición de radón en aire	25
Figura 16. Esquema de medición del lector de electrets	26
Figura 17. Esquema referencial del capacitive probe method	27
Figura 18. Circuito equivalente del capacitive probe method	28
Figura 19. Distribución normal o gaussiana	34
Figura 20. Grafica de función de probabilidad rectangular de $x \pm a$	35
Figura 21. Grafica de función de probabilidad triangular de $x \pm a$	35
Figura 22. Comportamiento lineal del método	38
Figura 23. Contenedores de acero inoxidable con radón	45
Figura 24. Cámara de radón del laboratorio de referencia BfS	46
Figura 25. Esquema del método De abajo hacia arriba para estimar la incertidumbre	54
Figura 26. Histograma de la variación porcentual por muestra	58
Figura 27. Gráfica de caja para la variación porcentual $\Delta \text{Exp}\%$	59
Figura 28. Gráfica de valores individuales de la variación porcentual $\Delta \text{Exp}\%$	59
Figura 29. Gráfica R&R del sistema de medición (X_{barra}/R) para $Rn(\text{Bq}/\text{m}^3)$	61
Figura 30. Concentración de radón por puntos dentro del ambiente	61
Figura 31. Comparación de media por operadores	61
Figura 32. Interacción de los operadores por partes	62
Figura 33. Ajuste lineal correspondiente a los resultados de ALEPH ($\text{KBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$) y $\Delta\text{Volt (V)}$	63
Figura 34. Gráfica de Residuos (Volts) vs número de observación	64
Figura 35. Histograma de los residuos	64
Figura 36. Grafica de residuos vs valores ajustados	64
Figura 37. Dispersión de la concentración de radón de los 21 datos de fondo	66
Figura 38. Comparación datos de ALEPH vs BfS Lab (Lab ext)	67
Figura 39. Diagrama de causa y efecto	68
Figura 40. Ejemplo de la hoja para la estimación de incertidumbre de ALEPH SAC	72
Figura 41. Tabla de valores de distribución T-Student	88
Figura 42. Tabla de valores chi-cuadrado	89
Figura 43. Código de ética de ALEPH SAC	94

RESUMEN

La presente investigación ha tenido como objetivo validar el método EIC (Electret Ion Chamber) en aire para la medición de Rn^{222} en interiores de hogares mediante la determinación y análisis de sus parámetros analíticos con la finalidad de obtener medidas confiables, las medidas fueron realizadas en la cámara de radón del laboratorio de "Instrumentación nuclear y radón" de ALEPH SAC, del mismo modo el tratamiento de los datos también fue realizado por este laboratorio. Este método está caracterizado por el fabricante Rad Elec Inc. hasta los 2400 m.s.n.m., con una tasa de dosis de hasta los 12 $\mu R/h$, es robusto respecto a la humedad relativa pudiendo trabajar hasta el 100% y respecto a la temperatura en los hogares no se ve afectado. Previamente a la validación se realizó un análisis preliminar de RSD de 6 mediciones, para evaluar la factibilidad de la validación del método.

Después del análisis preliminar se efectuó la determinación de los parámetros analíticos del método, para ello se necesitaron un total de 71 muestras, de las cuales 21 fueron para determinar los límites de detección y cuantificación, 16 para precisión y 4 para robustez. Las 24 muestras restantes se emplearon para desempeñar un examen de aptitud con el laboratorio *Bundesamt für Strahlenschutz* (BfS) de Alemania, obteniendo un error promedio relativo del 7.5%. Estos resultados se utilizaron para determinar los parámetros analíticos restantes (veracidad, linealidad, rango, sensibilidad y selectividad). Del mismo modo, la incertidumbre se determinó empleando el método de abajo hacia arriba, considerando aportes de la medición, sesgo y analista.

De esta manera se concluye que el método es válido para realizar mediciones de gas Rn^{222} en interiores de hogares siendo confiable para su uso.

PALABRAS CLAVE: aptitud, abajo hacia arriba, confiable, electret, parámetro, validar.

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to validate the EIC (Electret Ion chamber) method in air for the measurement of Rn222 inside homes through the determination and analysis of its analytical parameters in order to obtain reliable measurements, the measurements were made in the radon chamber of the "Nuclear and radon instrumentation" laboratory of ALEPH SAC, in the same way the treatment of the data was also carried out by this laboratory. This method is characterized by the manufacturer Rad Elec Inc. up to 2400 masl, with a dose rate of up to 12 $\mu\text{R} / \text{h}$, it is robust with respect to relative humidity and can work up to 100% and with respect to the temperature in homes It is not affected. Prior to the validation, a preliminary RSD analysis of 6 measurements was carried out to evaluate the feasibility of the validation of the method

After the preliminary analysis was made the determination of the analytical parameters of the method, for that 71 samples were needed, 21 of those were to determine the limits of detection and quantification, 16 for precision and 4 for robustness. The remaining 24 samples were used to perform a proficiency test with the Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) laboratory in Germany, obtaining an average error of 7.5%. These results were used to determine the remaining analytical parameters (veracity, linearity, range, sensitivity and selectivity). In the same way, uncertainty was determined using the bottom-up method, considering the measurement, bias and analyst.

In this way it is concluded that the method is valid for measurements of Rn222 gas in indoor homes, being reliable for its use

KEY WORDS: aptitude, bottom up, reliable, electret, parameter, validate.

LISTA DE ABREVIATURAS

AEFI: Asociación Española de Farmacéuticos de La Industria.

BfS: *Bundesamt für Strahlenschutz* (Oficina Federal de Protección Radiológica).

CCOO: Federación de Enseñanza de Comisiones Obreras de Andalucía.

CEM: Centro Español de Metrología.

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear.

EIC: *Electret Ion Chamber*

EMA: Entidad Mexicana de Acreditación

EPA: *Environmental Protection Agency* (Agencia de Protección Ambiental).

EPTIS: *European Proficiency Testing Information System* (Sistema Europeo de Información de Pruebas de Competencia)

IAEA: *International Atomic Energy Agency* (Agencia Internacional de Energía Atómica)

ICRP: *International Commission on Radiological Protection* (Comisión Internacional de Protección Radiológica).

INACAL: Instituto Nacional de Calidad.

IPEN: Instituto Peruano de Energía Nuclear

ISO: *International Organization for Standardization* (Organización Internacional de Normalización).

ISPCH: Instituto de Salud Pública de Chile.

LCD: *Liquid Cristal Display* (Pantalla de cristal líquido).

MeV: Mega electronvoltio

NIST: *National Institute of Standards and Technology* (El Instituto Nacional de Normas y Tecnología)

OMS: Organización Mundial de la Salud

Po²¹⁴: Isótopo polonio 214.

Po²¹⁸: Isótopo polonio 218.

Rn²²²: Isótopo radón 222.

R&R: Repetibilidad y reproducibilidad

RSD: *Relative standard deviation* (Desviación estándar relativa)

RSD_r: Desviación estándar relativa de repetibilidad

RSD_R: Desviación estándar relativa de reproducibilidad

UCM: Universidad Complutense de Madrid

U²³⁸: Isótopo uranio 238

WHO: *World Health Organization* (Organización Mundial de la Salud)

GLOSARIO

ALEPH SAC: Empresa peruana encargada de realizar soluciones integrales en seguridad radiológica.

Analito: Un analito es el componente de la muestra cuya concentración se busca en un análisis.

Bottom-up: Método para estimar la incertidumbre que considera incertidumbres aportadas durante el proceso de medición.

Bq/m³: Bequerelios por metro cubico, es una unidad de concentración de radón en aire.

Confianza: Se refiere a las medidas que tienen el grado debido de seguridad y que siempre se debe medir lo mismo bajo las mismas condiciones.

Coulomb: Unidad del sistema internacional atribuida a la cantidad de carga eléctrica

CR 39: Polímero usado para medir trazas nucleares.

Electret: Detector utilizado para medir radón 222 por medio de su diferencia de voltaje superficial.

EURACHEM: Es una red de organizaciones en Europa con el objetivo de establecer un sistema para la trazabilidad internacional de mediciones químicas y promover las buenas prácticas de calidad.

Device: Dispositivo, se puede referir al detector utilizado en este trabajo.

Fluorocarbono: Son compuestos químicos que contienen enlaces carbono-flúor.

Grados de libertad: Valores asignados de forma arbitraria para un conjunto de observaciones empleadas para el cálculo de algo.

Indoor: Ambientes interiores.

Intralaboratorio: Actividades que se dan dentro del laboratorio, puede referirse a pruebas o ensayos internos.

LR 115: Polímero utilizado para medir trazas nucleares.

Magnet: Imán.

Makrofol: policarbonato termoplástico usado como detector de trazas.

Mesurando: Aquello que se puede medir.

Minitab: Software utilizado para realizar análisis estadístico inferencial en este trabajo.

Outdoor: ambientes exteriores.

PTFE: Politetrafluoroetileno, polímero del cual se encuentra constituido el *electret*.

Pvalue: Valor de probabilidad asociado a un determinado estudio.

Rad Elec: Empresa encargada de la fabricación de los *electrets* como dispositivo para la medición de radón.

Rango: Representa la diferencia de la máxima y menor medida.

S-Chamber: Modelo de cámara de ionización que emplea a los *electrets* para la medición de radón.

Sesgo: Estimación matemática entre el valor verdadero y un valor calculado.

SPER-1: Equipo utilizado para leer el voltaje superficial de los *electrets*.

ST: *Short term*, intervalo corto de tiempo.

UKRadon: Organización del Reino Unido encargada de tratar temas relacionados al radón.

$\mu\text{R/h}$: **Microroentgen por hora**, unidad radiología atribuida en este trabajo a la medición de radiación natural de fondo.

uSv/h : **Microsievert por hora**, unidad radiología atribuida en este trabajo a la medición de radiación natural de fondo.

CAPÍTULO I INTRODUCCION

En los últimos años ha sido relevante el estudio del radón por su efecto nocivo a la salud, siendo la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco según estudios de la OMS. Diversas organizaciones recomiendan tanto programas como estudios en domicilios, centros de estudio y lugares cerrados donde se realicen actividades laborales.

El radón se cuantifica por medio de su concentración en el aire, diferentes métodos se utilizan para determinar dicha concentración, debido a eso el uso de cámaras de ionización que usan *electrets* para la medición de esta concentración se incrementó desde los años 80. Son los laboratorios los responsables de manejar y aplicar estos métodos para medir radón, siendo así de carácter estricto que aquellos que deseen acreditarse deberán cumplir ciertos requerimientos técnicos de forma obligatoria, para lo cual se deben someter al desarrollo de un proceso validación. Según (ISO, 2017), la validación es la evaluación donde se muestran evidencias objetivas que se están cumpliendo las exigencias para su uso propuesto y de esa forma obtener resultados confiables. Para llevar a cabo la validación, según (INACAL, 2017), el laboratorio tiene la tarea de determinar los parámetros analíticos del método, estos serían: veracidad, precisión, selectividad/especificidad, rango, linealidad, límite de detección, límite de cuantificación, incertidumbre, sensibilidad y robustez.

Del mismo modo, según (EMA, 2017), las pruebas de aptitud para los laboratorios, resultan en herramientas eficientes para demostrar la competencia técnica de los métodos realizados y detectar anomalías que puedan influenciar en la confianza de los resultados con el fin de considerar tomar acciones preventivas o correctivas.

1.1. Descripción y Formulación del problema

1.1.1. Descripción

En la actualidad, en nuestro país se ha presentado un gran interés de parte de diversas instituciones para tratar el tema de gas radón con este fin, se han implementado laboratorios de investigación con el objetivo de medir su concentración, sin embargo, estos laboratorios no tienen métodos validados lo cual resultaría en mediciones que no son confiables, estas medidas servirían para tomar acciones correctivas o preventivas y así mitigar el riesgo en la salud de la población. Adicionalmente, el INACAL posee un directorio de acreditación, el cual registra a los laboratorios que se encuentran acreditados a nivel nacional, permitiendo evidenciar a los que realizan mediciones confiables, sin embargo, a pesar del entusiasmo en la investigación y medición, no se registra ningún laboratorio con referencia a la medición de la concentración de Rn^{222} en el país.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cómo logra un laboratorio que realiza ensayos de medición de Rn^{222} en aire en interiores de hogares, aplicando el método EIC (*Electret ion chamber*) obtener resultados confiables?

1.2. Antecedentes

En el año 1911 Charles Wilson construyó la primera cámara de niebla, la cual permitía observar las partículas cargadas y fotografiar sus trazas, años después Langsdorf construyó la primera cámara de burbujas, donde las trazas de estas se visualizaban en un medio líquido y en los años cuarenta se desarrolló la cámara de ionización de rejilla de Frish (Delgado González, 2014).

Del mismo modo, el empleo de los *electrets* ha ido evolucionando basándose en conceptos previos de las cámaras de ionización, según (Sessler, 1980), el *electret* es una pieza de material dieléctrico que posee una cuasi-permanencia eléctrica de carga el cual produce un campo eléctrico fuerte capaz de recolectar iones del signo opuesto. (Turnhout, 1975) Mencionó que las propiedades atribuidas a los polímeros de fluorocarbono como el teflón

facilitaron al desarrollo del *electret* como un componente electrónico. Años después (Marvin, 1995), sugirió que la reducción de carga de la superficie del *electret* se da por la recolección de iones de signo opuesto del gas que está rodeado, proponiendo usarlo como una especie de dosímetro de radiación gamma. Los *electrets* fueron usados subsecuentemente por varios investigadores para cuantificar iones producidos dentro una cámara de ionización (Denman, et al., 2005). Tiempo después apreciaron que los *electrets* también responden a la radiación alfa, dando así paso al desarrollo de los monitores pasivos que los usarían para medir la concentración de radón en el aire (Kotrappa, et al., 1988). Actualmente el método EIC (*Electret Ion Chamber*) es uno de los más usados para la medición de radón (Rad Elec Inc., 2017).

Por otro lado, el gas radón no tiene olor, color y es químicamente inerte, se produce por el decaimiento radiactivo de uranio pudiéndose encontrar en el suelo, las rocas y en algunos materiales que se aplican para la construcción civil. El Rn^{222} es el isótopo más significativo y decae por emisión alfa siendo su periodo de semidesintegración de 3.8 días, produciendo su progenie las cuales también son aportadores alfa tales como: Po^{218} y Po^{214} (NRPB, 2004).

A nivel internacional, la OMS ha recomendado una concentración máxima permisible de 100 becquerelios por metro cubico para los ambientes en los interiores de los hogares, si esta es mayor las personas deberían tomar acciones para reducirla para este fin, el método EIC serviría para realizar mediciones de corto periodo (de 2 a 7 días), siendo accesible y de fácil uso (EPA, 1992).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Validar el método Electret Ion Chamber para medir Rn^{222} en aire en interiores de hogares, a fin de demostrar la aptitud del método y obtener medidas confiables.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Realizar pruebas preliminares para efectuar un análisis de RSD y así evaluar la factibilidad de la validación del método.
- b) Determinar los parámetros analíticos para realizar la validación del método usando análisis estadístico.
- c) Sustentar la validación del método mediante una prueba de aptitud.

1.4. Justificación

El método EIC es un método integrado usado para la medición de Rn²²² en aire siendo el más versátil del mercado, está disponible para cortas y largas mediciones, presenta un buen desempeño en un amplio rango de condiciones ambientales, una lectura rápida a comparación con otros métodos pasivos y usar este método proporcionaría resultados de buena exactitud, eficiencia y costo razonable (Rad Elec Inc., 2017).

En la Tabla 1 se muestra la comparación del método EIC con otros métodos.

Tabla 1. Comparación de algunos métodos de medición de radón

Detector	Carbón activado	Detectores de trazas	EIC	Monitor continuo de radón
Corta o larga medición	Corta	Larga	ambas	Cortas
Integración verdadera	No	Si	Si	Si
Lectura por horas	No	No	No	Si
Corrección por temperatura	Requerida	No	No	No
Corrección por humedad	Requerida	No	No	No
Elevación por corrección	No conocido	Si	Si	Puede requerirse
Costo por medida	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Costo por detector	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Robustez	Buena	Buena	Buena	Requiere manejo cuidadoso
Equipamiento de análisis	Alta	Muy alta	Baja	Alta

Fuente: (Kotrappa, 2014)

En la Tabla 2 se muestran los resultados para métodos de medidas integradas en el laboratorio EPA de la intercomparación que fue realizada por la IAEA en el año de 1994 en donde los promedios de los errores relativos entre laboratorios que aplican el método EIC son de 3.9% el cual es menor a comparación de los otros métodos, lo cual ratificaría la eficiencia del método ante otros.

Tabla 2. Resultados de la intercomparación de la IAEA

Método	Promedios de Errores Relativos %
Barrera de difusión de carbono	16.7
EIC	3.9
CR39	28.6
LR 115	46.5

Fuente: (Budd, et al., 1998)

Por otro lado, la preocupación permanente de los laboratorios que realizan análisis cuantitativos y la física de las radiaciones ha sido obtener mediciones confiables, estas están ligadas estrechamente con las buenas prácticas profesionales, las cuales deben ser aplicadas durante el desarrollo del método.

Siendo este método de buenas características y sabiendo que la validación comprobaría el uso apto del método demostrando la capacidad de este para obtener medidas confiables, surge el objetivo de validarlo.

1.5. Hipótesis

Es posible validar el método *Electret Ion Chamber* para medir gas Rn²²² en aire en interiores de hogares, mediante la determinación de sus parámetros analíticos sustentados por una prueba de aptitud.

1.6. Alcance de la investigación

El presente trabajo se enfocó en aplicar el método EIC para interiores de hogares, para esto se debe tener en cuenta las condiciones ambientales del medio donde se realizaron las mediciones. Con ese fin el fabricante, Rad Elec Inc., menciona en las especificaciones de caracterización del método EIC que este trabaja normalmente con el nivel de fondo gamma hasta los 12 $\mu R/h$, con

una altitud hasta los 2400 m.s.n.m., teniendo la capacidad de hacer mediciones desde los 6 hasta 1300 becquerelios por metro cúbico durante un periodo de exposición de 7 días (Rad Elec Inc., 2007).

Del mismo modo, los *electrets* pueden medir radón en agua lo cual les atribuye la cualidad de operar hasta en 100% de humedad relativa y respecto a la temperatura no presenta cambios significativos mientras el detector no sufra daños en su estructura (Kotrappa, 2015).

Considerando interiores de hogares se estableció que la temperatura de medición debe ser menor a los 45°C.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Radiación

Se define como la emisión, propagación y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas, estas se clasifican en radiación ionizante y radiación no ionizante (Foro Nuclear, 2013).

2.1.1. Radiación Natural y Artificial

En general las radiaciones siempre están presentes en la naturaleza, desde radiación proveniente del espacio conocida como radiación cósmica, también está la radiación que emerge del suelo proveniente de materiales radiactivos existentes en la corteza terrestre, en nuestras casas la principal exposición a la radiación se da por parte del gas radón, como consecuencia de los materiales de construcción, las condiciones de vida desarrolladas y la infraestructura de nuestros hogares (CSN, 2018).

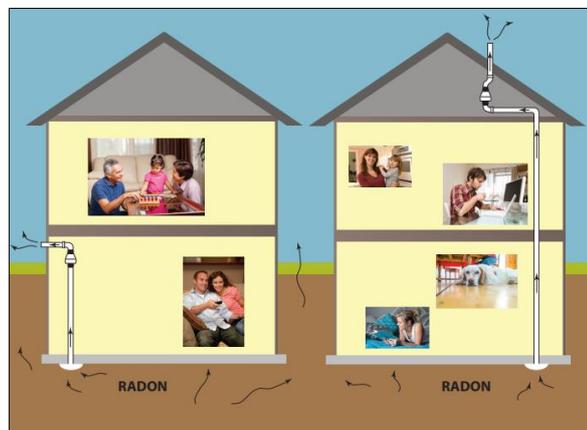


Figura 1. Gas radiactivo radón en nuestros hogares
Fuente: (Health Canada, 2014)

Las radiaciones ionizantes también se pueden producir de forma artificial, el físico Roentgen en el año 1895 descubrió el primer tipo de radiación artificial cuando experimentaba con rayos catódicos, estos se producen por el choque de electrones en un determinado material dentro de un tubo vacío (CSN, 2018).

2.1.2. Radiación ionizante e indirectamente ionizante

Las radiaciones ionizantes están formadas por partículas o por ondas electromagnéticas de altas frecuencias, éstas poseen la suficiente energía para ionizar átomos y romper los enlaces que mantienen a las moléculas de las células unidas por otro lado, las radiaciones no ionizantes a diferencia de las ionizantes no tienen la suficiente energía para romper los enlaces que unen a los átomos (CSN, 2018). En otros casos cuando la radiación está formada por partículas sin carga que pueden dar lugar en la materia a la liberación de partículas directamente ionizantes, estas reciben el nombre de radiaciones indirectamente ionizantes, estas pueden ser rayos X, rayos gamma y neutrones (Cherry, 2018).

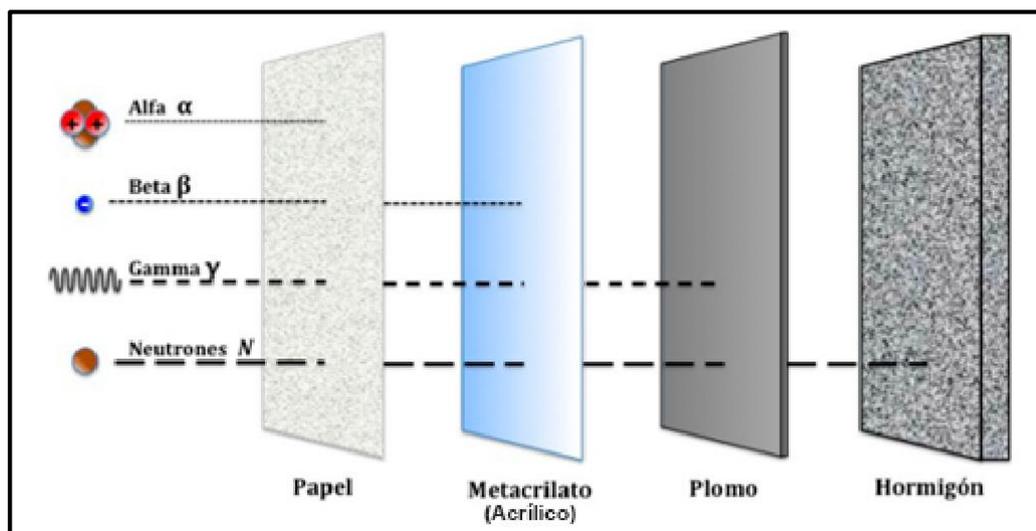
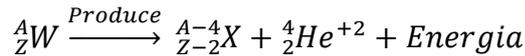


Figura 2. Tipos de radiación y su capacidad de penetración
Fuente: (Morrón, 2013)

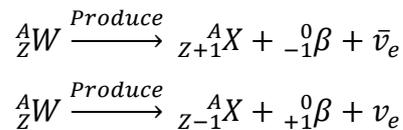
2.1.3. Radiación Alfa

También conocida como radiación corpuscular que está formada por 2 protones y 2 neutrones, como el núcleo de un átomo de Helio, y tiene dos cargas positivas. La emisión de tipo alfa ocurre en general en átomos de elementos muy pesados como el uranio, el torio o el radio (Federación de Enseñanza de CCOO, 2009).



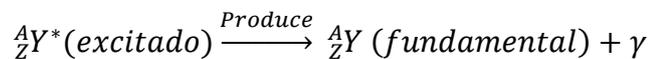
2.1.4. Radiación Beta

Son electrones (beta negativa) o positrones (beta positiva), liberados de determinados procesos nucleares, tienen poca masa en comparación con la radiación alfa y también son un poco más penetrantes; por lo tanto pueden penetrar la piel en unos centímetros (Foro Nuclear, 2013).



2.1.5. Radiación gamma

La radiación gamma no posee ni carga ni masa, estas provienen de una desintegración de átomos inestables de algunos elementos radiactivos, este tipo de radiación es muy penetrante a diferencia de la radiación alfa y beta (CSN, 2018).



2.1.6. Magnitudes y unidades

Actividad

Según (IPEN, 1997), la actividad es el número de desintegraciones por unidad de tiempo. En un estado de energía, en un momento dado, para una cantidad de radionúclido, la actividad se expresa como:

$$A = DN/dt \tag{1}$$

Donde:

DN : Es el valor medio de desintegraciones

dt : Intervalo de tiempo

En el sistema internacional la unidad de la actividad tiene el nombre de *Becquerel* (Bq), también se puede expresar en *Curíes* (Ci) (EPA, 2014).

$$1 \text{ curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (2)$$

Concentración de actividad

Es el número de desintegraciones por segundo por unidad de volumen, otra forma conveniente de expresar esta unidad resulta los picocuries por litro (pCi/L) que es equivalente a 37 bequerelios por metro cubico (EPA, 2014).

$$C = A/V \quad (3)$$

Donde:

C : Concentración de actividad (Bq/m^3)

A : Actividad (Bq)

V : Volumen (m^3)

Exposición al radón

Es definida como la concentración de radón 222 multiplicada por el tiempo total de exposición (Rojas Hancoo, 2016).

$$\rho_{Rn} = C \cdot t \quad (4)$$

Donde:

ρ_{Rn} : Exposición al radón ($Bq \cdot h/m^3$)

C : Concentración de actividad (Bq/m^3)

t : Tiempo (h)

Dosis absorbida

Es la energía media impartida ($d\varepsilon$) por la radiación ionizante a la masa de materia (m), la unidad de la dosis absorbida es (J/Kg) y su nombre especial es *Gray* (Gy) (IPEN, 1997).

$$D = d\varepsilon/dm \quad (5)$$

Dosis efectiva

Es la suma de las dosis equivalentes en el tejido, multiplicada por el factor de ponderación (IPEN, 1997).

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (6)$$

Donde:

W_T : Factor de ponderación

H_T : Dosis equivalentes en el tejido

Tabla 3. Factores de ponderación de los tejidos y órganos

Tejido y órgano	Factor de ponderación W_T
Gónadas	0,20
Medula ósea	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estomago	0,12
Vejiga	0,12
Mama	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficies óseas	0,01
Órganos y tejidos restantes	0,05

Fuente: (IPEN, 1997)

Dosis equivalente

Es la dosis absorbida de un órgano o tejido multiplicada por su factor de ponderación de la radiación (W_R) (IPEN, 1997).

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R} \quad (7)$$

Donde:

$D_{T,R}$: Es la dosis absorbida media del órgano o tejido

$H_{T,R}$: Es la dosis equivalente

Tabla 4. Factores de ponderación de la radiación

Tipo y energía de la radiación	Factor de ponderación WR	
Fotones de todas las energías	1	
Fotones de todas las energías	1	
	< 10 keV	5
	10 keV a 100 keV	10
Neutrones de energía	> 100 keV a 2 MeV	20
	> 2 MeV a 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones (no de retroceso) de energía > 2 MeV	5	
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados	20	

Fuente: (IPEN, 1997)

2.1.7. Interacción de partículas alfa con la materia

2.1.7.1. Ionización

Las partículas alfa son partículas pesadas cargadas que interaccionan con los electrones atómicos del medio, sabiendo que la masa de estas partículas es mucho más grande que los electrones colisionados, sus trayectorias son prácticamente rectilíneas. (CSN, 2013).

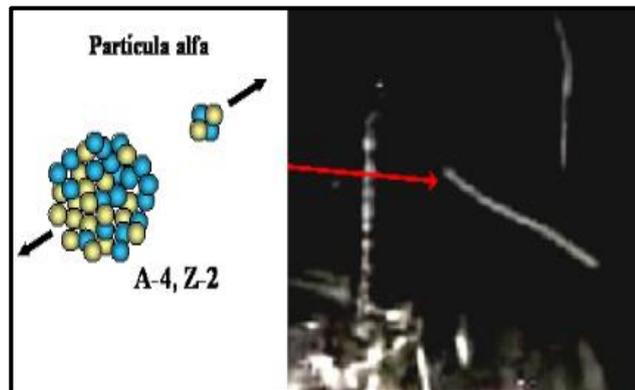


Figura 3. Partícula alfa observada en una cámara de niebla

Fuente: (UCM, 2017)

La ionización total viene expresada por J_t , donde E_c es la energía de la partícula alfa en MeV

$$J_t = 28.8 \times 10^4 E_c \quad (9)$$

Para el caso de una partícula alfa del gas radón con 5.49 MeV de energía, la ionización total sería:

$$J_t = 1,58 \times 10^5 \text{ pares iónicos} \quad (10)$$

Conociendo la expresión de ionización total, del mismo modo se puede expresar la ionización específica como:

$$J_s = J_t/dx \quad (11)$$

Las partículas alfa poseen la propiedad de perder su energía en un corto recorrido produciendo una alta ionización específica, esta puede ser expresada en forma gráfica por la curva de Bragg, la cual se puede apreciar que el número de pares iónicos producidos después de alcanzar su máximo cae súbitamente al final del recorrido.

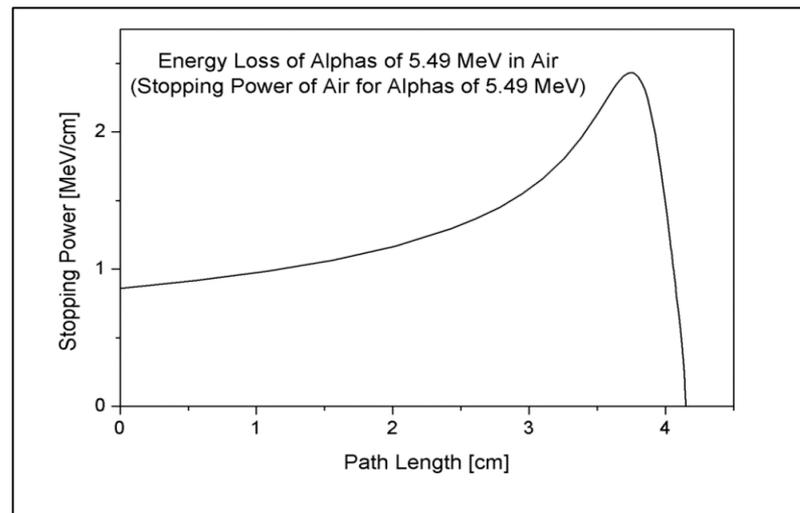


Figura 4. Ionización específica de las partículas alfa en función de su alcance

Fuente: (Wikipedia, 2018)

2.1.7.2. Poder de frenado

El poder de frenado de partículas alfa en la materia se puede expresar en el sistema internacional en Joules por metro (J/m) y viene dado por:

$$S(E) = -dE/dx \quad (12)$$

El poder de frenado (S), incrementa como la velocidad de la partícula disminuye, la expresión clásica que describe la pérdida de energía es conocida como la formula Bethe Bloch.

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta} NZ \left(\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right) \quad (13)$$

$$\gamma = (T + mc^2)/mc^2 \quad (14)$$

Donde:

$\frac{dE}{dx}$: Poder de frenado de la partícula (MeV/m)

r_0 : Radio del electron $2,81 \cdot 10^{-15}$ (m)

Z: carga de la partícula, (z=2, para alfas)

mc^2 : Energía del electron en reposo

N: Numero de átomos por metro cubico

A: Peso atómico

Z: Numero atómico del medio

T: Energía cinética de la partícula (MeV)

β : Velocidad relativa de fase

I: Potencial medio de excitación del medio en eV (Liza Neciosup, 2017)

2.1.7.3. Alcance

El alcance de la partícula alfa depende de su energía, en el caso del radón sus partículas alfa tienen 5.49 MeV, considerando que las partículas alfa son muy pesadas y su trayectoria es prácticamente rectilínea, debido a esto se dice que el alcance coincide con el recorrido medio en el material, en la Tabla 5 se hace la comparación del alcance en dependencia de la energía y del medio.

Tabla 5. Alcance de partículas alfa en función de la energía

Energía (MeV)	Aire Alcance (cm)	Tejido biológico Alcance (cm)
0.1	0.1	-
1	0.52	0.0008
2	1.67	0.0022
4	3	0.0036
8	7.36	0.0086

Fuente: (Ávila Rey, et al., 2018)

Se sabe que las partículas alfa entre 4 y 10 MeV tiene un alcance R_0 expresado por:

$$R_0(cm) = 0,32 \cdot E^{3/2} \quad (15)$$

De lo anterior, se puede generalizar este alcance para cualquier medio mediante la fórmula de Bragg-Kleeman (Ávila Rey, et al., 2018).

$$R' = R_0 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{A_x}}{\rho} \quad (16)$$

Donde:

A_x : Numero másico del material, cuando está formado de un único isótopo

ρ : Densidad del material en g/cm^3

Si el material está compuesto, se debe calcular el número másico en función de los distintos átomos que lo componen y sus correspondientes fracciones molares.

$$\sqrt{A_x} = \frac{n_1 A_1 + n_2 A_2 + \dots}{n_1 \sqrt{A_1} + n_2 \sqrt{A_2} + \dots} \quad (17)$$

2.1.8. Cadenas de desintegración

Mediante los estudios de los elementos radiactivos se apreció que se podían formar series o cadenas de desintegración distintas, estas son: Serie del Torio, del Uranio, del Actinio y del Neptunio.

La más importante para este trabajo es la cadena del U^{238} , la cual contiene al Rn^{222} en su cadena de desintegración.

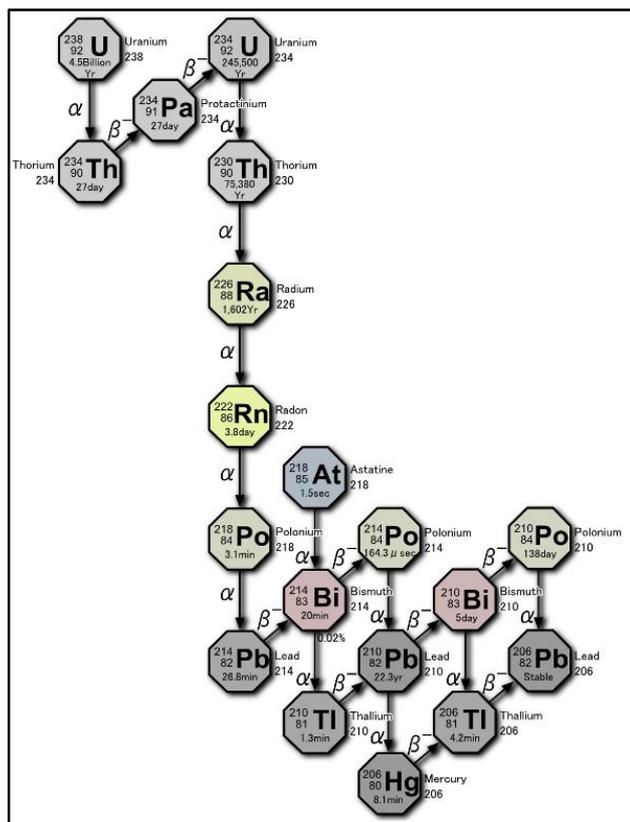


Figura 5. Cadena de desintegración del U²³⁸
Fuente: (Tomé López, 2012)

Tabla 6. Cadena de desintegración U²³⁸

Elemento	Desintegración	t ½	Producto
U 238	Alfa	4,47 109 a	Th 234
Th 234	Beta -	24,10 d	Pa 234
Pa 234	Beta -	6,70 h	U 234
U 234	Alfa	2,45 105 a	Th 230
Th 230	Alfa	7,54 104 a	Ra 226
Ra 226	Alfa	1602 a	Rn 222
Rn 222	Alfa	3,8235 d	Po 218
Po 218	Alfa y Beta -	3,10 min	At 218
At 218	Alfa y Beta -	1,5 s	Rn 218
Rn 218	Alfa	35 ms	Pb 214
Pb 214	Beta -	26,8 min	Bi 214
Bi 214	Beta - , Alfa	19,9 min	Po 214
Po 214	Alfa	0,1643	Tl 210
Tl 210	Beta-	1,30	Pb 210
Pb 210	Beta -	22,3 a	Bi 210
Bi 210	Beta- , Alfa	5,013 d	Po 210
Po 210	Alfa	138,376	Tl 206
Tl 206	Beta -	4,199 min	Pb 206
Pb 206	-	Estable	-

Fuente: (Fisiquiweb, 2016)

2.1.9. Efectos estocásticos de la radiación

Un efecto estocástico es aquel que aumenta probabilísticamente en dependencia de la dosis de radiación sin embargo, la gravedad de estos efectos no dependen de la dosis, se podría decir que el desarrollo de cáncer sería un efecto estocástico debido que no se tiene umbral registrado. (IAEA , 2013).

2.2. Radón

2.2.1. Efectos a la salud

El radón es un gas natural que proviene del decaimiento del uranio que se puede encontrar en el suelo y las rocas, este decae en partículas radiactivas que por su naturaleza física pueden quedar situadas en los pulmones debido al proceso de respiración (Figura 6), estas partículas pueden dañar los tejidos pulmonares por efectos estocásticos a largo plazo y producir cáncer por eso, el radón es considerado como un agente cancerígeno humano debido a la naturaleza de su efecto la probabilidad de causar daño es directamente proporcional al tiempo de exposición a este gas (EPA, 1993).

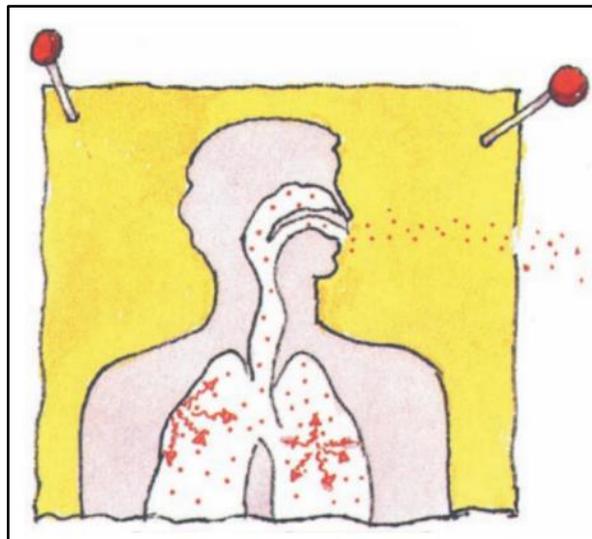


Figura 6. Respiración del gas Rn²²²
Fuente: (EPA, 2015)

Informes revelan que los niños tienen mayor riesgo que los adultos a contraer ciertos tipos de cáncer causados por la radiación y la magnitud de los factores de riesgo provenientes del radón sin embargo, se conoce más sobre estos factores que de otras sustancias que causan cáncer, esto por medio a estudios de personas con cáncer (mineros), el hábito de fumar en conjunto con la exposición al radón resultan en un factor muy serio que podría afectar a la salud entonces, para reducir el riesgo al cáncer pulmonar se tendría que dejar de fumar y también reducir el nivel de radón en los lugares donde se transcurre la mayor parte del día (hogares, trabajos y centros de estudio) (EPA, 2017).

Se conocen tres isótopos del radón (Rn^{222} , Rn^{220} y Ra^{219}) denominados respectivamente radón, torón y actinón, estos son inestables y cada uno de ellos forma parte de una cadena radiactiva natural diferente (Beltrán, 2010). Entre estos tres radioisótopos, el Rn^{222} es el más importante debido a su vida media más larga de 3.8 días, por este motivo cuando radón se menciona sin especificación de un radioisótopo en particular, se refiere generalmente al Rn^{222} (Nikezic & Yu, 2007).

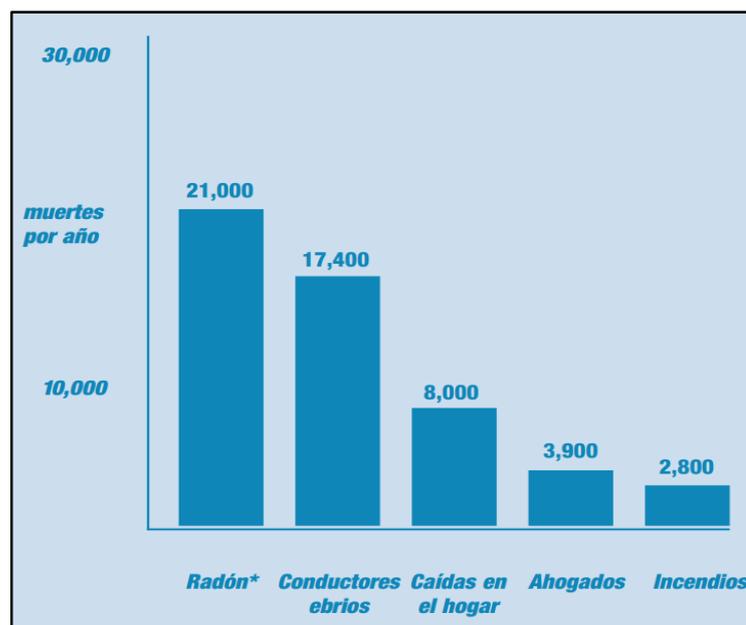


Figura 7. Comparación de muertes causadas por el radón
Fuente: (EPA, 2017)

La EPA sustenta por medio de sus estudios que el radón aumenta el riesgo de contraer el cáncer pulmonar significativamente en personas fumadoras y no fumadoras (Anexo N°4).

2.2.2. Niveles de acción

Diversas organizaciones realizaron recomendaciones para proteger a las personas de la exposición al radón, como la concentración de radón varía en los países dependiendo de las características geográficas las medidas preventivas pueden variar. Los niveles de acción de radón indican cuando se debe realizar acciones para reducir su concentración (EPA, 1993).

Tabla 7. Niveles de acción de diferentes organizaciones

Organización	Concentración (Bq/m³)
OMS (World Health Organization)	100
EPA	148
Unión Europea	300
Comare	200
IRR	400
Ukradon	200
ICRP	300

Fuente: (Ruano-Ravina, et al., 2017)

2.2.3. Transporte de Radón

El gas radón proviene de los suelos y rocas, este tiene su forma de transporte para llegar a interactuar con las personas, estos mecanismos de transferencia de masa son conocidos como: difusión y convección.

Según (Sainz Fernandez, 2010) menciona que el radón se transporta por difusión cuando el movimiento aleatorio de las partículas hacen que cambien de lugar constantemente, esto resulta que el radón pase de un lugar de mayor concentración hasta una de menor concentración; del mismo modo también el radón se puede transportar por convección, este mecanismo de transporte se da por diferencias de presión y temperatura, el fluido que contiene el gas radón actuaría como vehículo de transporte.

2.2.4. Progenie del gas radón

Son partículas sólidas que pueden quedar atrapadas en la corteza terrestre o de otra manera al encontrarse en el aire podrían adherirse a partículas de polvo y movilizarse con el aire formando aerosoles radiactivos. De la misma manera estas pueden quedarse adheridas al pulmón (Toribio Calero, 2018).

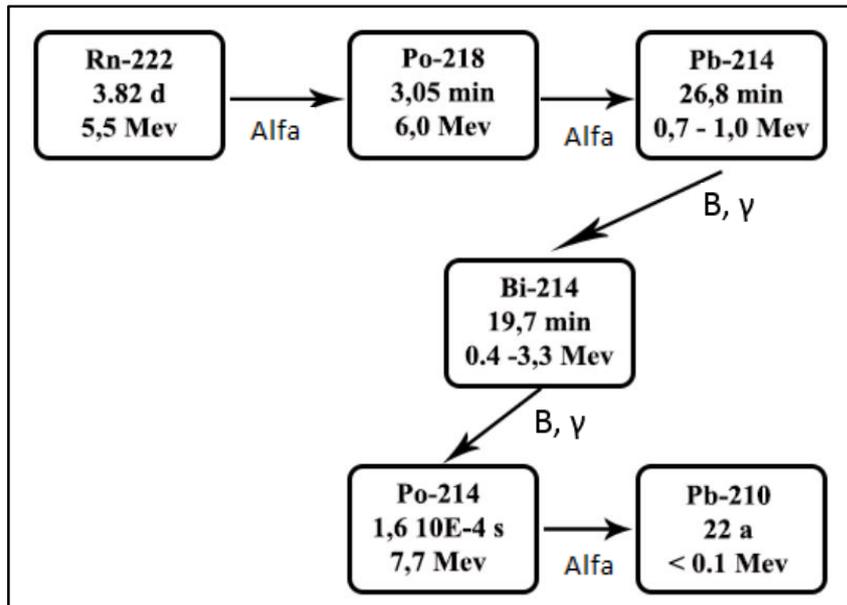


Figura 8. Progenie del radón

Fuente: Elaboración propia

2.3. Métodos para medir radón

Las definiciones que se presentan a continuación están basadas en (Miles, 2004).

2.3.1. Métodos activos

Celdas de centelleo

Consiste en filtrar de aire para remover algunas partículas y ser muestreado por una celda, el radón decae dentro de estas celdas las cuales interactuarán con el detector para generar centelleos, estos son detectados por un fotomultiplicador que genera pulsos eléctricos y son procesados por la electrónica del dispositivo para obtener las medidas.

Cámara de ionización

Un segundo tipo de método activo, opera como una cámara de ionización donde el radón en el ambiente entra por difusión filtrada hacia el interior de la cámara, a diferencia de las celdas de centelleo la interacción del gas radón en esta cámara no generan centelleos si no iones que son procesados por la electrónica del dispositivo resultando en medidas de radón.

Recolección electrostática de productos de decaimiento

Un tercer tipo de método activo tiene el mismo principio que los anteriores pero su diferencia de este radica que usa un detector de estado sólido de silicio.

2.3.2. Métodos pasivos

Detectores de trazas

Consiste en una pieza pequeña de plástico o film encerrado en un contenedor que usa un filtro por donde el radón entra por difusión excluyendo de progenie y partículas de polvo. Dentro de la cámara el radón produce radiación alfa que choca con la pieza de plástico o film, que trabaja como detector, esta colisión genera una fisura en el detector. Después de terminado el periodo de exposición, los detectores son tratados mediante una solución que ayuda a acentuar la forma de las trazas en los detectores lo que nos permitirá cuantificarlas. Como consecuencia se sabe que el número de trazas es proporcional a la concentración de radón dentro del ambiente donde se ha expuesto el detector.

Electret ion Chamber (EIC)

La explicación de este método es descrita en el ítem 2.4.

Carbón activado

La naturaleza del carbón activado permite la absorción de radón, durante el periodo de medición el radón entra por difusión y se absorbe en el carbón, el final de la medición este retorna al laboratorio para su análisis.

En el laboratorio, estos detectores son analizados, por medio de la progenie que se mantiene en el contenedor, directamente por un detector gamma.

2.4. Electret Ion Chamber (EIC)

Este método muy usado para determinar concentraciones de radón *indoor* y *outdoor* en E.E.U.U, Europa, Canadá y otros países (Kotrappa, 2015). Tiene tres componentes: (1) una cámara de ionización hecha de plástico conductor; (2) un *electret* cargado y (3) un lector del voltaje superficial del *electret* (Rad Elec Inc., 2007).

También es conocido como E-PERM (*electret passive environmental radón/radiation monitors*), este realiza mediciones integradas, son portables, pasivos y no requieren batería o alguna fuente externa de poder para su funcionamiento, consiste de un *electret* encerrado con una cámara de ionización hecha de plástico conductor donde el gas radón entra por difusión a través de pequeños agujeros que están filtrados, los iones negativos producidos dentro de la cámara son recolectados por la superficie del *electret* que esta con carga causando una disminución de su carga, la reducción de esta carga es medida usando un lector de *electrets* (caída de voltaje) y los datos obtenidos se utilizan para realizar cálculos para determinar la concentración de radón (Kotrappa, 2015).



Figura 9. Componentes del sistema de medición

Arriba a la izquierda: Cámara de ionización, arriba a la derecha: Lector de *electret* y abajo a la izquierda *Electret*. Fuente: (Kotrappa, 2015)

2.4.1. Cámara de ionización

Es un contenedor que debe mantener el *electret* cubierto con el fin de excluir la recolección de iones de fondo durante el almacenamiento o transporte, para esto se diseñó un contenedor implementado por un resorte con tapa, como si se tratase de un pistón, el cual proporciona un estado de *On* y *Off* para permitir la entrada del aire (Kotrappa, et al., 1990). Acorde con las exigencias físicas, las cámaras de ionización están hechas de un plástico conductor y las cámaras para realizar mediciones en cortos periodos se llaman *S-Chambers* (Kotrappa, 2015).

La entrada de las cámaras está cubierta por un filtro (*Whatman41*), la cual aísla de progenie de radón y de algunos residuos sólidos suspendidos en el aire (Kotrappa, et al., 1988).

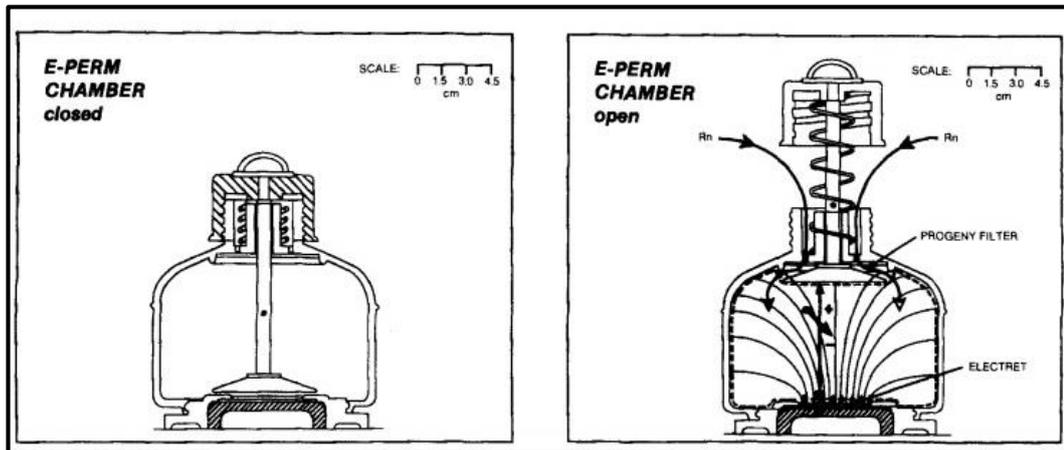


Figura 10. Configuración cerrada (izquierda) y abierta (derecha) de *S-chamber*
Fuente: (Kotrappa, et al., 1988)

Solo el gas radón (no la progenie presente en el ambiente donde se está midiendo) entra por difusión dentro de la cámara por medio del filtro, el electret produce un campo electrostático que atrae iones producidos por el radón que ingresó y su progenie formada dentro de la cámara, debido a esto el electret que almacena carga se descarga en forma proporcional a la exposición de radón ($KBqh/m^3$), este proceso fue caracterizado por el fabricante para obtener una forma indirecta de medir la concentración de radón (Rad Elec Inc., 2007).

El fabricante en su manual da a conocer que la mínima y máxima concentración de radón que mide el sistema EIC es de 6 a 1300 Bq/m³ para un periodo de exposición de 7 días (Rad Elec Inc., 2007).

2.4.2. *Electret*

El *electret* es un disco hecho de material teflón que ha sido eléctricamente cargado y procesado de forma especial para que las cargas en la superficie sean estables ante la humedad y temperatura, el *electret* produce un campo electrostático dentro de la cámara de ionización capaz de atraer iones del signo opuesto generados por el decaimiento radiactivo del radón y su progenie dentro de la cámara (Rad Elec Inc., 2007).

El material más usado para la fabricación de los *electret* son los materiales fluorocarbonados como el teflón (PTFE) debido que tienen una alta resistividad (**Anexo N°5**), esta propiedad evita que las cargas en el *electret* se recombinen, lo que resulta en que las cargas se puedan mantener así durante un largo tiempo, la palabra “*electret*” es análoga a la palabra magnético en inglés, es un material dieléctrico de alta resistividad interna (Kotrappa, 2015).

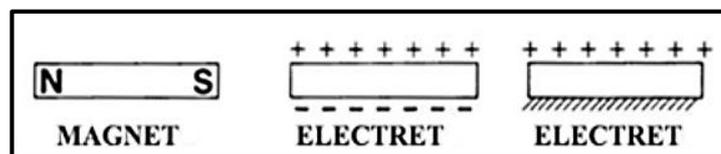


Figura 11. Comparación del *electret* y un *magnet*
Fuente: (Kotrappa, 2015)



Figura 12. *Electret*
Fuente: Elaboración propia

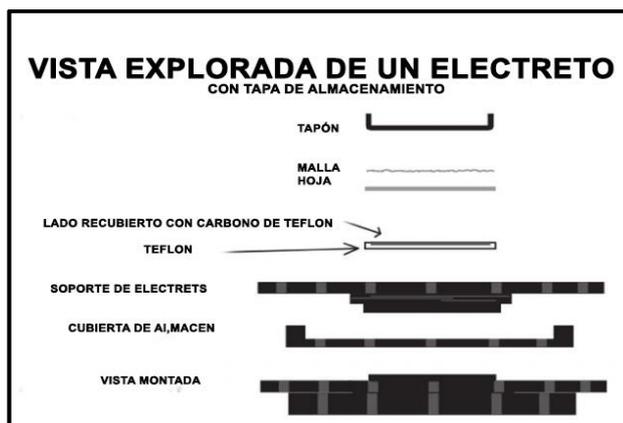


Figura 13. Vista explorada de un *electret*
Fuente: Traducido (Kotrappa, 2015)

El método para cargar *electrets*, realizado por el fabricante, consiste en aplicar dos electrodos sobre el teflón con un campo eléctrico de 40kVcm^{-1} , para después situarlos en sus respectivos soportes y cubiertas de almacenamiento, este método se conoce como polarización interna debido a la orientación de sus dipolos (Kotrappa, 2015).

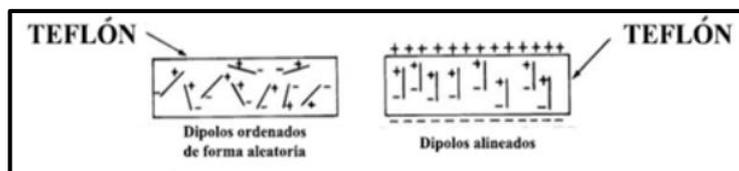


Figura 14. Orientación de los dipolos internos del teflón
Fuente: (Kotrappa, 2015)

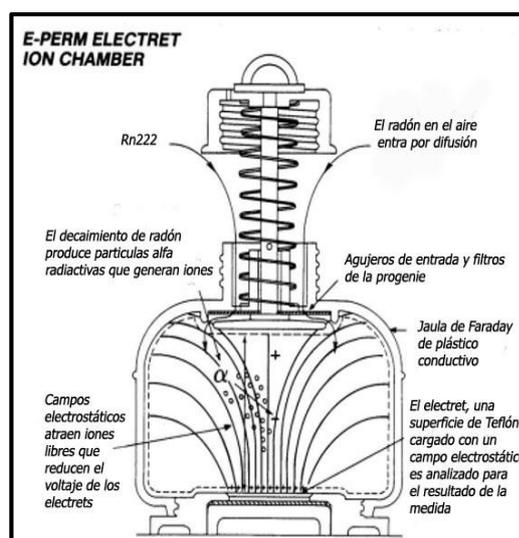


Figura 15. Funcionamiento del método EIC para medición de radón en aire
Fuente: Modificado (Kotrappa, 2015)

Según (Kotrappa, 2015), menciona una aproximación entre la relación del voltaje y la carga superficial, la cual depende del espesor del *electret*, los factores de conversión pueden ser usados para convertir voltios en carga del *electret* en *Coulombs* de la siguiente manera:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (18)$$

Donde:

Q : Carga de los electrets (2) (c)

V : Voltaje de la superficie (voltios)

k : Constante dieléctrica del *electret*

ϵ_0 : Permitividad en el vacío $8.854 \times 10^{-14} \text{ C} \cdot \text{V}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

S : Área del *electret* (cm^2)

d : Distancia interna o espesor del *electret* (cm)

Basándose en los conceptos anteriores se podría calcular la relación entre la carga y el voltaje, según (Kotrappa, 2015) el cambio de 1 voltio corresponde a 9.40×10^{-12} Coulombs para un *electret-ST*.

2.4.3. Lector de *electrets* (SPER-1)

Este dispositivo emplea un método conocido como el método del obturador (*capacitive probe method*) es usado para medir el potencial de la superficie de los *electrets* (Kotrappa, et al., 1988).

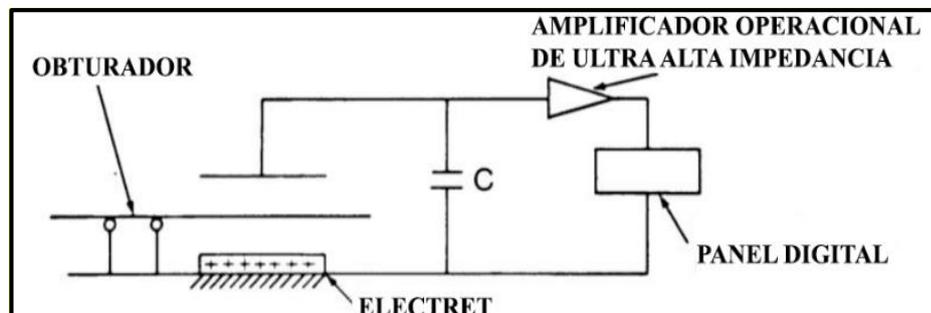


Figura 16. Esquema de medición del lector de *electrets*

Fuente: Modificado (Kotrappa, 2015)

2.4.3.1. Método de lectura de los electrets

Un método exacto para determinar la densidad superficial de carga en los *electrets* se llama *capacitive probe*, este método se basa en la medir la carga inducida, este método no interfiere eléctrica ni mecánicamente con las cargas del *electret* (Sessler, 1971).

Cuando el obturador es accionado, la carga es inducida en la sonda (*probe*) que a su vez carga el condensador dentro del instrumento y el voltaje de este condensador es mostrado en el panel digital después de pasar por un amplificador operacional de ultra alta impedancia, finalmente cuando el obturador regresa su estado inicial el condensador interno se descarga para realizar otra nueva medida (Kotrappa, 2015).

Para el cálculo del voltaje superficial se tiene el condensador del instrumento como (C_m), una sonda con una densidad de carga (σ), un *electret* con área efectiva (A), también se considera las distancias de la sonda al *electret* (h), (g) la distancia de la base del dieléctrico del *electret* a tierra y (t) el espesor total del dieléctrico del *electret*.

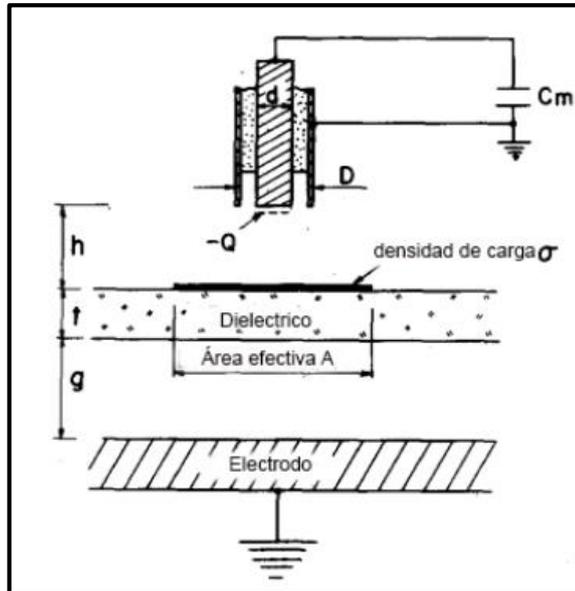


Figura 17. Esquema referencial del *capacitive probe method*

Fuente: (Ootera & Nakanishi, 1988)

Expresando el esquema de Figura 17 en forma de circuito equivalente tendríamos:

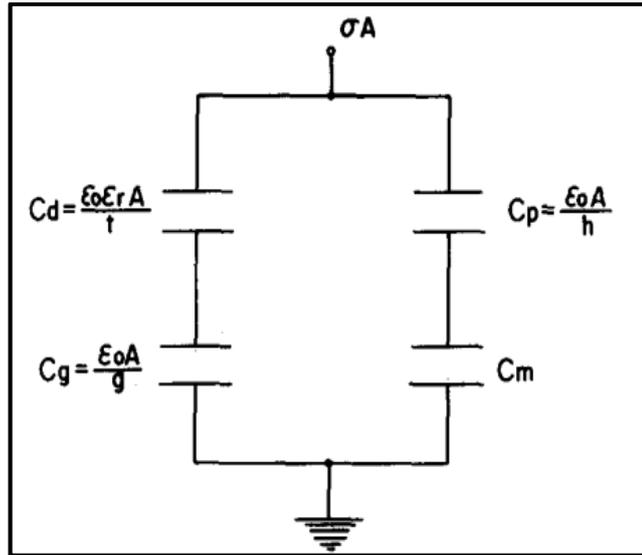


Figura 18. Circuito equivalente del *capacitive probe method*
Fuente: (Ootera & Nakanishi, 1988)

Basándonos en lo mencionado por (Foord, 1969), voltaje que se suscita en C_m se denota como V_m , y este se puede expresar como:

$$V_m = \frac{C_p}{C_p + C_m} \left(\frac{\sigma A}{C_E} \right) \quad (19)$$

Tomando en cuenta que C_E es la capacitancia equivalente, dada por:

$$C_E = \frac{C_d C_g}{C_d + C_g} + \frac{C_p C_m}{C_p + C_m} \quad (20)$$

Para nuestro caso se considera que $g=0$ (por tener el *electret* junto a su base conductora) entonces la expresión anterior puede ser:

$$V_m = \frac{\sigma A}{C_m \left(1 + \frac{C_d}{C_p} \right) + C_d} \quad (21)$$

Bajo las condiciones que $C_m \gg C_d$

$$V_m = \frac{\sigma A}{C_m \left(1 + \frac{\epsilon_r h}{t} \right)} \quad (22)$$

V_m : Voltaje del condensador interno del SPER-1 (Voltios)

σ : Densidad de carga del *electret* (C/cm²)

A : Superficie efectiva del *electret* (cm²)

t : Espesor del *electret* (cm)

ϵ_r : Permitividad del PTFE (*electret*)

h : Distancia de la superficie del *electret* a la sonda de medición (cm)

C_m : Capacitancia del condensador "m" (C/v)

Eficiencia del lector de *electrets* (SPER-1)

La eficiencia del equipo se obtiene del certificado de calibración del lector SPER-1, donde indica que fue calibrado por un electrómetro Fluke 189.

Los datos de la Tabla 8 fueron proporcionados en el certificado del servicio de calibración del lector SPER-1 de Rad Elec Inc.

Tabla 8. Tabla de eficiencia del lector de *electrets* SPER-1

Referencia Voltios (R)	Lector Voltios (L)	Eficiencia R/L	error $ \Delta V $
250	251	1.004	1
350	350	1	0
450	450	1	0
550	550	1	0
650	650	1	0
750	749	0.998667	1
Eficiencia promedio	1.000444		
Error máximo	1		

Fuente: Elaboración propia

El patrón de referencia es trazable al NIST

2.4.4. Determinación de la concentración por *electrets*

Factor de calibración (CF)

Es la relación de la respuesta que tiene el método EIC para medir radón en aire en un intervalo de medición. Debido a la disminución progresiva del voltaje de los *electrets* durante la medición, este factor no es constante y depende su voltaje inicial y final (Kotrappa, 2015).

Se puede entender como la disminución de voltaje en la superficie del *electret* cuando una *electret* es expuesto a un día de concentración de 1 pCi/L (Rad Elec Inc., 2007).

$$CF = \left(A + \frac{B(v_i + v_f)}{2} \right) \quad (23)$$

Siendo:

v_i : Voltaje inicial del *electret* registrado en el lector (Voltios)

v_f : Voltaje final del *electret* registrado en el lector (Voltios)

A : Constante 1.697 ((Voltios.L)/(pCi.dia))

B : Constante 0.00057 (l/(pCi.dia))

CF: Factor de calibración ((Voltios.L)/(pCi.dia))

Esta fórmula en conjunto con sus constantes nos ayudan a calcular la concentración de radón, es proporcionada por el fabricante el cual lo determinó haciendo pruebas de su método como parte de su caracterización (ISO, 2012).

Determinación de la concentración de radón usando *electrets*

Para realizar ensayos de radón es necesario cuantificar dos voltajes, estos se hacen por medio de la medición del voltaje en la superficie de los *electrets*. Del mismo modo también se toma en cuenta el intervalo de exposición.

$$C_{Rn} = \frac{(v_i - v_f)}{CF \cdot t} - BG \quad (24)$$

Donde:

C_{Rn} : Concentración de radón en aire (pCi/L)

v_i : Voltaje inicial (voltios)

v_f : Voltaje final (voltios)

t: Tiempo (días)

CF: Factor de calibración ((Voltios.L)/(pCi.dia))

BG: Contribución de fondo gamma (**Anexo N°3**)

2.4.5. Efectos del ambiente en la medición por EIC

Los efectos del ambiente en el método son detallados en la Tabla 9

Tabla 9. Efecto de parámetros ambientales en el método EIC

Parámetro ambiental	Efecto
Temperatura	La temperatura no tiene efecto significativo en el rendimiento del método cuando se usa en interiores de hogares, generalmente la temperatura no tiene cambios muy grandes.
Humedad relativa	La humedad relativa encontrada en los interiores no afecta el rendimiento de las medidas de radón, debido que los detectores están diseñados para hacer medidas a 100% de humedad relativa.
Factor de elevación	Como otras cámaras de ionización, este sistema también está afectado por la presión ambiental, en esfuerzos por determinar el efecto se calculó un factor de corrección (Anexo N°3).
Presencia de iones en el ambiente	Siempre hay algunos iones en el ambiente, en este caso los iones son parados por el filtro de la cámara, esto se demostró con experimentos que el fabricante realizó con un generador de iones operando.
Campos eléctricos externos	Los campos eléctricos externos no tienen efecto en el rendimiento en el sistema de medición de radón, el sistema se encuentra hecho de un plástico conductor que protege de todo campo eléctrico exterior.
Corriente de aire	Los protocolos EPA mencionan que las mediciones abiertas de carbón activado son afectadas por las corrientes de aire, sin embargo, el sistema EIC no se afectan por corrientes externas debido que interactúa con aire encerrado dentro de la cámara de ionización.
Radiación gamma	El sistema es sensible al radón como también a la radiación ionizante penetrante (rayos gamma y X). La radiación natural es la única fuente de radiación gamma que podría afectar en los resultados, por eso se introduce un término en el algoritmo de cálculo, a este se le conoce como un factor de corrección multiplicado por la tasa de dosis (Anexo N°3).
Torón en aire	El torón es otro isótopo del radón con una corta vida media , este generalmente se encuentra a bajas concentraciones .La cámara filtra este isótopo por eso se dice que para fines prácticos el sistema mide solo Rn ²²² .

Parámetro ambiental	Efecto
Polvo externo	El polvo externo o polvo del medio no afecta al rendimiento de las medidas, ya que estas se filtran en la entrada del aire de la cámara de ionización

Fuente: (Rad Elec Inc., 2007)

2.4.6. Especificaciones

Tabla 10. Especificaciones técnicas del método EIC

Especificaciones Técnicas	
<i>Electret</i>	Voltaje inicial 750v Voltaje mínimo de uso 150v
<i>S-Chamber</i>	Hechos de material conductor (210 ml)
Lector <i>SPER-1</i>	Rango de lectura 0 a ± 2000 voltios

Fuente: (Rad Elec Inc., 2007)

2.5. Validación de Métodos Analíticos

2.5.1. Definición

Es el proceso en el cual se definen los requisitos analíticos que se aseguran que el método de ensayo bajo ciertas condiciones ha desarrollado capacidades consistentes para su uso confiable (INACAL, 2017).

Según (ISPCH, 2010), la validación, es un paso fundamental para asegurar que los resultados obtenidos por dicho método son confiables, para esto se busca determinar con fundamento estadístico que el método es adecuado para fines previstos, esto requiere evaluar ciertas capacidades del método que generalmente se encuentra ligadas estrechamente con el desarrollo del mismo (EURACHEM, 2005).

2.5.2. Tipos de validación

Según (Jofre Rebolledo, 2009) existen dos tipos de validación y se definen:

Validación prospectiva, es aquella validación la cual se realiza antes del uso del método, este tipo de validación se aplica cuando se está desarrollando un método analítico siendo así muy típico en los laboratorios de investigación y desarrollo, y se realiza con un protocolo debidamente planificado.

Validación retrospectiva, es aquella donde se realiza el proceso de después de haber utilizado el método analítico, esta se efectúa para verificar la idoneidad del proceso analítico.

2.5.3. Prueba de aptitud

Una forma reconocida de demostrar el desempeño de un laboratorio es mediante una prueba de aptitud, esta ayuda a resaltar el desempeño de la reproducibilidad entre laboratorios y los errores sistemáticos, es importante dar seguimiento a esta clase de pruebas ya que pueden ser usadas como una herramienta eficiente de un control de calidad externo adecuado (EURACHEM, 2005).

2.6. Distribuciones de probabilidad

2.6.1. Distribución normal

Las medidas de una población pueden tomar cualquier valor en torno al valor verdadero o media de la población en ausencia de errores sistemáticos, si se dispone de todas las medidas y se representaran las frecuencias, se podría observar la distribución de los datos en torno a la media o al valor verdadero de la población, en estas condiciones se le denomina distribución normal u gaussiana (Jurado, 2017).

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (25)$$

La distribución normal se encuentra determinada por dos parámetros, su media (μ) y su desviación estándar (σ), formulas mostradas en el **Anexo N°7**, esta distribución se caracteriza por tener única moda que coincide con su media y su mediana, su grafica es similar a los histogramas con forma de campana, también es conocida como campana de Gauss siendo simétrica respecto a su media y asintótica al eje de abscisas, haciendo posible teóricamente cualquier valor entre $-\infty$ y $+\infty$, por lo tanto el área por debajo de la curva será de 1 (ISPCH, 2010).

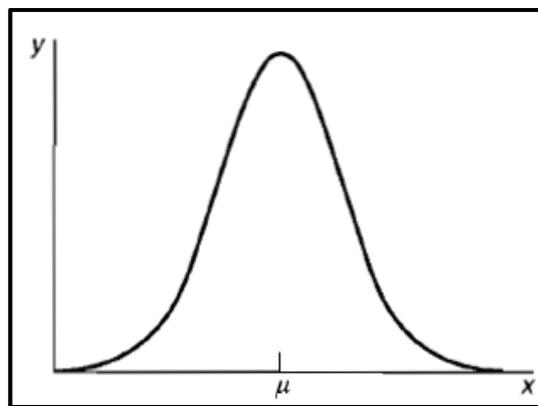


Figura 19. Distribución normal o gaussiana
Fuente:(Miller & Miller, 2002)

2.6.1.1. Confianza y significación

Se conoce como confianza a la probabilidad de haber acertado al decir que todo el intervalo contiene al valor verdadero, de otro modo se le denomina nivel de significación a la probabilidad de errar el acierto referido al nivel de confianza y este será igual a $1 - (\text{nivel de confianza})$ (Botella-Rocamora, et al., s.f.). Si se dice que el nivel de confianza es del 95% le corresponde el valor de α de 0.05.

2.6.2. Distribución rectangular

Las medidas de una población pueden tomar cualquier valor en torno al valor verdadero o media con una probabilidad uniforme a lo largo de un intervalo, dada la variable aleatoria continua "x", definida en un intervalo entre a y b se dice que "x" tiene una distribución uniforme en el intervalo que comprende a y b (Universidad de Valencia, 2018). La grafica de $x \pm a$ sería.

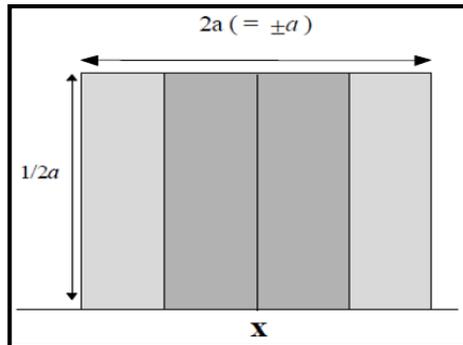


Figura 20. Grafica de función de probabilidad rectangular de $x \pm a$

Fuente: (Uribe Rosas, 2017)

Según (Universidad Politecnica de Madrid, 2011), la incertidumbre asociada a la $x \pm a$ se determina la incertidumbre de tipo B que viene expresada por:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

2.6.3. Distribución triangular

Es una función de probabilidad continua, este modelo proporciona una primera aproximación cuando se tiene poca información disponible, solo se necesita conocer el valor mínimo a , el valor máximo b y la moda c (Sergas, 2014).

En una distribución triangular $x \pm a$, los valores más cercanos a "x" son más probables que los valores que se encuentran más alejados (Uribe Rosas, 2017).

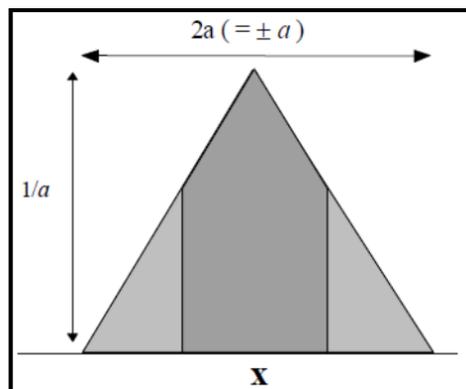


Figura 21. Grafica de función de probabilidad triangular de $x \pm a$

Fuente: (Uribe Rosas, 2017)

Según (Universidad Politécnica de Madrid, 2011), la incertidumbre de una distribución $x \pm a$ se determina por:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (27)$$

2.7. Parámetros Analíticos

2.7.1. Veracidad

La veracidad de un método es la expresión de que tan aproximada se localiza la medida de un conjunto de resultados producidos por el método respecto al valor de referencia (EURACHEM, 2005).

2.7.2. Precisión

Según (EURACHEM, 2005), bajo la ISO 3534 -1:2014, es la proximidad de concordancia entre los resultados de pruebas independientes obtenidas bajo condiciones estipuladas, la precisión está en función de distribución de los errores aleatorios y no se relaciona con el valor verdadero o especificado.

La precisión se puede establecer en términos de repetibilidad y reproducibilidad, el grado de precisión se expresa en términos de imprecisión (ISPCH, 2010).

2.7.2.1. Repetibilidad

Es la precisión de la medida bajo condiciones de repetibilidad, las condiciones comprenden el mismo procedimiento, sistema de medida, condiciones de operación y el mismo lugar del mismo objeto o similar en un periodo corto (CEM, 2012).

2.7.2.2. Reproducibilidad

Es la precisión de la medida bajo condiciones de reproducibilidad, las condiciones comprenden diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos o similares (CEM, 2012).

2.7.3. Selectividad/Especificidad

En los métodos analíticos existe un paso fundamental esta es cuando el analito produce señal de cuantificación, sin embargo en algunas ocasiones pueden existir otros agentes presentes junto con el analito que podrían influir

en la cuantificación de la señal pudiendo generar error sistemático en la medición, a estos agentes se le denominan interferencias, de todo esto surge el concepto de selectividad entendiéndose como el parámetro analítico que expresa de forma cualitativa la interferencia de agentes o compuestos usando un método de medición, a la máxima expresión de la selectividad se le denomina especificidad cuando la señal proveniente del analito está en su total ligada a lo que se requiera cuantificar (Jurado, 2017).

Del mismo modo (ISPCH, 2010) menciona que la selectividad es el grado en que un método puede cuantificar o cualificar al analito en presencia de interferentes.

Frecuentemente se dice que especificidad es el sinónimo de selectividad, sin embargo especificidad se refiere a que la respuesta solo se debe producir debido a una única señal, esto no es posible en cuanto se refiere a procedimientos analíticos, como hay pocos métodos que puedan satisfacer esto, el término selectividad es el más apropiado (AEFI, 2001).

2.7.4. Rango

El rango se define como el intervalo donde la concentración superior e inferior del analito se aplica criterios aceptables de precisión, exactitud y linealidad (AEFI, 2001).

2.7.5. Linealidad

Es el parámetro que indica la respuesta de un método en dar resultados que sean proporcionales a la cantidad del analito que se determinara dentro de la muestra, dentro del rango de trabajo (ISPCH, 2010).

Es una propiedad importante de los métodos que se utiliza para medir un rango de concentraciones, se puede determinar la linealidad de la respuesta a patrones puros y a muestras reales (EURACHEM, 2012).

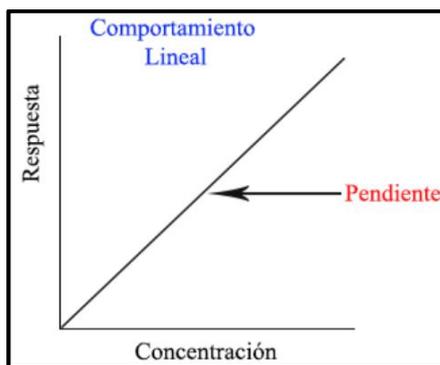


Figura 22. Comportamiento lineal del método
Fuente: Elaboración propia

2.7.6. Límite de detección

Es la concentración más baja del analito que puede detectarse sin necesidad de cuantificarse bajo condiciones experimentales establecidas con cierto grado de confianza (Medina & Berrocal, 2008).

Para determinar el límite de detección se debe basar en análisis de muestras que hayan sido sometidas a todo el proceso de medición obtenido resultados calculados con la misma ecuación que para las muestras de ensayo (Eurolab España , 2016).

2.7.7. Límite de cuantificación

Se define como la mínima concentración del analito que se puede determinar con precisión y exactitud aceptable en una muestra, bajo las condiciones establecidas (Medina & Berrocal, 2008). Es el nivel más bajo en el cual el desempeño es aceptable para una aplicación típica (Eurolab España , 2016).

2.7.8. Incertidumbre

Es el parámetro asociado al resultado que caracteriza la dispersión de los valores que pueden estar atribuidos al mesurando (ISPCH, 2010).

Para este fin se debe considerar las incertidumbres de tipo A y B que se encuentran presentes en el método:

Evaluación de tipo A

Evaluación de un componente por medio de un análisis estadístico de los valores que se obtienen de distintas mediciones, una forma sencilla de este tipo de evaluación podría ser el realizar varias mediciones en condiciones de repetibilidad.

Evaluación de tipo B

Evaluación de un componente de la incertidumbre de la medición que se realiza por medios diferentes a los del tipo A, esta podría estar basada en información del fabricante o puede ser obtenida por un certificado de calibración (ISPCH, 2010).

Para determinar la incertidumbre es esencial conocer las fuentes de incertidumbre, estas pueden ser:

- a) Muestreo
- b) Efectos de la muestra
- c) Efectos instrumentales
- d) Pureza de reactivos
- e) Estequiometría asumida
- f) Condiciones de medición
- g) Efectos de la muestra
- h) Efectos computacionales
- i) Corrección del blanco
- j) Efectos del operador
- k) Efectos aleatorios (EURACHEM, 2012).

Según (Uribe Rosas, 2017), la incertidumbre combinada y analítica, se definen como:

Incertidumbre combinada

Incertidumbre típica obtenida de la evaluación de ley de propagación de la incertidumbre. Siendo $y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$, la expresión del cálculo de la concentración, la incertidumbre combinada será:

$$u_{\text{combinada}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2} \quad (28)$$

Donde:

c_i : coeficiente de sensibilidad

u_i : incertidumbre estandar de una variable

Incertidumbre expandida

Esta define un intervalo alrededor del resultado, que nos da a entender una porción relativamente grande de la dispersión de sus posibles valores, se puede calcular de la siguiente manera :

$$U = k u_{\text{combinada}} \quad (29)$$

Donde k representa el factor de cobertura , usualmente se usa el valor de “2” representa una confianza del 95%, el resultado final se expresaria de la siguiente manera.

$$\text{Concentración de Radón} \pm U$$

2.7.9. Sensibilidad

Este parámetro representa el factor de cambio de un sistema de medición y el cambio del valor correspondiente en el analito (AEFI, 2001). Del mismo modo también se puede decir que la sensibilidad es el cambio en la respuesta del instrumento dividido entre el correspondiente cambio del estímulo (CEM, 2012).

2.7.10. Robustez

Es la capacidad del procedimiento analítico de no ser influenciado por variaciones pequeñas de factores del método, este proporciona la fiabilidad de su uso de forma normal, al realizar la prueba de robustez significa optimizar el método analítico implementado y describir bajo qué condiciones se pueden obtener resultados confiables (ISPCH, 2010).

Si el cambio en dependencia de los factores del método es significativo se llevara un estudio más detallado para medir la dimensión de la influencia en los resultados, y elegir un rango de trabajo (EURACHEM, 2012).

2.7.11. Errores

Errores sistemáticos

Son aquellos errores que se producen de igual modo en cualquier medición, este error está condicionado por algún factor al azar, alguno de estos podrían ser los errores de los patrones (ISPCH, 2010).

Errores aleatorios

Son los errores que ocurren de forma inevitable, algunos de estos resultan imposibles de controlar, las fuentes de estos errores son difíciles de identificar o sus efectos no se pueden corregir del todo por ser numerosos y pequeños, tales errores pueden ser: errores de paralaje, de observador, entre otros (ISPCH, 2010).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de Investigación

La investigación planteada es de tipo experimental, por que realizó un estudio intencional de la población bajo diseños experimentales buscando distintas respuestas del método a determinadas concentraciones de radón para poder determinar los parámetros analíticos. También es de criterio cuantitativo porque se recopilaron los datos de las mediciones realizadas de forma numérica.

3.2. Ámbito temporal y espacial

La investigación se desarrolló dentro de las instalaciones del “Laboratorio de Instrumentación Nuclear y Radón” de ALEPH SAC desde enero hasta noviembre del 2017.

3.3. Variables

3.3.1. Variables dependientes

Parámetros analíticos para validar el método.

- Veracidad
- Precisión
- Exactitud
- Linealidad
- Rango de trabajo
- Sensibilidad
- Límite de detección y límite de cuantificación
- Selectividad
- Robustez
- Incertidumbre

3.3.2. Variable independiente

Concentración de gas Rn²²² en aire en interiores.

3.4. Población y muestra

La población de estudio son los *electrets* que fueron expuestos a distintas concentraciones y exposiciones de radón en distintos intervalos de tiempo, se necesitó un total de 71 muestras para realizar las distintas actividades, las cuales son: pruebas preliminares, determinación de parámetros analíticos y la prueba de aptitud del método.

Tabla 11. Concentraciones y exposiciones de radón

Laboratorio	Parámetro a calcular	Concentración o exposición
BfS Alemania (Prueba de aptitud)	Veracidad, linealidad, sensibilidad, rango y selectividad	191 y 208 KBq.h/m ³
	Precisión	≈ 230 Bq/m ³
Aleph SAC	Preliminares	≈ 30 Bq/m ³
	Límite de detección y cuantificación	< 6 Bq/m ³
	Robustez	≈ 135 Bq/m ³

Fuente: (BfS, 2017)

La prueba de aptitud se realizó con el laboratorio BfS de Alemania, estos datos proporcionados fueron utilizados para el cálculo de los parámetros analíticos del método que requieran medidas convencionalmente verdaderas (veracidad, selectividad, rango, linealidad, incertidumbre y sensibilidad).

En la cámara de radón del laboratorio de Aleph SAC, se midieron diversas concentraciones de radón dentro del rango de trabajo del EIC (6 Bq/m³ a 1300Bq/m³), estas mediciones sirvieron para el cálculo de los parámetros analíticos faltantes (precisión, robustez, límite de detección y límite de cuantificación).

3.5. Instrumentos

Tabla 12. Instrumentos usados en el presente trabajo

Marca	Modelo	Descripción
Rad Elec	S-Chamber	Cámara de ionización S-Term
Rad Elec	SPER-1	Lector de <i>electrets</i>
Rad Elec	ST	<i>Electrets</i>
Rad Elec	Referencia	<i>Electrets</i>

Fuente: Elaboración propia

3.6. Procedimientos

3.6.1. Evaluación de los Preliminares

Se empleó tres grupos de dos replicas cada uno, estos fueron expuestos a una concentración de radón ($\approx 30 \text{ Bq/m}^3$) para evaluar la precisión entre estos por medio del cálculo de sus respectivos RSDr experimentales. Los resultados son satisfactorios si los RSDr son menores del 10%.

Evaluados satisfactoriamente los ensayos preliminares mostrados en el apartado de resultados se procedió con la determinación de los parámetros analíticos del método.

3.6.2. Prueba de aptitud

La prueba de aptitud se llevó a cabo en el laboratorio BfS, está acreditado por el organismo de acreditación de Alemania (Dakks, registro N° D-K-15063-01-00). El laboratorio BfS está registrado en el EPTIS, demostrando su competencia, teniendo todas sus medidas están sujetas a un sistema de gestión de calidad acreditada.

Se emplearon 24 detectores pasivos que fueron separados en 4 grupos de 6 detectores cada uno, uno de estos grupos fue usado como blanco de tránsito el cual no fue expuesto y se utilizó para ver el efecto de las condiciones de transporte los detectores. Los demás grupos de detectores fueron expuestos en ambientes controlados y después de la exposición fueron retornados al laboratorio de ALEPH SAC para ser medido y los resultados se envían al

laboratorio BfS, finalmente el laboratorio BfS emite un informe de los resultados a todos los laboratorios participantes .

Tabla 13. Datos de la prueba de aptitud

Grupos	Intervalo de tiempo expuesto	t(h)	$C_{Rn,Ref}$ (kBq. m ⁻³)	Volu men (m ³)	$\rho_{Rn,Ref}$ (kBq.h. m ⁻³)	U (%)	T (°C)	r.H. (%)	p (hPa)
1	07.03 -13.03	150.1	1.27	11	191	5	24	27	1013
2	03.03 -14.03	167.6	1.24	11	208	5	24	27	1013
3	04.03 -14.03	167.8	6.55	30	1099	5	23	27	1014
4	03.03 -14.03	178.4	6.55	30	1169	5	23	27	1015

Fuente: (BfS, 2017)

Los detalles de la exposición al radón se muestran en la Tabla 13, donde la exposición está dada por $\rho_{Rn,Ref}$ y U es la incertidumbre relativa expandida de la concentración de Rn²²² al 95% de confianza. Las concentraciones están dadas en la columna $C_{Rn,Ref}$, estas concentraciones de radón fueron obtenidas en el sistema de radón del laboratorio de referencia BfS en Alemania, el cual consta de varios contenedores de radón hechos de acero inoxidable de 0.4 m³ y una cámara de radón donde se acumula Rn²²² como resultado de una fuente de Ra²²⁶ en los contenedores de acero inoxidable.



Figura 23. Contenedores de acero inoxidable con radón

Fuente: BfS Alemania

El flujo de aire que contiene gas Rn²²² hacia la cámara de radón (11 m³) es controlado por computadora con la finalidad de mantener y compensar continuamente la concentración de actividad del Rn²²², el laboratorio BfS

afirma que también se puede monitorear la presión, controlar la temperatura y humedad relativa.



Figura 24. Cámara de radón del laboratorio de referencia BfS

Fuente: BfS Alemania

En la Tabla 14 se muestran las condiciones ambientales de los laboratorios del BfS donde se almacenaron las muestras de blanco de tránsito.

Tabla 14. Condiciones ambientales de almacenamiento de blancos

C_{Rn} (Bq. m ⁻³)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)	Presión (hPa)	Tasa de Dosis ambiental (uSv/h)
≤ 5	29	22	1017	0.07

Fuente: (BfS, 2017)

La concentración de fondo de radón fue menor que 5 Bq.m⁻³ mientras se hacía los ensayos de exposición por el laboratorio de BfS.

3.6.3. Determinación de los parámetros analíticos

3.6.3.1. Veracidad

La veracidad fue determinada mediante la prueba de T en 1 de los resultados de 12 detectores reportados por ALEPH SAC en prueba de aptitud, tomando los valores de la exposición proporcionada por el laboratorio BfS como valores de referencia.

Prueba de T en 1

En esta prueba se evalúa la hipótesis nula entre la media de los datos de la diferencia porcentual (\bar{x}) y un límite establecido del 10% (μ_0), en este caso la

media muestral es la desviación estándar S y los grados de libertad corresponden al valor de n-1, donde n es el número total de datos. Este valor de T está asociado a un valor de probabilidad Pvalue, que es comparado con la significancia de 0.05 (95% de confianza).

$$T = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \quad (30)$$

Las hipótesis son:

- Ho: La diferencia media es menor o igual al 10%
- H1: La diferencia media es mayor al 10%

Criterio de decisión

Pvalue > (0.05), entonces no existe diferencia significativa entre la media de los resultados y el valor de referencia, por lo tanto el método de ensayo es veraz.

Pvalue ≤ (0.05), entonces existe diferencia significativa entre la media de los resultados y el valor de referencia, por lo tanto el método de ensayo no es veraz.

3.6.3.2. Precisión

La precisión del método fue determinada comparando los RSD de repetibilidad y de reproducibilidad con un RSD teórico igual al 10% según lo recomendado por la EPA en el protocolo EPA-402-R-92-004.

Según (Lyn, et al., 2007), menciona que 8 duplicados proporcionan estimaciones de incertidumbre que son aceptablemente precisas y rentables. Entonces se adoptó este criterio y se utilizó dos analistas para determinar la reproducibilidad, resultando un total de 16 muestras.

Para calcular el RSD fue necesario calcular las desviaciones estándar tanto de reproducibilidad (S_{Rj}) y repetibilidad (S_{rj}). Organizando los resultados en forma matricial, analistas para las columnas y número de resultados para las filas.

$$\begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1j} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix}$$

Basándonos en la ISO 5725- 2 "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method" para el cálculo de la desviaciones estándar entre cada columna que representaría en nuestro caso a cada analista fue:

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n_{ij} - 1} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2} \quad (31)$$

Donde:

\bar{y}_{ij} : Media de todos los datos de cada grupo o columna

y_{ijk} : Resultados de los ensayos, considerando que ($k = 1, 2 \dots, n_{ij}$)

n_{ij} : Numero de resultados

Entonces la desviación estándar de repetibilidad estuvo dada de la siguiente manera:

$$s_{rj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)}} \quad (32)$$

Y la desviación estándar Intralaboratorio (entre analistas) quedo de la siguiente manera.

$$s_{Lj} = \sqrt{\frac{\frac{1}{p-1} [\sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{y}_{ij})^2 - (\bar{y}_j)^2 \sum_{i=1}^p n_{ij}] - \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)}}{1 - \left[\sum_{i=1}^p n_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \right]}} \quad (33)$$

Donde:

\bar{y}_j : es la media total

p : Columnas a evaluar, en este caso el número de analistas

Y finalmente para el cálculo de la desviación estándar de reproducibilidad

$$S_{Rj} = \sqrt{S_{Lj}^2 + S_{rj}^2} \quad (34)$$

Finalmente, el RSD de repetibilidad

$$RSD_r = \frac{S_{rj}}{\bar{y}_j} \quad (35)$$

Análogamente para reproducibilidad

$$RSD_R = \frac{S_{Rj}}{\bar{y}_j} \quad (36)$$

Criterio de decisión

Si RSD_r es menor o igual al RSD teórico (10%), el método es preciso en condiciones de repetibilidad.

Si RSD_R es menor o igual al RSD teórico (10%), el método es preciso en condiciones de reproducibilidad.

3.6.3.3. Exactitud

El método es exacto si cumple los parámetros de veracidad y de precisión al 95% de confianza.

3.6.3.4. Linealidad

La proporcionalidad entre la señal característica del método definida como diferencia de voltajes Δ Volt (V) en los *electrets* y la actividad de radón (KBq.h/m³) presente en la muestra se evalúa mediante una función lineal en un rango definido de análisis denominado intervalo de linealidad. Se determinó dicha linealidad mediante la regresión lineal y se realizó una evaluación del modelo. Los datos empleados este parámetro analítico son los mismos de veracidad, los que se reportaron de parte de ALEPH SAC.

Siendo la ecuación $y = ax + b$

$$a = \frac{N \sum y_i + \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (37)$$

$$b = \frac{\sum y_i + a \sum x_i}{N} \quad (38)$$

Donde:

x_i : Elemento del dominio

y_i : Elemento del rango correspondiente al dominio

Evaluación del modelo

Para evaluar si el modelo lineal es significativo se utilizó software Minitab para obtener valores de probabilidad para una prueba F (Fisher) con una significancia de 0.05. Si el Pvalue es menor que el nivel de significancia entonces se rechazará la hipótesis nula.

Las hipótesis son

- Ho: La pendiente es 0
- H1: La pendiente es distinta 0 (Cayuela, 2014).

Criterio de decisión

- La regresión debe ser significativa (Pvalue < 0.05), entonces la pendiente es distinta de cero, el modelo lineal es adecuado.
- Se observaron los residuos ($Y_{estimada} - Y_{obtenida}$) para observar e identificar algún tipo de tendencia.

3.6.3.5. Rango de trabajo

Este parámetro se demuestra a partir de los resultados de linealidad.

Criterio de decisión

El rango de trabajo es el intervalo donde se demostró linealidad con el cumplimiento de veracidad y precisión.

3.6.3.6. Sensibilidad

Este parámetro se demostró de los resultados de linealidad.

Criterio de decisión

La sensibilidad se determinó con la pendiente de la ecuación obtenida de la regresión lineal, a es la sensibilidad del método donde $y = ax + b$ es la ecuación obtenida.

3.6.3.7. Límite de detección y Limite de cuantificación

El límite de detección del método (LD) se determinó mediante el análisis de blancos 7 réplicas en 3 grupos distintos (21 muestras en total), donde se evaluó la variabilidad de los elementos, del límite de detección calculado se obtendrá el Limite de cuantificación (EPA, 1994).

Criterio de decisión

Se calculó multiplicando la desviación estándar de repetibilidad (S_r), calculada en la determinación de la precisión del método, por el valor que corresponde a una distribución T-Student con n-1 grados de libertad (**Anexo N°1**), para 99% de confianza y se le suma el promedio de las muestras, para el caso del límite de cuantificación (LC) es 3 veces el límite de detección (LD).

$$LD = \bar{x}_{fondo} + t_{(6,0.01)} \cdot S_r \quad (39)$$

$$LC = LD * 3 \quad (40)$$

3.6.3.8. Selectividad

Se determinó por la prueba chi-cuadrado, comparando los resultados observados (O_i) por el laboratorio ALEPH con los resultados esperados (E_i) que son los obtenidos por el laboratorio de referencia en la prueba de aptitud para n comparaciones.

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (41)$$

Criterio de decisión

Si $X^2 \leq$ Chi cuadrado (n-1, 0.05), el método es selectivo, caso contrario, si $X^2 >$ Chi cuadrado(n-1, 0.05) el método no es selectivo. Los valores de Chi cuadrado son mostrados en el **Anexo N°2**.

3.6.3.9. Robustez

El método es robusto si los resultados de ensayo no varían significativamente cuando se aplica pequeñas variaciones en algunos factores que intervienen en el desarrollo del método de ensayo, para esto se aplica la metodología de Youden y Steiner.

Para radón en aire usando electrets, los factores seleccionados fueron analista y tiempo, como son dos factores se empleó el método full factorial que nos dice que para realizar este estudio se necesitan 4 medidas (Mulholland, 1988).

Tabla 15. Modelo para calcular robustez por el método de Youden y Steiner

Variables	Valor alto	Valor bajo	1	2	3	4
(A1,A2)	A1	A2	A1	A1	A2	A2
(T,t)	7 d	7.1 d	7.1	7	7.1	7
Medidas			M1	M2	M3	M4

Fuente: Elaboración propia

Criterio de decisión

Se hizo un análisis de los valores de la tabla modelo en conjunto con la desviación estándar de repetibilidad S_r , siendo así:

$$\text{Efecto} \geq \sqrt{2}S_r \quad (42)$$

Si el Efecto es mayor que $\sqrt{2}S_r$, el factor atribuido a este tiene influencia en los resultados, de lo contrario el método es robusto al factor analizado sin presentar influencia significativa (ISPCH, 2010).

3.6.3.10. Método de abajo hacia arriba

Se utilizó el método de abajo hacia arriba para la determinación de la incertidumbre, este fue establecido por la GUM, este proporciona un enfoque de modelamiento para la estimación de incertidumbre permitiendo descomponer las partes analíticas primarias para cuantificar individualmente

las contribuciones de cada proceso que aporta a la incertidumbre combinada y mejora la comprensión de las actividades analíticas (Uribe Rosas, 2017).

Para la determinación de la incertidumbre, se realizaron las siguientes etapas:

- **Especificación de la fórmula del cálculo de radón**

Se declaró el tipo de magnitud que se va cuantificar.

- **Identificación de las fuentes de incertidumbre**

Con un diagrama causa efecto (Ishikawa).

- **Estimación de la incertidumbre de medición**

Para estimar las incertidumbres estándar de los certificados de calibración es común asumir su distribución de probabilidad normal, rectangular o triangular (Uribe Rosas, 2017).

- **Estimación de la incertidumbre combinada**

Se estimó la incertidumbre combinada en función de sus incertidumbres estándar para cada componente.

$$U_{Combinada} = \sqrt{U_{metodo}^2 + U_{sesgo}^2 + U_{analista}^2} \quad (43)$$

- **Calculo de la incertidumbre expandida**

Finalmente se calculó la incertidumbre expandida, multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura.

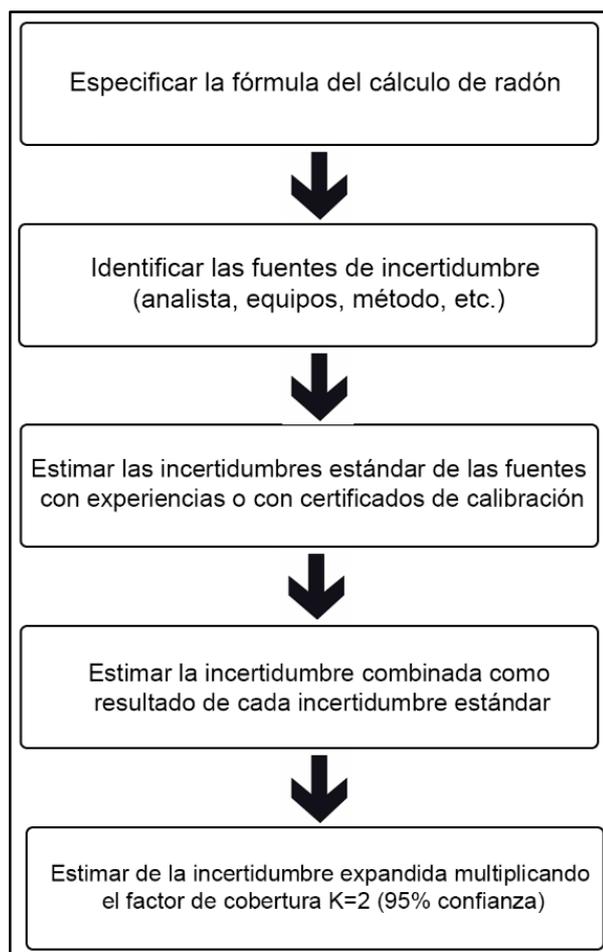


Figura 25. Esquema del método De abajo hacia arriba para estimar la incertidumbre
Fuente: Elaboración propia

3.7. Análisis de datos

3.7.1. Técnicas de recolección de datos

Se realizó observación experimental cuantitativa de las diferencias de voltaje en los *electrets* producidas por el gas Rn^{222} . Además, el muestreo estuvo basado en los criterios de la norma EPA-402-R-92-004 “Protocolos de dispositivos de medición de productos de decaimiento de radón interior y radón”

Las concentraciones de radón experimentales fueron obtenidas en la cámara de radón que implementó el laboratorio de ALEPH SAC, en ella se acumuló Rn^{222} en condiciones controladas, se tomaron en cuenta las exigencias de protección radiológica previstas para su uso.

3.7.2. Técnicas de análisis y procesamiento de datos

Se revisaron y analizaron los resultados experimentales de las distintas concentraciones de radón entre sí en distintos intervalos de tiempo basados en la norma ISO 11665-4:2012 "Medición de la radioactividad en el medio ambiente - Aire: radón-222 - Parte 4: Método de medición integrado para determinar la concentración de actividad promedio mediante muestreo pasivo y análisis retardado", *los cuales fueron procesados en software estadístico mediante criterios de estadística inferencial descritos en los procedimientos.*

Tabla 16. Detalles del software estadístico

Software	Detalles
Excel	2013, Complemento de análisis de datos
Minitab	Versión 17, paquete básico

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Aseguramiento de la calidad de los resultados

Para mantener la debida calidad de los resultados, el fabricante recomienda calibrar el lector de electrets SPER-1 una vez al año. Del mismo modo el método EIC posee un electret de referencia, este electret es como cualquier otro pero su diferencia radica que puede mantener por más tiempo su carga superficial, el voltaje de este electret es certificado por el fabricante en cada calibración del SPER-1 y se debe considerar una acción correctiva de calibración cuando salga del intervalo de ± 3 de dicho voltaje certificado cuando se lea con el SPER-1 (Rad Elec Inc., 2007).

El rango de dinámico de los electrets, también conocido como rango de operatividad, está dado por el fabricante el cual consiste de un rango de voltaje en el cual el electret puede funcionar de forma adecuada entre los 750v y 150v, esto debido que la respuesta del electret debajo de los 150v no es eficiente lo que podría generar resultados que no sean correctos. (Ramírez, et al., 1999)

3.8. Consideraciones éticas

Para el presente trabajo de investigación los datos presentados están bajo la supervisión y aprobación de la Gerencia de calidad y medio ambiente de ALEPH SAC. Para más información véase el **Anexo N°6**.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1. Exámenes Preliminares

Tabla 17. Resultados de los ensayos preliminares

Analista	Puntos	VI	VF	Rn en Aire	Media	Diferencia	RSD
		volt	volt	Bq/m ³	Bq/m ³	Bq/m ³	
Analista 1	Punto 1	710	689	30.3	29.4	0.94	3.19
		642	622	28.8	29.4	0.63	2.15
	Punto 2	688	668	28.1	29.4	1.28	4.36
		740	719	29.9	29.4	0.51	1.73
		450	431	28.9	29.4	0.45	1.53
	Punto 3	540	520	30.3	29.4	0.87	2.95

Fuente: Elaboración propia

4.2. Prueba de Aptitud

Tabla 18. Resultados de la prueba de aptitud

Grupo de exposición	Tránsito	1	2	3	4
Exposición de referencia al radón 222	-	191	208	1099	1169
$D_{Rn,Ref}$					
Nº	kBq.h.m ⁻³				
1	12	170	197		317
2	11	172	201		343
3	35	189	193	No	245
4	14	177	185	expuesto	276
5	10	181	179		324
6	26	167	206		246
Promedio (kBq.h.m ⁻³)	18	176	193.5	-	291.83
RSD (kBq.h.m ⁻³)	10.2	8.1	10.1	-	42.0
Error Relativo (%)	-	-7.9	-7	-	-75

Fuente: (BfS, 2017)

Tabla 19. Resultados promedios de la prueba de aptitud

BfS 2017		
	Error Relativo Promedio (%)	Error máximo (%)
CR39	17.1	119.9
Makrofol	4.3	9.3
EIC de otros laboratorios	37.9	96.2
LR115	17.4	25.9
EIC Aleph	7.5	7.9

Fuente: (BfS, 2017)

4.3. Parámetros analíticos

4.3.1. Veracidad

Tabla 20. Datos utilizados para la prueba T en 1

N°	BfS	ALEPH	$\Delta \text{Exp (KBq.h/m}^3\text{)}$
1	191	170	0.11
2	191	172	0.10
3	191	189	0.01
4	191	177	0.07
5	191	181	0.05
6	191	167	0.13
7	208	197	0.05
8	208	201	0.03
9	208	193	0.07
10	208	185	0.11
11	208	179	0.14
12	208	206	0.01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resultados de prueba T en 1 para estudio de veracidad

Prueba de T en 1							
Prueba de $\mu = 10 \text{ vs. } > 10$							
Variable	N	Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95 %	T	P
ΔExp	12	7.33	4.48	1.29	5.01	-2.06	0.97

Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentes en las imágenes Figura 26, Figura 27 y Figura 28 presentan resultados con H_0 e intervalo de confianza t de 95% para la media.

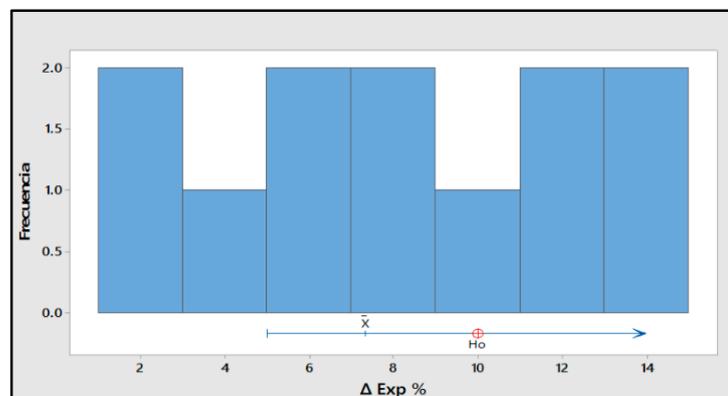


Figura 26. Histograma de la variación porcentual por muestra

Fuente: Elaboración propia

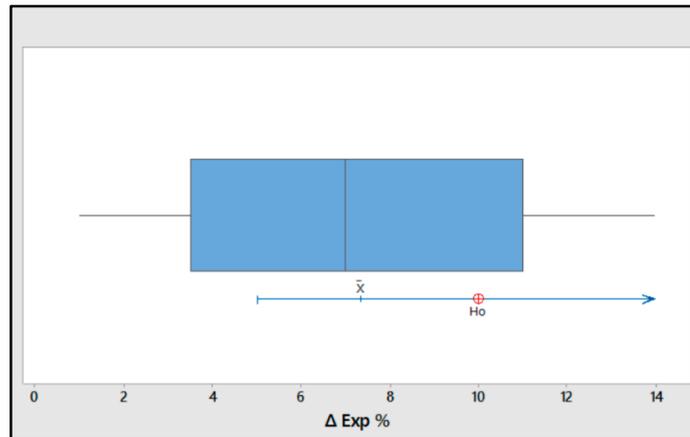


Figura 27. Gráfica de caja para la variación porcentual $\Delta \text{Exp}\%$

Fuente: Elaboración propia

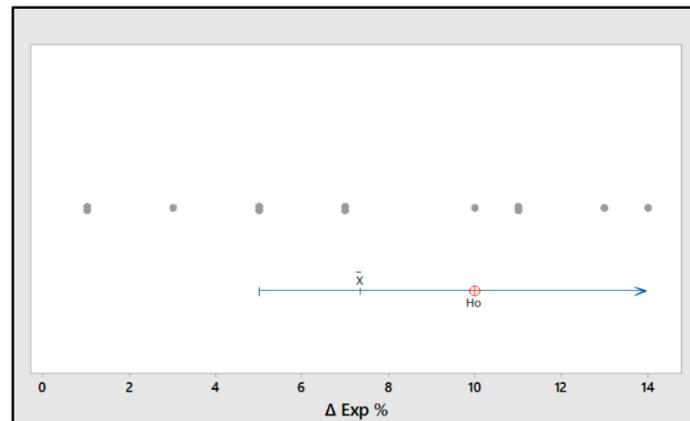


Figura 28. Gráfica de valores individuales de la variación porcentual $\Delta \text{Exp}\%$

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Precisión

Tabla 22. Pruebas realizadas para el estudio de precisión

Nº de Ensayos	Concentración de radón (Bq/m^3)	
	Analista 1	Analista 2
1	233.3	233.0
2	235.3	235.6
3	232.1	234.3
4	234.5	233.4
5	236.4	231.7
6	236.8	237.8
7	236.4	236.0

Nº de Ensayos	Concentración de radón (Bq/m ³)	
	Analista 1	Analista 2
8	236.0	234.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Resultados estadísticos de la precisión

Promedios		
General	Analista 1	Analista 2
234.7	235.1	234.5
Desviaciones Estándar		
General	Analista 1	Analista 2
1.8	1.7	1.9
Varianzas		
General	Analista 1	Analista 2
3.1	2.8	3.7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Desviaciones estándar: Repetibilidad, intralaboratorio y reproducibilidad

Desviación estándar (Bq/m ³)	
S ² _r (Repetibilidad)	3.25
S ² _L (Intralaboratorio)	0.21
S ² _R (Reproducibilidad)	3.47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. RSD de repetibilidad (RSD_r) y de reproducibilidad (RSD_R)

RSD	
RSD _r	0.77
RSD _R	0.79

Fuente: Elaboración propia

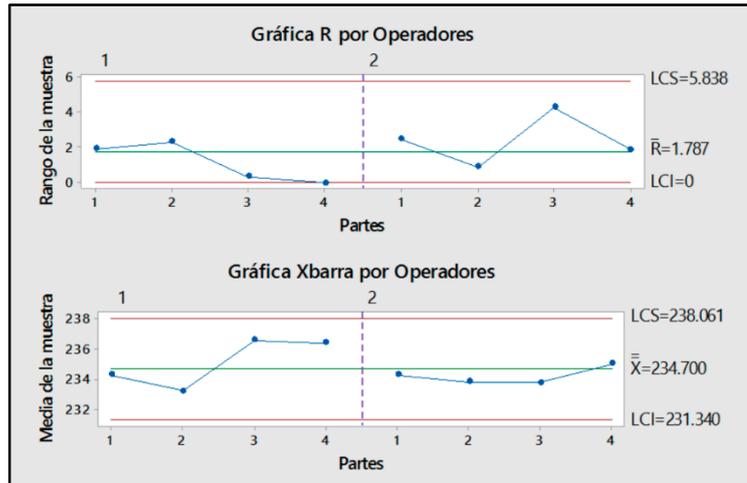


Figura 29. Gráfica R&R del sistema de medición (Xbarra/R) para Rn(Bq/m3)
Fuente: Elaboración propia

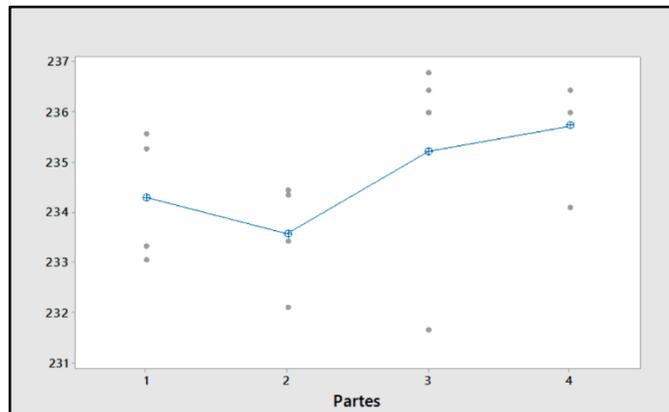


Figura 30. Concentración de radón por puntos dentro del ambiente
Fuente: Elaboración propia

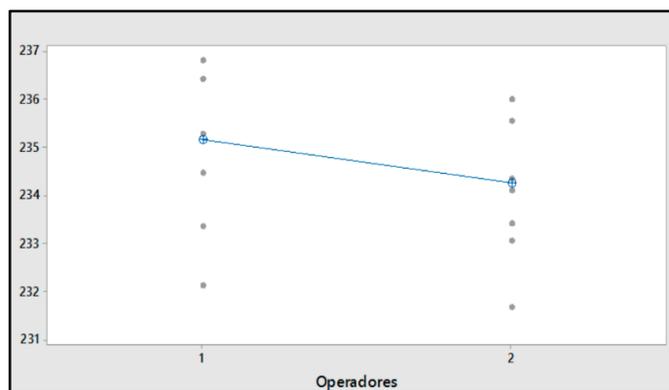


Figura 31. Comparación de media por operadores
Fuente: Elaboración propia

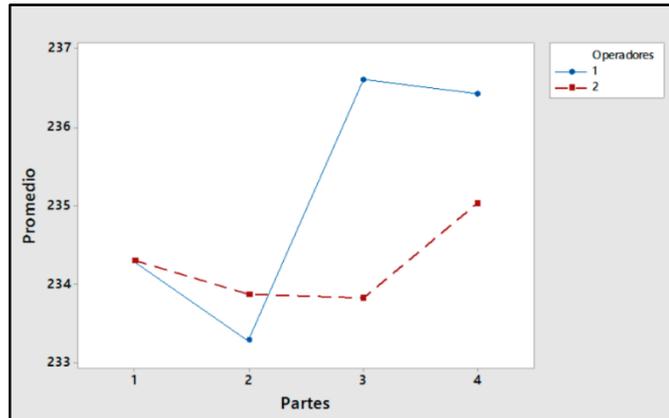


Figura 32. Interacción de los operadores por partes
Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Linealidad, Rango y Sensibilidad

Tabla 26. Datos para el cálculo de linealidad

N°	BfS (KBq.h/m ³)	ALEPH (KBq.h/m ³)	ΔVolt (V)
1	191	170	405
2	191	172	417
3	191	189	453
4	191	177	427
5	191	181	423
6	191	167	403
7	208	197	468
8	208	201	457
9	208	193	459
10	208	185	446
11	208	179	433
12	208	206	480

Fuente: (BfS, 2017)

Tabla 27. Resultados de la regresión

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de determinación R ²	0.93
Error típico	6.71
Observaciones	12

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento lineal de los datos de la Tabla 26 se presenta en la siguiente figura:

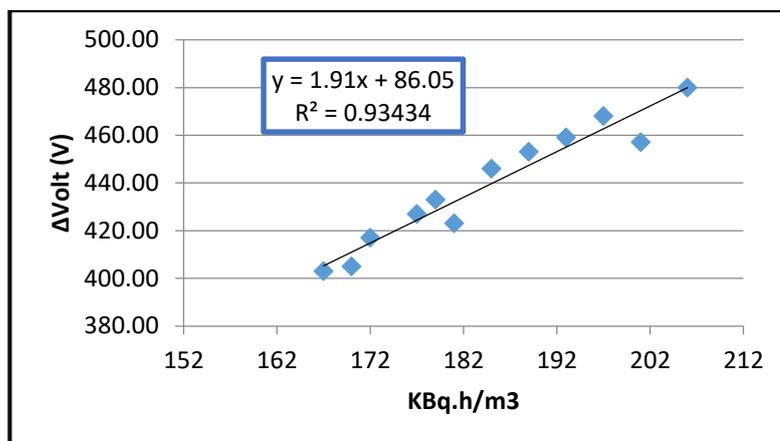


Figura 33. Ajuste lineal correspondiente a los resultados de ALEPH (KBq.h/m³) y ΔVolt (V)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Análisis de varianza

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	6411.65	6411.65	142.29	0.003
Error	10	450.60	45.06		
Total	11	6862.25			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Pronostico de "Y" y residuos

N° de Observación	Pronóstico para Y(ΔVolts)	Residuos (Volts)
1	411.05	-6.05
2	414.87	2.13
3	447.38	5.62
4	424.43	2.57
5	432.08	-9.08
6	405.32	-2.32
7	462.67	5.33
8	470.32	-13.32
9	455.02	3.98
10	439.73	6.27
11	428.26	4.74
12	479.88	0.12

Fuente: Elaboración propia

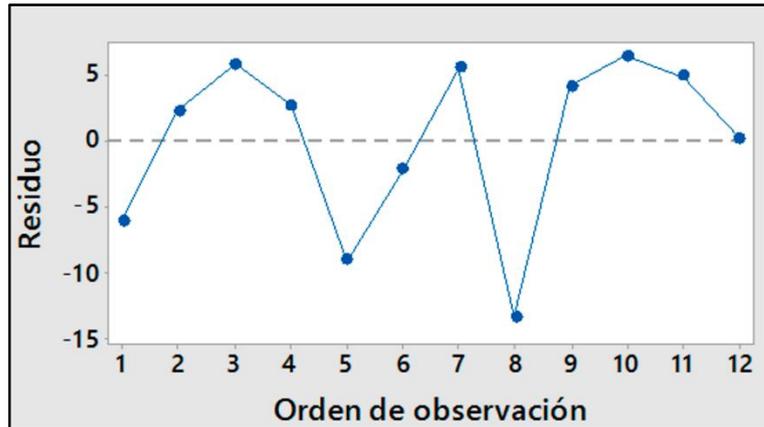


Figura 34. Gráfica de Residuos (Volts) vs número de observación
Fuente: Elaboración propia

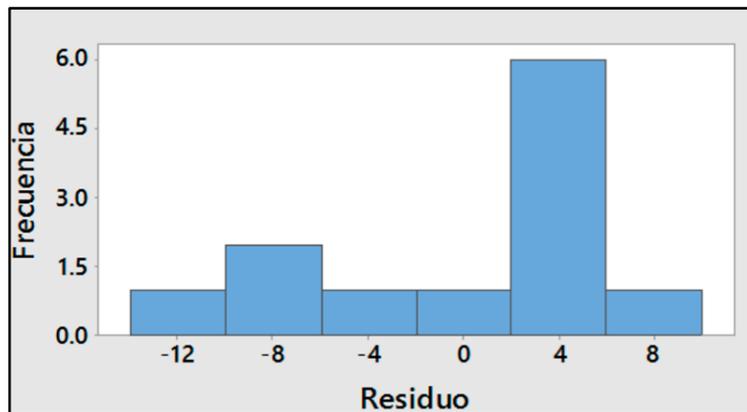


Figura 35. Histograma de los residuos
Fuente: Elaboración propia

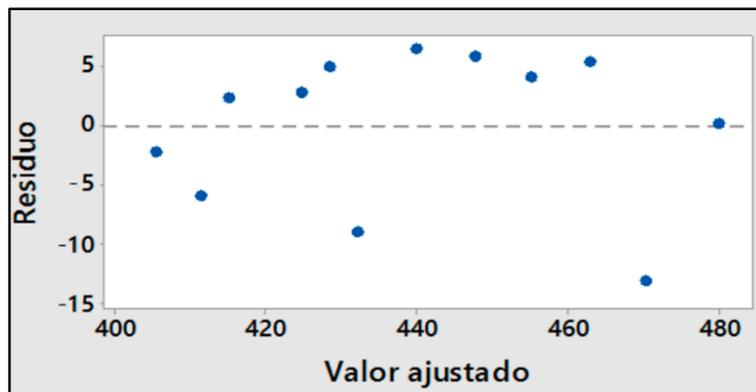


Figura 36. Gráfica de residuos vs valores ajustados
Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Límite de detección y cuantificación

Las tablas 30, 31 y 32 muestran los resultados para 7 blancos (fondos) de tres diferentes grupos para un mes de medición.

Tabla 30. Resultados de los blancos del primer grupo

N° Blanco	V_I(Volts)	V_F(Volts)	Radón en Aire (Bq/m³)
1	729	718	5.0
2	662	651	5.5
3	655	644	5.6
4	689	678	5.3
5	674	663	5.4
6	719	708	5.1
7	667	656	5.5
Desv. Est.(S)	28.8	28.8	0.22

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Resultados de los blancos del segundo grupo

N° Blanco	V_I(Volts)	V_F(Volts)	Radón en Aire (Bq/m³)
1	709	698	5.1
2	671	660	5.4
3	728	717	5.0
4	729	718	5.0
5	700	689	5.2
6	676	665	5.4
7	705	694	5.2
Desv. Est.(S)	22.7	22.7	0.17

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Resultados de los blancos del tercer grupo

N° Blanco	V_I(Volts)	V_F(Volts)	Radón en Aire (Bq/m³)
1	671	660	5.4
2	653	642	5.6
3	690	679	5.3
4	728	717	5.0
5	739	728	5.0
6	650	639	5.6
7	680	669	5.4
Desv. Est.(S)	34.7	34.7	0.26

Fuente: Elaboración propia

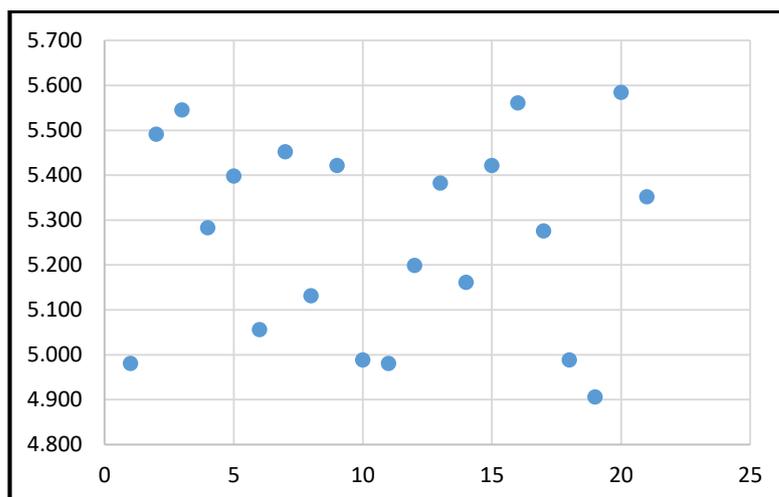


Figura 37. Dispersión de la concentración de radón de los 21 datos de fondo
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Límites de detección y cuantificación

Límites	
S global	0.22
Factor t (6,0.01)	3.14
LD (Bq/m3)	6
LC (Bq/m3)	18

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Selectividad y Especificidad

Tabla 34. Datos para la selectividad

ALEPH (O) Bq/m³	BfS (E) Bq/m³	(O-E)²/E
170	191	2.31
172	191	1.89
189	191	0.02
177	191	1.03
181	191	0.52
167	191	3.02
197	208	0.58
201	208	0.24
193	208	1.08
185	208	2.54
179	208	4.04
206	208	0.02
	SUMA	17.29
	CHI-2	19.68

Fuente: (BfS, 2017)

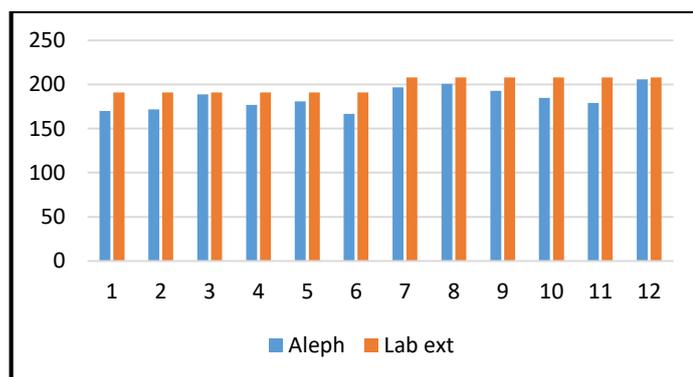


Figura 38. Comparación datos de ALEPH vs BfS Lab (Lab ext)
Fuente: Elaboración propia

4.3.6. Robustez

Para determinar si el método es robusto o no, se consideró dos factores analista y tiempo de exposición.

Tabla 35. Datos para el estudio de Robustez

Variables	Valor alto	Valor bajo	1	2	3	4
(A1,A2)	A1	A2	A1	A1	A2	A2
(T,t)	7d	7.1d	7.1	7	7.1	7
Resultados (Bq/m ³)			134.4	134.9	134.6	134.7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Promedios por variable de análisis (analista y tiempo)

Factor	Concentración (Bq/m ³)
Analista	
Promedio en Analista1	134.65
Promedio en Analista2	134.65
Tiempo	
Promedio en T (7.1d)	134.50
Promedio en t (7d)	134.80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Resultados finales para el análisis de robustez

Factor	Efecto del factor	Límite(2.24*S_r)	Resultados
Analista	0.014	4.04	El factor no influye
Tiempo	0.301	4.04	El factor no influye

Fuente: Elaboración propia

4.4. Estimación de la incertidumbre

La estimación de la incertidumbre se llevó a cabo para el método EIC aplicado para su uso en aire para la medición de concentración de gas radiactivo Rn²²² en interiores, el cual tiene como formula la descrita en el ítem **2.4.4. Determinación de la concentración de radón usando *electrets*.**

Continuando con el desarrollo del método de abajo hacia arriba, se hizo un análisis de las fuentes de incertidumbre en forma de un diagrama de causa-efecto.

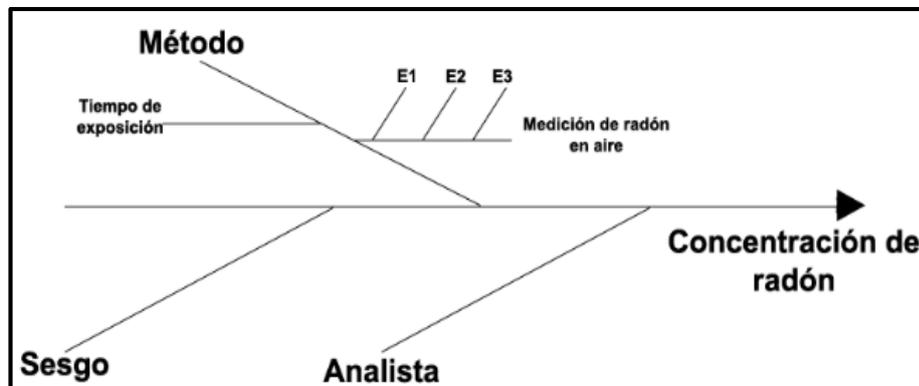


Figura 39. Diagrama de causa y efecto

Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Incertidumbre asociada al método

La incertidumbre asociada al método, se calculó multiplicando la incertidumbre relativa (U_{r_m}) por la concentración de radón obtenida por el método de medición de radón en aire por el método de EIC (C_{Rn-222}).

$$U_m = U_{r_m} \cdot C_{Rn-222} \quad (44)$$

Sin embargo la incertidumbre relativa del método, está determinada por sus componentes que serían la incertidumbre por medición $Ur_{med\ radón}$ y la incertidumbre por el tiempo de exposición Ur_{te} como se aprecia en la Figura 39 por el diagrama de causa efecto.

$$Ur_m = \sqrt{Ur_{te}^2 + Ur_{med\ radón}^2} \quad (45)$$

La incertidumbre de la medición ($Ur_{med\ radón}$) está dada por cuatro errores asociados a las imperfecciones del equipo (E1), a la lectura del voltaje (E2) y el error de la concentración de radón (E3) y el error de fondo gamma(E4). La incertidumbre asociada a los tres primeros fueron su error relativo entre $\sqrt{3}$, siendo estas incertidumbres estándares de tipo B. Para el caso del error relativo del equipo que mide el fondo gamma, se consideró que es una distribución normal, entonces se pudo expresar la incertidumbre relativa asociada al fondo gamma como el error del equipo dividido entre 2. La expresión del $Ur_{med\ radón}$ fue:

$$Ur_{med\ radón} = \sqrt{\left(\frac{Er_{im.\ equipo}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Er_{lectura\ de\ v}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.074(C_{Rn-222})^{-1}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Er_{monitor}}{2}\right)^2} \quad (46)$$

4.4.2. Incertidumbre asociada al sesgo

Para estimar esta incertidumbre primero se calculó el sesgo del analista, para esto necesita un valor de referencia del analista al emplear el método (\bar{x}) y un valor de referencia (R) de la forma:

$$Sesgo_A = \frac{|\bar{x} - R|}{R} \quad (47)$$

Entonces se pudo calcular la incertidumbre del sesgo multiplicando la concentración de radón medida por el sesgo del analista que emplea el método, se obtuvo de la siguiente forma:

$$U_{sesgo} = \sqrt{(Sesgo_A * C_{Rn-222})^2} \quad (48)$$

4.4.3. Incertidumbre asociada al analista

La incertidumbre del analista, se calculó determinando el coeficiente de variación, teniendo en cuenta su desviación estándar de repetibilidad (S_r) y el promedio (\bar{x}).

$$CV\% = \frac{S_r}{\bar{x}} \quad (49)$$

$$U_A = \sqrt{(CV\% * C_{Rn-222})^2} \quad (50)$$

4.4.4. Incertidumbre Combinada

Se apreció que los principales aportes se dan por el método, sesgo y analista, entonces la incertidumbre combinada sería

$$U_C = \sqrt{(U_m)^2 + (U_{sesgo})^2 + (U_A)^2} \quad (51)$$

Donde

U_m : Incertidumbre asociada al método

U_{sesgo} : Incertidumbre asociada al sesgo

U_A : Incertidumbre asociada al analista

U_C : Incertidumbre combinada

4.4.5. Incertidumbre expandida

Con los tres términos calculados anteriormente, se pudo calcular la incertidumbre combinada. La incertidumbre expandida (U_{Ex}) fue calculada por:

$$U_{Ex} = KU_C \quad (52)$$

Donde K es el factor de cobertura, para una distribución de probabilidad normal al 95 % de confianza este tendría un valor de 2.

4.4.6. Resultados

La incertidumbre expandida es una expresión muy grande y depende de la concentración de radón, sin embargo, en forma abreviada se puede expresar de la siguiente manera:

$$U_{Ex} = 2 \sqrt{(U_m)^2 + (U_{sesgo})^2 + (U_A)^2}$$

Con el fin de ser explícitos se presenta en la Figura 40 un ejemplar del resultado de concentración de radón e incertidumbre, teniendo en cuenta los cálculos determinados en el presente trabajo.

Se realizó el cálculo de incertidumbre para una concentración de radón de 101.0014 Bq/m³, determinada por una descarga desde los 729 a 670 voltios en 7 días a modo de ejemplo.

Método:	DETERMINACION DE Rn222 EN AIRE MEDIANTE MEDICION INTEGRADA USANDO ELECTRET ION CHAMBER
Ensayo:	Determinación de radón
Producto:	Aire

Valor Reportado:	Conc. Radón (Bq/m3)	101.00
-------------------------	---------------------	--------

I. INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL MÉTODO

U_m	3.89
U_{r_m}	0.04

1. Por medición de Radón en aire.

ur Med Radón	0.04
--------------	------

2. Por el tiempo de exposicion (periodo de análisis).

u ta	0.01
ur ta	0.00082

II. INCERTIDUMBRE DEL SESGO

U sesgo	0.13
---------	------

Analista	REALIZA ENSAYO	Sesgo relativo	Sesgo
Analista 1	SI	0.00131	0.13191
Analista 2	NO	0.00131	0.00000

III. INCERTIDUMBRE DEL ANALISTA

U analista	0.72
------------	------

Analista	REALIZA ENSAYO	DE relativa	Dev. Est.
Analista 1	SI	0.00713	0.72058
Analista 2	NO	0.00819	0.00000

V. INCERTIDUMBRE COMBINADA

Ucomb.	3.96
--------	------

$$u_{comb} = \sqrt{[u - Metodo]^2 + [u - Sesgo]^2 + [u - Analista]^2}$$

VI. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA AL 95% DE CONFIANZA

Factor de cob. (k)	2.00
Uexpan.	7.92

VII. REPORTE DE RESULTADOS

A un 95% de confianza se tiene el siguiente resultado:

Conc. Radón (Bq/m3)	101.00	±	7.92
---------------------	--------	---	------

Figura 40. Ejemplo de la hoja para la estimación de incertidumbre de ALEPH SAC
 Fuente: Elaboración de ALEPH SAC

CAPÍTULO V

DISCUSIONES

Evaluación preliminar

Se da por satisfactoria esta prueba ya que, los RSDs de todas las muestras en la Tabla 17 no superaron el máximo permitido de 10 % para el análisis de factibilidad de la validación, lo cual nos permitió continuar con la determinación de los parámetros analíticos del método.

Prueba de aptitud

Los datos de la prueba de aptitud fueron mostrados en la Tabla 18, los cuales fueron obtenidos al someterlos al patrón de referencia del laboratorio BfS de Alemania, en esta se aprecia que el grupo 3 no fue expuesto por causas del laboratorio de referencia Alemán. Los valores de los errores relativos del grupo de detectores respecto a la exposición al patrón de referencia del grupo 1 y 2 son -7.9% y -7% respectivamente, el grupo de tránsito no tiene error relativo debido que no se encuentra expuesto a patrón de referencia.

Para el grupo 4 los resultados no son válidos (-75%) debido que la exposición al radón es muy grande la cual descarga demasiado el electret saliéndose de su rango dinámico (voltaje final no debe ser menor de 150 v) por lo cual se obtuvo un error relativo alto. Un error relativo puede ser positivo cuando el valor de la referencia se encuentra por debajo del promedio de las medidas y negativo cuando el valor de referencia se encuentra encima del promedio.

En la Tabla 19 se muestran los resultados promedios de la prueba de aptitud donde se presentaron un total de 40 laboratorios a nivel mundial, haciendo un total de 53 tipos de detectores de gas radón, los cuales fueron agrupados según su tipo (CR39, Makrofol, Electret y LR115). Se observa que el error relativo promedio del método EIC de ALEPH SAC es de 7%, siendo menor a comparación de otros métodos: LR115 (17.4%), EIC de otros laboratorios (37.9%) y CR39 (17.1%). En el caso del Makrofol su error relativo promedio es del 4.3 % pero su error máximo es del 9.3% mayor al error máximo promedio del método EIC de ALEPH SAC que es de 7.9%, los otros métodos

tienen un error máximo promedio muy elevado: CR39 (119.9%), EIC de otros laboratorios (96.2%) y LR115 (25.9%).

Veracidad

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de T en 1 obteniendo una media de las diferencias porcentuales de 7.33% y una desviación estándar del 4.48%. El Pvalue 0.968 es mayor que el nivel de significancia (0.05).

Reforzando los cálculos, se observa en el histograma (Figura 26), el gráfico de cajas (Figura 27) y el gráfico de valores individuales (Figura 28) nos muestran que la media y la mayor parte de los datos están debajo del valor asignado RSD de 10 %.

Precisión y Exactitud

Como se aprecia en la Tabla 25 se muestran los $RSD_r = 0.77$ y $RSD_R = 0.79$ los cuales son menores que el $RSD_{Teórico} 10\%$.

Del mismo modo en la Figura 29 se visualiza que tanto para R (rangos) y \bar{X} (medias) los valores no salen de la zona de control, en la Figura 31 se observa que ambos promedios de cada operador no son iguales, sin embargo el valor de diferencia entre estos es muy pequeño y la Figura 32 nos muestra cierta tendencia mutua en los resultados de ambos operadores.

Linealidad, rango de trabajo y sensibilidad

En la Figura 33 se observa la tendencia lineal de los datos, entonces se realizó la regresión lineal obteniendo la ecuación $\Delta V = 1.91C_{rn} + 86.05$, y se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) de 0.93. El análisis de varianza, como se muestra en la Tabla 28, nos proporciona un Pvalue de 0.003 siendo menor que 0.05 que es el nivel de significancia.

Finalmente se observa en la Figura 34 que los residuos no presentan ningún tipo de tendencias.

LD y LC

Los datos de fondo recabados de los grupos 1, 2 y 3 se muestran en la Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32 respectivamente. El límite de detección calculado es 5.96 Bq.h/m³ y el límite de cuantificación es de 17.88 Bq.h/m³ como se aprecia en la Tabla 33.

Selectividad

En la Tabla 34 muestra que el valor de la suma de los cuadrados de las diferencias observadas y esperadas es 13.105 siendo menor al valor de Chi-cuadrado (probabilidad 0.05 con 11 grados de libertad) 19.675. La Figura 38 muestra una relación entre los resultados de los laboratorios de ALEPH SAC y el laboratorio BfS.

Robustez

La Tabla 35 muestra cuatro resultados para el estudio de dos factores (tiempo y analista) ordenados para el estudio de robustez, los resultados muestran en la Tabla 36 que el efecto de tiempo y analista no son significativos por ser menores que la medida crítica 4.039.

Tabla 38. Resumen de los resultados finales

Parámetro analítico	Método o criterio de decisión	Resultados
Veracidad	Pvalue > (0.05), entonces no existe diferencia significativa entre la media (o mediana) de los resultados y el valor de referencia, por lo tanto el método de ensayo es veraz.	El Pvalue = 0.968
	Pvalue ≤ (0.05), entonces existe diferencia significativa entre la media (o mediana) de los resultados y el valor de referencia, por lo tanto el método de ensayo no es veraz.	
Precisión	Si RSDr es menor o igual al RSD teórico (10%), el método es preciso en condiciones de repetibilidad.	RSDr = 0.77
	Si RSDR es menor o igual al RSD teórico (10%), el método es preciso en condiciones de reproducibilidad.	RSD _R = 0.79
Linealidad	La regresión debe ser significativa (Pvalue < 0.05), entonces la pendiente es distinta de cero, el modelo lineal es adecuado.	Pvalue = 0.003
	El grafico de residuales debe mostrar que la distribución de los residuales es aleatoria, es decir, no presenta tendencias de tipo alguno.	-
Rango de trabajo	El rango de trabajo es el intervalo donde se demuestra linealidad y con el cumplimiento de veracidad y precisión.	191 – 208 KBq.h/m ³
Sensibilidad	La sensibilidad se determina con la pendiente de la ecuación obtenida del análisis de regresión lineal.	1.91 V.m ³ /KBq.h
Límite de detección	LD = 3.14 Sr	5.96 ≈ 6 Bq/m ³
	Donde 3.14 es el valor que corresponde a una distribución t-Student con 6 grados de libertad.	

Parámetro analítico	Método o criterio de decisión	Resultados
Límite de cuantificación	LC = 3 LD	17.88 ≈ 18 Bq/m3
Robustez	El factor tiene efecto significativo si : Efecto > 1.41Sr	Efecto Analista =0.014 Efecto Tiempo =0.30

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

Prueba de aptitud

En el protocolo EPA 402-R-92-004 se menciona que un método es competente cuando el error relativo de este se encuentra en $\pm 25\%$ del valor de referencia.

Se obtuvieron errores menores al 25 % en los grupos 1 (7%) y 2 (7.9%) mostrados en la Tabla 18 del mismo modo, se observa en la Tabla 19 un resultado menor del error relativo promedio y máximo del método EIC de ALEPH SAC comparado con otros métodos similares (LR115, CR39 y EIC de otros laboratorios) y un error relativo máximo menor que el método que emplea Makrofol por lo tanto se concluye por medio de la prueba de aptitud que el método es de buen desempeño en comparación a otros.

Veracidad

No se presenta diferencia significativa entre la media de las variaciones porcentuales y el valor de referencia, debido que el Pvalue es mayor que el nivel de significancia (0.05), en conclusión, el sesgo no es significativo por lo tanto se concluye que el método de ensayo es veraz.

Precisión y Exactitud

Se concluye por el análisis de los RSDs de repetibilidad y repetibilidad que el método es preciso, tomando como referencia el protocolo EPA 402-R-92-004, donde menciona que el RSD no debe ser mayor al 10%. Así mismo, se puede afirmar que el método es exacto al 95% de confianza debido a que cumple veracidad y precisión.

Linealidad, Rango y Sensibilidad

Por medio del análisis de varianza y la apreciación del coeficiente de determinación, se concluye que el modelo lineal es adecuado habiéndose

desarrollado en un rango de trabajo de [191 - 208 KBq.h/m³], siendo su sensibilidad la pendiente que es 1.91 V.m³/KBq.h.

Límite de detección y cuantificación

En general los datos nos indican que no se determinaron valores de fondo máximos a los 6.0 Bq/m³. Se concluye que se determinó un límite de detección reportable de 6.0 Bq/m³ y límite de cuantificación de 18 Bq/m³.

Selectividad

Se concluye que el método es selectivo por el análisis Chi-cuadrado evaluado satisfactoriamente al ser el valor Chi-cuadrado experimental (17.29) menor que el Chi-Cuadrado teórico estimado (19.675).

Robustez

Se concluye que el método es robusto en la variación del tiempo (variar de 7 días a 7.1 día) y a la variación de analista (entre analista 1 y analista 2) por no tener efectos significativos en los resultados.

Incertidumbre

Se realizó la estimación de la incertidumbre por el método *de abajo hacia arriba* tomando en cuenta los aportes del método de medición, sesgo y analista los cuales son detallados y mostrados en los resultados.

Conclusión general

Finalmente se demuestra en el presente trabajo mediante la aplicación de estadística inferencial para la determinación de los parámetros analíticos atribuidos a los resultados de las concentraciones de radón y su evaluación con referencia a los criterios de decisión resultan adecuados, por lo tanto se concluye que el método EIC en aire usado para la medición de Rn²²² en interiores de hogares ha sido validado demostrando su aptitud al cumplir con los suficientes requisitos técnicos para obtener medidas confiables.

CAPÍTULO VII RECOMENDACIONES

Para no obtener valores de errores relativos muy altos (-75%), se debe proveer para la próxima prueba de aptitud la participación dentro de rangos de medición del método, del mismo modo se recomendaría usar bolsas a prueba de radón para el transporte de los electrets hasta Alemania para su exposición y así minimizar el aporte de fondo.

Según la matriz de medición (Aire), se podría ampliar el alcance de este trabajo para aplicarlo también en ambientes laborales.

REFERENCIAS

1. AEFI. (2001). Comisión de normas de buena fabricación y control de calidad.
2. Ávila Rey, M. J., Calvino Casilda, V., & López Peinado, A. J. (2018). *Introducción a la radioquímica* (Primera ed.). Madrid: UNED.
3. Beltrán, J. (2010). *Universitat de València*. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de <http://www.uv.es>
4. BfS. (2017). *Intercomparison of passive radon detectors*. Alemania.
5. Botella-Rocamora, P., Alacreu-García, M., & Martínez-Beneito, M. A. (s.f.). *Universitat de Valencia*. Recuperado el 05 de 23 de 2018, de <https://www.uv.es/~mamtnez/IECRC.pdf>
6. Budd, G., Hopper, R., Braganza, E., Ronca-Battista, M., Steinhausler, F., & Stegner, P. (1998). Intercomparison of Radon and Decay Product Measurements in an Underground Mine and EPA Radon Laboratory . *Health Physics*, 75(5), 465-474.
7. Cayuela, L. (Junio de 2014). *Unidad de Alcalá*. Recuperado el 28 de Abril de 2018, de https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_asignaturas/asig202218/informacion_academica/2-Modelos%20lineales.pdf
8. CEM. (2012). *VIM*.
9. Cherry, R. N. (2018). *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2018, de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf>
10. CSN. (2013). *Consejo de seguridad nuclear*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/764096047_1572009112411.pdf
11. CSN. (2018). *Consejo de seguridad nuclear*. Recuperado el 25 de Abril de 2018, de <https://www.csn.es>
12. Delgado González, M. J. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CÁMARA PROPORCIONAL DE MULTIALAMBRES*.
13. Denman, A. R., Groves-Kirkby, C. J., Phillips, P. S., Crockett, R. M., Woolridge, A., & Gillmore, G. K. (2005). The practical use of electrets in a public health radon remediation campaign. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84(3), 375 -391 .

14. EMA. (2017). *Entidad Mexicana de Acreditacion*. Recuperado el 20 de mayo de 2018, de http://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/proceso-de-acreditacion/programas-de-ensayos-de-aptitud
15. EPA. (1992). • *Indoor Radon And Radon Decay Product Measurement Device Protocols EPA 402-R-92-004*.
16. EPA. (Mayo de 1993). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/0000059B.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
17. EPA. (1994). *Method 200.8, Revision 5.4: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*. Recuperado el 02 de Mayo de 2018, de <https://www.epa.gov/>
18. EPA. (2014). *Conversion factor for radon units*. Recuperado el 05 de Mayo de 2018, de <https://www.epa.gov>
19. EPA. (2015). *EPA*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2015-08/documents/citizensguide_sp.pdf
20. EPA. (2017). *Manual informativo sobre el radón - La guía para proteger a su familia y a usted del radón* .
21. EURACHEM. (2005). MÉTODOS ANALÍTICOS ADECUADOS A SU PROPÓSITO . México.
22. EURACHEM. (2012). *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. TRADUCIDO.
23. Eurolab España . (2016). *Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos*. Eurachem.
24. Federación de Enseñanza de CCOO. (2009). Temas para la educación. *Revista digital para los profesionales de la enseñanza*(4).
25. Fernández Gallardo, P. (2007). *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado el 24 de 05 de 2018, de https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/gallardo/tablas_Probl_2007-2008.pdf
26. Fisquiweb. (22 de Agosto de 2016). *fisquiweb.es*. Recuperado el 28 de Abril de 2018, de <https://fisquiweb.es/Apuntes/Apuntes2Fis/SeriesRadiactivas.pdf>

27. Foord, T. (1969). Measurement of the distribution of surface electric charge by use of a capacitive probe. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 2(5), 411-413.
28. Foro Nuclear. (2013). *Foro Nuclear*. Recuperado el 15 de 04 de 2018, de <https://www.foronuclear.org>
29. Health Canada. (2014). *LE RADON - GUIDE DE RÉDUCTION POUR LES CANADIENS*. Ottawa: Health Canada.
30. IAEA . (2013). *International Atomic Energy Agency*. Recuperado el 12 de Abril de 2018, de <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/radiation-terms.htm>
31. INACAL. (04 de Octubre de 2017). *INACAL*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de [https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/documentosespecificos/files/Directrices%2FDA-acr-20D-DIRECTRIZ.PARA.LA.VALIDACION.DE.METODOS.DE.ENSAYO\(1\).pdf](https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/documentosespecificos/files/Directrices%2FDA-acr-20D-DIRECTRIZ.PARA.LA.VALIDACION.DE.METODOS.DE.ENSAYO(1).pdf)
32. IPEN. (1997). *REGLAMENTO DE SEGURIDAD RADIOLOGICA*.
33. ISO. (2012). *ISO 11665-4:2012, Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis*.
34. ISO. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO.
35. ISPCH. (2010). *GUÍA TÉCNICA N°1 - Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición : "Aspectos generales sobre la validación de métodos"*. Santiago.
36. Jofre Rebolledo, V. R. (2009). *VALIDACION DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ACIDOS GRASOS EN ACEITES DE OLIVA EXTRA VIRGEN*. Santiago: TESIS.
37. Jurado, J. M. (Mayo de 2017). *Aplicación de Microsoft Excel a la Química Analítica: validación de métodos analíticos*. Recuperado el 5 de Abril de 2018
38. Kotrappa, P. (12 de Diciembre de 2014). *ResearchGate*. Recuperado el 26 de Mayo de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/242237431_REVIEW_OF_E-PERM_PASSIVE_INTEGRATING_ELECTRET_IONIZATION_CHAMBERS_FOR_MEASURING_RADON_IN_AIR_THORON_IN_AIR_RADON_IN_WATER_AND_RADON_FLUX_FROM_SURFACES_AND_MILL_TAILINGS?enrichId=rgreq-6f10c56d32b1b8d609e6

39. Kotrappa, P. (2015). *ELECTRET ION CHAMBERS FOR CHARACTERIZING INDOOR, OUTDOOR, GEOLOGIC AND OTHER SOURCES OF RADON*. Maryland: Nova Science Publishers, Inc.
40. Kotrappa, P., Dempsey, J., Ramsey, R., & Stieff, L. (1988). An Electret Passive Environmental ²²²Rn Monitor Based on Ionization Measurement. *Health Physics*, 54(1), 47-56.
41. Kotrappa, P., Dempsey, J., Ramsey, R., & Stieff, L. (1990). Measurement, A Practical E-PERMTM (Electret Passive Environmental Radon Monitor) System for Indoor ²²²Rn. *Health Physics*, 58(4), 461-467.
42. Liza Neciosup, R. A. (18 de Mayo de 2017). *PUCP*. Recuperado el 15 de Mayo de 2018, de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/8656>
43. Lyn, J. A., Ramsey, M. H., Coad, D. S., Stephen, A. P., Wood, R., & Boon, K. A. (2007). The duplicate method of uncertainty estimation: are eight targets enough? *The Analyst (Royal Society of Chemistry)*, 132(11), 1147-1152.
44. Marvin, H. B. (1995). How to measure radiation with electrets. *Nucleonics* 13, 82-83.
45. Medina, J., & Berrocal, J. (2008). *Validación de método analítico de valoración de naproxeno sódico 550 mg. tableta por cromatografía líquida de alta performance*. TESIS: TESIS.
46. Miles, J. (2004). *International Nuclear Information System*. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/010/36010924.pdf?r=1
47. Miller, J. N., & Miller, J. C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica* (Cuarta ed.). Madrid: Prentice Hall.
48. Morrón, L. (2013). *Los Mundos de Brana*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2018, de <https://losmundosdebrana.com/>
49. Mulholland, M. (1988). Ruggedness testing in analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 7(10), 383-389.
50. Nikezic, D., & Yu, K. (2007). *COMPUTER SIMULATION OF RADON MEASUREMENTS WITH NUCLEAR TRACK DETECTORS*. Nova Science Publishers, Inc.
51. NRPB. (2004). High radon houses found in Cornwall. *Radon Newslett.*
52. Ootera, H., & Nakanishi, K. (1988). Analytical method for evaluating surface charge distribution on a dielectric from capacitive probe

- measurement-application to a cone-type spacer in +or-500 kV DC-GIS. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(1), 165-172.
53. Rad Elec Inc. (2007). *E-PERM System Manual*. Maryland.
 54. Ramírez, M. P., Correa, E., & Sancho, C. (1999). *Medida de Radón y Descendientes en el Desmantelamiento de una Instalación Nuclear del CIEMAT*. Madrid : CIEMAT.
 55. Rojas Hancoo, J. J. (Febrero de 2016). *Repositorio digital de tesis PUCP*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2018, de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/7441/R OJAS_JHONNY_RADON_222.pdf
 56. Ruano-Ravina, A., Kelsey, K. T., Fernández-Villar, A., & Barros-Dios, J. M. (2017). Action levels for indoor radon: different risks for the same lung carcinogen? *European Respiratory Journal*, 50(5).
 57. Sainz Fernandez, C. (2010). *El radon : Exposicion de riesgo para la salud . Soluciones para reduccion*. Universidad de Santiago de Compostela.
 58. Sergas. (2014). *Sergas.es*. Recuperado el 4 de Mayo de 2018, de https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilidad_Octubre2014.pdf
 59. Sessler, G. (1971). Method for Measurement of Surface Charge Densities on Electrets. *Review of Scientific Instruments*, 42(1), 15-19.
 60. Sessler, G. M. (1980). Electrets. In: Topics in Applied Physics. *Springer-Verlag*, 33.
 61. Tomé López, C. (2012). *Naukas*. Recuperado el 28 de Abril de 2018, de <http://naukas.com/2012/06/22/altamira-y-el-torio/>
 62. Toribio Calero, J. (07 de Junio de 2018). *tesis.pucp.edu.pe*. Recuperado el 10 de Junio de 2018, de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/12135>
 63. Turnhout, J. V. (1975). The use of polymers for electrets. *Journal of Electrostatic*, 1(2), 147 - 163.
 64. UCM, G. d. (25 de Junio de 2017). *nuclear.fis.ucm.es*. Recuperado el 14 de Abril de 2018, de <http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/camaraniebla/practica/p articulas.htm>
 65. Universidad de Valencia. (2018). *www.uv.es*. Recuperado el 5 de Mayo de 2018, de <https://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/uniforme.htm>

66. Universidad Politecnica de Madrid. (2011). *faii.etsii.upm.es*. Recuperado el 4 de Mayo de 2018, de <http://faii.etsii.upm.es/dfaii/Docencia/Libre%20eleccion/Material%20Doce nte%20Libre%20Eleccion/Introduccion%20a%20la%20Metrologia/TEMA %203.%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20incertidumbre%20t%C3 %ADpica.pdf>
67. Uribe Rosas, C. (Mayo de 2017). *Cálculo de Incertidumbre en Mediciones Analíticas*. Recuperado el 10 de Mayo de 2018, de <http://www.inacal.gob.pe>
68. Wikipedia. (2018). *Wikipedia* . Recuperado el 15 de Mayo de 2018, de https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg_peak
69. WS Hampshire Inc. (2018). *WS HAMPSHIRE*. Recuperado el 15 de Mayo de 2018, de http://catalog.wshampshire.com/Asset/psg_teflon_ptfe.pdf

ANEXOS

ANEXO N°1
DISTRIBUCIÓN DE T- STUDENT

α Γ	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290

Figura 41. Tabla de valores de distribución T-Student
Fuente: (Fernández Gallardo, 2007)

ANEXO N°2
DISTRIBUCIÓN DE TABLA CHI-CUADRADO

$\frac{\pi}{\phi}$	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.75	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	$\frac{\pi}{\phi}$
1	3.93E-05	1.57E-04	9.82E-04	3.93E-03	1.58E-02	0.102	0.455	1.323	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88	1
2	1.00E-02	2.01E-02	5.06E-02	0.103	0.211	0.575	1.386	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60	2
3	7.17E-02	0.115	0.216	0.352	0.584	1.213	2.37	4.11	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84	3
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	1.923	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86	4
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	2.67	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75	5
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.20	3.45	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55	6
7	0.989	1.239	1.690	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.3	7
8	1.344	1.647	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.22	13.36	15.51	17.53	20.1	22.0	8
9	1.735	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.7	23.6	9
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.55	15.99	18.31	20.5	23.2	25.2	10
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.34	13.70	17.28	19.68	21.9	24.7	26.8	11
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.34	14.85	18.55	21.0	23.3	26.2	28.3	12
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.34	15.98	19.81	22.4	24.7	27.7	29.8	13
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	13.34	17.12	21.1	23.7	26.1	29.1	31.3	14
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	14.34	18.25	22.3	25.0	27.5	30.6	32.8	15
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.91	15.34	19.37	23.5	26.3	28.8	32.0	34.3	16
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	16.34	20.5	24.8	27.6	30.2	33.4	35.7	17
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	13.68	17.34	21.6	26.0	28.9	31.5	34.8	37.2	18
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	18.34	22.7	27.2	30.1	32.9	36.2	38.6	19
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	19.34	23.8	28.4	31.4	34.2	37.6	40.0	20
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	20.3	24.9	29.6	32.7	35.5	38.9	41.4	21
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	21.3	26.0	30.8	33.9	36.8	40.3	42.8	22
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	18.14	22.3	27.1	32.0	35.2	38.1	41.6	44.2	23
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	23.3	28.2	33.2	36.4	39.4	43.0	45.6	24
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.3	29.3	34.4	37.7	40.6	44.3	46.9	25
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	20.8	25.3	30.4	35.6	38.9	41.9	45.6	48.3	26
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	21.7	26.3	31.5	36.7	40.1	43.2	47.0	49.6	27
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.7	27.3	32.6	37.9	41.3	44.5	48.3	51.0	28
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.6	28.3	33.7	39.1	42.6	45.7	49.6	52.3	29
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.6	24.5	29.3	34.8	40.3	43.8	47.0	50.9	53.7	30
40	20.7	22.2	24.4	26.5	29.1	33.7	39.3	45.6	51.8	55.8	59.3	63.7	66.8	40
50	28.0	29.7	32.4	34.8	37.7	42.9	49.3	56.3	63.2	67.5	71.4	76.2	79.5	50
60	35.5	37.5	40.5	43.2	46.5	52.3	59.3	67.0	74.4	79.1	83.3	88.4	92.0	60
70	43.3	45.4	48.8	51.7	55.3	61.7	69.3	77.6	85.5	90.5	95.0	100.4	104.2	70
80	51.2	53.5	57.2	60.4	64.3	71.1	79.3	88.1	96.6	101.9	106.6	112.3	116.3	80
90	59.2	61.8	65.6	69.1	73.3	80.6	89.3	98.6	107.6	113.1	118.1	124.1	128.3	90
100	67.3	70.1	74.2	77.9	82.4	90.1	99.3	109.1	118.5	124.3	129.6	135.8	140.2	100
Z_{α}	-2.58	-2.33	-1.96	-1.64	-1.28	-0.674	0.000	0.674	1.282	1.645	1.96	2.33	2.58	Z_{α}

Figura 42. Tabla de valores chi-cuadrado
Fuente: (Fernández Gallardo, 2007)

ANEXO N°3
CORRECCIONES DEL MÉTODO EIC

Contribución gamma (BG)

El factor de corrección gamma depende del tipo de cámara y de la dosis ambiental de fondo registrada, el cálculo se realiza:

$$BG = \dot{D}(0.087)$$

Donde:

BG: Aporte gamma (*pCi/L*)

\dot{D} : Tasa de dosis ($\mu R/h$)

G : Factor G ($(pCi/L)/(\mu R/h)$)

Factor de elevación (H)

La corrección de elevación se realiza al final de la determinación de la concentración de radón.

Tabla 39. Factores de corrección de elevación para las cámaras "S"

Factores de corrección por elevación		
Elevación en pies	Elevación en metros	Factor de corrección para "S Chamber"
0	0.0	1.00
1000	304.8	1.00
2000	609.6	1.00
3000	914.4	1.00
4000	1219.2	1.03
5000	1524.0	1.09
6000	1828.8	1.15
7000	2133.6	1.21
8000	2438.4	1.27

Fuente: (Rad Elec Inc., 2007)

El factor gamma se aplica en los resultados finales

$$C_{Rn-correctada} = C_{Rn} * H$$

ANEXO N°4
ESTUDIO DE RIESGO DE CONTRAER CÁNCER

Tabla 40. Riesgo de contraer cáncer personas fumadoras expuestas al radón

Nivel de radón	Si 1,000 personas que han sido fumadoras se vieran expuestas a este nivel de radón durante toda la vida*...	El riesgo de contraer cáncer por la exposición al radón es comparable a **...	QUÉ HACER: Deje de fumar y
20 pCi/L	unas 260 personas podrían contraer cáncer pulmonar	250 veces el riesgo de morir ahogado	Repare su casa
10 pCi/L	unas 150 personas podrían contraer cáncer pulmonar	200 veces el riesgo de morir en un incendio en el hogar	Repare su casa
8 pCi/L	unas 120 personas podrían contraer cáncer pulmonar	30 veces el riesgo de morir debido a una caída	Repare su casa
4 pCi/L	unas 62 personas podrían contraer cáncer pulmonar	5 veces el riesgo de morir en un accidente automovilístico	Repare su casa
2 pCi/L	unas 32 personas podrían contraer cáncer pulmonar	6 veces el riesgo de morir envenenado	Considere reparar entre 2 y 4 pCi/L
1.3 pCi/L	unas 20 personas podrían contraer cáncer pulmonar	(Nivel promedio de radón en el interior)	(Es difícil reducir los niveles de radón
0.4 pCi/L		(Nivel promedio de radón al aire libre)	por debajo de 2 pCi/L)

Fuente: (EPA, 2017)

Tabla 41. Riesgo de contraer cáncer personas no fumadoras expuestas al radón

Nivel de radón	Si 1,000 personas que no han sido fumadoras se vieran expuestas a este nivel de radón durante toda la vida*...	El riesgo de contraer cáncer por la exposición al radón es comparable a **...	QUÉ HACER: Deje de fumar y
20 pCi/L	unas 36 personas podrían contraer cáncer pulmonar	35 veces el riesgo de morir ahogado	Repare su casa
10 pCi/L	unas 18 personas podrían contraer cáncer pulmonar	20 veces el riesgo de morir en un incendio en el hogar	Repare su casa
8 pCi/L	unas 15 personas podrían contraer cáncer pulmonar	4 veces el riesgo de morir debido a una caída	Repare su casa
4 pCi/L	unas siete personas podrían contraer cáncer pulmonar	el riesgo de morir en un accidente automovilístico	Repare su casa
2 pCi/L	unas cuatro personas podrían contraer cáncer pulmonar	el riesgo de morir envenenado	Considere reparar entre 2 y 4 pCi/L
1.3 pCi/L	unas dos personas podrían contraer cáncer pulmonar	(Nivel promedio de radón en el interior)	(Es difícil reducir los niveles de radón
0.4 pCi/L	unas dos personas podrían contraer cáncer pulmonar	(Nivel promedio de radón al aire libre)	por debajo de 2 pCi/L)

Fuente: (EPA, 2017)

ANEXO N°5
PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL ELECTRET

Tabla 42. Propiedades eléctricas del PTFE

Propiedades Eléctricas del PTFE	
Constante Dieléctrica a 1 MHz	2.1
Factor de Disipación a 1 MHz	<0.0002
Resistividad volumétrica	>10 ¹⁸
Resistividad volumétrica (Ohm-cm) al 50% RH	
Fuente: (WS Hampshire Inc., 2018)	

ANEXO N°6 CODIGO DE ÉTICA

	CÓDIGO DE ÉTICA	Código: F-SG-020
		Fecha: 20/08/2015
		Versión: 02
		Página: 1 de 1

ALEPH GROUP CÓDIGO DE ÉTICA

ALEPH SAC se compromete a llevar a cabo todas sus operaciones de conformidad con la ética profesional. Esto incluye el cumplimiento de todos los estatutos y reglamentaciones aplicables y evitar el uso de procedimientos que puedan infundir apariencia de impropiedad. El compromiso de ALEPH SAC con la buena ética profesional está descrito a continuación.

1. Tanto ALEPH SAC como todos sus empleados, agentes y contratistas están obligados a dar cumplimiento a las políticas y procedimientos internos, así como a las leyes y regulaciones locales, estatales y nacionales aplicables en el suministro de servicios a nuestros clientes.
2. ALEPH SAC está comprometida con la satisfacción de sus clientes, sin embargo, la integridad de nuestra información es de vital importancia. ALEPH SAC no violará ninguna de las leyes, regulaciones y/o políticas y procedimientos de la empresa, para satisfacer los requerimientos de los clientes, ya sean establecidos o implícitos.
3. El personal de ALEPH SAC, debe mantener la imparcialidad e independencia de criterio y no deberá acceder a cualquier presión, o influencia indebida, interna o externa, comerciales, financieras ni de otra índole, que pudieran influir su juicio técnico y/o afectar la calidad de su trabajo.
4. El personal de ALEPH SAC, debe mantener en absoluto secreto y confidencialidad toda información a la que tuviese acceso, incluyendo pero no limitándose a fórmulas, diseños de equipos, procesos analíticos, planes estratégicos, lista de clientes, lista de precios, estados financieros, documentación contractual, así como información técnica, financiera, comercial, legal, políticas, procedimientos propios y/o cualquiera otra, que por su naturaleza deba de considerarse de carácter confidencial para ALEPH SAC, y que, por consiguiente, se obliga a no utilizar dicha información en provecho propio, ni a divulgar a ninguna persona física o jurídica sin la previa autorización escrita de ALEPH SAC, el cual queda expresamente facultado sin restricción de ninguna naturaleza para establecer en su contra las acciones penales y civiles que conforme a derecho correspondan, en caso de incumplimiento del compromiso de confidencialidad que por este acto adquiere.
5. ALEPH SAC está comprometida con la conducción de su empresa de una manera segura desde el punto de vista ambiental y a la protección de la salud y seguridad de nuestros empleados. ALEPH SAC se responsabiliza específicamente con el manejo () y disposición de las muestras para radiometría y/o dosimetría de acuerdo con todas las reglamentaciones aplicables, así como las políticas y procedimientos de la empresa.
6. ALEPH SAC tiene CERO TOLERANCIA por cualquier violación de este Código de ética. Cualquier infracción de esta política está sujeta a una acción disciplinaria. Además, su incumplimiento igualmente puede traer consecuencias criminales y/o civiles tanto para la Empresa como para los afectados individualmente.
7. Todo el personal de ALEPH SAC está obligado a comunicar cualquier violación real o sospechosa de las leyes, reglamentaciones y/o de las políticas y procedimientos de la empresa. Las violaciones pueden ser reportadas a la Gerencia de Gestión de Calidad y Medio Ambiente
8. Todos los incidentes reportados serán investigados y se tomarán las medidas apropiadas.

Figura 43. Código de ética de ALEPH SAC

Fuente: Elaboración de ALEPH SAC

ANEXO N°7 FORMULAS DE ESTADÍSTICA

Media

También conocida como media aritmética o promedio, en distribuciones simétricas, es la igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (53)$$

Donde:

x_i : Valor de una lectura

n : Número de lecturas

\bar{x} : Medio

Desviación estándar

Es la dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (54)$$

Donde:

\bar{x} : Media

x_i : Valor de una lectura

n : Número de lecturas

S : Desviación estándar

Varianza

Es el cuadrado de la desviación estándar, se simboliza por S^2 .

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (55)$$

Donde:

\bar{x} : Media

x_i : Valor de una lectura

n : Número de lecturas

Coeficiente de variación

También conocida como RSD (*Relative standard deviation*), es la desviación estándar dividida por el promedio y puede ser expresado como porcentaje.

$$\text{RSD} = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (56)$$

Donde:

S: desviación estándar de las lecturas

\bar{x} : Promedio de totalidad de lecturas