

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RADIOLÓGICOS
RADÓN (^{222}Rn) Y RADIO (^{226}Ra) EN MATRICES DE AGUA
SUBTERRÁNEA DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO,
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**KARLA MARÍA MORALES NAVARRO
ADRIANA JEANMILLETTE RODRÍGUEZ CONTRERAS
ANDREA IVONNE SIGÜENZA DÍAZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2019.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

M. Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

DRA. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA QUÍMICO

Título:

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RADIOLÓGICOS RADÓN (^{222}Rn) Y
RADIO (^{226}Ra) EN MATRICES DE AGUA SUBTERRÁNEA
DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

Presentado por:

**KARLA MARÍA MORALES NAVARRO
ADRIANA JEANMILLETTE RODRÍGUEZ CONTRERAS
ANDREA IVONNE SIGÜENZA DÍAZ**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Directores:

**INGA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO
M. Sc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ
LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO**

San Salvador, Mayo de 2019

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docentes Directores:

INGA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO

M. Sc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ

LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la existencia de los radionúclidos naturales radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), en matrices de agua subterránea, pozos perforados de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), para estimar su calidad radiológica para fines de consumo humano, fue realizado en un período que abarcó desde el mes de abril hasta agosto del año 2018.

Para el análisis del radón (^{222}Rn) en agua de consumo, se ajustó e implementó el método D5072-9 “Standard Test Method for Radon in Drinking Water” de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Asimismo, para la determinación de radio (^{226}Ra) en agua de consumo humano, se adaptó e implementó uno de los métodos presentados por el Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL) en el marco del proyecto RLA/5/048 ARCAL LXXIX. Ambas metodologías analíticas fueron validadas, con ello se demostró la capacidad de detección de los métodos; así como, que los resultados obtenidos a partir de la aplicación de cada metodología, cuentan con el grado de confianza requerido, al cumplir con los criterios de aceptabilidad de cada parámetro de desempeño que fue evaluado.

Para cada sitio de muestreo, se encontró que la actividad del gas radón (^{222}Rn) no sobrepasó el límite máximo permitido de 11.1 Bq/L establecido por el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS) 13.02.01:14 para agua de consumo humano. También, se identificó al río Urbina como el sitio con mayor actividad de radón (^{222}Rn) con un promedio de 4.74 ± 0.18 Bq/L. Para la interpretación de los resultados, se crearon curvas de nivel, las cuales permitieron tener una estimación del comportamiento del radón (^{222}Rn) en el acuífero de San Salvador.

Con respecto al radio (^{226}Ra), a partir de las muestras recolectadas en los sitios de muestreo, se observó que todos los conteos obtenidos mediante el equipo de centelleo líquido se encontraban por debajo del límite de detección (5.00 mBq/L); por lo que no fue posible detectar y cuantificar la actividad del radio (^{226}Ra) disuelto en las muestras de agua. Sin embargo, cabe destacar que la presencia de radón (^{222}Rn) evidenció la existencia de radio (^{226}Ra) en los sitios de muestreo.

Por otro lado, se realizaron mediciones de algunos parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua extraídas en los sitios de muestreo, con la finalidad de verificar si existía una correlación con la actividad de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra). No obstante, no fue posible establecer una correlación puesto que no se contó con una cantidad suficiente de datos.

La investigación permitió realizar una valoración de la calidad radiológica del agua de consumo humano en el AMSS, y representa una línea base para el monitoreo periódico de los parámetros radiológicos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en esta zona y una base metodológica para replicar el estudio en otros sitios del país.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, a nuestro padre Dios, por su amor hacia nosotras y por permitirnos culminar satisfactoriamente esta etapa tan importante en nuestras vidas.

A nuestros asesores, Inga. Ana Cecilia Díaz de Flamenco, M.Sc. Julio Ernesto Payés Hernández y Lic. José Ramiro Rodríguez Carpio, por su valiosa asesoría, innumerables aportaciones, consejos, paciencia, lo cual fue parte fundamental para culminar exitosamente el presente trabajo de investigación.

Al Laboratorio del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por la oportunidad de utilizar sus instalaciones, equipo y reactivos.

Al personal de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, por todo el apoyo al brindarnos acceso a los sitios de muestreo, el transporte hacia éstos y el acompañamiento para la recolección de muestras.

*Karla María Morales Navarro
Adriana Jeanmilette Rodríguez Contreras
Andrea Ivonne Sigüenza Díaz*

DEDICATORIA

No me alcanzan las palabras para agradecer a Dios por lo mucho que ha hecho por mí y quiero dedicar este triunfo a su nombre. Son incontables las veces que me dio su ayuda en esta etapa de estudios que estoy culminando. En aquellos momentos que no me creí capaz de lograrlo Dios incrementó su luz que me dio impulso, ánimo y fe en que todo iba salir bien. La paz que me brindó, me alimentó de alegría y amor, y me motivó a seguir adelante al mostrarme que lo imposible es posible cuando Él está presente.

Lo dedico a mi Madre Virgen María por su intercesión y amor hacia mí, por su cálida presencia y amistad incondicional, mostrándome ángeles en el camino a quienes les dedico también mi logro; en primer lugar mi familia: a mi hermana Alejandra Morales que con sus ánimos, sus consejos, su cariño singular, sus atenciones en los momentos más sacrificados y su entrega al ayudarme me hizo saber que cada paso que doy es un paso hacia el éxito siempre y cuando lo haga con amor, dedicación, convicción y pasión; ella es la responsable de las veces que pude levantarme cuando veía todo imposible; a mi hermana Fátima Morales que a pesar del poco tiempo que a ella le quedaba era capaz de sacarme una sonrisa en el momento más indicado, por sus pláticas reconfortantes que me hacían ver soluciones en medio de problemas y oportunidades de crecer en medio de malas experiencias; siempre alentándome en que se pueden hacer mejor las cosas, sin dejar de mencionar su fraternal cariño; a mi mamá, que con sus lecciones, sus consejos, su apoyo y su entrega sin límites, me hizo hacerle frente a los problemas; por enseñarme que el éxito es el resultado de la aplicación diaria de la disciplina y por su incansable protección que me hacía sentir segura; a mi papá, por su sacrificio, por darme lo que necesitaba, por su escucha incondicional, por la paciencia y ternura con la que me ayudaba y apoyaba en los momentos que más lo necesitaba, así como por sus consejos que hicieron que agarrara aire en medio de la sobrecarga de trabajo. En

general, dedico mi tesis a toda mi familia, porque a pesar de las dificultades y limitaciones pusieron todo su esfuerzo y me dieron todo lo que tenían a su disposición para seguir juntos adelante.

A mis compañeras Andrea Sigüenza y Adriana Rodríguez que han estado a todo vapor presentes en este trayecto, ya que juntas las tres entre desvelos, discusiones y risas terminamos con satisfacción este documento, que representa el término de nuestra carrera y el inicio de una nueva etapa.

A la ingeniera Cecy de Flamenco, por hacerse parte de este equipo uniéndose a nuestros sufrimientos y a nuestras alegrías; su apoyo fue una pieza clave durante este periodo.

Al M.Sc. Payés por sus gratas enseñanzas, porque con su alta entrega nos transmitió sus conocimientos que hicieron posible la calidad de nuestro trabajo.

Al Lic. Ramiro, que con su indispensable compañía nos regaló todo su apoyo, sus consejos y sus enseñanzas, con los que nos impulsó para que cada análisis se realizara con éxito.

Dedicado especialmente a todos ustedes.

Karla María Morales Navarro

DEDICATORIA

A mi bello Dios, por todas las bendiciones que me has dado durante mi vida, por permitirme culminar esta etapa que fue una de las mejores de mi vida, por todo el amor, la familia, la salud, el apoyo, la protección, la fortaleza, la motivación.

A mi mamá, Karina Evelyn Contreras de Rodríguez, mi amor eterno y ejemplo a seguir, quien representa el amor puro en mi vida, éste y cada uno de mis logros son dedicados especialmente a ella. Gracias mi ángel de amor, por guiarme al camino de Dios, por las enseñanzas tan valiosas, por tus abrazos, las pláticas y los momentos de felicidad que definitivamente han quedado atesorados en mi corazón. Te amo muchísimo mamá.

A mi papá, Ramón Antonio Rodríguez Herrera, quien siempre ha estado presente brindándome su amor y apoyo incondicional. Gracias súper papá, por cada una de las enseñanzas de vida y por depositar en mi un sueño, por eso y más gracias. Te amo muchísimo.

A mi hermanita, Sofía Camila, mi bebé que llena de amor, ternura y felicidad cada uno de mis días.

A mi hermanito, Rafael Antonio, quien me hace reír y me da ánimos.

A mi familia, por cuidar de mí, por su amor, apoyo moral y solidaridad. Gracias por todo.

A mis amistades, con quienes he compartido tantos buenos y malos momentos en el transcurso de mi vida universitaria, gracias por su gran apoyo, por las risas, las bromas, la confianza y la motivación.

Adriana Jeanmillette Rodríguez Contreras

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi papi Oscar y mi mami Maribel, por su amor, trabajo, paciencia, esfuerzo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ustedes son mi pilar, sin olvidar a mi hermana Marcela, a quien amo e intento ser siempre un buen ejemplo para ella ¡Este triunfo es de ustedes!

De manera especial a mis asesores de tesis: Al M.Sc. Julio Payés por habernos guiado y apoyado; al Lic. Ramiro Rodríguez por habernos acompañado en cada salida de campo, por su gran apoyo en el laboratorio; a la Ing. Cecy de Flamenco por sus consejos y correcciones. A todos, gracias por compartir gran parte de sus conocimientos, su paciencia y motivación, han sido fundamentales para culminar este trabajo.

A mis compañeras de tesis por haber recorrido este viaje juntas, por esas noches de desvelos, esos desacuerdos, enojos; pero, sobre todo, gracias por esa amistad que se fortaleció y aun en los momentos de desesperación, prevalecieron siempre las risas y el cariño.

Y por supuesto a mi querida Universidad, por permitirme concluir con una etapa de mi vida, a las autoridades de ANDA por permitirnos el desarrollo de esta investigación. A todas las personas que de cualquier forma me apoyaron y ayudaron a que el trabajo se realizara con éxito, o estuvieron ahí en todo el proceso de mi carrera, a los maestros, ingenieros, amigos, familia, ¡GRACIAS! ¡Ya soy ingeniera!

Andrea Ivonne Sigüenza Díaz

ÍNDICE

Contenido	N° Página
RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	1
SIGLAS.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Capítulo 1 : ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.1. CONTEXTO.....	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
1.4. OBJETIVOS.....	13
1.4.1. Objetivo General.....	13
1.4.2. Objetivos Específicos.....	13
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	14
1.6. DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES.....	15
1.6.1. Delimitación.....	16
1.6.2. Limitaciones.....	16
1.7. ANTECEDENTES.....	16
Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. ELEMENTOS RADIATIVOS.....	19
2.1.1. Origen.....	19
2.1.2. Radiactividad.....	20
2.1.3. Unidades de la radiactividad.....	24
2.1.4. Ley de desintegración radiactiva.....	25
2.1.5. Periodo de semidesintegración.....	26
2.1.6. Equilibrio secular.....	26

Contenido	N° Página
2.1.7. Cadena de desintegración.....	27
2.1.8. Isótopos radiactivos.....	28
2.1.9. Mecanismo de transferencia y propiedades fisicoquímicas del radón (²²² Rn) y radio (²²⁶ Ra).....	31
2.1.10. Pozos de agua subterránea.....	41
2.2. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES....	43
2.2.1. Efectos causados por el radón (²²² Rn).....	43
2.2.2. Efectos causados por el radio (²²⁶ Ra).....	44
2.3. CALIDAD RADIOLÓGICA DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO...	44
2.3.1. RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano: requisitos de calidad e inocuidad.....	45
2.3.2. Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS).....	46
2.3.3. Normativa propuesta para el radón (²²² Rn) en agua potable de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).....	47
2.4. TÉCNICA DE CENTELLEO LÍQUIDO.....	47
2.4.1. Proceso de centelleo.....	48
2.5. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA ANALÍTICA.....	53
2.5.1. Selectividad.....	55
2.5.2. Linealidad.....	56
2.5.3. Sensibilidad.....	57
2.5.4. Límites.....	58
2.5.5. Exactitud.....	59
2.5.6. Robustez.....	61
2.5.7. Trazabilidad.....	61
2.5.8. Incertidumbre.....	62
Capítulo 3 : MATERIALES Y METODOS.....	63
3.1. FASE DE CAMPO.....	64
3.1.1. Descripción de la zona de estudio.....	64

Contenido	N° Página
3.1.2. Hidrología de la zona	65
3.1.3. Selección de puntos de muestreo.....	66
3.1.4. Puntos seleccionados para la extracción de muestras de agua subterránea.....	66
3.1.5. Muestreo	68
3.1.6. Materiales y equipo utilizados en el muestreo	68
3.1.7. Selección de envases	69
3.1.8. Volumen de la muestra tomada en campo.....	70
3.1.9. Técnicas de recolección de las muestras de agua en pozos perforados.....	71
3.1.10. Preservación y envasado.....	75
3.2. FASE DE LABORATORIO.....	77
3.2.1. Ubicación	78
3.2.2. Equipo de centelleo líquido	78
3.2.3. Método ASTM D5072-09 radón (^{222}Rn) en agua.....	80
3.2.4. Método ARCAL RLA/5/048 para radio (^{226}Ra) en agua	97
3.2.5. Materiales de referencia.....	112
Capítulo 4 : PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	113
4.1. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍAS ANALÍTICAS	114
4.1.1. Validación de método ASTM D5072-09 para análisis de radón (^{222}Rn) en agua.....	114
4.1.2. Validación de método ARCAL RLA/5/048 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua.....	135
4.2. ANÁLISIS DE RADÓN (^{222}Rn) EN SITIOS DE MUESTREO.....	159
4.2.1. Comparación con el régimen de precipitación	159
4.2.2. Medición de parámetros fisicoquímicos	160
4.2.3. Evaluación cualitativa de la presencia de radón (^{222}Rn)	163
4.2.4. Evaluación cuantitativa de la presencia de radón (^{222}Rn)	164
4.2.5. Relación de la actividad de radón (^{222}Rn) con el Reglamento Técnico Salvadoreño	175

Contenido	N° Página
4.3. ANÁLISIS DE RADIO (^{226}Ra) EN SITIOS DE MUESTREO.....	177
CONCLUSIONES.....	181
RECOMENDACIONES.....	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184
GLOSARIO.....	191
ANEXOS.....	196

ÍNDICE DE TABLAS

		N° Página
Tabla 2.1	Productos iniciales y finales de las series radiactivas.	28
Tabla 2.2	Guía de parámetros para la validación de métodos analíticos...	54
Tabla 3.1	Sitios de muestreo de agua subterránea.	66
Tabla 3.2	Materiales y equipo para el desarrollo de jornada de muestreo.	68
Tabla 3.3	Condiciones de preservación y envasado para el análisis de muestras de agua subterránea.	76
Tabla 3.4	Actividades teóricas de muestras patron de radón (^{222}Rn) para análisis de linealidad.	87
Tabla 3.5	Cantidad de patrón NIST-01 necesario para la preparación de actividades teóricas de radón (^{222}Rn).....	88
Tabla 3.6	Actividades teóricas modificadas de muestras patrón de radón (^{222}Rn).	89
Tabla 3.7	Muestras blanco para análisis de radón (^{222}Rn).....	90
Tabla 3.8	Actividades teóricas de los patrones de radio (^{226}Ra) para análisis de linealidad.	105
Tabla 3.9	Cantidad de patrón NIST-01 necesario para la preparación de actividades teóricas de radio (^{226}Ra)	106
Tabla 3.10	Actividades teóricas modificadas de muestras patron de radio (^{226}Ra).	107
Tabla 3.11	Muestras blanco para análisis de radio (^{226}Ra) utilizadas para el cálculo de los límites de la metodología.....	108
Tabla 3.12	Cantidades materiales de referencia para el desarrollo de la validación de las metodologías analíticas.	112
Tabla 4.1	Conteos de solución de referencia NIST-01 y de muestra blanco para cálculo de eficiencia del método ASTM D5072-09.....	115
Tabla 4.2	Conteos de muestras patrón preparadas para el cálculo de la linealidad de metodología para análisis de radón (^{222}Rn).	116

Tabla 4.3	Factor de sensibilidad del método para el análisis de radón (^{222}Rn).....	118
Tabla 4.4	Conteos de fondo de muestras blanco de radón (^{222}Rn).....	118
Tabla 4.5	Parámetros para el cálculo del AMD de radón (^{222}Rn) en agua.	119
Tabla 4.6	Límites calculados para la metodología de análisis de radón (^{222}Rn).....	120
Tabla 4.7	Sesgo en muestras patrón para metodología análisis de radón (^{222}Rn).....	121
Tabla 4.8	Porcentajes de recuperación obtenidos para la metodología de análisis de radón (^{222}Rn).....	122
Tabla 4.9	Actividad de las muestras patrón preparadas para análisis de repetibilidad del método de análisis de radón (^{222}Rn).....	123
Tabla 4.10	Actividades obtenidas a partir de prueba de reproducibilidad para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).....	125
Tabla 4.11	Prueba de robustez con cambio de analista para análisis de radón (^{222}Rn).....	126
Tabla 4.12	Prueba de robustez con cambio de temperatura para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).....	128
Tabla 4.13	Prueba de robustez con efecto de aireación para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).....	129
Tabla 4.14	Registro de mediciones semanales de la actividad de radón (^{222}Rn) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN.....	131
Tabla 4.15	Conteos de solución de referencia NIST-01 y de muestra blanco para cálculo de la eficiencia del método.....	135
Tabla 4.16	Conteos de muestras patrón preparadas para linealidad de metodología para análisis de radio (^{226}Ra).....	136
Tabla 4.17	Factor de sensibilidad del método para el análisis de radio (^{226}Ra).....	138

	N° Página
Tabla 4.18 Conteos de fondo de radio (^{226}Ra) en muestras blanco.....	139
Tabla 4.19 Límites de la metodología de análisis de radio (^{226}Ra).	141
Tabla 4.20 Sesgo en muestras patrón para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).	142
Tabla 4.21 Porcentajes de recuperación obtenidos para la metodología de análisis de radio (^{226}Ra).	143
Tabla 4.22 Actividad de las muestras patrón para análisis de repetibilidad del metodo	144
Tabla 4.23 Actividades obtenidas a partir de prueba de reproducibilidad para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).....	146
Tabla 4.24 Prueba de robustez con cambio de analista para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).	147
Tabla 4.25 Prueba de robustez con cambio de pH para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).	149
Tabla 4.26 Registro de mediciones semanales de la actividad de radio (^{226}Ra) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN.....	152
Tabla 4.27 Registro del crecimiento de la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra preparada.....	157
Tabla 4.28 Propiedades fisicoquímicas en muestras de agua de consumo humano medidas en cada sitio de muestreo en el periodo de estudio.....	161
Tabla 4.29 Actividad medida del gas radón (^{222}Rn) en cada sitio de muestreo en el periodo de estudio.....	165
Tabla 4.30 Conteos obtenidos mediante el analisis de radio (^{226}Ra) en las muestras recolectadas.	177
Tabla A.1 Resultados obtenidos en la prueba de selección de envase para la recolección de muestras.....	204
Tabla A.2 Valores de $t_{\text{crítico}}$ para la prueba estadística t-Student.	205

Tabla A.3	Resultados obtenidos en la prueba de cambio de volumen de recolección.	206
Tabla A.4	Parámetros de desempeño para evaluación de la metodología para determinación de radón (^{222}Rn).	229
Tabla A.5	Parámetros de desempeño para evaluación de la metodología para determinación de radio (^{226}Ra).....	232
Tabla A.6	Resultados para validación de metodología ASTM D5072-09 para análisis de radón (^{222}Rn) en agua.	234
Tabla A.7	Resultados para validación de metodología ARCAL RLA/5/0/48 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua.	237

ÍNDICE DE FIGURAS

		N°	Página
Figura 1.1	División Política del AMSS.	8	
Figura 2.1	Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación ionizante.....	21	
Figura 2.2	Espectro electromagnético.	24	
Figura 2.3	Cadena de decaimiento del uranio-radio (^{238}U).	29	
Figura 2.4	Transferencia y origen del radón (^{222}Rn) a partir de su progenitor radio (^{226}Ra).	30	
Figura 2.5	Mecanismo de decaimiento de thorio (^{230}Th) a radio (^{226}Ra).....	32	
Figura 2.6	Mecanismo de transferencia del radón (^{222}Rn).....	36	
Figura 2.7	Representación gráfica del coeficiente de Ostwald, solubilidad del radón (^{222}Rn), en función de la temperatura a presión de 1 atm	37	
Figura 2.8	Representación de un pozo perforado sobre la superficie de un acuífero.....	41	
Figura 2.9	Secuencia de eventos que se desarrollan durante el proceso de centelleo líquido.....	48	
Figura 2.10	Diagrama de los componentes de un contador de centelleo líquido.....	51	
Figura 2.11	Espectro de los productos de decaimiento del radio (^{226}Ra) mediante la técnica de centelleo líquido.	51	
Figura 2.12	Quenching durante la transferencia de energía en el proceso de centelleo líquido.....	52	
Figura 2.13	Principales causas del problema de fondo.	53	
Figura 3.1	Ubicación de sitios de muestreo.....	67	
Figura 3.2	Envases utilizados durante la recolección de la muestra	70	
Figura 3.3	Procedimiento para la recolección de muestras para análisis de radón (^{222}Rn) en agua.....	72	
Figura 3.4	Procedimiento para la recolección de muestras para análisis de radio (^{226}Ra).....	73	

Figura 3.5	Procedimiento para la medición en campo de propiedades in-situ	74
Figura 3.6	Equipo de centelleo líquido TRICARB-2100 PACKARD ubicado en el CIAN-FIA-UES.....	78
Figura 3.7	Viales de vidrio (izquierda) y PET (derecha) utilizados en el equipo de centelleo líquido.....	79
Figura 3.8	Condiciones óptimas para el transporte y almacenamiento de muestras de agua para el análisis de radón (^{222}Rn).....	82
Figura 3.9	Materiales necesarios para el análisis de radón (^{222}Rn) en muestras de agua de consumo humano.....	83
Figura 3.10	Procedimiento para la medición de radón (^{222}Rn) en muestras de agua.....	85
Figura 3.11	Tratamiento de muestras para análisis de radio (^{226}Ra).....	101
Figura 3.12	Procedimiento para la medición de radio (^{226}Ra) en muestras de agua.....	102
Figura 4.1	Gráfico de actividad de radón (^{222}Rn) vs conteos por segundo (s^{-1}).....	116
Figura 4.2	Gráfico de control de la actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón NIST-01.....	133
Figura 4.3	Gráfico de control de la actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón IRD.....	134
Figura 4.4	Gráfico de control de la actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón CIAN.....	134
Figura 4.5	Gráfico de la actividad (Bq/L) vs. conteos por segundo (s^{-1}) de radio (^{226}Ra).....	137
Figura 4.6	Gráfico de control de la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón NIST-01.....	154
Figura 4.7	Gráfico de control de la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón IRD.....	154

Figura 4.8	Gráfico de control de actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón CIAN.....	155
Figura 4.9	Cambio en la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra preparada	156
Figura 4.10	Curva de equilibrio entre los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestra patrón CIAN.....	158
Figura 4.11	Fechas de ejecución de jornadas de muestreos.	159
Figura 4.12	Promedio de lluvia en el meses de abril, a partir del año 1971 hasta el año 2018. Variable de lluvia nacional.....	160
Figura 4.13	Comparación de espectros de radón (^{222}Rn) obtenidos en el equipo de centelleo líquido.....	163
Figura 4.14	Espectro que fue emitido por una muestra blanco en el equipo de centelleo líquido.....	164
Figura 4.15	Ubicación de los sitios de muestreo en mapa hidrogeológico. ..	166
Figura 4.16	Gráfico de la elevación con la ubicación de los cinco sitios muestreados.....	168
Figura 4.17	Flujo de la actividad de radón (^{222}Rn) para sitios muestreados..	169
Figura 4.18	Curvas de nivel para los cinco muestreos realizados.....	170
Figura 4.19	Comparación de actividad de radón (^{222}Rn) obtenida para cada sitio de muestreo.	171
Figura 4.20	Relación entre la altura geográfica y la concentración de radón (^{222}Rn).....	172
Figura 4.21	Promedio mensual de actividad de radón (^{222}Rn).....	173
Figura 4.22	Actividad de radón (^{222}Rn) por sitio para los 5 muestreos.	173
Figura 4.23	Comparación de actividad de radón (^{222}Rn) promedio entre cada sitio de muestreo.....	174
Figura 4.24	Actividad promedio de radón (^{222}Rn) obtenida en las jornadas de muestreos.....	174

Figura 4.25	Comparación de la actividad de radón (^{222}Rn) promedio obtenida por sitio de muestreo, con valor máximo permisible por el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano.	175
Figura 4.26	Comparación de conteos de radio (^{226}Ra) obtenidos para cada sitio muestreado.	178
Figura 4.27	Carta de control de conteos de radio (^{226}Ra) obtenidos en cada sitio de muestreo.	180
Figura A.1	Cadena de desintegración del torio (^{232}Th).....	196
Figura A.2	Cadena de desintegración del uranio (^{238}U).	196
Figura A.3	Cadena de desintegración del uranio (^{235}U).	197
Figura A.4	Representación del ciclo hidrológico.	198
Figura A.5	Tipos de acuíferos existentes al interior de la tierra.	201
Figura A.6	Porcentaje de agua en la tierra.....	202
Figura A.7	Etiqueta utilizada para la identificación de muestras.	203

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Bq:	Becquerelio.
Ci:	Curie.
cm:	Centímetro.
CPM:	Cuentas por minuto.
CPS:	Cuentas por segundo.
dps:	Desintegración por segundos.
Hz:	Hercio o Hertz.
keV:	Kilo electronvoltio.
kg:	Kilogramo.
km:	Kilómetro.
L:	Litro.
m³:	Metro cúbico.
mg:	Milígramo.
min:	Minuto.
mL:	Mililitro.
mm/a	Milímetro por año.
msnm:	Metros sobre el nivel del mar.
°C:	Grados centígrados.
Pa:	Pascal.
rpm:	Revoluciones por minuto.
s:	Segundo.
µs:	Microsiemens.

SIGLAS

ADC:	Conversor Análogo-Digital.
ADN:	Ácido Desoxirribonucleico.
AMSS:	Área Metropolitana de San Salvador.
ANDA:	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
APHA:	American Public Health Association. (Asociación Americana de Salud Pública).
ARCAL:	Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe.
ARN:	Ácido Ribonucleico.
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
AWWA:	American Water Works Association (Asociación Americana de Obras de Agua).
CAPRE:	Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.
CIAN-FIA-UES:	Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.
EPA:	Environmental Protection Agency (Agencia de protección ambiental).
LIC:	Límite Inferior de Control.
LSC:	Límite Superior de Control.
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
MCA:	Analizador multicanal.
MINSAL:	Ministerio de Salud.
MR:	Material de Referencia.

NAS:	National Academy of Sciences (Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos).
NSO:	Norma Salvadoreña Obligatoria.
OD:	Oxígeno Disuelto.
OMS:	Organización Mundial de la Salud.
PE:	Polietileno.
PET:	Tereftalato de Polietileno.
PP:	Polipropileno.
PTFE:	Politetrafluoroetileno.
RTS:	Reglamento Técnico Salvadoreño.
SI:	Sistema Internacional de Unidades.
TDS:	Sólidos Disueltos Totales.
TFM:	Tubo Fotomultiplicador.

INTRODUCCIÓN

Los elementos radiactivos existen desde mucho antes de que surgiese la vida en el planeta Tierra. De hecho, han estado presentes en el espacio desde el inicio del universo. Sin embargo, en la historia del hombre el conocimiento de la presencia de la radiactividad es relativamente reciente pues data de 1895, gracias a los descubrimientos de Wilhem Röntgen, Henri Becquerel, Marie Curie, Joseph John Thomson y Ernest Rutherford. De acuerdo con Dávila Rangel (2001), la inquietud por conocer acerca de la radiactividad en agua se remonta al año de 1902, en un estudio del contenido de radiactividad en agua de lluvia.

El radón (^{222}Rn) es un gas noble radiactivo de origen natural, que se forma como el producto de la desintegración del radio (^{226}Ra), pertenece a la cadena de desintegración radiactiva del uranio (^{238}U). Es un gas fácilmente soluble en agua y desde el momento en que los suelos y las rocas, los que contienen diferentes concentraciones de radio (^{226}Ra) están en contacto con aguas profundas y superficiales, es posible encontrar diferentes concentraciones de radón (^{222}Rn) en agua de consumo humano (Fuente Lastra, 2015).

Puesto que el radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo respirable, su presencia en concentraciones anormales es considerada por la normativa internacional como un riesgo para la salud humana. El ingreso de radón (^{222}Rn) al organismo humano puede darse a través de dos vías principales: por inhalación de aire y por ingestión de agua, es así que uno de los posibles efectos a la salud por la constante exposición de radiactividad es el riesgo de desarrollar cáncer pulmonar o el riesgo de enfermar de cáncer estomacal por la ingestión de radón (^{222}Rn), mientras que el radio (^{226}Ra), debido a su tendencia a reemplazar el calcio (Ca) en la estructura ósea, puede ocasionar cáncer de huesos.

Por lo tanto, el interés de la presente investigación se centra en el tema de la calidad radiológica del agua para el consumo humano, proveniente de las fuentes subterráneas de los pozos administrados por la ANDA, que están ubicados en el acuífero de San Salvador.

Se pretende comparar el radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) presentes en agua para el consumo humano con los límites permisibles dictados por el reglamento técnico RTS 13.02.01:14, elaborado a partir de la normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Se recomienda para aguas potables, donde el límite restrictivo con respecto a la cantidad de radón (^{222}Rn) disuelto es de 11.1 Bq/L y para radio (^{226}Ra) 1 Bq/L, según la Guía Mundial para la Salud de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Sobre la base de las consideraciones anteriores y los resultados obtenidos a partir de la presente investigación preliminar se da apertura a nuevas investigaciones que abarquen la evaluación de la radiactividad del agua de consumo humano en todo el país; para tal labor será necesario realizar mediciones en forma periódica. Por lo tanto, la investigación contribuirá a crear una base técnica para futuras investigaciones, con una metodología ya validada.

CAPÍTULO 1 : ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este capítulo se centra en presentar el enfoque, y la importancia de la investigación. Aquí se definen los objetivos, el problema y la justificación del proyecto. Además, se describe la zona de estudio ubicada en algunos de los municipios del área metropolitana de San Salvador (AMSS) y las teorías planteadas sobre la calidad radiológica del agua para fines de consumo humano. Es evidente entonces el referenciar trabajos anteriores como antecedentes para la realización de dicha investigación.

1.1. CONTEXTO

El AMSS es un conglomerado de catorce municipios como se observa en la Figura 1.1. Se localiza en la zona central del país, y se extiende en una superficie que cubre 589.91 km², equivalentes al 3% del territorio nacional. Geográficamente, en ella se ubican elementos representativos, como el volcán de San Salvador al poniente y el lago de Ilopango al suroriente (OPAMSS, 2014).

El AMSS, concentra el 25.7% de la población total del país; al revisar la distribución poblacional por los municipios que la forman se observa que únicamente San Salvador y Soyapango concentran el 33.1% de 1, 693,186 de habitantes reportados para el AMSS. En el año 2017, la densidad poblacional del AMSS se estimó en 2,772 habitantes por km² (DIGESTYC, 2017).

Por lo tanto, el AMSS es una región densamente poblada, y como consecuencia de ello el consumo de agua es relativamente alto. Esto fue demostrado durante el 2017, año en el que se consumieron un aproximado de 106.2 millones de metros cúbicos de agua, denotando un consumo promedio de 21 metros cúbicos (m³) mensuales por servicio instalado, lo que indica que en el transcurso de ese año los usuarios consumieron mensualmente un promedio 8.8 millones de metros cúbicos en la re-

gión metropolitana (ANDA, 2017). Por lo tanto, es menester de las autoridades estatales vigilar la calidad del agua que se suministra para resguardar la salud de los habitantes asegurando aspectos microbiológicos, fisicoquímicos, radiológicos y de aceptabilidad, según los lineamientos de la OMS.

Con respecto a los aspectos radiológicos cabe destacar que la radiación ambiental procede de diversas fuentes, de origen natural y producidas por el hombre (por ejemplo, por el uso médico o industrial de materiales radioactivos), las cuales pueden ser liberadas al medio ambiente y, por tanto, contaminar el agua de consumo, además de otros contaminantes (OMS, 2011).

Si bien es cierto, la radiación ionizante que emiten algunas sustancias químicas radiactivas presentes en el agua de consumo puede ocasionar peligros radiológicos, estos peligros no suelen tener consecuencias significativas para la salud pública, y la exposición a la radiación por el agua de consumo humano debe evaluarse conjuntamente con la exposición por otras fuentes.

Debido a esto se propone realizar un estudio en la zona del AMSS donde subyace el acuífero de San Salvador. Cabe señalar que Barrera de Calderón (2010) indica que dicho acuífero es conformado por dos unidades hidrogeológicas, identificadas como Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción y Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media; las cuales abastecen parcialmente la demanda de agua de dichas zonas. El resto del suministro se provee por medio de la incorporación de dos plantas principales de extracción y tratamiento de agua: Sistema Zona Norte y Sistema Planta Potabilizadora Las Pavas.

Esto anterior, es tomando en cuenta que la exposición de las personas a la radiación varía de unos lugares a otros, en función de varios factores como la altitud sobre el nivel del mar, el tipo y la cantidad de radionúclidos presentes en el suelo (exposición

terrestre), la composición de radionúclidos del aire, los alimentos y el agua de consumo, y las cantidades incorporadas al organismo por inhalación e ingestión (OMS, 2011).

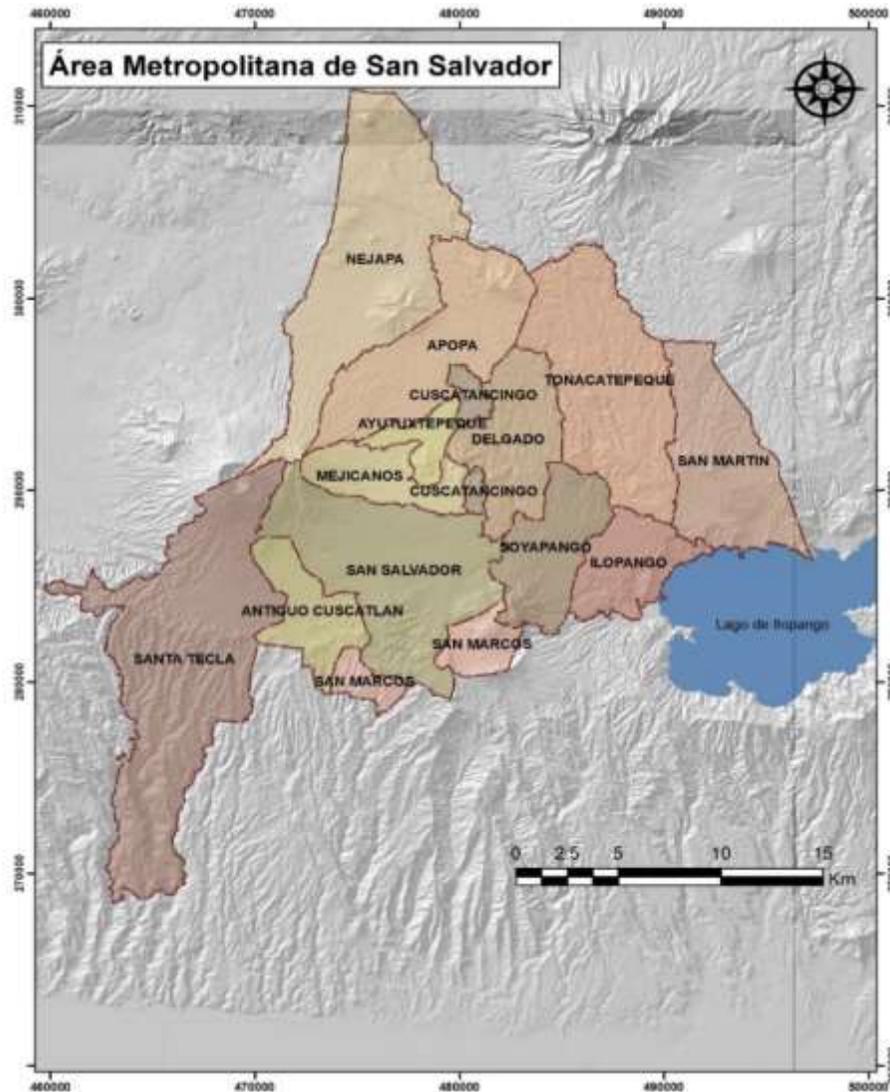


Figura 1.1 División Política del AMSS. Fuente: (OPAMSS, 2014).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la creación de la ANDA en el año 1962, se han establecido diferentes análisis para garantizar la calidad del agua que llega a las viviendas de la población de El Salvador. Las normas para el Diseño y Construcción de Acueductos y Alcantarillado Sanitario fueron elaboradas en el año 1967. Posteriormente, en el año 1994 se trabajó en la elaboración de las nuevas “Normas Técnicas para el Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Aguas Negras” que sustituyeron a las de 1967. Estas fueron aplicadas a proyectos urbanos y suburbanos (ANDA, 1998).

Cabe señalar que dichas normas fueron tomadas en cuenta para aguas superficiales y/o aguas subterráneas, que alimentan el sistema. Dentro del abastecimiento de agua de consumo, se establecieron diferentes análisis especializados de acuerdo a los Métodos Estándar de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA) y la Asociación Americana de Obras de Agua (AWWA), donde las muestras son sometidas a análisis toxicológicos, hidrobiológicos, bacteriológicos, físicos y químicos.

De acuerdo con ANDA (1998), los resultados de las muestras de agua deben ser menores o iguales a los máximos tolerables indicados por las normas actualizadas de la OMS, AWWA o del Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CA-PRE). Si los resultados exceden esos valores, es necesario entonces investigar si es posible aplicar un proceso de potabilización.

En el año 2018, con el objeto de establecer los límites permisibles de los parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos que debe cumplir el agua de consumo humano, entró en vigencia el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano, el cual tiene correspondencia con las Guías para la calidad del agua potable de la OMS.

A partir de lo anterior se evidencia que la ANDA cuenta con normativas estrictas que convierten el agua de abastecimiento para el consumo de la población en una fuente confiable de agua de consumo humano. Cabe destacar que, dentro de las normativas internacionales, las Guías para la calidad del agua de consumo humano de la OMS señalan que la calidad del agua de consumo humano es una cuestión que causa preocupación en países de todo el mundo por su repercusión en la salud de la población; siendo factores de riesgo los agentes infecciosos, los productos químicos tóxicos y la contaminación radiológica.

La OMS (2011) recomienda realizar análisis microbiológicos, químicos y radiológicos en agua de consumo, siendo los radiológicos los que permiten comprobar si existe radiactividad en el agua; éste es un fenómeno que consiste en la desintegración de núcleos atómicos que emiten energía a partir de la formación de nuevas partículas distintas a las anteriores y/o radiaciones electromagnéticas. Esto es permitido por las propiedades que tienen los isótopos inestables de alcanzar su estado fundamental por medio de la liberación de energía.

Según Dávila Rangel (2001) la principal fuente de contaminación radiactiva para la ingestión y el uso doméstico del agua, es de origen natural y pertenece principalmente a dos de las tres series naturales radiactivas: del uranio (^{238}U) y del torio (^{232}Th). Estos se desintegran emitiendo nuevas partículas donde específicamente los elementos de interés son el radón (^{222}Rn) y el radio (^{226}Ra) de la serie de decaimiento del uranio (^{238}U).

El uranio al ser un elemento pesado (más que el hierro) proveniente de las supernovas (explosiones estelares), al llegar a la tierra se conserva en forma de mineral; está formado por tres tipos de isótopos: uranio (^{238}U), uranio (^{235}U) y uranio (^{234}U). De cada gramo de uranio natural, el 99.28 % de la masa corresponde al uranio (^{238}U), éste a pesar de encontrarse a bajas concentraciones en la Tierra se desinte-

gra lentamente, lo que permite que emita partículas durante todo su periodo de desintegración; dentro de sus descendientes, el cual es de interés, el radio (^{226}Ra) se almacena en los granos minerales, que pueden ser arrastrados por aguas subterráneas, así mismo genera energía en forma de partículas en las que su descendiente, el radón (^{222}Rn), cuenta con un periodo de desintegración necesario para alcanzar el espacio intersticial entre granos de los minerales que contienen el radio (^{226}Ra) y de esta manera al salir son transportados por difusión o convección hasta cumplir con su período de desintegración. De acuerdo con L'Annunziata (2012) el gas radón (^{222}Rn), posee una solubilidad en agua (a 20°C) de 22.2 ml/100 ml, lo que manifiesta que este gas puede ser captado por las aguas subterráneas que circulan hacia la superficie, en busca de ser liberado al aire.

Se ha comprobado, en estudios realizados tanto con seres humanos como con animales, que la exposición a dosis bajas y moderadas de radiación puede aumentar la incidencia de cáncer a largo plazo. En concreto, hay estudios con animales que sugieren que la exposición a la radiación puede aumentar la tasa de malformaciones genéticas (OMS, 2011).

Por otro lado, tres cuartas partes de la superficie terrestre del planeta lo constituye el agua, que es posible encontrarla en forma de lluvias, ríos, lagos, mares, aguas subterráneas, entre otras. Su composición química la constituye dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, confiriendo propiedades con una alta acción disolvente, considerándose como el solvente universal. Sin embargo, esta propiedad hace que el agua que se obtiene de la naturaleza no sea químicamente pura debido a que proviene del subsuelo, lo que le permite arrastrar sustancias de diversa naturaleza que se encuentran en estratos de la corteza terrestre; considerándose provechoso para el ser humano hasta las partículas radiactivas, refiriéndose en mayor medida al radio (^{226}Ra) y radón (^{222}Rn) contaminantes perjudiciales para todo ser vivo. Estas son susceptibles a ser atrapadas en las aguas según su origen, siendo las aguas

subterráneas las que presentan mayor riesgo de ser desnaturalizadas con los contaminantes que generalmente residen en los suelos, ya que éstas se alojan en los acuíferos bajo la superficie de la tierra.

Estimaciones de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NAS) y la EPA, según lo publicado en los informes: “Efectos biológicos de la radiación de ionización”, y del “gravamen de riesgo del radón en agua potable 1999”, consideran que la radiactividad es peligrosa en cualquier nivel e incluso niveles bajos del gas radón (^{222}Rn). Mueren alrededor de 700 personas cada año por exposición a niveles bajos. (EPA, 2015)

El trabajo de investigación se centra en la exploración de la existencia de radiación natural en matrices de agua subterránea (pozos perforados de la ANDA) que son destinadas al consumo humano y que provienen del acuífero de San Salvador; confirmando así un panorama que permite valorar el estado en que se ha encontrado este recurso en los pozos que fueron seleccionados para el periodo en estudio, ya que no se cuenta con dichos análisis para este recurso en el país.

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Existe actividad radiológica en fuentes de agua subterránea (pozos perforados de la ANDA) que ha sido destinada al consumo humano en el AMSS para el año 2018, evidenciada por la presencia de radón (^{222}Rn) y/o radio (^{226}Ra).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la existencia de radionúclidos naturales radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en matrices de agua subterránea (pozos perforados de ANDA) en el Área Metropolitana de San Salvador, para estimar su calidad radiológica para fines de consumo humano.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a. Validar la metodología analítica para la determinación de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) implementada por el CIAN mediante la técnica de centelleo líquido, para proceder a su aplicación en la cuantificación de estos radionúclidos en matrices de agua subterránea destinada al consumo humano.
- b. Identificar cualitativamente la presencia de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de matrices de agua subterránea destinadas al consumo humano, a partir de su espectro generado en el equipo de centelleo líquido, que servirá de base para su posterior análisis químico cuantitativo.
- c. Cuantificar la concentración de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) mediante el método ASTM D5072-09 y el ARCAL RLA/5/0/48, respectivamente, para establecer los niveles presentes de estos elementos en las matrices de aguas subterráneas analizadas.
- d. Comparar los resultados obtenidos con los lineamientos establecidos en las Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) 4ta edición, en la normativa propuesta para el

Radón en agua potable de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y por el Reglamento Técnico Salvadoreños (RTS 13.02.01:14) para agua de consumo humano con el fin de establecer si cumple o no estos parámetros.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En El Salvador no se cuenta con una valoración del estado de los parámetros radiológicos del agua subterránea destinada al consumo humano. El agua subterránea interacciona con la corteza terrestre, en la cual se albergan las cadenas de desintegración radiactiva, donde la del uranio (^{238}U) es más abundante, y entre sus principales descendientes se destacan el radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), cuyas concentraciones en el agua dependen de las características geológicas de la zona en la que se encuentran. Cabe señalar que, se pueden presentar altos niveles de radiactividad natural en el agua subterránea especialmente en regiones con actividad volcánica, tal es el caso del país, en el cual se extiende una cadena volcánica.

Por lo tanto, es de suma importancia detectar la presencia y cuantificar las concentraciones de dichos radionúclidos en el agua subterránea destinada al consumo de la población del AMSS, debido a que la exposición y consumo de dosis bajas a moderadas a largo plazo puede aumentar el riesgo de cáncer (EPA, 1999).

El radio (^{226}Ra), considerado como el isótopo de radio más importante, es tóxico por su poder de ionización de la materia, y puede causar cáncer en los huesos (UESEPA, 2000). Éste, al ser ingerido por una persona es eliminado parcialmente por su organismo mediante las heces, a pesar de ello el remanente genera problemas en la salud, ya que al presentar propiedades similares a las del calcio tiene la tendencia de reemplazarlo en la estructura ósea de los seres humanos.

El gas radón (^{222}Rn) producto del decaimiento del radio (^{226}Ra), es una de las fuentes de radiación terrestre más abundantes. Una persona se expone a dicho radionúclido cuando este es procedente del agua de consumo humano y ante tal situación ingresa al cuerpo por su ingesta, además se puede dar por la inhalación del gas cuando se encuentra mezclado con el aire. Dicho radionúclido natural puede causar cáncer en los órganos internos de una persona, especialmente en los pulmones ya que estas partículas se descomponen en el tejido pulmonar, y a consecuencia de ello liberan energía que puede dañar las paredes pulmonares (EPA, 2015). Por otra parte, se le atribuye al radón (^{222}Rn) el cáncer de estómago. De acuerdo con la Academia Nacional de las Ciencias de los Estados Unidos (1999), el radón (^{222}Rn), al estar presente en el agua de consumo humano, provocó alrededor de 183 muertes por cáncer de pulmón en 1999, en este país; mientras que unas 20 muertes anuales fueron por cáncer de estómago.

Los resultados de la investigación permitirán tener una valoración de la calidad del agua, tomando en cuenta los parámetros radiológicos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) del agua subterránea destinada al consumo humano en el AMSS, que deja un estudio base y contribuye al monitoreo radiológico para posteriores investigaciones en relación a esta u otra zona.

1.6. DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES

A continuación, se presenta la delimitación de la investigación, es decir los límites o alcance específico, del estudio, y las limitaciones que explicará la zona que será estudiada y el por qué, y los procedimientos metodológicos que serán utilizados.

1.6.1. Delimitación

El estudio se llevará a cabo tomando como puntos de muestreo matrices de agua subterránea (pozos perforados de la ANDA) destinada al consumo humano, que forman parte del AMSS.

1.6.2. Limitaciones

El monitoreo de los parámetros radiológicos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en agua subterránea está limitado a los pozos perforados que ya existen en la zona de estudio y de acceso limitado, ya que solo se podrán muestrear en lugares, días y horarios previamente establecidos por las autoridades de la ANDA y con el acompañamiento de personal autorizado.

1.7. ANTECEDENTES

El contenido de radiactividad en la corteza terrestre que contiene minerales de uranio (^{238}U) o radio (^{226}Ra), son fuentes de radón (^{222}Rn). Es así que las aguas subterráneas, en su recorrido a través del terreno y una vez acumuladas en los acuíferos, entran en contacto con el radón (^{222}Rn). Este gas es soluble en agua, lo que explica que las concentraciones de radón (^{222}Rn) en aguas de este tipo puedan llegar a alcanzar valores muy elevados, siempre en función de las características hidrogeológicas del terreno. De la misma manera, por su naturaleza gaseosa, el radón (^{222}Rn) posee una gran movilidad y emigra desde los lugares de origen a través de poros y grietas hasta la superficie, y de ahí pasa a formar parte de la atmósfera. Una vez en la atmósfera, se mezcla con los demás componentes del aire y se distribuye por toda ésta debido a los agentes meteorológicos (viento, movimientos convectivos).

Por otra parte, la liberación relativa de radón (^{222}Rn) depende del uso del agua. Esta es altamente influenciada ante las salpicaduras y la ebullición del agua, de modo que, las emisiones más altas de radón (^{222}Rn) ocurren en los baños de duchas y en la cocina durante la cocción. La concentración de radón (^{222}Rn) resultante en una casa depende de la cantidad de agua utilizada, del volumen de la casa y la ventilación (OMS, 1983).

Es necesario entonces determinar la concentración de radón (^{222}Rn) en las aguas de uso doméstico con miras a establecer el riesgo adicional al que la población se expone, además de sus radionúclidos antecesores del decaimiento del uranio (^{238}U) como lo es el radio (^{226}Ra). En El Salvador no se realizan análisis de parámetros radiológicos en fuentes de suministro de agua de consumo, debido al desconocimiento de elementos radiactivos de origen natural que pudieran estar presentes, existiendo por tanto pocos antecedentes al respecto.

A nivel internacional la OMS y la EPA han incluido en sus criterios de evaluación de la seguridad del agua de consumo, aspectos concernientes al contenido de radionúclidos.

Asimismo, países como México y Estados Unidos han realizado investigaciones orientadas a evaluar la calidad radiológica del agua. Por ejemplo, Alfaro et al (2001) en su investigación en pozos localizados en la Cuenca de Cuitzeo en Michoacán, encontró que la concentración promedio de radón (^{222}Rn) osciló entre 0.88 y 4.75 Bq/L. Por otro lado, Villalba, Colmenero Sujo y Cabrera Montero (2004) en el desarrollo de su investigación en muestras de agua de pozos de las ciudades de Chihuahua y Aldama, encontraron que, de los 32 pozos estudiados de ambas ciudades, el contenido del radón (^{222}Rn) disuelto en el agua de 22 de ellos fue mayor a 11 Bq/L, superando el valor recomendado por la EPA. Por último, Outola et al (2008) encontró en Maryland que la concentración de radio (^{226}Ra) en agua fue menor a 0.04 Bq/L.

En El Salvador, la regulación para la calidad radiológica del agua de consumo humano se pone de manifiesto mediante el RTS 13.02.01:14 para agua, cuyo objeto es establecer los límites permisibles de los parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos que debe cumplir el agua de consumo humano.

Por su parte, el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES), ha tomado la iniciativa para la medición de los parámetros radiológicos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) presentes en el agua mediante la técnica de centelleo líquido; se realizó una investigación por parte de Rodríguez Carpio (2013), en la cual se indica que en las aguas termales del Cerro Pacho, Caldera de Coatepeque tienen en disolución gas radón (^{222}Rn), lo que evidencia la presencia radiactiva de radio (^{226}Ra) y uranio (^{238}U) en la geología de la zona. Además, señala que no se encontró radio (^{226}Ra) en concentraciones superiores al límite de detección de 4.2 mBq/L obtenido en el desarrollo de la metodología analítica; sin embargo, no descarta la presencia de radio (^{226}Ra) disuelto en el agua termal del Cerro Pacho en concentraciones inferiores a dicho límite. Así mismo, Payes Hernández (2016), en su investigación encontró la presencia de radón (^{222}Rn) en agua de diferentes zonas del occidente del país, tales como la Residencial El Trébol, un pozo comunitario en Santa Ana, y el río Agua Caliente, encontrando concentraciones en promedios de 2.81, 6.29 y 5.24 Bq/L, respectivamente. Esto ha permitido abrir brecha para indagar la presencia de estos radionúclidos en otras matrices de agua.

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

Para la elaboración de un estudio de la presencia de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en agua destinada al consumo humano es importante conocer su origen en el interior de la tierra; así como la forma mediante la cual son incorporados en el agua subterránea, dirigiéndose a los pozos de extracción del agua de consumo; por lo que en este capítulo se proporciona toda la información fundamental que ayudará a comprender dicho fenómeno.

Adicionalmente, se presenta información relevante sobre la técnica de centelleo líquido, utilizada para la detección y cuantificación de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de agua. Finalmente, se suministra la información necesaria para la comprensión del proceso de validación de una metodología analítica, incluyendo cada uno de los parámetros que son evaluados durante dicho proceso.

2.1. ELEMENTOS RADIATIVOS

Para abarcar todo lo que compete a la dinámica del radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), se explica la forma en que se presentan al interior de la tierra y como sus propiedades fisicoquímicas guían su transporte hacia la superficie, así como la relación entre ambos elementos. Para lograr su mayor comprensión se muestra a continuación el origen en común de ambos elementos.

2.1.1. Origen

En la estructura interna de la tierra se encuentra un núcleo interno sólido y un núcleo externo líquido, éste emite gases, diferentes sustancias químicas y minerales, formando magmas que se encuentran compuestos de minerales que forman rocas y

muchas sustancias químicas que se transforman a partir series de desintegraciones y reacciones químicas. Dichas reacciones químicas suceden espontáneamente de manera rápida y forman moléculas complicadas; sobre todo por la presencia de oxígeno en el aire y en el agua de mares, ríos y lagos (Romo de Vivar y Delgado, 2011), que provocan desprendimiento de gases y sedimentación de compuestos, con ciclos de equilibrio donde llegan a un punto en el que la cantidad que se libera es la misma que se forma desde el origen (equilibrio).

Dentro de las especies químicas de mayor abundancia en la profundidad terrestre, se encuentran naturalmente elementos radiactivos encargados de transferir calor a partir de la emisión de energía, además de emitir nuevas partículas radiactivas con propiedades distintas. De acuerdo con L'Annunziata (2012), la mayor parte de la radiación ambiental natural de origen terrestre, se debe a la presencia de los radionúclidos de las series del uranio y torio, los cuales se encuentran extensamente distribuidos en la corteza terrestre.

El enfoque de la investigación está orientado a dos de los elementos radiactivos presentes en la naturaleza: radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), productos del decaimiento del uranio (^{238}U), el cual es el isótopo más abundante del uranio en la naturaleza.

2.1.2. Radiactividad

Se define la radiactividad como la emisión de radiación que se origina a partir de una reacción nuclear o como resultado de un decaimiento espontáneo de núcleos atómicos inestables (L'Annunziata, 2012). Esto da lugar a un fenómeno físico, mediante el cual se emite radiación ionizante y se genera la transformación del núcleo atómico a uno diferente, en busca de la estabilidad.

La emisión de radiación ionizante se manifiesta mediante la emanación de partículas atómicas tales como alfa y beta, o de ondas electromagnéticas, como los rayos

x y los rayos gamma. Cada uno con diferente poder de penetración, tal y como se muestran en la Figura 2.1.

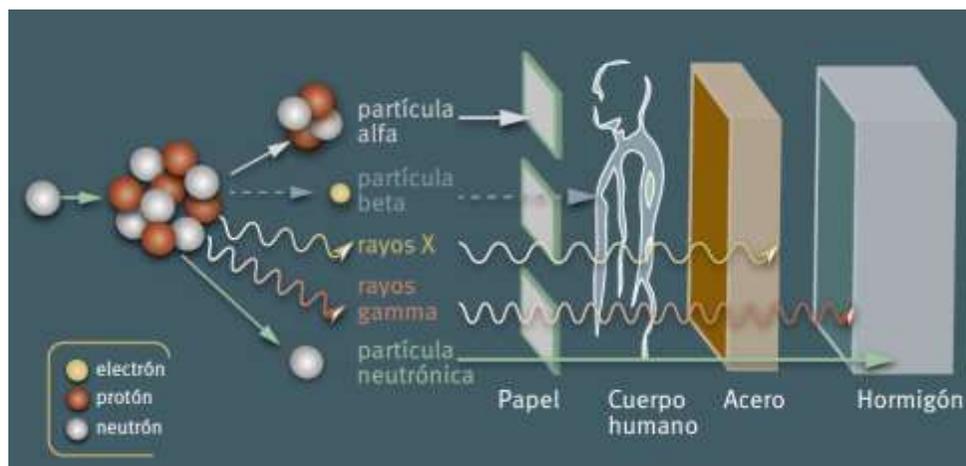


Figura 2.1 Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación ionizante. Fuente: (PNUMA, 2016).

a. Radiación alfa (α)

Emitida como producto del decaimiento de núcleos, cuyo número atómico (Z) es por lo general mayor a 83. Una partícula alfa está formada por 2 protones y 2 neutrones, lo cual equivale a un núcleo de un átomo de helio (He). La pérdida de una partícula alfa se manifiesta en la disminución en 4 unidades del número másico (A) y en 2 unidades el número atómico (Z). Un ejemplo de ello es cuando al emitir una partícula alfa, el átomo de radio (^{226}Ra) se transforma en radón (^{222}Rn).



Q_a Es la energía que se libera durante el decaimiento espontáneo de un núcleo inestable, llamada energía de decaimiento o energía cinética (K_T).

b. Radiación beta (β)

Resulta de la emisión de un negatrón (β^-) o un positrón (β^+). La pérdida de una partícula beta se manifiesta en el crecimiento en 1 unidad del número atómico (Z), mientras que el número másico (A) no cambia.

I. Emisión de un positrón o una partícula beta positiva (β^+)

Resulta de la emisión de un positrón (β^+) acompañado de un neutrino (ν), esto es generado por el decaimiento de un radionúclido que posee protones en exceso o, en otras palabras, un desequilibrio neutrón/protón (n/p) (L'Annunziata, 2012). El desequilibrio (n/p) genera la conversión de un protón a un neutrón dentro del núcleo. La ecuación general para la emisión de positrones, se muestra a continuación:



Dónde:

- ${}^A_Z P$ Radionúclido padre
- ${}^{A}_{Z+1} D$ Radionúclido descendiente
- β^+ Positrón o partícula beta positiva
- ν Neutrino
- K_T Energía cinética total

II. Emisión de un negatrón o una partícula beta negativa (β^-)

Consiste en la emisión de un negatrón (β^-) acompañado por un antineutrino.

La ecuación general se muestra a continuación:



Dónde:

A_ZP	Radionúclido padre
${}^A_{Z+1}D$	Radionúclido descendiente
β^-	Negatrón o partícula beta negativa
$\bar{\nu}$	Antineutrino
K_T	Energía cinética total

Esto es producto del decaimiento de un radionúclido que posee neutrones en exceso o, en otras palabras, un desequilibrio neutrón/protón (n/p). El desequilibrio (n/p) genera la conversión de un neutrón a un protón dentro del núcleo (L'Annunziata, 2012).

c. Radiación gamma (γ)

El decaimiento de un radionúclido, tras emitir partículas alfa (α) o beta (β), a menudo deja el núcleo del producto en un estado de energía excitado. Dicho núcleo cae directamente en el estado fundamental o desciende en pasos para reducir los estados de energía a través de la disipación de energía como radiación gamma. Los rayos gamma son emitidos mediante la transición de estado que un núcleo experimenta cuando se encuentra en un estado excitado (L'Annunziata, 2007). Por lo tanto, se define como un tipo de radiación electromagnética, que conjuntamente con las partículas alfa

(α) y beta (β), corresponden a las radiaciones emitidas por átomos radiactivos. La Figura 2.2 muestra a la radiación gamma (γ) dentro del espectro electromagnético.

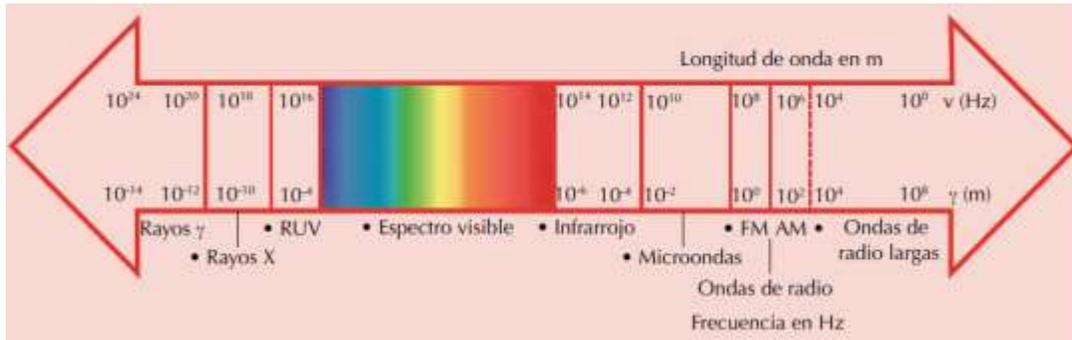


Figura 2.2 Espectro electromagnético. Fuente: (Cardona Hernández , Fierro Arias, Cabrera Pérez , y Vidal Flores, 2017).

2.1.3. Unidades de la radiactividad

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), se establece el Becquerelio (Bq) como la unidad de radiactividad, éste se define como la razón de desintegración en términos de tiempo (segundos)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

Otra unidad muy utilizada es el Curie (Ci), la cual equivale a la actividad de un 1g de radio. El factor de conversión que relaciona el Curie y el Becquerelio es el siguiente:

$$1 \text{ Ci} = 2.22 * 10^{12} \text{ dpm} = 3.7 * 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

La actividad de la concentración de los radionúclidos se expresa como actividad por unidad de volumen. Por lo tanto, en el SI la actividad de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) es expresada tanto en unidades de Bq/L como en Bq/m³.

2.1.4. Ley de desintegración radiactiva

Suponiendo que inicialmente solo existe el radionúclido padre (A) el cual se desintegra para dar origen a su progenie, el radionúclido B y así sucesivamente hasta llegar a un radionúclido cuyo núcleo sea estable (D), se pueden obtener las siguientes relaciones:

La razón de decaimiento del radionúclido padre (A) en un tiempo dado, viene dada por la ecuación 2.4:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

λ_A Constante de decaimiento del radionúclido padre

La cual al ser integrada entre los límites N_A^0 y N_A , y t_0 y t , permite obtener una expresión matemática que da como resultado el número de átomos radiactivos en el tiempo t.

$$\int_{N_A^0}^{N_A} \frac{dN_A}{N_A} = -\lambda_A \int_{t_0}^t dt$$

$$\text{Ln} \left(\frac{N_A}{N_A^0} \right) = -\lambda_A t$$

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Adicionalmente, la razón de desintegración del radionúclido B, es dada por la ecuación 2.6:

$$-\frac{dN_B}{dt} = \lambda_B N_B - \lambda_A N_A \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

$\lambda_B N_B$ Razón de desintegración del radionúclido B

$\lambda_A N_A$ Razón de formación del radionúclido B

Por otro lado, la constante de desintegración se obtiene fácilmente a partir de la ecuación 2.7:

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

$t_{1/2}$ Tiempo de vida media

2.1.5. Periodo de semidesintegración

El periodo de semidesintegración (semivida) es el periodo de tiempo necesario para que la cantidad de un radionúclido disminuya en un 50% de su actividad. Este valor varía según el radionúclido y es independiente de la cantidad con la que se cuente inicialmente, ya sea 1g o 1 kg, el periodo de semivida del uranio (^{238}U), radio (^{226}Ra) y radón (^{222}Rn) será el mismo.

2.1.6. Equilibrio secular

Es una condición en la que los valores de las actividades de un radionúclido padre (A) y radionúclido hijo (B) permanecen constantes e iguales con el tiempo. De acuerdo con L'Annunziata (2012), el equilibrio secular depende del siguiente criterio:

El radionúclido padre debe de tener larga vida, es decir, debe de tener un decaimiento insignificante durante el periodo de observación. Además, el radionúclido hijo debe tener un periodo de semivida relativamente corto. La diferencia relativa de semivida se expresa mediante:

$$\frac{\lambda_A}{\lambda_B} \leq \sim 10^{-4}$$
$$\lambda_A \ll \lambda_B$$

Donde:

- λ_A Constante de decaimiento del radionúclido padre
- λ_B Constante de decaimiento del radionúclido hijo

Lo anterior se demuestra para el caso de los radionúclidos radio (^{226}Ra) (A) y radón (^{222}Rn) (B), en el cual se presenta lo siguiente:

$$\lambda_{\text{Ra}^{226}}(3.00 * 10^{-7} \text{min}^{-1}) \ll \lambda_{\text{Rn}^{222}}(1.26 * 10^{-4} \text{min}^{-1})$$

2.1.7. Cadena de desintegración

En la naturaleza se encuentran 3 familias o series radiactivas: torio (^{232}Th), uranio-radio (^{238}U) y uranio-actinio (^{235}U), las cuales son presentadas en el Anexo 1. Cabe señalar que, en cada una de ellas se presenta la emanación de un gas inerte radiactivo (radón (^{222}Rn), actinon ^{219}Ac , torón (^{220}Rn)) como un producto del decaimiento y finalizan en radionúclidos estables, los cuales son todos isótopos del elemento plomo (Pb). Adicionalmente, se ha preparado de forma artificial la familia del neptunio (^{237}Np).

Los principales procesos de desintegración en todas ellas son la emisión alfa y beta, las secuencias de elementos e isótopos son generalmente similares en las respectivas familias. Todos los miembros de cada una de las series radiactivas poseen

masas diferentes en múltiplos de 4 unidades. Tienen su origen en nucleídos cuyas vidas son largas comparadas con la vida de la Tierra (Burcham, 1974). En la Tabla 2.1 se muestran productos iniciales y finales de las diferentes series radiactivas.

Tabla 2.1 Productos iniciales y finales de las series radioactivas.

Nombre de la serie	Número másico	Radionúclido Inicial	Periodo	Radionúclido Final
Torio	4n	^{232}Th	1.4×10^{10} años	^{208}Pb
Neptunio	4n+1	^{237}Np	2.2×10^6 años	^{208}Bi
Uranio-radio	4n+2	^{238}U	4.5×10^9 años	^{206}Pb
Uranio-actinio	4n+3	^{235}U	7.2×10^8 años	^{207}Pb

Fuente: (Burcham, 1974).

2.1.8. Isótopos radiactivos

Existe una amplia variedad de isótopos radiactivos, obtenidos a partir del decaimiento de las 3 series radiactivas: torio (^{232}Th), uranio-radio (^{238}U) y uranio-actinio (^{235}U). Los isótopos radiactivos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), ambos productos de la desintegración del uranio (^{238}U), adquieren especial atención por ser considerados en la calidad radiológica del agua de consumo humano.

En la Figura 2.3 se presentan los tipos de desintegración y periodos de semidesintegración de la cadena de decaimiento del uranio (^{238}U).

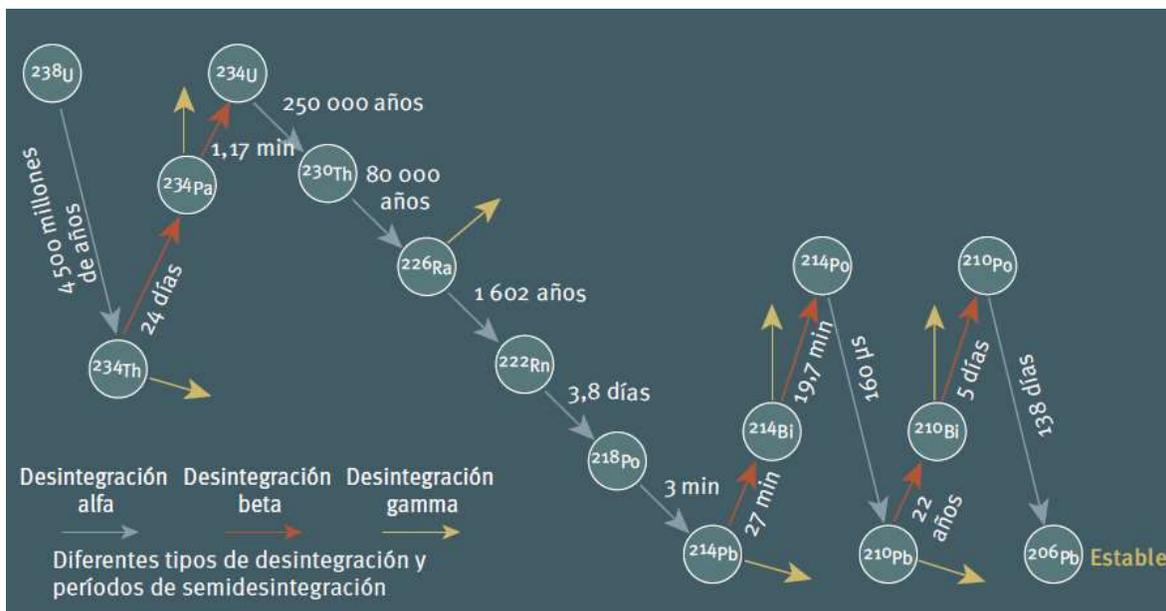


Figura 2.3 Cadena de decaimiento del uranio-radio (^{238}U). Fuente: (PNUMA, 2016).

Se muestra el proceso de transferencia para la cadena de decaimiento del uranio (^{238}U) en la Figura 2.4, en donde el radionúclido inicial se encuentra en forma de mineral, formando parte del contenido de las cámaras magmáticas, éste posee una vida media de 4.5 millones de años, lo que hace que difícilmente sea desintegrado, decayendo constantemente en sus descendientes (véase la Figura 2.3).

El radio (^{226}Ra) al ser un elemento alcalinotérreo se deposita sobre las rocas por un largo periodo (tiempo de semivida 1,600 años), las cuales al entrar en contacto con las aguas subterráneas permiten la extracción y arrastre de dicho radionúclido; por lo tanto, no se puede inferir fácilmente la ubicación de este isótopo, además, a lo largo de su vida decae en radón (^{222}Rn), isótopo en estado gaseoso inerte natural, el que se transporta mediante espacios libres o fluidos, siendo su destino final la atmósfera. El radón (^{222}Rn) tiene una afinidad especial por el aire, debido a que su coeficiente de difusión ($0.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) en éste es mayor que en cualquier otro fluido al interior de la tierra, sumado a su capacidad de solubilidad en agua, la cual le facilita el viaje hasta la superficie.

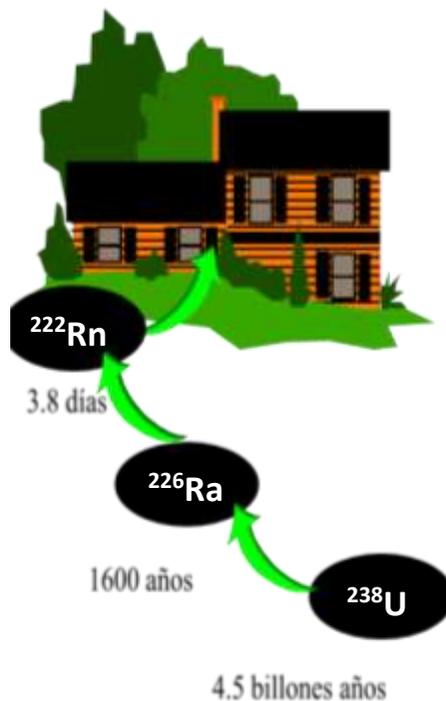


Figura 2.4 Transferencia y origen del radón (^{222}Rn) a partir de su progenitor radio (^{226}Ra).

Fuente: (Magaña, 2018).

Por lo tanto, el agua subterránea es una vía para la transferencia del radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra); cuando se extienden fracturas y fallas sobre las placas, se da lugar a que el gas radón (^{222}Rn) que es transportado mediante el agua subterránea, encuentre un medio que le permite ascender hacia la superficie de la tierra, de modo que existen dos fuentes principales en las que se encuentra la presencia del radio-núclido radón (^{222}Rn):

- a. Superficie de la tierra donde se encuentren fallas, fracturas, permeabilidad al interior de la tierra, que puede desembocar en cimientos de viviendas, edificios, entre otros lugares donde exista población, así como también lugares despoblados.

- b. Aguas subterráneas y superficiales, ésta última debido a que en ellas se desembocan aguas subterráneas con especies químicas arrastradas y disueltas en el interior de la tierra.

Dentro del transporte se encuentra una parte esencial del estudio, debido a que el radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) transferidos mediante aguas subterráneas, pueden ser ascendidos por medio de pozos perforados con destino al consumo humano; por tanto, es necesario explicar el origen del agua subterránea mediante el ciclo hidrológico en el Anexo 2.

2.1.9. Mecanismo de transferencia y propiedades fisicoquímicas del radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra)

El radón en condiciones normales de presión y temperatura es un gas, que emana al ambiente a través de los poros de las rocas. Se considera tres mecanismos de desplazamiento: difusión, emanación y transporte. Así la difusión dentro del agua o el gas del poro tiene características diferentes para cada isótopo. A continuación, se detalla con mayor detalle el mecanismo de transferencia y propiedades fisicoquímicas del radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra)

2.1.9.2 Radio (^{226}Ra)

Las aguas subterráneas se enriquecen en radio (^{226}Ra) por la interacción, fundamentalmente, con fuentes naturales (rocas, suelos o manantiales geotérmicos); aunque también es de destacar el aporte de fuentes artificiales (por ejemplo: explotaciones en minas de uranio como parte del ciclo del combustible nuclear) (Aguado Casas, 2003).

El radio (^{226}Ra) se forma gracias a la desintegración alfa (decaimiento del uranio (U^{236})), experimentando un retroceso de sus partículas en el momento de su formación; cuando éste se da dentro de los poros de minerales, se considera como el mecanismo por el cual el radio (^{226}Ra) es liberado desde la matriz sólida a un posible medio acuoso (Fisher, 2001) tal como se muestra en la Figura 2.5. Degering et al. (2016), establecen que las energías típicas de los núcleos de retroceso son del orden de 60 keV a 100 keV y dan como resultado desplazamientos de aproximadamente 10nm en sólidos. Por lo tanto, si el uranio (^{236}U) se encuentra en las superficies de los granos, el radio (^{226}Ra) podría ser expulsado directamente al agua subterránea.

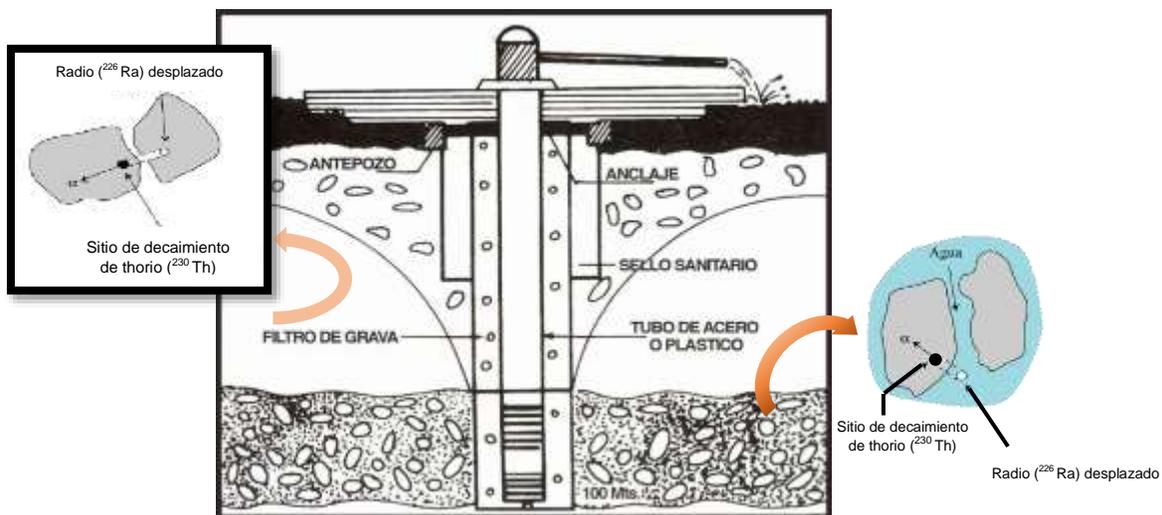


Figura 2.5. Mecanismo de decaimiento de ttorio (^{230}Th) a radio (^{226}Ra). Fuente: (Villalobos, 2018).

En la literatura se encuentran procesos que contribuyen a la movilización del radio (^{226}Ra) en las fases sólidas y líquidas dentro de un acuífero, los cuales son:

- I. Disolución de los sólidos del acuífero y mecanismo de lixiviación, según la porosidad y permeabilidad de las rocas adyacentes al acuífero (Cervantes

González y Manchado Martín, 2002). En este caso, se genera directamente un incremento en la cantidad de radio (^{226}Ra) en el agua subterránea.

- II. Eliminación por coprecipitación durante la formación de minerales secundarios (Degering et al., 2016).
- III. Sorción de especies disueltas sobre superficies minerales o partículas (Degering et al., 2016). Este fenómeno puede favorecer la migración del radio (^{226}Ra) en el agua subterránea. Fisher (2001) informa que existen experimentos que parecen indicar que en aguas más salinas que el agua de mar, la sorción de radio (^{226}Ra) se previene por la competencia de cationes acuosos (sodio, calcio, magnesio y potasio) por los lugares de intercambio que el radio (^{226}Ra) ocupa en la superficie de los sólidos. Esto da lugar a la existencia de una correlación entre la salinidad de las aguas subterráneas y su concentración de actividad de radio (^{226}Ra).
- IV. Los procesos diagenéticos, podrían retrasar o promover la movilización del radio (^{226}Ra). El cuarzo, feldespato o cementos de carbonato que llenan los poros, podrían evitar que el radio (^{226}Ra) alcance la interfaz entre la superficie del grano y el agua subterránea (Fisher, 2001).

Por lo general, la movilidad (migración) del radio (^{226}Ra) en las aguas subterráneas no es significativa, a excepción de acuíferos con gran circulación de agua como, por ejemplo, sistemas hidrotermales. En ellos se produce una modificación de la superficie de las rocas y se tienen altas concentraciones de sales disueltas que llevan a minimizar la adsorción de radio (^{226}Ra) a la superficie del acuífero, formándose complejos con radio (^{226}Ra) que favorecen la migración de éste (Aguado Casas, 2003).

La distribución de la actividad del radio (^{226}Ra) en las aguas subterráneas está controlada por las características hidrogeoquímicas del acuífero. De acuerdo con Roba, Codrea, Moldovan, Baciú & Cosma (2010), la movilidad puede ser influenciada por

parámetros químicos, incluyendo pH, salinidad, condiciones redox, e iones disueltos como cloruros, sulfatos, hidróxidos, óxidos y sales.

En tal sentido, la concentración de la actividad de radio (^{226}Ra) en el agua subterránea del acuífero es directamente proporcional con los sólidos totales disueltos (TDS), es decir que si los TDS aumentan, la concentración de la actividad de radio (^{226}Ra) también aumenta (Fisher, 2001); por el contrario la concentración de la actividad de radio (^{226}Ra) es mayor a pH bajos (dePaul & Szabo, 2007); además, tiene una relación directa con el total de iones disueltos (TDI) e inversa con el oxígeno disuelto (OD), (Vinson, Vengosh, Hirschfeld & Dwyer, 2009). Cabe señalar que el radio (^{226}Ra) es más móvil en aguas subterráneas reductoras, ricas en cloruro con un alto contenido total de TDS (Zapeczka & Szabo, 1986).

En cuanto a su comportamiento químico, el ión Ra^{+2} forma sales insolubles en agua con sulfatos, carbonatos y cromatos; mientras que su comportamiento con los cloruros, bromuros, nitratos y sales hidróxidas de radio sí son solubles en agua. El carácter insoluble de sulfatos y carbonatos de este elemento hace que sea eliminado de la fase acuosa en cuanto las concentraciones de SO_4^{-2} o CO_2 sean suficientes, por lo general mediante coprecipitación con Ba, Ca, Mg, Fe o Mn (Aguado Casas, 2003).

El radio (^{226}Ra) depositado decae en un elemento gaseoso llamado radón (^{222}Rn), esta desintegración se lleva a cabo de tal manera que al haber pasado 30 días se alcanza el equilibrio secular en condiciones de sistema cerrado o hermético.

2.1.9.2 Radón (^{222}Rn)

El radón fue el quinto elemento radiactivo en ser descubierto, se encuentra en la familia de los gases nobles con número atómico 86; existen diferentes isótopos naturales, siendo de interés en la presente investigación el radón (^{222}Rn), producto del

decaimiento del radio (^{226}Ra), el cual se origina a partir de los minerales que se encuentran al interior de la tierra. Al ser un gas noble es químicamente inerte y no participa en reacciones químicas, ya que teniendo una estructura atómica estable (con su octeto completo), no necesita combinarse con otros elementos. Por lo tanto, el comportamiento del radón (^{222}Rn) está básicamente controlado por procesos físicos y no por interacciones químicas.

Por ser un gas, su energía cinética hace que las partículas tiendan a expandirse en todo el volumen en el que se encuentren, en este caso las partículas de radón (^{222}Rn) ocupan el volumen de los poros y fracturas de las rocas donde la fuerza impulsora se da en el momento de la emisión de una partícula alfa; ya que se impulsa un fuerte retroceso del núcleo residual de radón (^{222}Rn), permitiendo así la emigración a partir de gradientes de concentración y en flujos convectivos con gradientes de presión (Rábago Gómez, 2013).

De todo el radón (^{222}Rn) producido por la desintegración del radio (^{226}Ra) en los granos de las rocas, la fracción que consigue escapar de los mismos y pasar a ocupar el volumen de poros disponibles, se denomina factor o coeficiente de emanación. Este factor depende, por una parte, de la distribución y tamaño de los granos de mineral que constituyen la matriz sólida de las rocas y, por otra parte, de su nivel de humedad; es decir, de la fracción de poros ocupados por agua, ya que ésta al absorber la energía de retroceso del átomo residual de radón (^{222}Rn) formado, lo frena en el poro, adquiriendo éste, a partir de ese momento, tal como se manifiesta en la Figura 2.6, libertad para moverse a través de las rocas, debido a procesos de carácter difusivo o convectivo. Únicamente los átomos de radón (^{222}Rn) desintegrados del radio (^{226}Ra) en una fina lámina superficial de las rocas pueden escapar a la fase acuosa, y su solubilidad en ésta depende de la presión parcial del gas, debido a su propiedad inerte; además de la facilidad con la que se disuelve en el líquido (coeficiente de solubilidad).

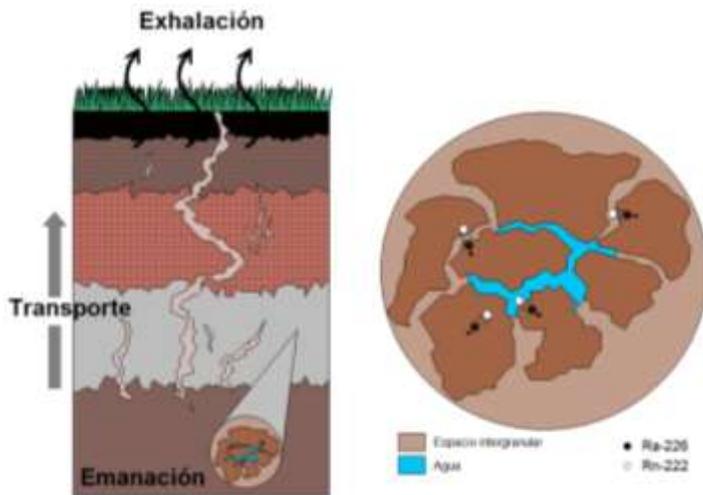


Figura 2.6 Mecanismo de de transferencia radón (^{222}Rn). Fuente: (Lastra, 2016).

En el caso de su disolución en agua, ésta es de $230 \text{ cm}^3/\text{kg}$ a 20°C extendiendo un coeficiente de solubilidad, desde 0.106 hasta 0.507 a presión atmosférica y variando según la temperatura (Feng & Li, 2012). Cabe señalar que, el coeficiente de solubilidad del radón (^{222}Rn) en agua es inversamente proporcional a la temperatura e inferior a la unidad.

Coefficiente de solubilidad para el radón (^{222}Rn): Se define como una relación entre la concentración de radón (^{222}Rn) en agua ($C_{\text{Rn,agua}}$) y en el aire ($C_{\text{Rn,aire}}$), formulándola de la siguiente manera:

$$K_{\text{Ostwald}} = \frac{C_{\text{Rn,agua}}}{C_{\text{Rn,aire}}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

La concentración se refiere a la actividad del radón (^{222}Rn), cuando alcanza el equilibrio, expresada en Bq/L.

La actividad en (Bq/L) de radón (^{222}Rn) es proporcional al número de átomos. Por lo tanto, se define una dependencia entre el coeficiente de Ostwald con la temperatura del agua, a 1 atmósfera de presión:

$$K_{\text{Ostwald}} = 0.425e^{0.05 \cdot T_{\text{agua}}(^{\circ}\text{C})} + 0.1 \quad \text{Ec. 2.9}$$

El intervalo en el cual el coeficiente de Ostwald es una buena aproximación para la solubilidad del radón (^{222}Rn), es en el rango de 0-40°C. En la Figura 2.7 se muestra la tendencia de la relación del coeficiente de Ostwald y la temperatura del agua.

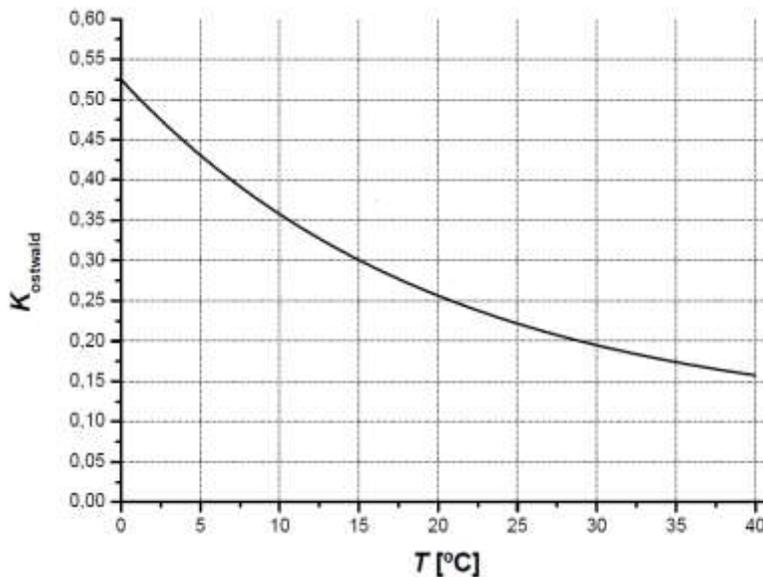


Figura 2.7 Representación gráfica del coeficiente de Ostwald, solubilidad del radón (^{222}Rn), en función de la temperatura a presión de 1 atm. Fuente: (Rábago Gómez, 2013).

A partir de esto, se puede tener una clara percepción, en la cual la solubilidad del radón (^{222}Rn) ante altas temperaturas se favorece en el aire, dándole mayor facilidad al radón (^{222}Rn) de transportarse ascendentemente, en el aire en comparación con el agua. Dando así una idea de la dinámica al interior de la tierra, debido a que al existir un gradiente descendente de la temperatura, desde el interior a la superficie, se puede predecir que en las zonas cercanas al interior de la tierra el radón (^{222}Rn) emana hacia la superficie por medio del aire, en mayor cantidad de lo que puede llegar a quedarse disuelto en acuíferos profundos; pero a medida que el gas va ascendiendo, la temperatura empieza a disminuir, dándole al radón (^{222}Rn) mayor solubilidad en agua y permitiendo un mayor arrastre del gas a través de los acuíferos

someros y aún mayor en los acuíferos semiconfinados y confinados, de donde existe un mayor uso para consumo humano.

Por otro lado, se puede llegar a pensar que el radón (^{222}Rn) es un gas con menor densidad que el aire, dándole menor fuerza de atracción hacia el centro de la tierra de la que posee el aire y proporcionando la facilidad de ascender hasta la superficie; sin embargo el radón (^{222}Rn) es el gas más denso que existe en la naturaleza (9.73 kg/m^3 en condiciones normales), por lo tanto no es una propiedad que contribuya a su transferencia al interior de la tierra. Además de su solubilidad, su carácter difusivo y convectivo permite guiar al radón (^{222}Rn) a través de las rocas por medio acuoso o aireado.

El transporte de radón (^{222}Rn), por lo tanto, es guiado por una gradiente de concentración, lo que indica que su transferencia está influenciada por una tendencia natural a transferir masa, para lograr hacer mínimas las diferencias del sistema.

La transferencia se da a través de un fluido en movimiento, ayudado por las características dinámicas del flujo. (Santillan, 2018). Existen estos dos modos de transferencia del radón (^{222}Rn), los cuales son la difusión molecular y la transferencia convectiva.

I. Difusión molecular

La difusión molecular es un proceso en el cual la materia se transporta de un lugar a otro dentro de un sistema, como resultado de movimientos moleculares al azar, inducidos por diferencias de concentración. La mayor probabilidad ocurre desde donde existe una mayor concentración hacia donde es menor. Esta tendencia está descrita por la Ley de Fick (ecuación 2.10).

La difusión molecular depende de la concentración, porosidad del terreno y distancia a recorrer (Garzón, 1992).

$$J = -\frac{D}{n} * \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

- J Tasa de emanación de radón (^{222}Rn), (Bq/Sm^2)
- D Coeficiente de difusión (característico del medio)
- n Porosidad del medio
- Z Diferencia de profundidad
- C Concentración en los poros del medio
- C/z Gradiente de concentración
- D/n Depende de la porosidad, aumento del contenido de agua y tamaño de grano

Por lo tanto, el radón (^{222}Rn) se difunde con mayor facilidad en el aire que el agua, ya que su coeficiente de difusión en ésta es $1 \times 10^{-1} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ frente a $1.13 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$, respectivamente.

La difusión molecular puede ocurrir en sistemas de fluidos estancados o en fluidos en movimiento (Santillan, 2018). En caso de que el fluido sea impulsado por el movimiento del fluido intersticial, se habla de transporte convectivo. (Quindós, 1995)

II. Transferencia convectiva

Consiste en la transferencia entre un fluido en movimiento y una superficie, el movimiento del fluido puede ser forzado (convección forzada) o debido a una diferencia de densidades que pudo haber surgido como resultado de una concentración o de una diferencia de temperatura (convección libre o natural), (Santillan, 2018).

En caso del radón (^{222}Rn), se transfiere por convección natural y su flujo se describe por la ley de Darcy:

$$v = \frac{k \delta P}{\mu \delta z} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

- k Permeabilidad del medio (m^2)
- μ Viscosidad del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- P Presión del fluido (Pa)

El fluido puede ser el aire, el agua (líquido o vapor) o gases tal como dióxido de carbono (CO_2), los cuales pueden verse impulsados por aguas lluvias filtradas que afecten la forma y tiempo de la corriente, presión y fallas geológicas (García Vindas, 1999).

La transferencia convectiva, al igual que su solubilidad, presentan una variación favorable para el aire, ya que su coeficiente de difusión en éste es de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Berenguer Subils, 1995) frente a $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ en agua (Vindas, 1999); lo que le permite al radón (^{222}Rn) viajar de forma ascendente mientras se encuentra disuelto en aire, junto con otros gases (nitrógeno y oxígeno) hacia la atmósfera.

El radón (^{222}Rn) es conocido por estar asociado a fumarolas y aguas termales. Por lo general, debido a sus propiedades, es transportado por las aguas subterráneas. Estas características permiten usar al gas radón (^{222}Rn) como una herramienta para el mapeo y determinación de la dinámica de un sistema hidrotermal; para detectar fallas en terrenos volcánicos, caracterizar el flujo de aguas subterráneas, y su monitorización en continuo. Ha sido utilizado para la predicción en terremotos (Rábago Gómez, 2013).

2.1.10. Pozos de agua subterránea

Para el abastecimiento con agua subterránea se debe recurrir a la captación mediante la perforación de pozos, que, atravesando el subsuelo, lleguen hasta las formaciones de acuíferos (MDE, 1999). Esto es mostrado a partir de la Figura 2.8.

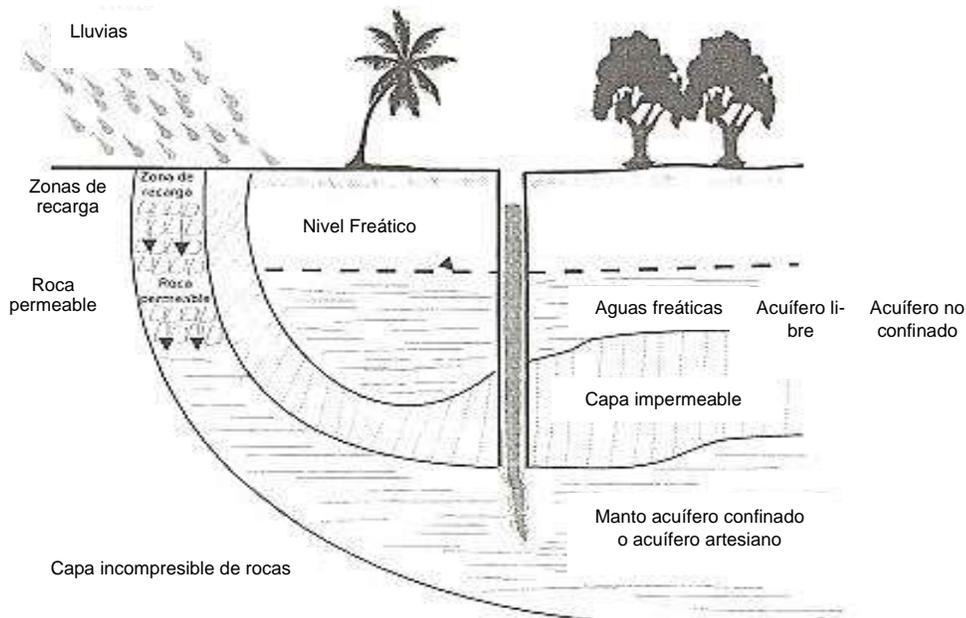


Figura 2.8 Representación de un pozo perforado sobre la superficie de un acuífero.

Fuente: (Ministerio de Desarrollo Económico, 1999).

Según la alimentación de estas formaciones, se encuentran básicamente dos tipos de acuíferos (MDE, 1999):

- a. Las inconfiadas o freáticas: Se alimentan directamente con el agua lluvia que cae a la superficie del terreno y se infiltra a través de los intersticios o porosidad de éstos, hasta quedar retenidas por un manto impermeable.

- b. Las confinadas o artesianas: Se alimentan con las aguas lluvias que caen en sus zonas de carga, que generalmente son suelos porosos confinados entre dos capas de roca impermeable.

La extracción de agua no se hace a través de acuíferos inconfiados, debido a que la presión impulsora es la atmosférica, lo cual no es conveniente para el impulso del ascenso del fluido.

Según el tipo de acuífero, así es el uso al que es destinado, por ejemplo: los acuíferos profundos son utilizados para la geotermia debido a las altas temperaturas y al sistema geológico adecuado; mientras que, para captaciones de agua de consumo humano, se utilizan acuíferos más someros.

La perforación va seguida de un entubamiento del pozo, hasta llegar al acuífero en donde la tubería va perforada, ranurada o con un filtro especial que permite la entrada del agua al interior de la tubería, reteniendo los granos pequeños de arena (MDE, 1999).

Por lo tanto, muchos minerales pueden ser retenidos en el interior de la tubería pudiendo ser el caso que el radio (^{226}Ra) quede con el resto; por el contrario, el radón (^{222}Rn), por ser un gas soluble en agua, es imposible su retención mediante un filtro.

El equipo de extracción, generalmente consiste en una bomba de eje vertical de una o varias etapas, la cual se instala "colgándola" dentro de la tubería desde la superficie donde está el motor, también vertical. Otros equipos usuales son los conjuntos bomba-motor sumergibles o los compresores de aire; donde algunas aguas de acuíferos confinados, más exactamente las artesianas saltantes, surgen a la superficie sin requerir de bombeo (MDE, 1999).

Durante el proceso de ascenso de agua destinada al consumo humano, a través de pozos de extracción es posible encontrar la presencia de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra). Cabe señalar que el transporte de dichos radionúclidos se da en función de sus propiedades fisicoquímica.

2.2. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión en la salud de las personas. Es así que tomar las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo, proporciona beneficios significativos para la salud.

La radiación ionizante es uno de los agentes etiológicos relacionados con enfermedades, más ampliamente investigado en el mundo entero. Es conocido que su incidencia sobre macromoléculas biológicas, tales como el ácido desoxirribonucleico (ADN), el ácido ribonucleico (ARN), proteínas estructurales, proteínas enzimáticas, etc. ocasiona su ionización o excitación, cuyo efecto es un cambio en su estructura o en su función. En consecuencia, el estudio de actividades específicas, sobre todo en aquellos medios por los que el hombre pueda estar expuesto a dicha radiación, es de especial interés.

2.2.1. Efectos causados por el radón (^{222}Rn)

El ingreso de radón (^{222}Rn) al organismo humano se puede dar a través de dos vías principales: por inhalación de aire y por ingestión de agua. El radón (^{222}Rn) proviene en su mayoría de emanaciones del subsuelo; también contribuyen los materiales de construcción de las casas y en menor medida su liberación del agua de uso doméstico de origen subterráneo. Existe una gran diferencia entre el riesgo de desarrollar cáncer pulmonar como efecto de la inhalación de radón (^{222}Rn) a través del aire que

respiramos y el riesgo de enfermar de cáncer estomacal por el contenido de radón (^{222}Rn) en el agua que incorporamos a nuestro cuerpo. Específicamente, en 1999 se estimó que el 12% de las muertes por cáncer de pulmón en los EEUU estaban relacionadas con la presencia de radón (^{222}Rn) y sus efímeros productos de desintegración en el aire de los espacios interiores (US NAS, 1999).

2.2.2. Efectos causados por el radio (^{226}Ra)

El radio (^{226}Ra) es un radioisótopo natural con alto periodo de semidesintegración (1,600 años) que presenta una elevada radiotoxicidad; debido a su tendencia a reemplazar el calcio en la estructura ósea y al ser emisor alfa genera, a su vez, un conjunto de descendientes radiactivos de semivida corta.

En el ser humano, la principal vía de entrada del radio (^{226}Ra) en su organismo es a través de la ingestión de bebidas y comidas. Del radio (^{226}Ra) ingerido, aproximadamente un 20% es absorbido por el sistema circulatorio, distribuyéndose inicialmente entre tejidos blandos y huesos; aunque la acumulación es preferente en los huesos en crecimiento. Los procesos que normalmente remodelan el hueso tienden a eliminar el radio (^{226}Ra), dando lugar a una semivida biológica de 10 años. En términos globales, entre el 70% y el 90% del radio (^{226}Ra) presente en nuestro cuerpo, se localiza en nuestro esqueleto con valores promedio dentro de regiones con fondo radiactivo normal en radio (^{226}Ra) de 0.31 Bq/kg en hueso seco, frente a los 0.005 bq/kg para otros tejidos (Aguado Casas, 2003).

2.3. CALIDAD RADIOLÓGICA DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO

La vigilancia de la calidad del agua de consumo se define como la evaluación y examen, de forma continua y vigilante, desde el punto de vista de la salud pública,

de la inocuidad y aceptabilidad de los sistemas de abastecimiento de agua de consumo (OMS, 2011).

En El Salvador, la ANDA posee plantas de tratamiento de tecnología convencional, las cuales incluyen procesos de coagulación, floculación, decantación o sedimentación, filtración y desinfección; donde se realiza un control de calidad a través de un monitoreo continuo, en que se llevan a cabo análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Se ejecutan también inspecciones sanitarias a los sistemas de abastecimiento, iniciando desde la fuente hasta el usuario, además de realizar buenas prácticas en el control operacional (ANDA, 2015).

ANDA, mediante diferentes instancias o dependencias, realiza las respectivas actividades necesarias para el aseguramiento de la calidad del agua de consumo humano, tomando como base los lineamientos establecidos en el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano: requisitos de calidad e inocuidad.

2.3.1. RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano: requisitos de calidad e inocuidad

Este reglamento tiene como objeto establecer los límites permisibles de los parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos, que debe cumplir el agua de consumo humano. Además, indica los métodos de análisis realizados en laboratorios nacionales, los cuales deben estar acreditados por el organismo de acreditación vigente; asimismo, para el caso de métodos de análisis realizados por laboratorios internacionales, estos deben ser reconocidos por el organismo de acreditación vigente.

El presente reglamento establece que la evaluación de parámetros radiológicos se desarrollará ante situaciones especiales o de emergencias. Además, delimita el límite máximo de radón (^{222}Rn) a 11.1 Bq/L y de radio (^{226}Ra) a 1 Bq/L, tomando en

cuenta la normativa de la OMS. Si bien el reglamento no establece los análisis radiológicos de rutina para las aguas de consumo humano, la investigación pretende aportar datos para establecer y reafirmar la importancia de estas mediciones, sobre todo, porque El Salvador es un país sísmico y vulnerable el cual debe contar con sistemas de monitoreo de aguas de consumo humano, incluyendo los parámetros radiológicos

2.3.2. Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

La finalidad principal de la OMS es la protección de la salud pública. En este mismo sentido, en el marco orientado a la seguridad del agua de consumo humano, ofrece información sobre aspectos microbiológicos, químicos, radiológicos y relativos a la aceptabilidad.

La OMS (2011) indica los criterios para evaluar la seguridad del agua de consumo en lo concerniente a su contenido de radionúclidos. El método propuesto para controlar los peligros radiológicos comprende dos etapas:

- a. Análisis inicial de la radiactividad alfa total y beta total, para determinar si la concentración de radiactividad (en Bq/l) es menor al nivel establecido, por debajo del cual no es preciso tomar medidas adicionales.
- b. Análisis de las concentraciones de radionúclidos individuales y comparación con los niveles de referencia específicos, en caso de superar los umbrales de la radiactividad alfa total (0.5 Bq/L) y beta total (1 Bq/L).

El nivel de referencia correspondiente al radio (^{222}Ra) es de 1 Bq/L; para el caso del gas radón (^{222}Rn), la OMS indica que la mayor proporción a exposición a la radiación natural procede de dicho radionúclido; por lo que si la concentración de radón

(^{222}Rn) en los sistemas públicos de abastecimiento de agua de consumo excede los 100 Bq/L, deberán aplicarse controles. Si la concentración supera los 100 Bq/L, la fuente de agua deberá tratarse para reducir la concentración hasta niveles mucho menores que 100 Bq/L (OMS, 2011).

2.3.3. Normativa propuesta para el radón (^{222}Rn) en agua potable de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)

El reglamento propuesto por la EPA proporciona información sobre cómo limitar la exposición de la población al radón (^{222}Rn) al centrar sus esfuerzos en los mayores riesgos para la salud pública, generados a partir de la presencia de dicho radionúclido en el aire y en el agua potable. Establece también, el nivel máximo objetivo de radón (^{222}Rn) en agua de consumo de 11.1 Bq/L. (EPA, 1999).

2.4. TÉCNICA DE CENTELLEO LÍQUIDO

Existen diferentes técnicas analíticas que permiten detectar y cuantificar la actividad del radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra). Para el caso del gas radón (^{222}Rn), se encuentran los detectores de centelleo de sulfuro de cinc (ZnS), detectores de cámara de ionización, detectores semiconductores, detectores de carbón activado, detectores DSTN, etc. En cuanto al radio (^{226}Ra), se destaca la espectrometría alfa, espectrometría gamma, espectrometría de masas y centelleo líquido. Siendo en efecto la técnica de centelleo líquido la utilizada para el desarrollo de la presente investigación, mediante la detección y cuantificación de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra).

2.4.1. Proceso de centelleo

Consiste en la conversión de la energía producto de un decaimiento nuclear, en fotones de luz visible (ver Figura 2.9).

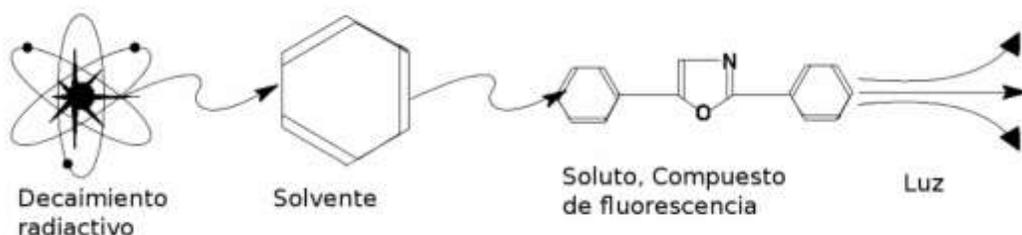


Figura 2.9 Secuencia de eventos que se desarrollan durante el proceso de centelleo líquido. Fuente: (Marín Díaz , 2014).

Inicialmente, se da la interacción de la radiación ionizante con las moléculas del solvente orgánico, mediante la disolución de la muestra emisora de radiación y el cóctel de centelleo dentro de un vial. El cóctel de centelleo, esencialmente consiste en una solución formada por un disolvente orgánico, junto con uno o más solutos centelladores.

La energía emitida como producto del decaimiento del radionúclido es absorbida en mayor proporción por las moléculas del solvente, esto genera la excitación de dichas moléculas y da como resultado la transferencia de energía de la radiación ionizante, desde las moléculas del solvente hacia las del soluto primario. Los hidrocarburos aromáticos han sido utilizados tradicionalmente como solventes primarios debido a su alta eficiencia en los resultados de los análisis, la cual es generada a partir de la alta densidad de electrones que poseen, entre los más utilizados se encuentra el tolueno, xileno y 1, 2, 4-trimetilbenceno.

Las moléculas del soluto o centellador primario, absorben la energía de desexcitación, procedente de las moléculas del solvente primario; como consecuencia de ello sus moléculas se excitan y emiten fotones de luz visible mediante la fluorescencia. En este caso, la longitud de onda resultante de la emisión de luz no coincide con la óptima necesaria para la detección mediante los tubos fotomultiplicadores (TFM); por lo que se requiere la presencia de un soluto secundario. El centellador primario más popular es el 2,5-dieniloxazol (PPO).

Por consiguiente, el soluto secundario cambia el espectro de emisión del sistema. Éste absorbe la energía producto de la excitación del centellador primario y la emite de nuevo, con una longitud de onda mayor, de modo que coincida con las características requeridas del TFM. Un centellador secundario muy utilizado es el 4-bis-2-(5-fenilo-xazolil)-benceno (POPOP).

Los fotones emitidos dentro del vial son detectados por dos TFM. Un TFM es un cilindro constituido por dos electrodos, un ánodo y un cátodo (llamado fotocátodo), su función es detectar la luz que ingresa en él y producir una señal de salida a través del siguiente proceso:

- a. La luz incide sobre el fotocátodo y excita los electrones para generar un flujo de fotoelectrones que es emitido al vacío (efecto fotoeléctrico externo) en la misma dirección y sentido que la luz que ha ingresado.
- b. Los fotoelectrones son acelerados y dirigidos por un campo eléctrico, hasta golpear la superficie de un electrodo auxiliar llamado dínodo, donde se multiplica el número de electrones. Este proceso es conocido como emisión secundaria y se repite en cada uno de los dínodos sucesivos.
- c. Los electrones secundarios multiplicados emitidos desde el último dínodo son recogidos por el ánodo situado al final de la región fotomultiplicadora.

Con el sistema de dínodos lo que se consigue es amplificar en gran medida el impulso eléctrico originado por los fotones al incidir en el fotocátodo, de modo que, a la salida del TFM podrán ser amplificados electrónicamente.

La muestra produce dos pulsos independientes en cada TFM, éstos son pasados por un circuito de coincidencia: Cuando los pulsos se presentan simultáneamente, dentro de 15 ns, el pulso es registrado en la sección conocida como scaler (circuito electrónico ideado para dar un único impulso de salida después de un cierto número de impulsos de entrada). Este sistema es diseñado para prevenir y reducir al mínimo los pulsos falsos que son resultado de ruido electrónico o background (Marín Díaz , 2014).

Finalmente, los pulsos son pasados por un conversor análogo-digital (ADC) y las señales son guardadas en un analizador multicanal (MCA), el cual clasifica las amplitudes de los pulsos por canales. Cada pulso con un rango de energía es sumado en un determinado canal, a lo que se llama cuenta, de ese modo se cuantifican los conteos y el equipo almacena el espectro (Marín Díaz , 2014). Los componentes de un contador de centelleo líquido son mostrados en la Figura 2.10. Asimismo, en la Figura 2.11 se muestra el espectro de emisión de los productos de decaimiento del radio (^{226}Ra) obtenidos mediante la técnica de centelleo líquido.

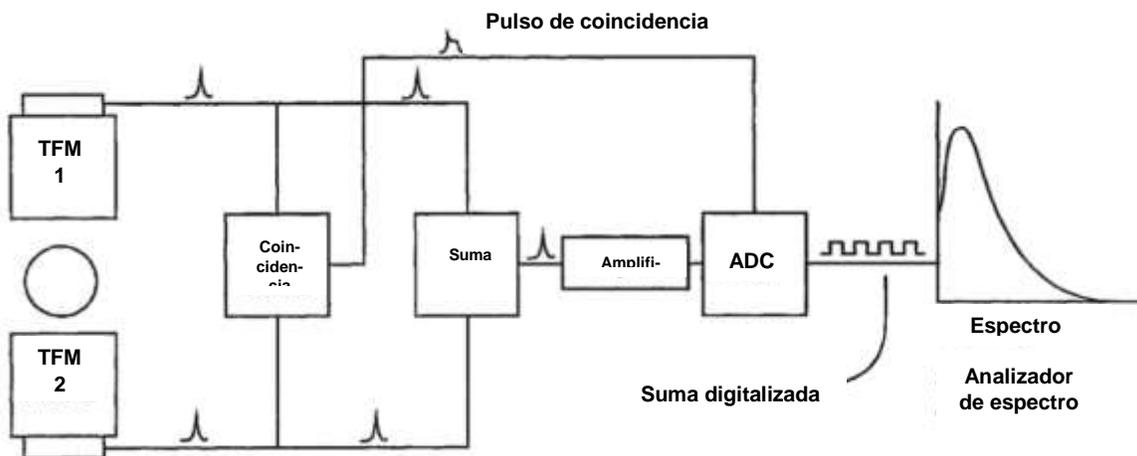


Figura 2.10 Diagrama de los componentes de un contador de centelleo líquido. Fuente: (L'Annunziata, 2012).

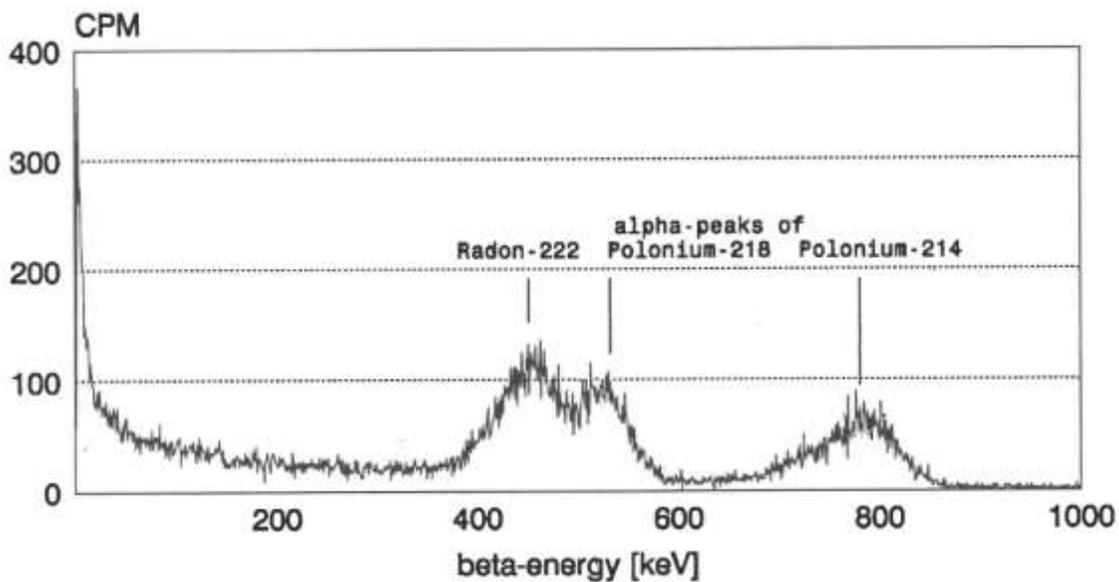


Figura 2.11 Espectro de los productos de decaimiento del radio (^{226}Ra) obtenidos mediante la técnica de centelleo líquido. Fuente: (Kappel, Keller, Kreienbrock & Nickels, 1992).

Los equipos de centelleo líquido recientes han incorporado circuitos electrónicos o discriminadores, que permiten separar los eventos producidos por la desintegración alfa y beta mediante el examen a los pulsos electrónicos producidos por los TFM. Por otro lado, se presentan algunas interferencias en el recuento, tales como:

a. Fenómeno de quenching

Se define como interferencia en la conversión de la energía, producto del decaimiento nuclear en fotones de luz emitida, procedentes de la muestra contenida en un vial de centelleo (L'Annunziata, 2012). Este fenómeno se manifiesta con la reducción de la tasa de conteos, como consecuencia de la disminución de la señal electrónica a la salida del tubo fotomultiplicador. Puede ser causado por 3 fenómenos conocidos como: quenching químico, por color y por ionización. En la Figura 2.12 se muestran las etapas del proceso en las que se puede dar el fenómeno de quenching.



Figura 2.12 Quenching durante la transferencia de energía en el proceso de centelleo líquido. Fuente: (L'Annunziata, 2012).

b. Problema de fondo

Aumento en la tasa de conteos generados a partir de la medición de una muestra, mediante el equipo de centelleo líquido. El fondo que se genera en un detector de centelleo líquido, puede tener su origen en la acción de

algún tipo de radiación ionizante en sí misma, no proveniente de los radionúclidos objeto del estudio, o mediante su interacción con alguno de los componentes que rodean el sistema de detección. Las fuentes de fondo se clasifican en función de su origen, en fuentes atenuables y no atenuables (Mosqueda Peña, 2009). Se muestra en la Figura 2.13 las principales causas del problema de fondo.

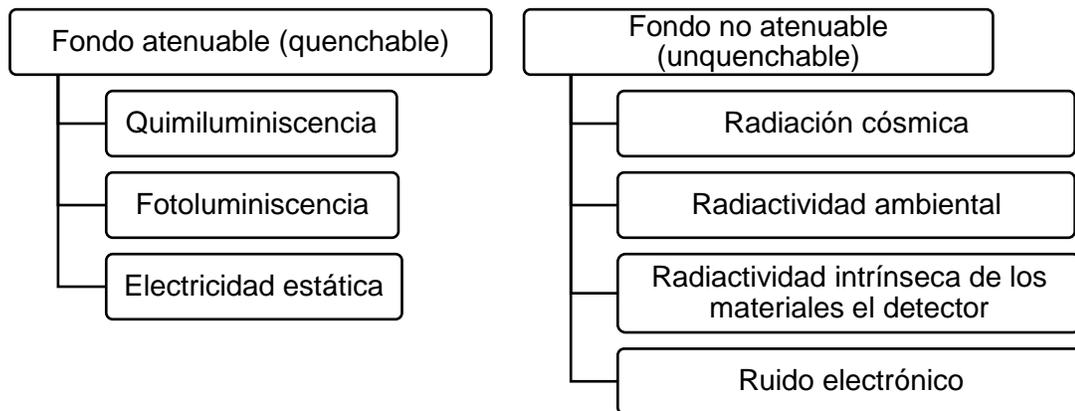


Figura 2.13 Principales causas del problema de fondo. Fuente: con base (L'Annunziata, 2012).

2.5. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA ANALÍTICA

Es un proceso que permite establecer evidencia documentada suficiente, mediante un fundamento estadístico obtenido a partir de estudios de laboratorio, con la finalidad de confirmar que los resultados obtenidos por el empleo de un método analítico cuentan con un alto grado de seguridad y cumplen con los requisitos previamente establecidos, según la finalidad prevista en determinadas aplicaciones analíticas. Debe de existir una validación si:

- a. Se utiliza un método nuevo que no ha sido validado anteriormente y se usará para la obtención de resultados representativos, o que requieren de una precisión y exactitud confiable.
- b. Si el método ya ha sido validado, pero se adapta con algunas condiciones diferentes a las que se tenían en el proceso de validación.

La validación está conformada por un conjunto de parámetros de desempeño que son condicionados a partir de criterios de aceptabilidad, donde al cumplir con cada uno de ellos, proporciona la confianza y seguridad por tratarse de un método que presenta resultados representativos y confiables.

En el caso de ser una validación de un nuevo método, se deben calcular todos los parámetros de desempeño, pero para el caso de una revalidación por modificación de condiciones, no es necesaria la reevaluación de todos los parámetros; esto dependerá de las modificaciones que se realicen, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Guía de parámetros para la validación de métodos analíticos.

No.	Parámetro a evaluar		Característica(s)	Evaluación de método Normalizado	Evaluación de método Modificado
1	Selectividad		Identificación del analito Interferencias	No	Sí
2	Linealidad		Rango lineal	Sí	Sí
3	Sensibilidad		Pendiente	Sí o No	Sí
4	Límites		Crítico (Lc) Detección (LoD) Cuantificación (LoQ)	Sí o No	Sí
5	Exactitud	Veracidad	Sesgo Recupera- ción	Sí	Sí

Continúa en pág. 55

Tabla 2.2 Guía de parámetros para la validación de métodos analíticos. Continuación

No.	Parámetro a evaluar		Característica(s)	Evaluación de método Normalizado	Evaluación de método Modificado
		Precisión	Repetibilidad Reproducibilidad	Sí	Sí
6	Robustez		Pruebas de parámetros	No	Sí o No
7	Incertidumbre		Valor de incertidumbre	Sí	Sí

Fuente: (Rodríguez Carpio, 2013).

A continuación, se explica en qué consiste cada uno de los parámetros de desempeño.

2.5.1. Selectividad

Dentro de un análisis es de vital importancia asegurarse que el equipo y la metodología posean la capacidad de determinar, exacta y específicamente, el analito de interés ante la existencia de componentes (interferencias); es decir, donde la medida que se ha atribuido al analito es solamente debido al analito y no a la presencia de otros componentes. Como principio general, la selectividad debe ser suficientemente buena para poder descartar cualquier interferencia (Umaña Hernández, 2008).

Por lo tanto, la selectividad se basa en:

a. Identificación del analito

El analito posee una señal característica propia del elemento, por lo tanto, esta señal le confiere una identidad al analito. El método, por lo tanto, tiene

que identificarlo según su identidad, dando la confianza que no se trata de otra especie que sea química o fisicoquímicamente similar.

b. Interferencia

La interferencia es la combinación, por superposición, de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio (Michelson, 2017). Por lo tanto, la señal que posee el analito puede verse afectada por elementos presentes en la muestra.

Algunos interferentes para el radón (^{222}Rn) son los otros isótopos naturales del radón, el torón (^{220}Rn) y actinón (^{219}Rn). Si se considera una mezcla de ellos, por los cortos periodos de desintegración de los últimos, resulta que en un minuto el actinón (^{219}Rn) habrá desaparecido prácticamente y una hora después lo hará el torón (^{220}Rn); por lo tanto, transcurrido el breve periodo de una hora, solo se hallaría presente el radón (^{222}Rn). La presencia de radio (^{228}Ra) contribuye en el conteo con un 1%, pero aumentaría significativamente los conteos, ya que emite cinco partículas por cada desintegración. Este último, al ser emisor gamma (4% de su energía) y alfa (4,87 MeV), y teniendo en cuenta que el equipo de centelleo líquido detecta partículas alfa, beta y gamma, y no realiza discriminación de energías, aumentaría el conteo y causaría una interpretación errónea de los resultados (Malcom, 2010).

2.5.2. Linealidad

Es una medida de la capacidad de un método analítico, que permite conocer la cercanía entre resultados obtenidos al emplear la metodología sobre el analito de interés con los resultados teóricos.

Para la evaluación de este parámetro donde se involucren concentraciones, es importante medir el analito en un rango de concentración donde se encuentre el valor probable, deseable o en el caso de comparación, con el valor del límite máximo permisible establecido en normas de interés.

Una vez seleccionado el rango, es necesario diseñar una gráfica con la tendencia lineal entre los resultados mostrados por el equipo y los resultados esperados, esperando un coeficiente de determinación (R^2) mayor o igual a 0.99, además de realizar una prueba estadística t-Student para reforzar al método lineal. Dicha prueba consiste en la evaluación del valor de $t_{calculado}$, calculado mediante la ecuación 2.2, el cual es comparado con el valor de $t_{tabulado}$, para un nivel de confianza del 95%, un contraste t de dos colas y (n-2) grados de libertad.

$$t_{calculado} = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

- |r| Valor absoluto del coeficiente de correlación
- $n - 2$ Número de grados de libertad
- r^2 Coeficiente de determinación

2.5.3. Sensibilidad

Se refiere a la medida de la capacidad de un método analítico a detectar cambios pequeños en la concentración del analito de interés. Se determina mediante la pendiente de la línea de calibración (pendiente de la gráfica de linealidad). El factor de sensibilidad se calcula mediante la ecuación 2.13. Donde implican valores bajos y altos de sensibilidad.

$$\gamma = \frac{m}{Si} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

- γ Sensibilidad analítica
- m Pendiente de la curva de calibración
- Si Desviación estándar de la medición

2.5.4. Límites

Para definir este parámetro de desempeño es necesario definir sus tres sub parámetros:

a. Límite de detección (LoD)

Es la cantidad o concentración de analito más pequeña en la muestra de prueba que puede distinguirse fiablemente de cero. En los sistemas analíticos donde el rango de validación no lo incluye o se aproxima, no es preciso que el límite de detección forme parte de la validación (Umaña Hernández, 2008).

b. Límite de cuantificación (LoQ)

Concentración más baja del analito que puede ser determinada con un nivel aceptable de precisión, repetibilidad y veracidad, aplicando la metodología de estudio.

c. Límite crítico (Lc)

El valor de la concentración o cantidad neta que en caso de superarse da lugar, para una probabilidad de error dada α , a la decisión de que la concentración o cantidad del analito presente en el material analizado es superior a la contenida en el material testigo (blanco) (Duffau, 2010).

2.5.5. Exactitud

Es la concordancia existente entre el resultado de un ensayo de un método analítico con un valor de referencia previamente aceptado. Para el caso de un método analítico, depende de la veracidad y la precisión.

a. Veracidad

Es una medida de la concordancia existente entre un valor promedio de una serie de resultados obtenidos a partir de ensayos analíticos con un valor ya conocido o de referencia.

I. Sesgo o error sistemático

Es la diferencia entre un resultado o una serie de resultados obtenidos a partir de la aplicación del método analítico y un valor asignado o de referencia. Cuanto más pequeño es el sesgo, mayor veracidad indica el método. Es obtenido a partir de la ecuación 2.14.

$$S' = X - Xa \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

- S' Sesgo
- X Lectura obtenida o valor promedio de las lecturas obtenidas.
- Xa Valor asignado, valor certificado del material de referencia o valor esperado.

II. Recuperación

Representa el rendimiento de detección de analito del método, para ello se añade una concentración conocida de analito a una muestra, que pasará a ser llamada muestra fortificada, para que el método la analice e identifique

la concentración de analito presente, comparando con una sin fortificar para conocer la fracción de analito que fue añadida a la muestra fortificada.

Se estima a partir de la ecuación 2.15 mediante los resultados del análisis de linealidad, comparándolos con la medición de un patrón por el equipo de centelleo líquido.

$$\%R = \frac{C_e - C_o}{C_a} * 100 \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde:

- $\%R$ Recuperación
- C_e Concentración de analito de la muestra enriquecida.
- C_o Concentración de analito medida en la muestra sin adicionar.
- C_a Concentración de analito adicionado a la muestra enriquecida.

b. Precisión

Es la medida de la concordancia de una serie de resultados obtenidos a partir de ensayos independientes, que se han ejecutado bajo condiciones previamente establecidas. Según la norma ASTM para radón (^{222}Rn) en agua, el rango de la desviación estándar aceptable para la precisión es del 10%. A diferencia de la exactitud, en este caso no se compara con un valor verdadero.

I. Repetibilidad

Precisión en condiciones de repetibilidad. Los resultados obtenidos de un ensayo independiente se ejecutan en lapsos cortos de tiempo bajo las mismas condiciones establecidas, tales como el mismo método, objeto de prueba, laboratorio, operador, equipo, etc.

Para su determinación es necesario calcular la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ec. 2.16}$$

$$\%CV = \frac{\sigma}{x} * 100 \quad \text{Ec. 2.17}$$

II. Reproducibilidad

Precisión en condiciones de reproducibilidad. Los resultados obtenidos de un ensayo se obtienen mediante el mismo método a partir del mismo objeto de prueba, pero con diferente operador, laboratorio y utilizando otro equipo. Para la evaluación de este parámetro es necesario calcular la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV).

2.5.6. Robustez

Es una medida de la capacidad de un método analítico de ser inalterado por variaciones pequeñas en las condiciones analíticas que puedan llegar a presentarse durante la puesta en marcha del método; identificando de este modo cuáles son las condiciones bajo las cuales arroja resultados confiables. Para desarrollar esta prueba es necesario identificar cuáles son las variaciones de los parámetros que pueden ser significativas al momento de desarrollar el procedimiento analítico, ejemplo de éstas son: la temperatura, pH, el cambio de analista, cambio de equipos, etc. Un método de ensayo es más robusto entre menos se vean afectados sus resultados, frente a una modificación de las condiciones analíticas.

2.5.7. Trazabilidad

Propiedad de los resultados de una medición o valor de un patrón por medio del cual la trazabilidad puede ser relacionada a referencias establecidas, usualmente a

patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena irrompible de comparaciones con incertidumbres expresadas. Se confirma a partir de la evaluación estadística t-Student.

2.5.8. Incertidumbre

En concordancia con el Centro Español de Metrología (2012), la incertidumbre se define como el parámetro que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, con base en la información usada en determinadas pruebas de laboratorio.

Para identificar las principales fuentes de incertidumbre se realizan técnicas para la identificación de causas, como por ejemplo el más reconocido diagrama de espigas.

La incertidumbre de la medición comprende generalmente muchos componentes. Estos pueden ser evaluados por el tipo de incertidumbres, tipo A y B, que están presentes en el método.

a. Evaluación de incertidumbre tipo A

Evaluación de un componente por un análisis estadístico de los valores de mediciones obtenidos en condiciones de medición definidas. Ejemplo: realizar varias mediciones en condiciones de repetibilidad.

b. Evaluación de incertidumbre tipo B

Evaluación de un componente de incertidumbre de la medición realizada por la evaluación basada en la información, obtenidos a partir de un certificado de calibración.

CAPÍTULO 3 : MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presenta la metodología empleada durante la parte práctica de la investigación, la cual se llevó a cabo en dos fases, la primera denominada fase de campo, consistió en la recolección y preservación de las muestras de agua de los pozos perforados por la ANDA ubicados en cada uno de los sitios muestreados, en ella se implementaron las respectivas técnicas de recolección según el radionúclido, realizando un correcto envasado y etiquetado de las muestras, además se completaron las hojas de muestreo con toda la información necesaria. Una vez tomadas las muestras se procedió a determinar la presencia de radio (^{226}Ra) y radón (^{222}Rn), cuantificando su concentración en aquellas muestras que registraron valores por arriba del blanco de medición. Para esto, se utilizaron equipos de laboratorio, reactivos y se tuvo acceso a las instalaciones de laboratorio del CIAN-FIA-UES, nombrando la segunda fase como, fase de laboratorio. Adicionalmente, se desarrolló la validación de las metodologías analíticas, esta parte fue de suma importancia debido que los métodos de análisis utilizados fueron adaptados según la nueva matriz de extracción y diferentes condiciones, lo que volvió necesario comprobar la confiabilidad de los resultados de las metodologías modificadas.

Fases de la investigación:

1. Fase de campo.
2. Fase de laboratorio.

A continuación se describen a profundidad cada una de las fases.

3.1. FASE DE CAMPO

La zona de estudio se localiza en el AMSS en donde se encuentra uno de los principales acuíferos reconocidos, el acuífero de San Salvador, identificado en la Depresión Central, donde los sitios de muestreo fueron seleccionados por el criterio de expertos del personal del laboratorio de la ANDA, además se detalla el muestreo que se realizó, las técnicas, preservación y envasado por cada radionúclido

3.1.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el AMSS específicamente en los municipios de Mejicanos, San Salvador y Santa Tecla, en la cual se encuentra uno de los principales acuíferos reconocidos, el acuífero de San Salvador, identificado en la Depresión Central.

Una de las principales zonas de recarga de los acuíferos identificados en la Depresión Central se localiza específicamente en las estructuras volcánicas: volcanes de San Salvador y Picacho, en donde la fracturación y el carácter escoriáceo de los flujos de lava hacen posible que aproximadamente hasta el 25% de las precipitaciones que caen sobre dichas zonas se infiltren (precipitación entre 1,800 y 2,000 mm/a) (ANDA-COSUDE, 2008). Es así que este acuífero alimenta gran cantidad de captaciones de aguas subterráneas (sitios de muestreo) destinadas al consumo humano, tras un pequeño tratamiento de desinfección. Las características hidrogeológicas están determinadas, en gran medida, por los fenómenos volcánicos y los procesos erosivos que han afectado a la zona, ya que existen áreas que han sido cubiertas, en gran medida por materiales lávicos (flujos de lavas andesítica y basáltica) y piroclásticos (pómez, cenizas volcánicas y tobas), dando lugar a los acuíferos detectados en el AMSS y en sus áreas aledañas.

Así los sitios de muestreo del presente estudio son los pozos perforados de la ANDA en el acuífero de San Salvador. Al extraer el agua, se almacena ya sea en cisternas o en tanques, de donde posteriormente se traslada a las cisternas de la planta, para luego ser distribuida a la red pública.

3.1.2. Hidrología de la zona

El Acuífero de San Salvador, presenta las siguientes características hidrogeológicas: hacia el sur, se ve limitado en su crecimiento por rocas pliocénicas de la Cordillera El Bálsamo que se considera una barrera negativa por su reducida permeabilidad, lo que hace que la escorrentía superficial y el flujo subterráneo se orienten hacia el noreste. La presencia del estrato volcán de San Salvador en el área de estudio constituye la principal zona de recarga de las formaciones acuíferas subterráneas del valle para lo cual su movimiento va desde las faldas del volcán de San Salvador en dirección Oeste – Este, Noroeste – Sureste (Ibarra Turcios, Campos Jarquín y Rivera, 2017).

El Acuífero de San Salvador está conformado por dos unidades hidrogeológicas identificadas como Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción y Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media (Barrera de Calderón, 2010). Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria. Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapillo, tobas) teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como

consecuencia del grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

3.1.3. Selección de puntos de muestreo

Los sitios de muestreo fueron seleccionados por el criterio de expertos del personal del laboratorio de la ANDA, tomando en cuenta para la selección de los pozos la altitud sobre el nivel del mar que abarca la zona alta, media y baja que representa el agua subterránea abastecida por el acuífero de San Salvador. En la Figura 3.1 se expone la ubicación de los puntos sugeridos.

3.1.4. Puntos seleccionados para la extracción de agua subterránea

Los cinco sitios de muestreo para el desarrollo de la investigación fueron proporcionados y seleccionados por la ANDA (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Sitios de muestreo de agua subterránea.

Nombre del sitio	Altitud (m.s.n.m)	Coordenadas geográficas	
Rio Urbina	608	13°42'36.1"N	89°10'35.2"OE
El Socorro	685	13°42'7.4"N	89°12'8.4"OE
Centroamérica	711	13°42'29.1"N	89°12'44.1"OE
La Gloria	770	13°44'15.3"N	89°13'14.4"OE
El Espino	839	13°40'42.7"N	89°15'17.6"OE

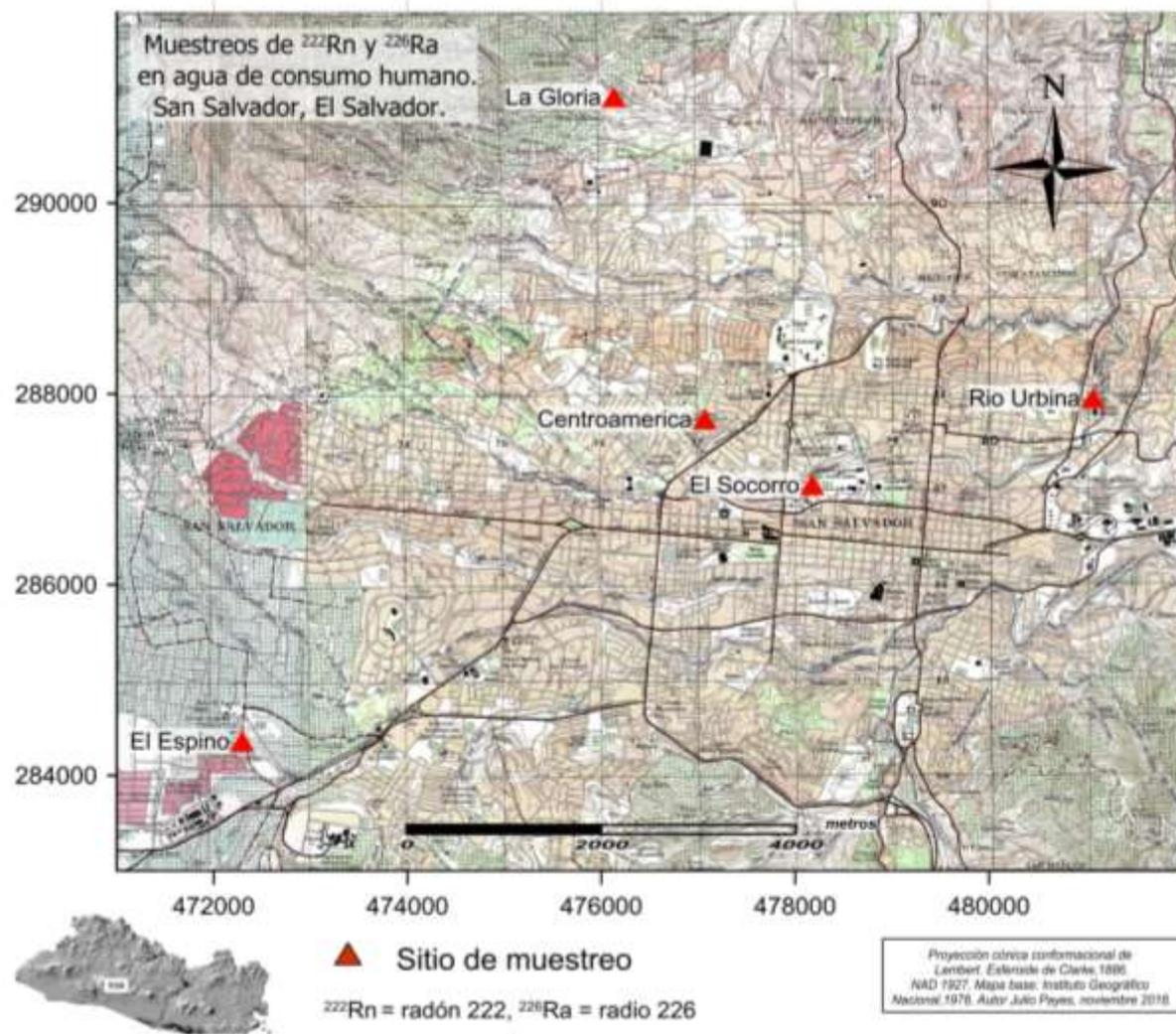


Figura 3.1 Ubicación de sitios de muestreo. Fuente: con base al mapa del Instituto Geográfico Nacional (1978).

3.1.5. Muestreo

La recolección de muestras se realizó la primera semana de cada mes durante 5 meses para los 5 sitios de muestreo, que incluye abril, mayo, junio, julio y agosto del año 2018. Tomando en cuenta que el presente estudio es exploratorio y es el primero que se realiza, se orienta a descubrir la presencia de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en agua para consumo humano. Cabe destacar la importancia de la confiabilidad de los resultados de cada análisis, razón por la cual se realizó la validación de cada método analítico utilizado y seguidamente se dedicó a muestrear para obtener una base de mediciones, generando así una tendencia que permite valorar el estado de la calidad radiológica del agua de consumo humano proveniente de los pozos perforados de la ANDA que extraen el agua subterránea del acuífero de San Salvador. En este sentido se pretende que los estudios que se realicen a futuro se dediquen a una red de monitoreo, teniendo como referencia los primeros datos generados y la reproducción de las metodologías validadas.

3.1.6. Materiales y equipo utilizados en el muestreo

La recolección de muestras se realizó de forma representativa. En la Tabla 3.2 se detalla todo el material y equipo que fue utilizado para cada jornada de muestreo.

Tabla 3.2 Material y equipo necesario para el desarrollo de cada jornada de muestreo.

	Descripción	Cantidad
Material	Recipientes de vidrio borosilicato, 5 para muestras destinadas a análisis de radio (^{226}Ra) y 5 para muestras destinadas a análisis de radón (^{222}Rn).	10

Continúa en pág. 69

Tabla 3.2 Material y equipo necesario para el desarrollo de cada jornada de muestreo.

Continuación

	Descripción	Cantidad
	Hielera destinada al almacenamiento de muestras de gas radón (^{222}Rn) ¹	1
	Bolso de muestreo	1
	Caja de almacenamiento con guantes, depósito adaptado para la sonda (capacidad = 1 galón)	1
	Beaker para contener recipiente de ácido nítrico y gotero	1
	Hojas de muestreo	10
Equipo	Sonda multiparámetros YSI profesional Plus para análisis de propiedades in-situ de la muestra.	1

Cabe destacar que, cada recipiente que fue utilizado para la recolección de muestras fue etiquetado, el diseño es mostrado en el Anexo 3.

3.1.7. Selección de envases

El material de los envases, debe ser inerte, de manera que no produzca alteraciones en la composición de la muestra, tales como pérdidas por adsorción, volatilización o contaminación por materias extrañas. En general los materiales más utilizados son el vidrio neutro y el polietileno (PE) de alta densidad, requiriéndose en algunos casos materiales más específicos como por ejemplo el vidrio ámbar o el politetrafluoretileno (PTFE), ya sea para el envase mismo o para sus tapas. Tomando en cuenta lo anterior, los envases sugeridos para la recolección de muestras fueron, un envase de vidrio o un envase plástico tipo PE, mostrados en la Figura 3.2.

¹ La hielera es únicamente necesaria para muestras destinadas al análisis de radón (^{222}Rn), para fines de su preservación, caso contrario el radio (^{226}Ra) que por su naturaleza no necesita cambios en la temperatura del medio para preservarse.



Figura 3.2 Envases utilizados durante la recolección de la muestra, envase de vidrio (izquierda) y envase de plástico (derecha).

Debido a la situación de contar con dos posibles envases para la recolección de las muestras se realizó una prueba exploratoria, en la cual se recolectaron muestras de agua de chorro en un envase de vidrio y en un envase de plástico tipo PE para medir radón (^{222}Rn) y mediante el uso de la prueba t-Student, se compararon ambos resultados, donde se concluyó que no existían diferencias significativas entre el uso de ambos envases. Los resultados obtenidos a partir de dicha prueba son mostrados en el Anexo 4.

3.1.8. Volumen de la muestra tomada en campo

En la norma ASTM D5072-09 para radón (^{222}Rn) en agua, se establece que el volumen de muestra a tomar es 10mL. En este mismo sentido la investigación presentada por Rodríguez Carpio (2013), utilizó 10mL de volumen de muestra donde pudo observar un problema al registrar los CPM de la muestra, ya que estos conteos eran muy cercanos al fondo. Además, Horiuchi, Ishii & Kobayashi (1993) sugieren trabajar con volúmenes de muestra de 1L ya que con este volumen se asegura una buena cantidad de radiactividad para el análisis.

Por tales motivos, se procedió a la realización de pruebas en la que se evaluaron diferentes volúmenes de muestra (10mL y 1000mL) para determinar el más conveniente, encontrándose que existen diferencias significativas entre los resultados de las pruebas de volumen. Cabe destacar que, la muestra con un volumen de 10mL presentó valores de actividad muy bajos comparados con la muestra de 1000mL, por lo que se trabajó con un volumen de recolección de agua de 1000mL. Los resultados que fueron obtenidos se muestran en el Anexo 5.

3.1.9. Técnicas de recolección de las muestras de agua en pozos perforados

Para realizar esta tarea con éxito fueron necesarias dos personas del equipo de investigación, un especialista del CIAN-FIA-UES, un técnico, un motorista de la institución (ANDA) y un medio de transporte para trasladar el equipo y muestras de agua.

Al momento de llegar a cada sitio de muestreo se procedió a la captura de fotografías de los pozos perforados de la ANDA, que permitieron visualizar las condiciones externas en las que se encuentran, además de describirlas en hojas de muestreos, las cuales son presentadas en el Anexo 6.

En este apartado se expone una breve reseña de los métodos que fueron utilizados para la recolección de las muestras en cada sitio. Cada una presentada en un flujo-grama para su mayor comprensión.

a. **Recolección de muestras para análisis de radón (^{222}Rn)**

El muestreo se realizó de conformidad con las normas ISO 5667-1, 2 y 3 e ISO 13164 - 1 para la toma de muestras para la medición de radón (^{222}Rn) en agua. Los pasos que fueron seguidos se presentan en la Figura 3.3.

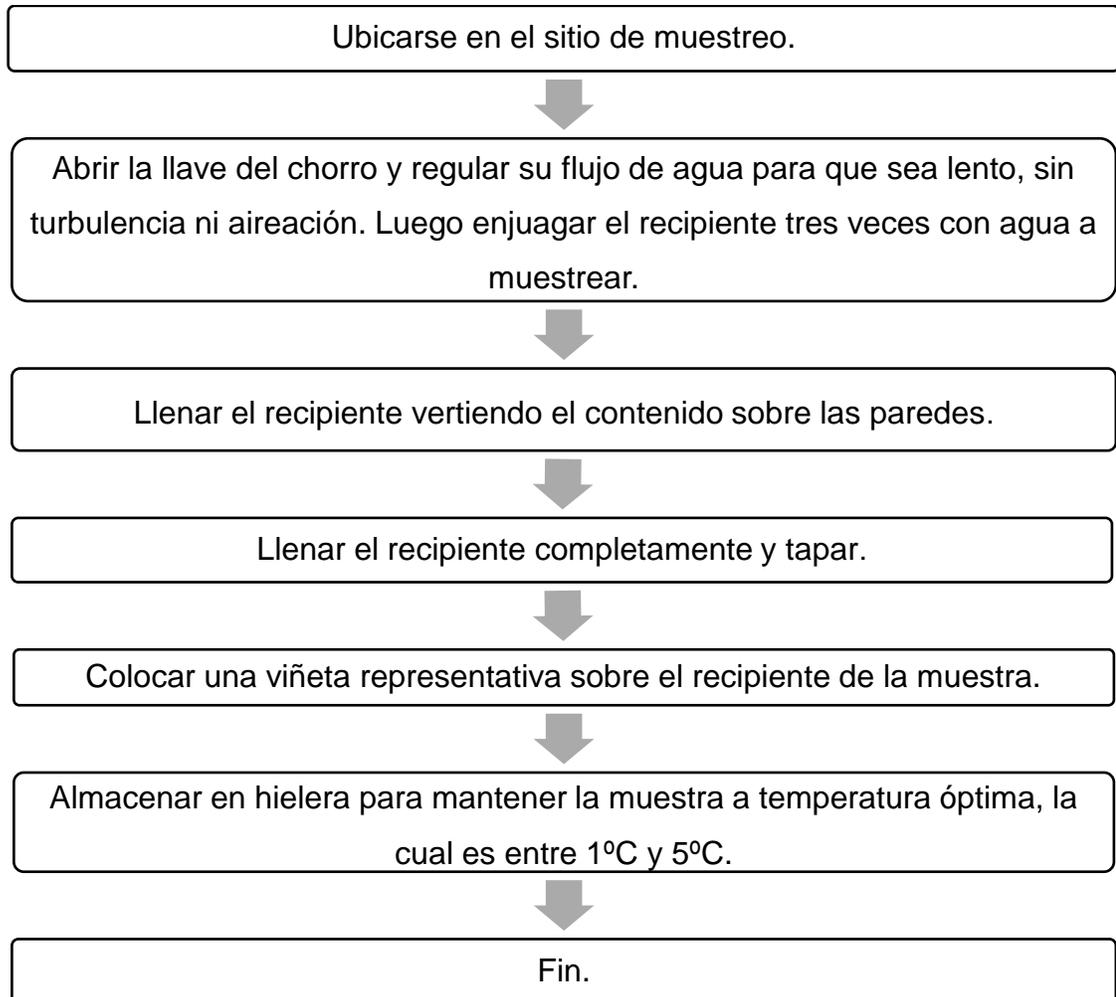


Figura 3.3 Procedimiento para la recolección de muestras para análisis de radón (^{222}Rn) en agua. Fuente: con base a las normas ISO 5667-1, 2 y 3 e ISO 13164-1.

b. Recolección de muestras para análisis de radio (^{226}Ra)

El muestreo se realizó de conformidad con las normas ISO 5667-1, 2 y 3 para la recolección de muestras para la medición de radio (^{226}Ra) en agua, los pasos que fueron seguidos son presentados en la Figura 3.4.

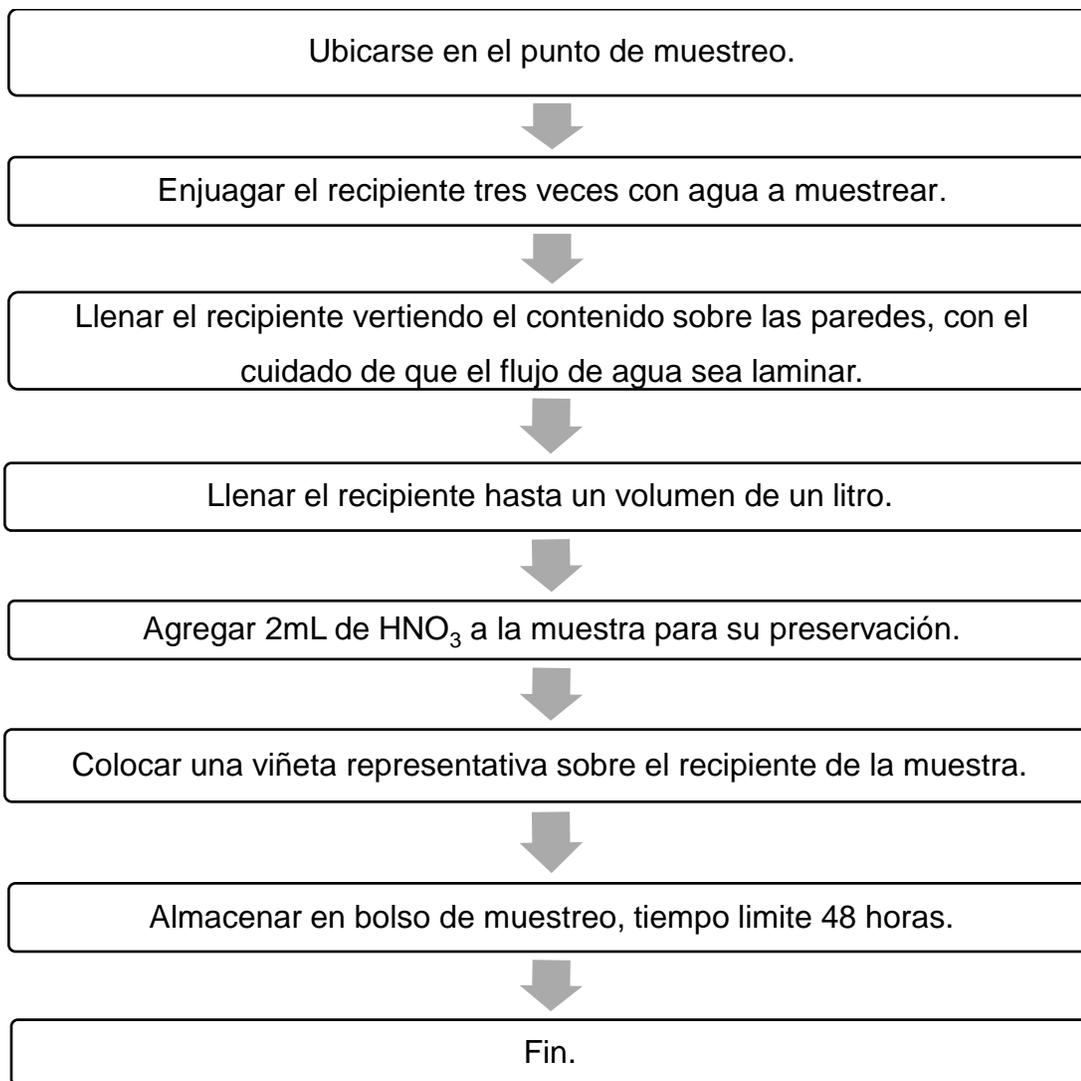


Figura 3.4 Procedimiento para la recolección de muestras para análisis de radio (^{226}Ra). Fuente: Con base a las normas ISO 5667-1, 2 y 3.

c. Medición en campo de propiedades in-situ

Se utilizó una sonda multiparámetros YSI profesional Plus que permitió medir los siguientes parámetros: pH, temperatura, cloruros, TDS, OD y conductividad en agua. El procedimiento consistió en la recolección de una muestra de agua dentro de un depósito adaptado para el ingreso de la sonda. Su correcta utilización se muestra en la Figura 3.5.

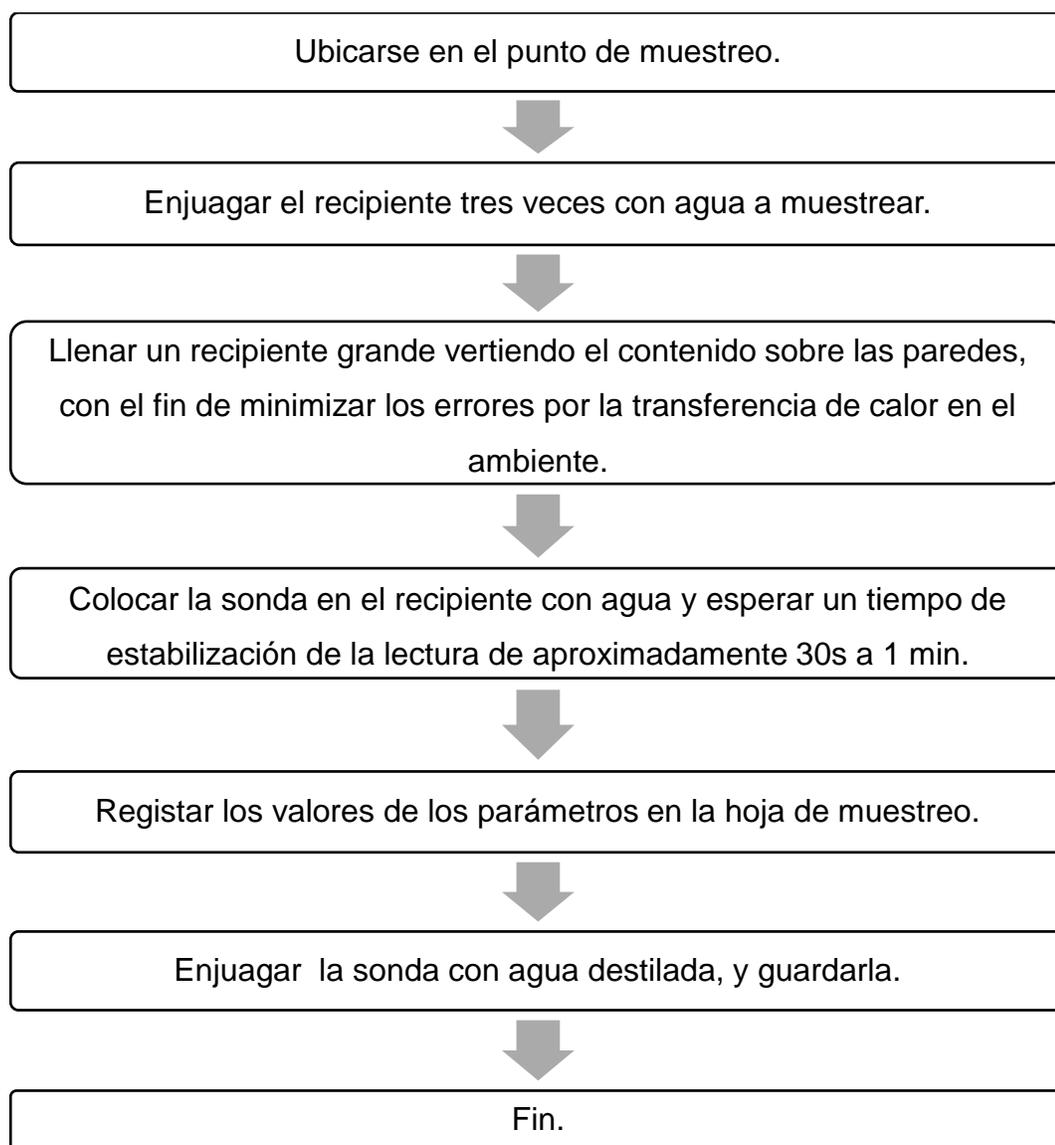


Figura 3.5 Procedimiento para la medición en campo de propiedades in-situ.

3.1.10. Preservación y envasado

Una vez recolectadas las muestras se mantuvieron bajo ciertas condiciones para los respectivos análisis, por lo que fue necesaria una preservación desde el momento de la finalización de la toma de muestra hasta el momento de su análisis o pretratamiento. En la Tabla 3.3 se menciona la preservación conveniente que se realizó para las muestras destinadas al análisis de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra).

Cabe destacar que, el gas radón (^{222}Rn) posee un mayor coeficiente de difusión en aire que en agua, lo que indica que éste tiene afinidad de utilizar el aire como medio de transporte, buscando el escape del recipiente al medio exterior, por lo tanto, en muestras para análisis de radón (^{222}Rn) fue necesario preservar a temperaturas bajas para conferirle un mayor coeficiente de difusión al agua y así evitar que el gas escapara del recipiente. Con respecto a las muestras para análisis de radio (^{226}Ra), fue necesario mantener la muestra en medio ácido para evitar la proliferación microbiana y efectos de absorción.

Tabla 3.3 Condiciones de preservación y envasado para el análisis de muestras de agua subterránea.

Muestra	Parámetro	Tipo de recipiente	Volumen	Transporte	Técnica de preservación	Tiempo máximo de preservación antes del análisis
Agua subterránea de pozo	Medición de radionúclido radón (^{222}Rn)	VB o P	1 L	Bajo hielo	Enfriar entre 1°C y 5°C	2 días
	Medición de radionúclido radio (^{226}Ra)	VB o P	1 L	En bolso de muestreo	Acidificar con HNO_3 (2mL por litro de muestra)	2 meses

VB: botella de vidrio de borosilicato.

P: botella plástica de PE.

Fuente: Con base a la norma ISO 5667-3.

3.2. FASE DE LABORATORIO

Para evaluar la presencia de radionúclidos disueltos en las muestras de agua subterránea del acuífero de San Salvador, fue necesario verificar si existía presencia de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en las muestras, para luego, en caso de comprobar su existencia, medir la concentración de dichos radionúclidos en cada muestra. Lo que hizo necesario el uso de metodologías validadas que garanticen la confiabilidad de los resultados.

Los métodos que fueron aplicados para el desarrollo de la investigación son:

- a. Para análisis de radón (^{222}Rn): Método ASTM D5072-09.
- b. Para análisis de radio (^{226}Ra): Método ARCAL RLA/5/0/48.

Para el análisis correspondiente a las muestras de agua recolectadas en los pozos de la ANDA fue necesario que estas contaran con condiciones establecidas según el parámetro a evaluar, para ello se volvió necesario un tratamiento previo que garantizara que las muestras se encontraban con las propiedades adecuadas listas para su análisis.

Condiciones según análisis de:

- a. Radón (^{222}Rn): Muestras a baja temperatura.
- b. Radio (^{226}Ra): Muestras en forma de precipitado.

Además, se demostró la viabilidad de los métodos analíticos ASTM D5072-09 y ARCAL RLA/5/0/48 para la determinación de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de agua, respectivamente. Esto mediante el análisis de parámetros de desempeño, que anteriormente fueron estimados por Rodríguez Carpio (2013), los cuales fueron evaluados previamente a los análisis de muestras de agua destinadas a consumo humano ya que se trata de métodos normalizados que en la presente investigación sufren modificaciones, tales como el uso de otra matriz y

cambio de analistas. Con respecto a la selección de los parámetros de desempeño, esta se hizo mediante el examen de la Tabla 2.2.

Para el desarrollo de la validación de ambas metodologías fue necesario elaborar un plan de validación para cada una de ellas con el fin de definir el diseño experimental, estos son mostrados en el Anexo 7.

3.2.1. Ubicación

La fase de laboratorio se desarrolló en el laboratorio del CIAN-FIA-UES.

3.2.2. Equipo de centelleo líquido

El equipo que fue utilizado es el de centelleo líquido TRICARB-2100 PACKARD, para la detección de la radiación ionizante generada por los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) (Ver Figura 3.6).



Figura 3.6 Equipo de centelleo líquido TRICARB-2100 PACKARD, del CIAN-FIA-UES.

a. Preparación del coctel de centelleo

Se disolvieron 0.40 g del soluto primario PPO (2,5 difenil oxazol) y 0.01 g del secundario POPOP (1-4 bis 2-(5 feniloxazolil) benceno) por 100mL de tolueno. Todos grados centelleo.

b. Viales

El vial, en el cual se introducen las muestras junto con el coctel de centelleo, juega un papel importante en este proceso, ya que sus características pueden influir en los resultados obtenidos mediante el equipo de centelleo líquido. Los tipos de viales utilizados en centelleo líquido son de tereftalato de polietileno (PET) y de vidrio (ver Figura 3.7).



Figura 3.7 Viales de vidrio (izquierda) y PET (derecha)

En la presente investigación se utilizaron viales de plástico tipo PET para el análisis de muestras de radón (^{222}Rn), esto se fundamenta en los resultados obtenidos por Rodríguez Carpio (2013), el cual realizó pruebas de diferenciación entre los tipos de viales (vidrio y PET) a utilizar en el análisis de dicho radionúclido en muestras de agua, encontrando que los viales de vidrio presentan efectos de quenching, además los resultados poseen una mayor desviación estándar y coeficiente de variación, en comparación con

los viales de PET. Por otro lado, con respecto al análisis de las muestras de radio (^{226}Ra) no se utilizaron viales de PET, ya que estos resultan poco recomendables si se desea realizar las mediciones después de algunos días. Por tal motivo, se utilizaron viales de vidrio para dichas mediciones.

3.2.3. Método ASTM D5072-09 radón (^{222}Rn) en agua

La metodología elegida para analizar radón (^{222}Rn) en la investigación fue la que dicta la norma D5072-09 “Standard Test Method for Radon in Drinking Water” de American Society for Testing and Materials (ASTM).

a. ¿En qué consiste?

El método consiste en el aprovechamiento del diferencial de coeficiente de difusión del gas en solventes orgánicos frente al agua, agregando un coctel a base de tolueno a muestras de un litro de agua, esperando su difusión agua- coctel, para posteriormente extraer el coctel, lo que permite concentrar el radón (^{222}Rn) de una muestra de un litro de agua a un vial de 20mL propio para el equipo de centelleo líquido en el que se realiza el respectivo análisis.

La norma fue elegida debido a que se cuenta con el equipo, materiales y reactivos necesarios para desarrollar la metodología, además de contar con resultados de análisis y validación que se hizo anteriormente por Rodríguez Carpio (2013), lo que permite únicamente revalidar la metodología adaptándola a la nueva matriz (pozos perforados de la ANDA).

b. Modificaciones

Como se mencionó anteriormente, este método fue desarrollado tomando como base, algunas modificaciones propuestas por Rodríguez Carpio (2013). Las modificaciones que se implementaron en la metodología para

la detección de radón (^{222}Rn) con respecto a dicho trabajo de investigación, fueron las siguientes:

- I. La matriz de muestra: En la investigación de referencia se trabajó con aguas termales con temperaturas cercanas a los 60°C ; mientras que para la presente investigación se trabajó en matrices de agua subterránea destinada a consumo humano.
- II. Frascos de recolección y almacenamiento de muestra: En la investigación de referencia se almacenaba la muestra en frascos de polipropileno (PP), en la presente investigación se almacenaron en frascos de vidrio de borosilicato.

Debido a las modificaciones anteriores, se volvió necesario hacer una revalidación del método que garantizara que los cambios no exceden los requisitos de desempeño del método original.

c. Descripción de actividades

Para el análisis de radón (^{222}Rn) en agua, utilizando el método ASTM D5072-09, es necesario realizar diferentes actividades que a continuación se detallan:

I. Preparación de muestra blanco para radón (^{222}Rn)

Se añade 1L de agua destilada en un recipiente de vidrio. Tanto como el procedimiento para el pretratamiento y medición de radón (^{222}Rn) en la muestra blanco, son los mismos que se utilizaron para el análisis de las muestras de agua de pozo.

II. Pretratamiento de las muestras de agua para análisis de radón (^{222}Rn)

Para este análisis se tiene en cuenta que el radón (^{222}Rn) es un gas inerte y se difunde fácilmente a través de distintos medios, como el del aire. Por lo tanto, debido a su naturaleza gaseosa el mayor riesgo es la fuga de este, por lo que fue necesario tener un cuidado meticuloso en el almacenamiento y transporte de la muestra. Sin embargo, aprovechando los beneficios de su naturaleza (mayor solubilidad del gas en solventes orgánicos frente al universal), se hace innecesario un tratamiento previo a su análisis, debido a que la base del coctel centellador es de tolueno, lo que permite la difusión agua-coctel, para posteriormente extraer el coctel y concentrar el radón (^{222}Rn) en un vial para su respectivo análisis mediante el equipo de centelleo líquido. En la Figura 3.8 se muestran las condiciones necesarias para evitar fugas del gas.



Figura 3.8 Condiciones óptimas para el transporte y almacenamiento de muestras de agua para el análisis de radón (^{222}Rn).

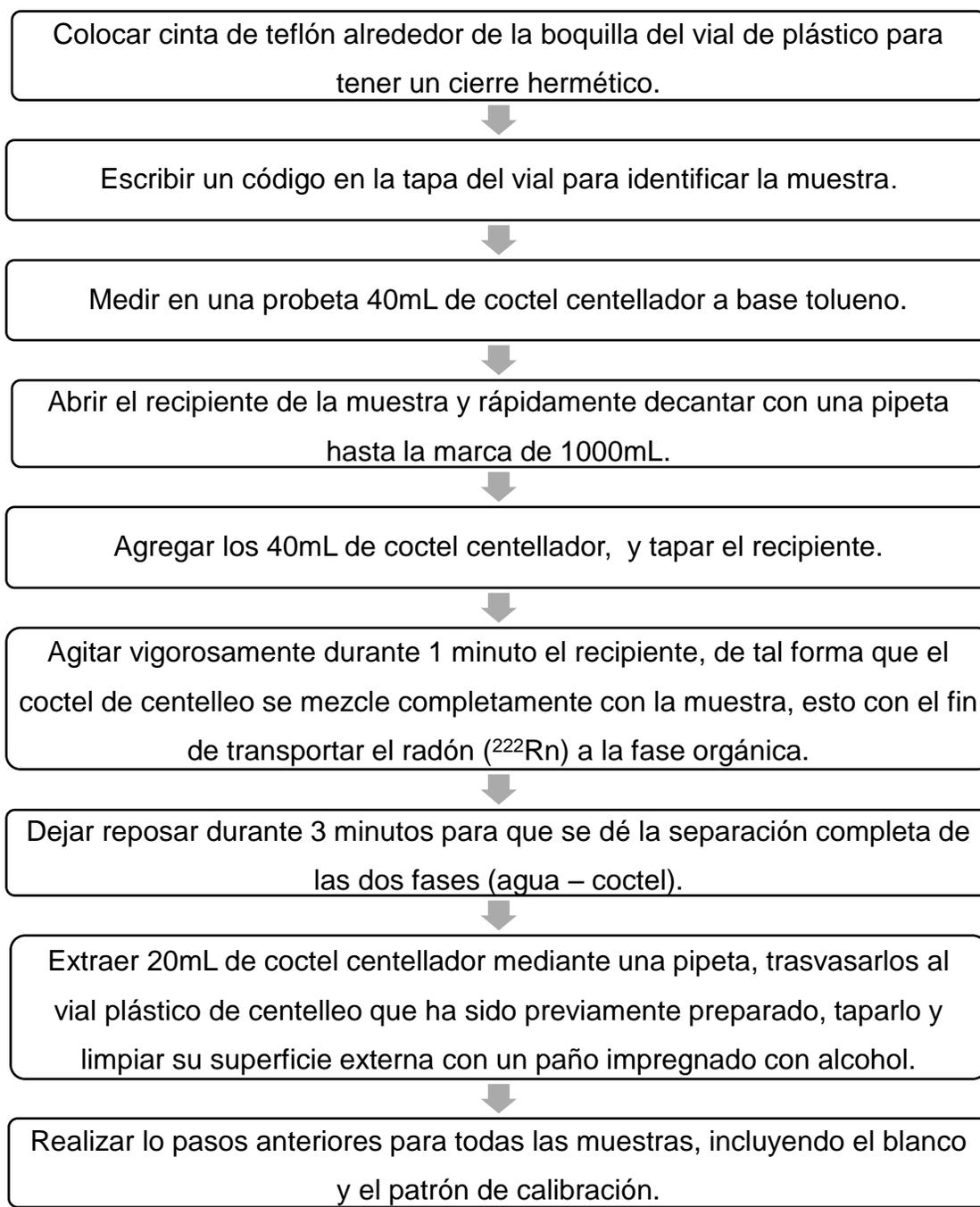
Dentro del correcto cuidado de las muestras, es vital cerrar los frascos lo mejor posible, dado que el gas necesita un espacio mínimo para poder transportarse al aire, y si esto sucede, el resultado de la medición no muestra la cantidad real de radón (^{222}Rn) existente en la muestra. Los materiales cuya utilización fue necesaria antes de cada análisis de radón (^{222}Rn), se muestran en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Materiales necesarios para el análisis de radón (^{222}Rn) en agua de consumo humano.

III. Procedimiento adaptado para la medición de radón (^{222}Rn)

Una vez teniendo las muestras en el laboratorio se siguió el procedimiento mostrado en la Figura 3.10.



Continúa en página 85.



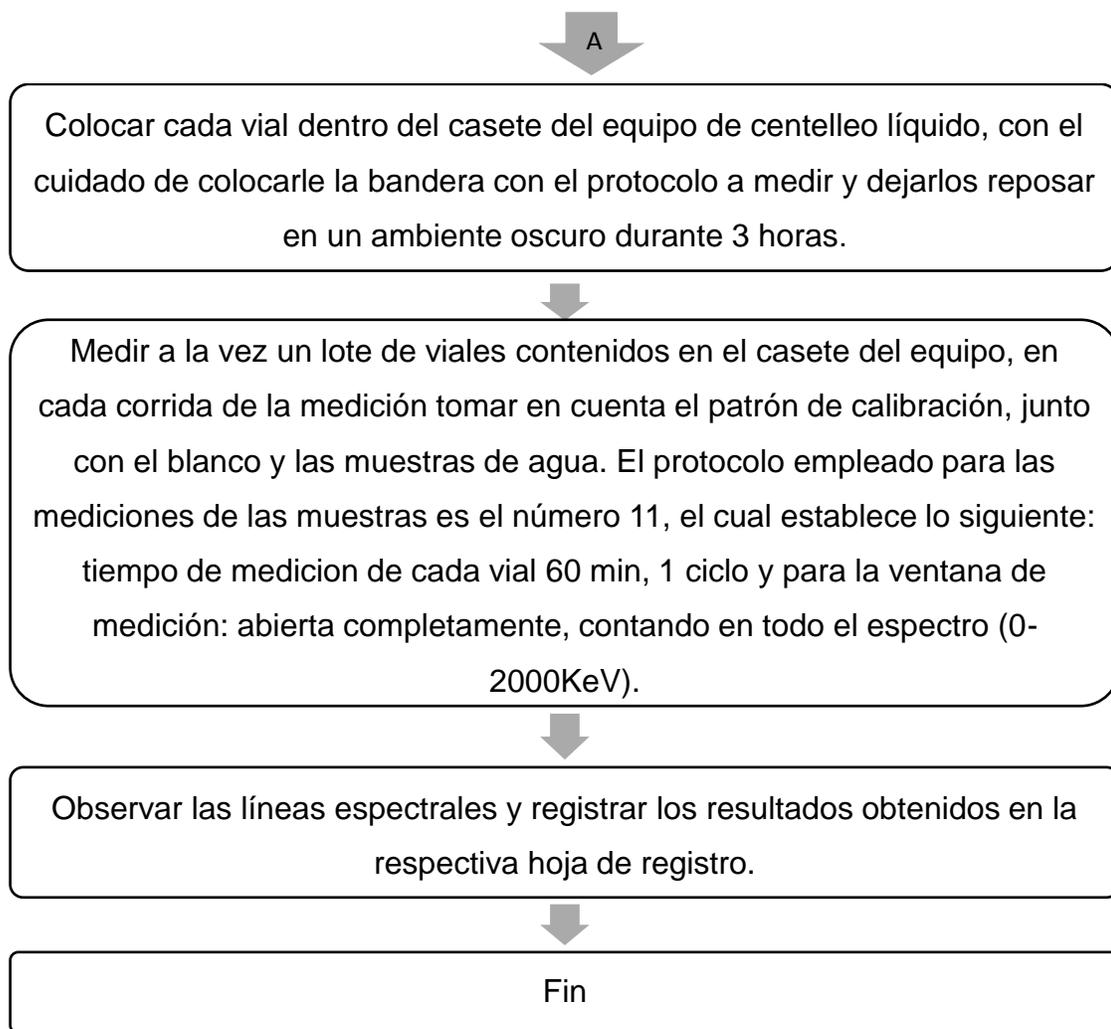


Figura 3.10 Procedimiento para la medición de radón (^{222}Rn) en muestras de agua.
Fuente: Con base a la metodología adaptada por Rodríguez Carpio (2013).

IV. Cálculo para actividad de radón (^{222}Rn)

Una vez obtenidos los conteos mediante el equipo de centelleo líquido, se procedió al cálculo de la actividad de radón (^{222}Rn) para cada muestra en Bq/L a partir de la ecuación 3.1:

$$AC = \frac{R_n}{(CF)(D)(V_a)} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Dónde:

AC Concentración de la actividad de radón (^{222}Rn) (Bq/L)

R_n Tasa de conteos netos (s^{-1})

CF Factor de calibración

D Factor de corrección por decaimiento

V_a Volumen de la muestra analizada

La tasa de conteos netos (R_n) se determinó a partir de:

$$R_n = R_a - R_b \quad \text{Ec. 3.2}$$

Dónde:

R_a Tasa de conteo de la muestra (s^{-1})

R_b Tasa de conteos del blanco (s^{-1})

El factor de corrección por decaimiento (D) fue calculado a partir de:

$$D = e^{\left(-\frac{0.693(T)}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Dónde:

T Tiempo transcurrido en días desde la colección de la muestra

$t_{\frac{1}{2}}$ Tiempo de vida media del radón (^{222}Rn) (3,82 días)²

Además, el factor de calibración (CF) fue calculado mediante la ecuación 3.4.

$$CF = \frac{(C_{CS} - C_B)}{A_{CS}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

² De acuerdo con el método ASTM (2009), el tiempo de vida media del radón (^{222}Rn) es 3.82 días.

Dónde:

C_{CS} Tasa de conteo del estándar de calibración (s^{-1})

C_B Tasa de conteo de la muestra blanco (s^{-1})

A_{CS} Actividad del estándar de calibración (Bq)

De esta manera se obtuvo la concentración (actividad) de radón (^{222}Rn) para todas las muestras.

d. Validación de metodología

En este apartado, se explica la forma en que se analizaron los parámetros de desempeño para la validación de la metodología analítica.

I. Linealidad

Para trazar la línea correspondiente al parámetro de linealidad fue necesario generar mediante el equipo de centelleo líquido datos de resultados de conteos versus datos específicos de actividad (Bq/L) por lo tanto se prepararon 7 muestras patrón con actividades diferentes de radón (^{222}Rn) mostradas en la Tabla 3.4, que abarcaron un rango de 0.5 Bq/L hasta 12 Bq/L, aproximadamente. Con los resultados obtenidos se creó un gráfico de conteos versus concentración, el cual se evaluó mediante la prueba estadística t-Student.

Tabla 3.4 Actividades teóricas de muestras patrón de radón (^{222}Rn) para análisis de linealidad.

N.º	Actividad (Bq/L)
1	0.50
2	1.00
3	3.00
4	5.00

Continúa en pág. 88

Tabla 3.4 Actividades teóricas de muestras patrón de radón (^{222}Rn) para análisis de linealidad. Continuación

N.º	Actividad (Bq/L)
5	7.00
6	9.00
7	12.00

Para obtener las actividades propuestas en la Tabla 3.4 se utilizó el patrón NIST- 01, en la Tabla 3.5 se presenta la cantidad de patrón que fue necesario para preparar dichas actividades en un litro de solución, así mismo se presenta una corrección del volumen de patrón a agregar para disminuir el error, esto fue posible de lograr a partir de una reducción en la cantidad de extracción mediante las micropipetas.

Tabla 3.5 Cantidad de patrón NIST-01 necesario para la preparación de actividades teóricas de radón (^{222}Rn).

Patrones	Cantidad NIST-01 (μL)	Propuesta	Actividad teórica Bq/L	Cantidad de extracciones de patrón NIST-01 en pipetas		
				Pipeta de 2000 μL	Pipeta de 200 μL	Pipeta de 20 μL
0.5	109	100	0.46			5
1	219	200	0.91		1	
3	657	600	2.74		3	
5	1095	1000	4.57		5	
9	1971	2000	9.13	1		
12	2628	2600	11.87	2	3	
TOTAL		8100				

En la Tabla 3.6 se muestran las actividades que en teoría fueron preparadas para el análisis de la linealidad a partir de correcciones en la cantidad de patrón NIST 01 disuelto en 1L de agua.

Tabla 3.6 Actividades teóricas modificadas de muestras patrón de radón (^{222}Rn).

N.º	Actividad teórica (Bq/L)
1	0.46
2	0.91
3	2.74
4	4.57
5	7.31
6	9.13
7	11.87

Adicionalmente, fue necesario preparar y analizar una muestra blanca para utilizar dicho resultado en la evaluación de los límites del método.

II. Sensibilidad

El factor de sensibilidad se calculó en base a los resultados obtenidos en la linealidad, se tomó en cuenta la desviación estándar de la actividad de 3 muestras patrón (S_i) y la pendiente del gráfico concentración vs respuesta (m), utilizando la ecuación 2.13. Las muestras patrón que fueron utilizadas para dicho calculo, fueron las siguientes: 0.46 Bq/L, 4.57 Bq/L y 11.87 Bq/L.

III. Límites

Se prepararon 7 muestras de blancos con agua destilada de 1L. Cada uno de ellos preparado en diferentes ocasiones, en la Tabla 3.7, se muestran de qué análisis se extrajo el dato de la respuesta del equipo de centelleo líquido, para las muestras blanco.

Tabla 3.7 Muestras blanco para análisis de radón (^{222}Rn).

Extracción del resultado de medición de radón (^{222}Rn) en blancos analizados en:	Primer muestreo
	Segundo muestreo
	Tercer muestreo
	Cuarto muestreo
	Quinto muestreo
	Linealidad
	Elección de recipiente

a. Límite de detección (LoD)

Se estimó con la ecuación 3.5, tomando en cuenta los resultados de las 7 muestras blanco para radón (^{222}Rn) de agua destilada.

$$AMD = \frac{\left(\frac{2.71J}{t}\right) + 0.65\sqrt{\frac{R_B}{t}}}{(CF)(D)(Va)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Dónde:

AMD	Actividad mínima detectable de radón (^{222}Rn) (Bq/L)
J	Índice de dispersión del conteo neto producido por radón (^{222}Rn)
R_B	Tasa de recuento del blanco (s^{-1})

t	Tiempo de conteo de la muestra y del blanco (s)
CF	Factor de calibración
D	Factor de corrección de decaimiento
Va	Volumen de la muestra analizada

b. Límite de cuantificación (LoQ)

Se estimó utilizando 10 veces la desviación estándar de los conteos de fondo de los 7 blancos y su promedio, calculado con la ecuación 3.6.

$$LoQ = 0 + 10s \quad \text{Ec. 3.6}$$

Dónde:

s Desviación estándar

c. Límite crítico

Utilizando los resultados de los 7 blancos, se obtuvo este límite utilizando la ecuación 3.7.

$$Lc = \frac{2.33 \sqrt{\frac{R_B}{t}}}{(CF)(D)(Va)} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Dónde:

Lc Valor crítico de la concentración de actividad de radón (^{222}Rn) (Bq/L)

R_B Tasa de recuento de blanco (s⁻¹)

t Tiempo de conteo de la muestra y del blanco (s)

CF Factor de calibración

D Factor de corrección de decaimiento

Va Volumen de la muestra analizada

IV. Exactitud

El término “exactitud”, esta aplicado a un conjunto de resultados de un ensayo, y supone una combinación de componentes aleatorios y un componente común de error sistemático o sesgo. Cuando se aplica a un método de ensayo, el término “exactitud” se refiere a una combinación de veracidad y precisión.

a. Veracidad

i. Sesgo

Fue calculado para todos los resultados obtenidos de las muestras patrón preparadas para el cálculo de la linealidad en las pruebas para radón (^{222}Rn), mediante la ecuación 2.14.

ii. Recuperación

Se estimó a partir de la ecuación 2.15, mediante los resultados obtenidos para el análisis de la linealidad en las 7 muestras patrón preparadas para las pruebas de radón (^{222}Rn), comparándolos con la medición de un patrón de referencia. Las muestras patrón que fueron utilizadas para dicho calculo, fueron las siguientes: 0.46 Bq/L, 4.57 Bq/L y 11.87 Bq/L.

b. Precisión

i. Repetibilidad

Se tomaron 7 mediciones de cada una de las siguientes muestras patrón: 0.46 Bq/L, 4.57 Bq/L y 11.87 Bq/L, preparadas en la

linealidad. Luego se calculó la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV), mediante las ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente.

Se volvió necesario realizar las mediciones en 3 días, un día para la obtención de la actividad de cada muestra patrón.

ii. Reproducibilidad

Para este parámetro, se determinó la precisión bajo las diferentes condiciones de reproducibilidad, por lo tanto, se pretendió así identificar los conteos que mide el equipo de centelleo líquido de muestras tratadas con dos distintos tipos de coctel; con coctel a base de tolueno grado HPLC y coctel base tolueno grado centelleo para luego determinar el parámetro más conveniente, a partir del cálculo de la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV). Además de realizar una evaluación estadística t-Student, para un nivel de confianza del 95%, un contraste t de dos colas y (n-2) grados de libertad. El valor de $t_{calculado}$ fue calculado mediante la ecuación 3.8.

$$t_{calculado} = \frac{X_{\Delta}}{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Dónde:

- X_{Δ} Sumatoria de las diferencias entre mediciones para ambas muestras
- s Desviación estándar de ambas series de datos
- n Cantidad de mediciones realizadas a una muestra

Para lograr lo anterior se analizaron 6 patrones, preparados con material de referencia CIAN y a una actividad de radio (^{226}Ra) de 2 Bq/L. Para la extracción de radón (^{222}Rn) en 3 patrones, se utilizó coctel de centelleo base tolueno grado HPLC y para los otros 3, coctel de centelleo base tolueno grado centelleo.

Los patrones se dejaron reposar por 30 días para lograr el equilibrio secular, para posteriormente analizarlo en el equipo de centelleo líquido.

NOTA: los 6 análisis se desarrollaron de la siguiente manera: el primer analista analizó dos patrones uno con coctel de centelleo base tolueno grado HPLC y otro con coctel de centelleo base tolueno grado centelleo, y así consecutivamente para los siguientes 2 analistas, los cuales analizaron los dos patrones de la misma manera en las siguientes semanas.

V. Robustez

Se determinó si existe diferencia significativa en los resultados al realizar cambios en algunas condiciones en el momento de aplicar el método ASTM- D5072-09. Las modificaciones a realizar, fueron las siguientes:

- a) Cambio de analista, se obtuvieron 3 muestras de agua de grifo con diferente analista, para posteriormente obtener mediciones por triplicado en el equipo de centelleo líquido.

- b) Efecto de la aireación al momento de la recolección de muestras de agua, para ello se recolectó 1 muestra en la que se permitió el ingreso de burbujas de aire al recipiente (aireada) y otra muestra, en la que no

se permitió el ingreso burbujas de aire (no aireada). Cada una fue medida por triplicado en el equipo de centelleo líquido.

- c) Efecto de la temperatura de almacenamiento en la que se transporta cada muestra luego de ser recolectada, una muestra fue transportada en frío y la otra a temperatura ambiente, ambas recolectadas en el sitio de muestreo “La Gloria”, dentro de los dos últimos muestreos. Este punto fue seleccionado tomando en cuenta que fue el primer punto de recolección durante las jornadas de muestreos, por lo tanto, el tiempo de almacenamiento fue mayor y permitió identificar con mayor seguridad si existía diferencia significativa ante tal efecto.

Al obtener los resultados, se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variación en cada prueba. Adicionalmente, se realizó una evaluación estadística F de Fisher para la prueba con cambio de analista; y una evaluación t-Student en las pruebas de aireación y de cambio de temperatura. La prueba F de Fisher consiste en la comparación de $F_{tabulada}$ con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, $(k - 1)$ grados de libertad para el numerador y $k(n - 1)$ grados de libertad para el denominador; con el valor de F_{prueba} , el cual fue calculado mediante la ecuación 3.9.

$$F_{prueba} = \frac{s_x^2}{s_w^2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Dónde:

- s_x^2 Estimación intermediente de varianza
 s_w^2 Estimación interna de varianza

La varianza interna fue calculada mediante la ecuación 3.10.

$$s_w^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2}{k} \quad \text{Ec. 3.10}$$

s_1^2, s_2^2, s_3^2 Varianza de cada muestra

La varianza intermedia fue calculada mediante la ecuación 3.11.

$$s_x^2 = n * s_{\bar{x}}^2 \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum(\bar{x} - \bar{\bar{x}})^2}{k-1} \quad \text{Ec.3.12}$$

Dónde:

\bar{x} Media aritmética de cada muestra

$\bar{\bar{x}}$ Media aritmética de las medias aritméticas de las muestras

VI. Trazabilidad

Se llevó a cabo un análisis mediante la prueba de diferenciación t-Student utilizando la ecuación 3.13. Para desarrollar dicho análisis, se tomó en cuenta el resultado obtenido de la actividad teórica de 0.46 Bq/L de las muestras patrón que fueron preparadas para la repetibilidad de la metodología para análisis del gas radón (^{222}Rn).

$$t_{cal} = \frac{|C_{MR} - C_{método}|}{\sqrt{\left(\frac{U_{MR}}{K}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2}} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Dónde:

C_{MRC} Concentración de la actividad de radio (^{226}Ra) certificada

$C_{\text{método}}$	Concentración de la actividad de radón (^{222}Rn) calculada en el método
U_{MR}	Incertidumbre asociada al material de referencia (MR)/ patrón.
s	Desviación estándar calculada por el método
n	Número de veces que se analiza el MR con el método

3.2.4. Método ARCAL RLA/5/048 para radio (^{226}Ra) en agua

En 1984 se estableció el Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe, conocido por sus siglas en español como ARCAL, posteriormente fue formalizado como un acuerdo intergubernamental en 1998. Este busca elaborar e implementar programas y proyectos enfocados en las necesidades de los países miembros de América Latina y el Caribe.

En el marco del proyecto RLA/5/048 ARCAL LXXIX: “Armonización regional de los requisitos técnicos y específicos de calidad para el control de la contaminación radioactiva de alimentos”, se elaboró el Manual de Procedimientos Técnicos para la determinación de contaminantes radiactivos en alimentos. El objetivo principal de dicho manual es proporcionar a los laboratorios de control de contaminantes radiactivos en alimentos, procedimientos de ensayo validados para la determinación de radionúclidos de interés en alimentos y agua de consumo humano (ARCAL, 2005).

El método que fue utilizado para la determinación de radio (^{226}Ra) en agua para consumo humano, es presentado en dicho manual de control radiológico en alimentos.

a. ¿En qué consiste?

El método normalizado para detectar radio (^{226}Ra) en agua, consiste en la extracción y cuantificación de radón (^{222}Rn) que se encuentra en equilibrio secular con el radio (^{226}Ra), mediante el equipo de centelleo líquido. En él se establece el procedimiento para la preparación de las muestras de agua, el cual se desarrolla mediante la extracción y concentración del contenido de radio (^{226}Ra) de la muestra en un precipitado generado mediante la reacción química entre el CaHPO_4 y el NaOH . Posteriormente, establece las indicaciones respecto al tiempo de espera para que se lleve a cabo el crecimiento del radón (^{222}Rn) y el conteo de éste en el equipo de centelleo líquido.

La presente metodología fue elegida debido a que se cuenta con el equipo, materiales y reactivos necesarios para su desarrollo. Además, se dispone de resultados de análisis de dicha metodología que se realizaron anteriormente por Rodríguez Carpio (2013).

b. Modificaciones

Como se mencionó anteriormente, el presente método se desarrolló tomando en cuenta como base, algunas modificaciones propuestas por Rodríguez Carpio (2013). Las modificaciones que se implementaron en la metodología para la detección de radio (^{226}Ra) en el presente trabajo de investigación, fueron las mismas realizadas para la detección de radón (^{222}Rn).

c. Descripción de actividades

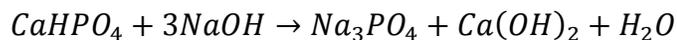
Para el análisis de radio (^{226}Ra) en agua, utilizando el método RLA/5/048 ARCAL, es necesario realizar diferentes actividades que a continuación se detallan:

I. Preparación de muestra blanco para radio (^{226}Ra)

Se añade 1L de agua destilada en un recipiente de vidrio. Tanto como el procedimiento para el pretratamiento y medición de radio (^{226}Ra) en la muestra blanco, son los mismos que se utilizaron para el análisis de las muestras de agua de pozo.

II. Pretratamiento de las muestras de agua para análisis de radio (^{226}Ra)

Para el análisis de radio (^{226}Ra), fue requerido un ajuste de las muestras previo a su medición, aprovechando sus propiedades alcalinotérricas. Se llevó la muestra de agua de 1L a un pH =10, en el que precipitó el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el hidróxido de radio ($\text{Ra}(\text{OH})_2$), por lo que la mayor cantidad de radio (^{226}Ra) presente en el agua fue extraído y concentrado en dicho precipitado. Esto se expresa mediante la siguiente reacción química:



Precipitando también el $\text{Ra}(\text{OH})_2$.

El procedimiento para el acondicionamiento de las muestras, se presenta en la Figura 3.11.

Ubicar el recipiente de vidrio sobre una parrilla de calentamiento con agitación magnética, y agitar la muestra de agua a una velocidad en la que se pueda observar un pequeño remolino en la parte superior de la muestra.



Pesar 0.2 g de CaHPO_4 , añadirlos en la muestra y disolver completamente.



Agregar solución NaOH 2.5M aproximadamente, hasta conseguir un pH = 10 en la muestra, que da lugar a la aparición de un precipitado.



Dejar reposar toda la noche, hasta conseguir que el precipitado sedimente.



Decantar líquido sobrenadante mediante el sistema de succión con pipetas Pasteur.



Rotular tubos de centrifuga identificandolos según la cantidad de muestras.



Transferir el precipitado a los tubos de centrifuga, realizando lavados al depósito con agua destilada evitando pérdidas.



Centrifugar durante 15 minutos a 3500 rpm.

Continúa en página 101.



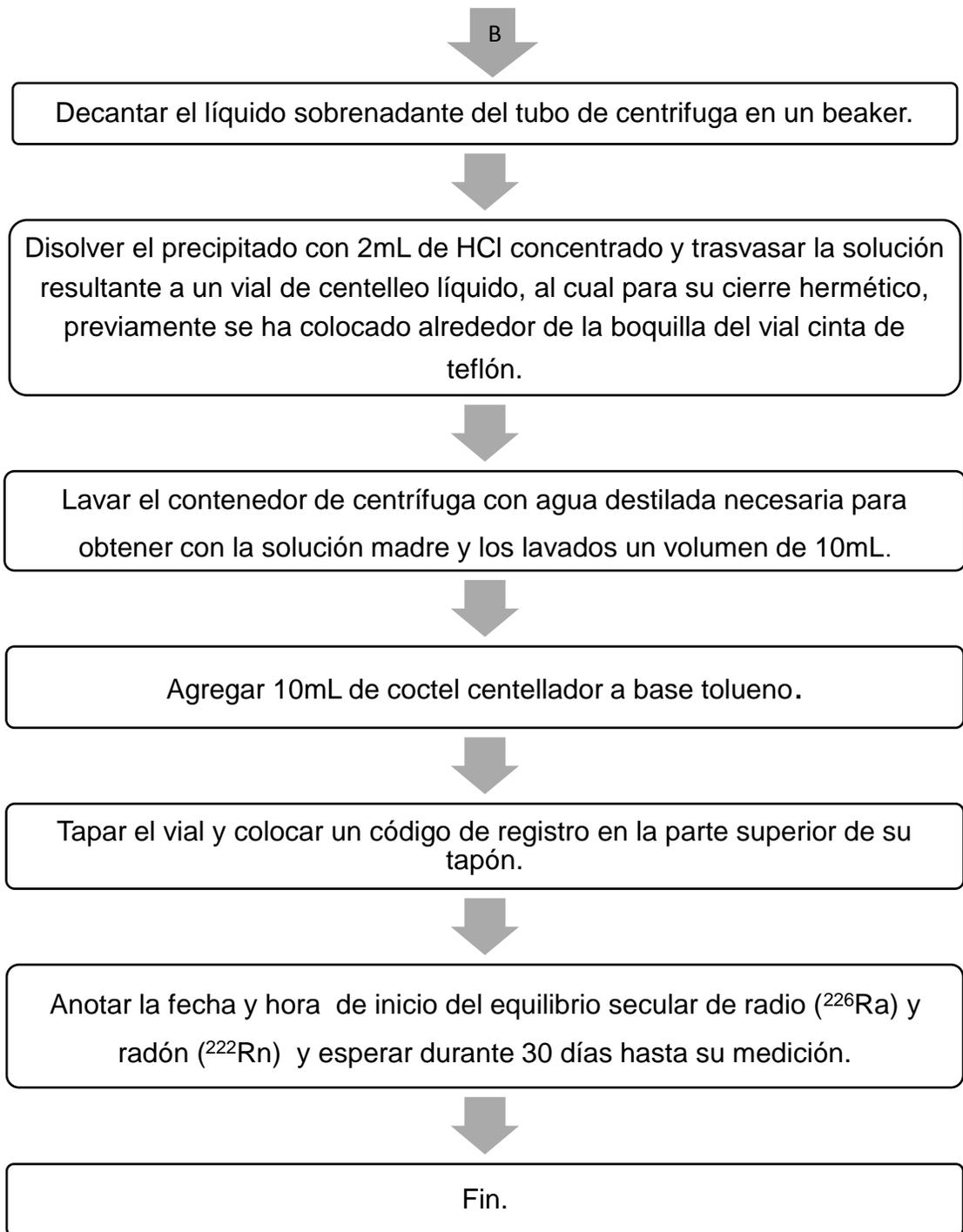


Figura 3.11 Tratamiento de muestras para análisis de radio (^{226}Ra). Fuente: Basado en la metodología adaptada por Rodríguez Carpio (2013).

III. Procedimiento adaptado para la medición de radio (^{226}Ra)

En la Figura 3.12 se muestra el procedimiento que se desarrolló para la detección de radón (^{222}Rn) en el equipo de centelleo líquido.

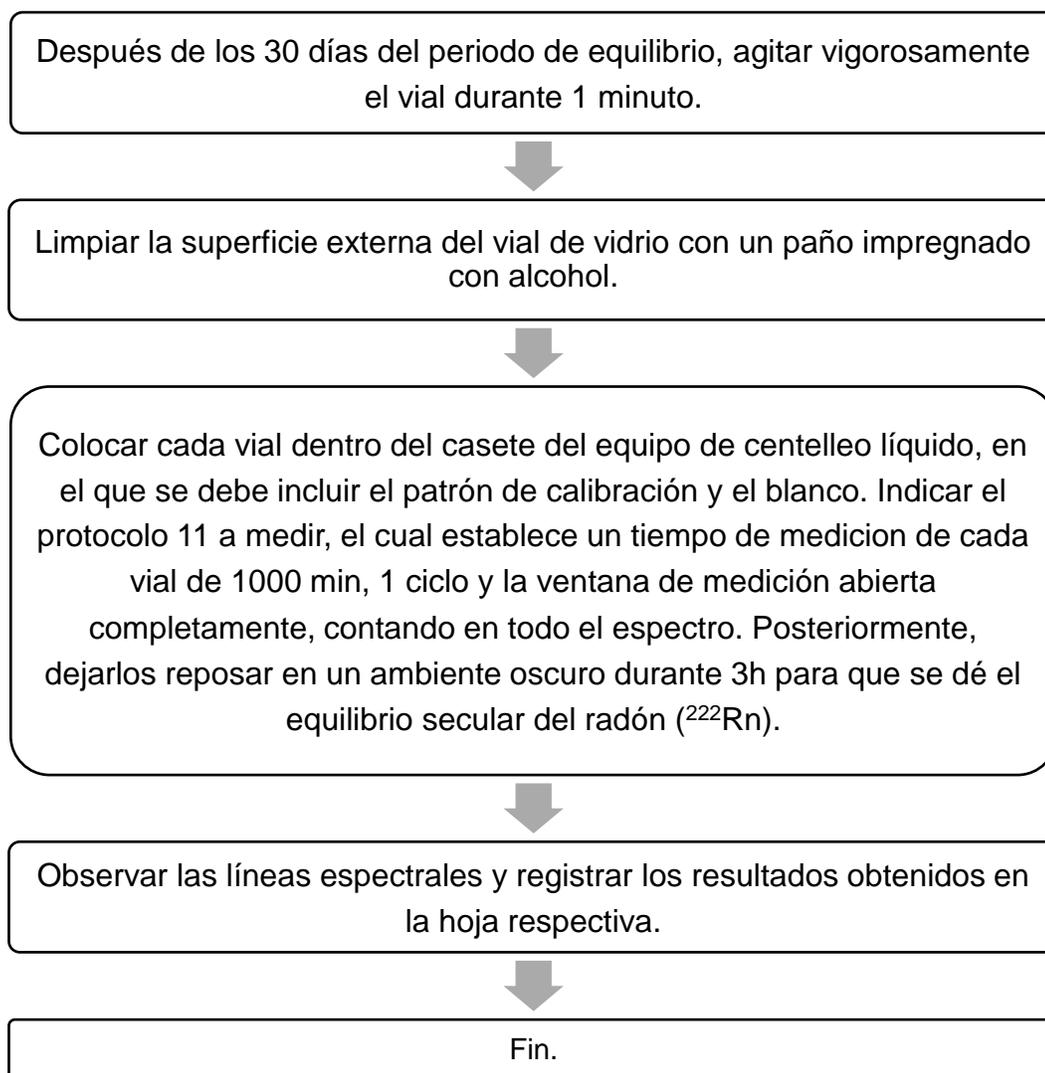


Figura 3.12 Procedimiento para la medición de radio (^{226}Ra) en muestras de agua. Fuente: Basado a la metodología adaptada por Rodríguez Carpio (2013).

IV. Cálculo para actividad de radio (^{226}Ra)

Una vez obtenidos los conteos mediante el equipo de centelleo líquido, se procedió a la medición de la actividad de radio (^{226}Ra) para cada muestra en Bq/L a partir ecuación 3.14:

$$A_m = \frac{(CPM_{tm} - CPM_f)(f_D)(f_S)}{60(V)(E_{fm})(f_C)} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Dónde:

A_m	Concentración de la actividad de radio (^{226}Ra) en la muestra
CPM_{tm}	Cuentas por minuto de la muestra
CPM_f	Cuentas por minuto del fondo
V	Volumen de la muestra
E_{fm}	Eficiencia total del método
f_C	Factor de corrección por decaimiento
f_D	Factor de corrección por decaimiento durante la medición
f_S	Factor de corrección por decaimiento durante el tiempo transcurrido entre la separación y el inicio de la medición

La eficiencia del método fue calculada, mediante la ecuación 3.15.

$$E_{fm} = \frac{CPM_e - CPM_f}{A_e} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Dónde:

A_e	Actividad del estándar
CPM_e	Cuentas por minuto del estándar

El factor de corrección por decaimiento, fue obtenido mediante la ecuación 3.16.

$$f_C = 1 - e^{-\lambda_{222Rn}(T_f - T_i)} \quad \text{Ec. 3.16}$$

Dónde:

λ_{222Rn} Constante de decaimiento de radón (^{222}Rn)

T_i Tiempo inicial de crecimiento

T_f Tiempo final de crecimiento

Mientras que, el factor de corrección por decaimiento durante el tiempo transcurrido entre la separación y el inicio de la medición, fue calculado partir de la ecuación 3.17.

$$f_S = e^{-\lambda_{222Rn}(T_s)} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Dónde:

T_s Tiempo entre la separación y el comienzo de la medición

Por último, el factor de corrección por decaimiento durante la medición se obtuvo mediante la ecuación 3.18.

$$f_D = \frac{\lambda_{222Rn}(T_m)}{1 - e^{-\lambda_{222Rn}(T_m)}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Dónde:

T_m Tiempo de la medición

d. Validación de metodología

En este apartado, se explica la forma en que se analizaron los parámetros de desempeño para la validación de la metodología analítica.

I. Linealidad

Se prepararon 7 patrones con actividades de radio (^{226}Ra) diferentes cada uno, que abarcan aproximadamente un rango de 0.20 Bq/L hasta 2 Bq/L (ver Tabla 3.8). Con los resultados obtenidos se creó un gráfico de concentración versus respuesta, el cual fue evaluado mediante la prueba estadística t-Student.

Tabla 3.8 Actividades teóricas de los patrones de radio (^{226}Ra) para análisis de linealidad.

N.º	Actividad (Bq/L)
1	0.2
2	0.4
3	0.6
4	0.8
5	1.0
6	1.5
7	2.0

Para obtener las actividades propuestas en la Tabla 3.8 se utilizó el patrón NIST-01, en la Tabla 3.9 se presenta la cantidad de dicho patrón necesaria para alcanzar los valores de las actividades propuestas para

un litro de solución. Además, se presenta una corrección para el volumen a añadir para disminuir el error, esto mediante una reducción de la cantidad de extracciones en las micropipetas.

Tabla 3.9 Cantidad de patrón NIST-01 necesario para la preparación de actividades teóricas de radio (^{226}Ra).

Patrones	Cantidad NIST-01 (μL)	Pro-puesta	Nueva actividad	Cantidad de extracciones de patrón NIST-01		
		Cantidad NIST-01 (μL)	Bq/L	2000 μL	200 μL	20 μL
0.20	44	40	0.18			2
0.40	88	100	0.46			5
0.60	131	140	0.64			7
0.80	175	180	0.82			8
1.00	219	220	1.00		1	1
1.50	328	340	1.55		2	7
2.00	438	440	2.01		2	2
	TOTAL	1460				

Por lo que, con la propuesta para la cantidad de patrón NIST-01 a añadir en muestras de 1L de agua, el resumen de las actividades teóricas que se obtuvieron se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Actividades teóricas modificadas de muestras patrón de radio (^{226}Ra).

N.º	Actividad (Bq/L)
1	0.18
2	0.46
3	0.64
4	0.82
5	1.00
6	1.55
7	2.01

Cabe señalar que, fue necesario preparar y analizar una muestra blanca para utilizar dicho resultado en la evaluación de los límites del método.

II. Sensibilidad

Al igual que para el caso del radón (^{222}Rn), el factor de sensibilidad se calculó en base a los resultados obtenidos en la linealidad, se tomó en cuenta la desviación estándar de 3 muestras patrón (S_i) y la pendiente del gráfico concentración vs respuesta (m), utilizando la ecuación 2.13. Las muestras patrón utilizadas para dicho calculo, fueron las siguientes: 0.18 Bq/L, 0.82 Bq/L y 2 Bq/L.

III. Límites

Se prepararon 7 muestras blancos de 1L con agua destilada. Cada uno de ellos preparado en diferentes ocasiones. En la Tabla 3.11, se

muestra de cuales análisis se extrajo el dato de la respuesta del equipo de centelleo líquido, para cada muestra blanco.

Tabla 3.11 Muestras blanco para análisis de radio (^{226}Ra).

Extracción del resultado de medición de radio (^{226}Ra) en blancos analizados en:	Primer muestreo
	Segundo muestreo
	Tercer muestreo
	Cuarto muestreo
	Linealidad
	Selección del envase
	Verificación de la actividad de materiales de referencia

a. Límite de detección (LoD)

Para su cálculo se utilizó la ecuación 3.19, tomando en cuenta los resultados de las 7 muestras blancos para radio (^{226}Ra) de agua destilada.

$$AMD = \frac{4.66 \sqrt{\frac{cpm_f}{t_m}} (f_D)(f_S)}{60(V)(E_{fm})(f_c)} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Dónde:

- CPM_f Cuentas por minuto del fondo
- t_m Tiempo de medición
- f_S Factor de corrección por decaimiento durante el tiempo transcurrido entre la separación y el comienzo de la medición
- f_D Factor de corrección por decaimiento durante la medición
- E_{fm} Eficiencia total del método

f_c Factor de corrección por decaimiento

b. Límite de cuantificación (LoQ)

Se estimó utilizando el valor de 10 veces la desviación estándar de los resultados de los 7 blancos y su promedio. Se calculó mediante la ecuación 3.6.

c. Límite crítico

Utilizando los resultados de los 7 blancos, se obtuvo este límite a partir de la ecuación 3.7.

IV. Exactitud

a. Veracidad

i. Sesgo

Tanto para el radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) el sesgo fue calculado de la misma manera utilizando la ecuación 2.14. En este caso fue calculado para todos los resultados obtenidos de las muestras patrón preparadas para el cálculo de la linealidad en las pruebas para radio (^{226}Ra).

ii. Recuperación

Se estimó a partir de la ecuación 2.15, mediante los resultados obtenidos para el análisis de linealidad en las 7 muestras patrón preparadas en las pruebas para radio (^{226}Ra), comparándolos con la medición de un patrón de referencia.

b. Precisión

i. Repetibilidad

Se tomaron 7 mediciones de cada uno de las siguientes muestras patrón: 0.18 Bq/L, 0.82 Bq/L y 2.0 Bq/L, preparadas para la gráfica de la linealidad. Luego se calculó la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de los resultados. Las mediciones se realizaron en 3 días, uno para cada muestra. Utilizando las ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente.

ii. Reproducibilidad

Para este parámetro, se determinó la precisión bajo las diferentes condiciones de reproducibilidad, por lo tanto, se identificó los conteos que mide el equipo de centelleo líquido de muestras tratadas con dos distintos tipos de coctel; con coctel a base de tolueno grado HPLC y coctel base tolueno grado centelleo para determinar el parámetro más conveniente, a partir del cálculo de la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV). Además de realizar una evaluación estadística t-Student, para un nivel de confianza del 95%, un contraste t de dos colas y (n-2) grados de libertad. El valor de $t_{calculado}$ fue calculado mediante la ecuación 3.8.

Para lograr lo anterior fue necesario analizar 6 patrones, todos preparados con el material de referencia CIAN y con una actividad teórica de radio (^{226}Ra) de 2Bq/L. Para la extracción de radio (^{226}Ra) en 3 patrones, se utilizó coctel de centelleo base tolueno grado HPLC y para los otros 3, coctel de centelleo base tolueno grado centelleo.

Los patrones se dejaron reposar 30 días para lograr el equilibrio secular, para posteriormente analizarlo mediante en el equipo de centelleo líquido.

V. Robustez

Se determinó si existía diferencia significativa en los resultados al realizar cambios en algunas condiciones para los análisis de radio (^{226}Ra). Las modificaciones que se realizaron fueron:

- a. Cambio de analista, se prepararon 3 muestras patrón con una actividad teórica de 1 Bq/L por diferente analista utilizando como material de referencia el patrón NIST-01, las mediciones se hicieron por triplicado.
- b. Cambios en el pH, se prepararon 3 muestras patrón con una actividad teórica de 2 Bq/L y con un pH de 9, 10 y 11, utilizando como material de referencia el patrón CIAN.

Al obtener los resultados, se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada prueba. Adicionalmente, se realizó una evaluación estadística F de Fisher para ambas pruebas.

VI. Trazabilidad

De igual forma que para la metodología de análisis del gas radón (^{222}Rn), se desarrolló un análisis mediante la prueba de diferenciación t-Student, utilizando la ecuación 3.13, se tomó en cuenta el resultado obtenido de la actividad teórica de 0.20 Bq/L de las muestras patrón preparadas para el análisis de la repetibilidad de la metodología.

3.2.5. Materiales de referencia

Para la validación de la metodología, existió la necesidad de elaborar muestras patrón con una actividad teórica a partir de un material de referencia. El CIAN-FIA-UES cuenta con dos materiales de referencia donados por Costa Rica, NIST-01 con certificado SMR 4967A que contiene una actividad de 4.567 Bq/mL e IRD con una actividad de 3.8Bq/mL. Además de contar con uno elaborado en el laboratorio con 9.948 Bq/mL de actividad.

En el presente trabajo de investigación, se utilizaron los materiales de referencia con los que el CIAN-FIA-UES cuenta, para la validación de la metodología ASTM D5072-09 para muestras destinadas a análisis de radón (^{222}Rn) en agua, y ARCAL RLA/5/0/48 para muestras destinadas al análisis radio (^{226}Ra) en agua. La cantidad necesaria de cada material de referencia para llevar a cabo la validación se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Cantidades de materiales de referencia utilizadas para el desarrollo de la validación de las metodologías analíticas.

Material de referencia	Cantidad por utilizar (μL)
NIST-01	10,957
IRD	780
CIAN	600

CAPÍTULO 4 : PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se describe el comportamiento que se logró detectar a partir de los resultados obtenidos, al aplicar las metodologías analíticas detalladas en el capítulo anterior. A partir del análisis mediante el método ASTM D5072-09 de las muestras recolectadas, se detectó y cuantificó la actividad de radón (^{222}Rn) presente. Sin embargo, mediante la metodología ARCAL RLA/5/048 aplicada no fue posible detectar la presencia de radio (^{226}Ra) por arriba del límite de detección, en los 4 meses propuestos, de modo que, su medición no se extendió al quinto muestreo.

Además, se presentan los resultados mediante gráficas y diagramas que facilitan el análisis e interpretación del comportamiento de la actividad del radón (^{222}Rn) en las muestras de agua recolectadas durante los cinco muestreos. No fue posible establecer una correlación entre distintos parámetros fisicoquímicos medidos al momento de recolectar las muestras con las respectivas concentraciones de radón (^{222}Rn) presente. Por último, se presenta una estimación acerca del estado en el que se encuentra la calidad radiológica del agua para consumo humano suministrada a partir del acuífero de San Salvador; dando así, lugar a que futuras investigaciones aporten información sobre el análisis radiológico del agua potable en todo el país.

Se muestran los resultados obtenidos a partir de la validación de las metodologías analíticas ASTM D5072-09 y ARCAL RLA/5/0/48, empleadas para el análisis de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de agua.

4.1. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Se presentan a continuación los resultados de cada uno de los parámetros de evaluación que fueron obtenidos a partir de la validación de las metodologías ASTM D5072-09 y ARCAL RLA/5/048, para el análisis en agua de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), respectivamente. Además, en el Anexo 8 son mostrados mediante un cuadro resumen.

4.1.1. Validación de método ASTM D5072-09 para análisis de radón (^{222}Rn) en agua

Los resultados de la validación del método ASTM D5072-09 para análisis de radón (^{222}Rn) en agua fueron los siguientes:

Calibración y estandarización

Se calcula el CF de la metodología de acuerdo a la ecuación 3.4. El método ASTM sugiere preparar patrones enriquecidos con radio (^{226}Ra), con una actividad que pueda registrar un mínimo de 10,000 conteos netos; lo que contribuye a una incertidumbre de conteo menor al 1%. Se define una incertidumbre de conteo con un límite de confianza del 95% (2s) igual a 0.5%.

Se calcula la eficiencia global para el método de extracción para un volumen de muestra de 1 L. Se prepararon 3 patrones con actividad de 1 Bq/L del patrón NIST-01 para un tiempo de medición de 60 minutos, los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Conteos de solución de referencia NIST-01 y de muestra blanco para cálculo de eficiencia del método ASTM D5072-09.

No	Solución de referencia de radón (²²² Rn) NIST-01		Conteos de fondo	
	CPM	CPS	CPM	CPS
1	100.37	1.67	45.20	0.75
2	102.73	1.71	44.97	0.75
3	98.57	1.64	44.90	0.75
4	100.56	1.68	45.02	0.75
5	96.77	1.61	45.03	0.75
6	99.10	1.65	46.80	0.78
7	96.70	1.61	46.00	0.77
8	97.52	1.63	45.94	0.77
Promedio	99.04	1.65	45.48	0.76

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.1 en la ecuación 3.4, se obtiene lo siguiente:

$$CF = \frac{1.65 - 0.76}{0.99} = 0.90$$

El cambio de volumen de muestra del método ASTM de 10 mL a 1 L define un CF de 0.90. Valor a utilizar para el cálculo de la actividad de radón (²²²Rn) de las muestras.

I. Linealidad

Se prepararon 7 patrones utilizando como material de referencia el patrón NIST-01, con diferentes actividades de radón (²²²Rn) cada uno, abarcando un rango de 0.46 Bq/L hasta 11.87 Bq/L (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Conteos de muestras patrón preparadas para el cálculo de la linealidad de metodología para análisis de radón (^{222}Rn).

Actividad teórica (Bq/L)	CPM	CPS	Actividad medida (Bq/L)
0.46	65.78	1.10	0.50
0.91	100.37	1.67	1.26
2.74	151.80	2.53	2.03
4.57	264.72	4.41	4.21
7.31	435.88	7.26	7.59
9.13	513.47	8.56	9.17
11.87	638.13	10.64	11.58

A partir de los resultados de las mediciones de las muestras, se genera un gráfico de concentración vs. respuesta (ver Figura 4.1), que permite evaluar el comportamiento de la curva.

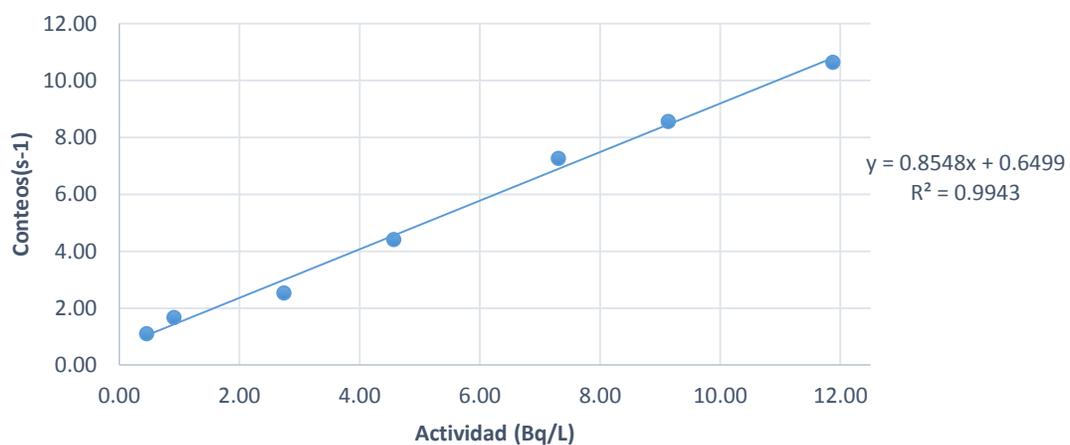


Figura 4.1 Gráfico de actividad de radón (^{222}Rn) vs conteos por segundo (s^{-1}).

Adicionalmente, para confirmar la linealidad del método, se procede a realizar la evaluación estadística t-Student. La hipótesis nula, en este caso establece que no existe correlación lineal significativa entre la actividad de radón (^{222}Rn) (Bq/L) y los CPS. De acuerdo a la Figura 4.1, $r^2 = 0.9943$ y $r = 0.9995$, sustituyendo los valores en la ecuación 2.12 se obtiene:

$$t_r = \frac{|0.9995|\sqrt{7-2}}{\sqrt{1-0.9943}} = 29.53$$

El valor de t_{tabulado} es obtenido para 8 grados de libertad y con un límite de confianza del 95%.

$$t_{\text{tabulado}} = 2.57$$

Como $t_{\text{calculado}} > t_{\text{tabulado}}$, se rechaza la hipótesis nula. Se puede concluir, mediante la prueba estadística realizada, que existe una correlación significativa entre la actividad de radón (^{222}Rn) y los conteos obtenidos mediante el equipo de centelleo líquido. Cabe señalar que el método puede ser aplicado en la detección y cuantificación de radón (^{222}Rn) en muestras de agua subterránea (pozos perforados) con un volumen de 1L, en un rango lineal de medición de 0.46 Bq/L hasta 11.87 Bq/L. En dicho rango se obtienen conteos (mediante el equipo de centelleo líquido), directamente proporcionales a la cantidad de radón (^{222}Rn) presente en las muestras.

II. Sensibilidad

El factor de sensibilidad se calculó utilizando la ecuación 2.13; con base a los resultados obtenidos para la linealidad, se tomó en cuenta la desviación estándar de 3 muestras patrón (S_i) y la pendiente del gráfico concentración vs respuesta (m).

Tabla 4.3 Factor de sensibilidad del método para análisis de radón (^{222}Rn).

Actividad teórica (Bq)	Actividad medida (Bq)	Desviación Estándar (Bq)	Pendiente (s^{-1}/Bq)	Factor de sensibilidad ($\text{s}^{-1}/\text{Bq}^2$)
0.46	0.49	0.04	0.85	21.13
4.57	4.33	0.05		15.81
11.87	11.79	0.17		5.14

Se puede observar a partir de la Tabla 4.3 que el método es más sensible para el análisis de muestras con bajo contenido de radón (^{222}Rn). Es decir, la habilidad del método para detectar pequeñas variaciones en la concentración de radón (^{222}Rn) presente en una muestra de agua, es mayor a bajas concentraciones.

III. Límites

Fueron preparadas 7 muestras blanco con agua destilada para el análisis de la metodología de radón (^{222}Rn), en este caso para el cálculo de los límites del método. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Conteos de fondo de muestras blanco de radón (^{222}Rn).

Muestra	Fecha y hora de preparación	CPM
Primer muestreo	06/04/2018 16:20	45.57
Segundo muestreo	09/05/2018 11:30	46.50
Tercer muestreo	06/06/2018 14:27	44.72
Cuarto muestreo	20/07/2018 14:21	45.20
Quinto muestreo	21/08/2018 14:38	45.03

Continúa en pág. 119

Tabla 4.4 Conteos de fondo de muestras blanco de radón (^{222}Rn) Continuación

Muestra	Fecha y hora de preparación	CPM
Linealidad	15/06/2018 10:51	47.30
Blanco A	04/05/2018 10:49	44.53
Promedio		45.55

a. Límite de detección (LoD)

Se estima con la ecuación 3.5, tomando en cuenta los resultados de los 7 blancos para radón (^{222}Rn) presentados en la Tabla 4.5 y la Tabla 4.6.

Tabla 4.5 Parámetros para el cálculo del AMD de radón (^{222}Rn) en agua.

Promedio de conteos de blancos, R_b	0.76 CPS
Índice de dispersión J, para conteos de 60 min	2.95
Tiempo de conteo	60.00 min
Factor de calibración para el volumen de 1L, CF	0.90
Factor de corrección por decaimiento, D	0.98
Volumen de muestra, Va	1 L

Al sustituir los valores de la Tabla 4.5 en la ecuación 3.5, se obtiene:

$$AMD = \frac{\left(\frac{2.71 * 2.95}{3600}\right) + 0.65 \sqrt{\frac{0.76}{3600}}}{(0.90)(0.98)(1)}$$

$$AMD = 0.08 \frac{Bq}{L}$$

Por lo tanto, la actividad más baja de radón (^{222}Rn) que puede ser detectada confiablemente por el método es de 0.08 Bq/L.

b. Límite de cuantificación (LoQ)

Es calculado utilizando la ecuación 3.6. De igual forma, se toma en cuenta el promedio de los resultados de las 7 muestras de agua destilada, con una desviación estándar de 1.01 CPM del valor del fondo de radón (^{222}Rn).

$$LoQ = 45.55 + 10(1.01) = 55.62 \text{ CPM}$$

$$LoQ = 0.32 \frac{\text{Bq}}{\text{L}}$$

De modo que la actividad más baja de radón (^{222}Rn) que puede ser detectada mediante el método con un nivel aceptable de precisión y veracidad, corresponde a 0.32 Bq/L.

c. Límite crítico (Lc)

El límite crítico (Lc) es calculado utilizando la ecuación 3.7 para un tiempo de conteo de 60 min, con una desviación estándar de 0.98 CPM del valor del fondo de radón (^{222}Rn).

$$Lc = \frac{2.33 \sqrt{\frac{0.76}{3600}}}{(0.90)(0.98)(1)} = 0.038 \frac{\text{Bq}}{\text{L}}$$

En la Tabla 4.6 se presentan los límites obtenidos. Por último, se observa que el criterio de aceptabilidad ($Lc < LoD < LoQ$) se cumple.

Tabla 4.6 Límites calculados para la metodología de análisis de radón (^{222}Rn).

	Actividad (Bq/L)
Límite de detección (LoD/AMD)	0.08
Límite crítico (Lc)	0.04
Límite de cuantificación (LoQ)	0.32

IV. Exactitud

a. Veracidad

i. Sesgo

El sesgo se calcula utilizando la ecuación 2.14 y tomando como base los resultados obtenidos de las 7 muestras patrón, que fueron preparadas para el cálculo de la linealidad del método. En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.7 Sesgo en muestras patrón para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).

Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Sesgo (%)
0.46	0.47	1.00%
4.57	4.42	-15.00%
11.87	11.82	-5.00%
0.91	1.26	34.00%
2.74	2.03	-71.00%
7.31	7.59	28.00%
9.13	9.18	4.00%

Las muestras de 4.57, 0.91, 2.74 y 7.31 Bq/L presentan un sesgo mayor al establecido según la norma ASTM para radón (^{222}Rn) en agua ($s\pm 10\%$), lo que significa que la actividad medida de cada muestra se aleja considerablemente del valor de la actividad teórica preparada. Por lo tanto, existe una diferencia sistemática importante, esta diferencia puede ser generada por errores sistemáticos, originados por algún

defecto de un instrumento o alguna particularidad en el proceso de preparación o medición de las muestras patrón. Por otro lado, para las muestras con actividades de 0.46, 11.87 y 9.13 Bq/L los valores del sesgo se encuentran dentro del límite del 10% que define el método ASTM.

ii. Recuperación

Los porcentajes de recuperación son calculados a partir de la ecuación 2.15 y se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Porcentajes de recuperación obtenidos para la metodología de análisis de radón (^{222}Rn).

Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Lectura del blanco (Bq/L)	Recuperación (%)
0.46	0.57	0.13	95.46
4.57	4.42		93.96
11.87	11.79		98.25

Los porcentajes de recuperación obtenidos son mayores al 95%; por lo que el rendimiento del método, en cuanto al proceso de extracción de radón (^{222}Rn) utilizando coctel centellador es el adecuado.

b. Precisión

i. Repetibilidad

Se realizaron 7 mediciones repetitivas bajo las mismas condiciones de cada uno de los siguientes patrones: 0.46 Bq/L, 4.57 Bq/L y 11.87 Bq/L, preparados para la gráfica de la linealidad. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Actividad de las muestras patrón preparadas para análisis de repetibilidad del método de análisis de radón (^{222}Rn).

Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
0.46	15/06/2018 12:03	14/08/2018 16:41	0.53
		14/08/2018 15:43	0.47
		14/08/2018 18:44	0.47
		14/08/2018 19:45	0.45
		14/08/2018 20:47	0.57
		14/08/2018 21:48	0.48
		14/08/2018 22:50	0.49
Promedio (Bq/L)			0.49
Desviación estándar (%s)			4.00%
Coeficiente de variación (%CV)			0.33%
4.57	15/06/2018 12:07	13/08/2018 15:00	4.32
		13/08/2018 16:01	4.33
		13/08/2018 17:03	4.25
		13/08/2018 18:05	4.33
		13/08/2018 19:08	4.30

Continúa pág. 124

Tabla 4.9 Actividad de las muestras patrón preparadas para análisis de repetibilidad del método de análisis de radón (^{222}Rn).

Continuación

Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
		13/08/2018 20:10	4.36
		13/08/2018 21:12	4.42
Promedio (Bq/L)			4.33
Desviación estándar (%s)			5.41%
Coeficiente de variación (%CV)			0.07%
11.87	15/06/2018 12:16	9/08/2018 14:32	11.60
		9/08/2018 15:34	11.62
		9/08/2018 16:36	11.64
		9/08/2018 17:37	11.82
		9/08/2018 18:39	11.96
		9/08/2018 19:41	11.94
		9/08/2018 20:42	11.95
Promedio (Bq/L)			11.79
Desviación estándar (%s)			17.00%
Coeficiente de variación (%CV)			0.24%

Los resultados obtenidos para las muestras de 0.46 Bq/L y 4.57 Bq/L cumplen con el criterio de evaluación del método, ya que éstas no presentan un porcentaje de desviación estándar mayor al 10%; sin embargo, la muestra patrón preparada con una actividad teórica de 11.87 Bq/L obtuvo una desviación estándar del 17%, lo que indica que al realizar réplicas en la medición de dicha muestra, los resultados obtenidos presentaron dispersión entre ellos.

ii. Reproducibilidad

Se prepararon dos muestras de radón (^{222}Rn) de 2 Bq/L, preparadas utilizando el patrón CIAN con diferente coctel cada una (grado centelleo y HPLC), fueron medidas durante 3 semanas, en diferentes días. Los resultados son presentados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Actividades obtenidas a partir de prueba de reproducibilidad para metodología de análisis de radón (^{222}Rn)

Tipo de coctel	Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
Centelleo	2	18/06/2018 15:55	24/07/2018 10:31	3.19
			30/07/2018 11:20	3.11
			07/08/2018 12:17	3.15
Promedio (Bq/L)				3.15
Desviación estándar (%s)				4.00%
Coeficiente de variación (%CV)				0.05%
HPLC	2	20/06/2018 12:02	24/07/2018 16:33	2.97
			30/07/2018 18:28	2.77
			07/08/2018 18:56	2.74
Promedio (Bq/L)				2.82
Desviación estándar (%s)				12.00%
Coeficiente de variación (%CV)				1.00%

Se realizó además una evaluación t-Student, en la cual se determinó que no existen diferencias significativas entre la media de los dos grupos de datos (coctel base tolueno grado HPLC y grado centelleo), ya que

$t_{\text{tabulado}} (4.303) > t_{\text{calculado}} (4.29)$. Sin embargo, la muestra preparada con coctel base tolueno grado HPLC presentó una desviación estándar de 12%, por arriba del límite establecido por el criterio de evaluación ($\pm 10\%$); de modo que para obtener resultados satisfactorios (evitando la dispersión en los datos), lo recomendable es realizar la extracción de radón (^{222}Rn) utilizando coctel base tolueno base centelleo.

V. Robustez

Se determinó si existen diferencias significativas en los resultados al realizar cambios en algunas condiciones en el momento de aplicar el método ASTM-D5072-09. Las modificaciones que se realizaron fueron:

a. Cambio de analista

Cada analista preparó y realizó la medición de una muestra de agua de grifo utilizando el patrón NIST-01 (ver Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Prueba de robustez con cambio de analista para análisis de radón (^{222}Rn).

Analista	Actividad medida (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)
I	1.19	1.16	4.86	0.20
	1.11			
	1.20			
II	1.27	1.27	4.76	0.18
	1.21			
	1.31			
III	1.04	1.04	0.97	0.01
	1.03			
	1.05			

De la Tabla 4.11, se observa que para los 3 analistas la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados cumplen con el criterio de aceptabilidad; sin embargo, el analista III presenta los menores valores con respecto a los demás analistas.

Por otro lado, es necesario verificar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de las 3 muestras preparadas por diferentes analistas. Para esto, se realizó una evaluación estadística F de Fisher. En este caso, la hipótesis H_0 establece que no existen diferencias significativas entre los resultados de las 3 muestras preparadas por diferentes analistas. Los resultados obtenidos fueron un $F_{prueba} = 24.36$, mientras que un valor de $F_{tabla} = 5.14$. como $F_{prueba} > F_{tabulada}$; se rechaza la hipótesis H_0 , lo cual indica que sí existen diferencias significativas entre los resultados de las muestras preparadas por diferentes analistas.

Se concluye que la recolección, preparación y medición de muestras de agua para análisis de radón (^{222}Rn), deben de desarrollarse por un analista previamente capacitado.

b. Temperatura de transporte

Durante el transporte de dos muestras de agua, una muestra se transportó en una hielera en ambiente frío y la otra a temperatura ambiente. Los resultados se detallan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Prueba de robustez con cambio de temperatura para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).

Condición	Actividad medida (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)
Con hielera	0.47	0.48	0.36	0.01
	0.48			
	0.48			
Temperatura ambiente	0.50	0.53	3.07	0.18
	0.56			
	0.53			

Fue necesario verificar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos, de modo que se realizó una evaluación estadística t-Student, encontrándose que, $t_{\text{tabulado}} (4.30) > t_{\text{calculado}} (3.14)$, es decir, no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos; sin embargo, al transportar la muestra a temperatura ambiente la desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos aumentan, por lo que es recomendable realizar el transporte en frío mediante una hielera.

c. Efecto de aireación

Se evaluó si el efecto de la aireación, al momento de la recolección de muestras, generaba diferencias significativas en los resultados. Para ello, se recolectó una muestra en la se permitió el ingreso de burbujas de aire al recipiente (aireada) y otra muestra en la que no se permitió el ingreso de dichas burbu-

jas de aire (no aireada). Posteriormente, cada muestra fue medida por triplicado mediante el equipo de centelleo líquido. Los resultados se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Prueba de robustez con efecto de aireación para metodología de análisis de radón (^{222}Rn).

Condición	Actividad real (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)
Aireada	2.00	2.01	1.47	0.01
	2.01			
	2.03			
No aireada	2.19	2.19	4.40	0.09
	2.15			
	2.24			

Se realizó una evaluación estadística t-Student, para determinar la existencia de diferencias significativas entre la media de las series de datos. En este caso, la hipótesis nula establece que no existen diferencias significativas entre las medias de los dos grupos de datos (muestra aireada y no aireada).

Utilizando la ecuación 3.8, se calculó el valor de $t_{\text{calculada}} = 6.80$. Luego con un nivel de confianza del 95%, y para 2 grados de libertad, se obtiene el valor de $t_{\text{tabulado}} = 4.30$.

Como $t_{\text{calculado}} > t_{\text{tabulado}}$, se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que sí existen diferencias significativas entre las medias de ambas series de datos.

Por lo que el procedimiento de recolección de muestras es clave para la obtención de resultados confiables; de modo que se recomienda evitar el ingreso de burbujas de aire al recipiente de recolección de la muestra para el análisis de radón (^{222}Rn).

VI. Trazabilidad

Se llevó a cabo un análisis a través de la prueba de diferenciación t-Student. Para desarrollar dicho análisis, se tomó en cuenta el resultado obtenido a partir de la muestra patrón, preparada con una actividad teórica de 0.46 Bq/L de radón (^{222}Rn), mediante el material de referencia NIST-01.

Se muestran los cálculos para la actividad teórica ^{222}Rn de 0.46 Bq/L preparada con el patrón NIST-01 para el análisis de la linealidad y repetibilidad del método; en este caso, con el promedio de 0.49 Bq/L, y la desviación estándar de 4%, utilizando la ecuación 3.13, se tiene:

Sustituyendo en la ecuación 3.13, con un promedio de 0.17 Bq/L y una desviación estándar de 0.01:

$$t_{cal} = \frac{|0.46 - 0.49|}{\sqrt{\left(\frac{0.1}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.04}{\sqrt{7}}\right)^2}} = 0.64$$

Luego se tiene que con un nivel de confianza del 95%, y para 6 grados de libertad, el valor de $t_{tabulado} = 2.45$.

Como $t_{tabulado} > t_{calculado}$, se acepta la hipótesis nula y se concluye que los resultados son trazables para la muestra patrón preparada en el laboratorio.

VII. Cartas de Control

Se realizó un seguimiento semanal de la actividad de 3 muestras de patrones diferentes, preparadas a partir de los patrones NIST-01, IRD y CIAN, con una actividad teórica de 1, 1 y 2 Bq/L, respectivamente. Se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Registro de mediciones semanales de la actividad de radón (^{222}Rn) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN.

Actividad teórica	Fecha y hora de preparación	CPM	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
1.00 Bq/L NIST-01	04/04/2018 16:25	99.95	20/06/2018 16:37	1.29
		90.47	28/06/2018 16:18	1.07
		83.23	04/07/2018 15:18	0.88
		89.92	12/07/2018 19:35	1.06
		76.65	19/07/2018 18:28	0.76
		79.93	26/07/2018 15:02	0.81
		85.45	08/08/2018 19:39	0.93
Promedio				0.97
Desviación estándar (%s)				18.34
Coeficiente de variación (%CV)				3.47
1 Bq/L IRD	04/04/2018 16:29	130.45	20/06/2018 14:37	1.47
		129.75	28/06/2018 18:18	1.50
		101.63	04/07/2018 16:18	0.98
		119.27	12/07/2018 17:33	1.29
		111.38	19/07/2018 19:31	1.19
		108.22	26/07/2018 16:05	1.09
		124.43	08/08/2018 15:31	1.37

Continúa en pág. 132

Tabla 4.14 Registro de mediciones semanales de la actividad de radón (^{222}Rn) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN. Continuación

Actividad teórica	Fecha y hora de preparación	CPM	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
Promedio				1.27
Desviación estándar (%s)				19.00
Coeficiente de variación (%CV)				2.95
2 Bq/L CIAN	04/04/2018 16:33	197.03	20/06/2018 15:37	2.56
		216.48	28/06/2018 17:18	2.94
		182.22	04/07/2018 17:18	2.33
		212.3	12/07/2018 18:32	2.84
		196.55	19/07/2018 20:33	2.66
		180.17	26/07/2018 17:07	2.29
		175.12	08/08/2018 16:32	2.19
Promedio				2.54
Desviación estándar (%s)				29.00
Coeficiente de variación (%CV)				3.21

De la Tabla 4.14, se observa que la muestra preparada con el patrón CIAN presentó una mayor desviación estándar en comparación con las muestras preparadas con los patrones NIST-01 e IRD. A continuación, en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan los gráficos de las cartas de control.

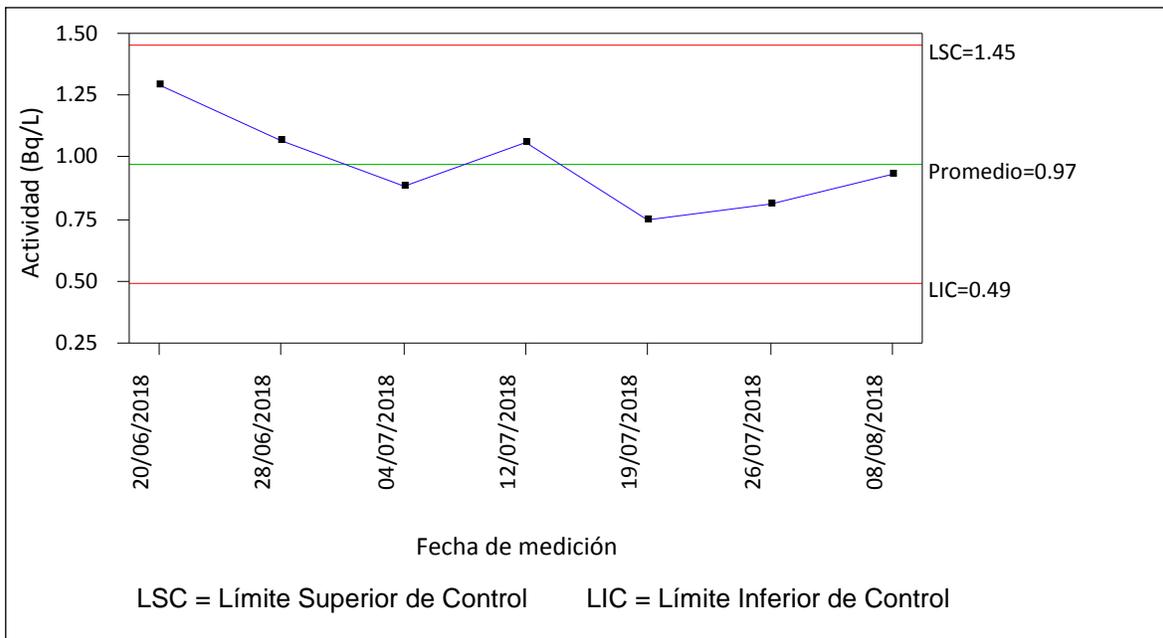


Figura 4.2 Gráfico de control de actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón NIST-01.

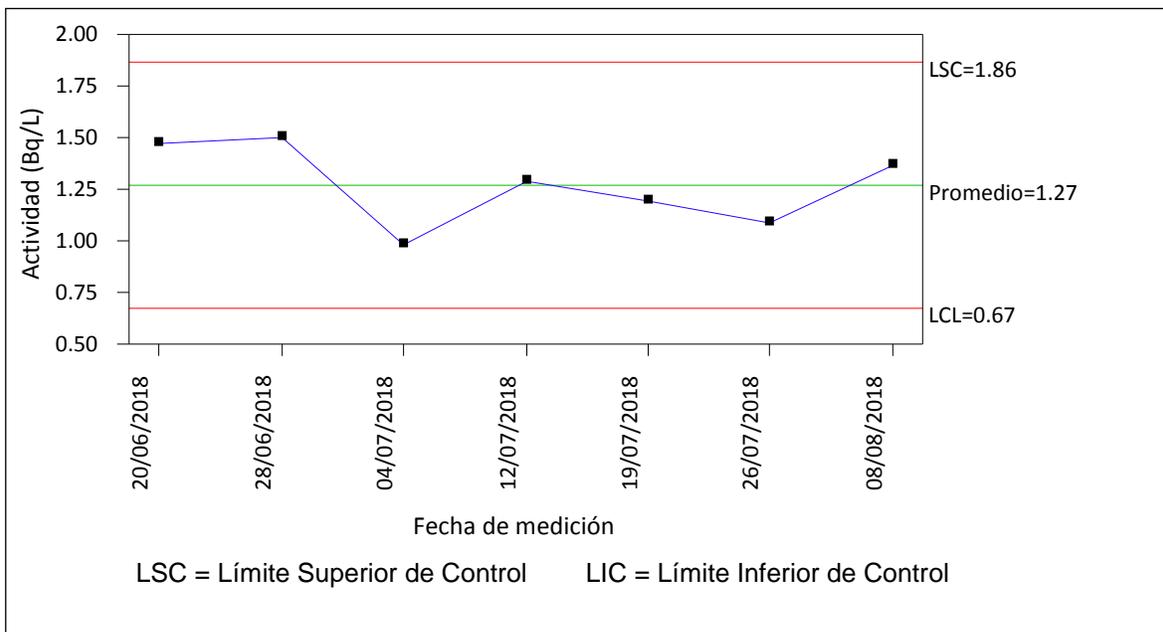


Figura 4.3 Gráfico de control de actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón IRD.

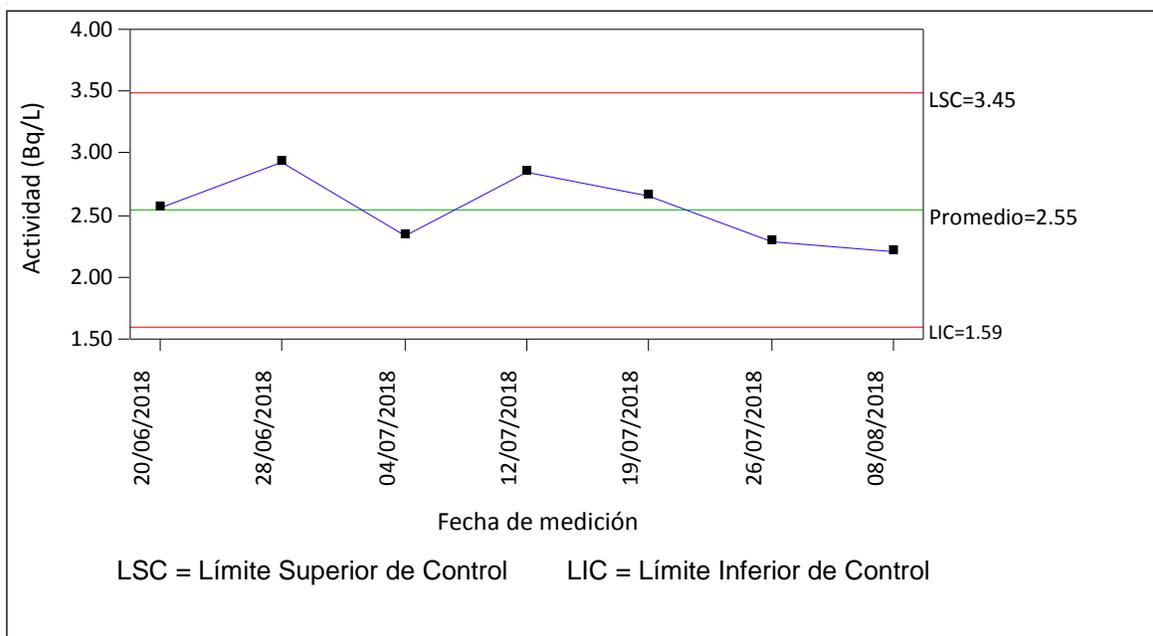


Figura 4.4 Gráfico de control de actividad de radón (^{222}Rn) en muestra patrón CIAN.

A partir de las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se observa que todos los resultados se encuentran distribuidos alrededor del promedio, y dentro de los límites de control. Por lo que el proceso de medición de cada una de las muestras patrón se encontró bajo control; demostrando así, que el equipo se encuentra dentro del rango de calibración y existe poca variación en las mediciones.

4.1.2. Validación de método ARCAL RLA/5/048 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua

Se presentan a continuación los resultados de cada uno de los parámetros de evaluación, que fueron obtenidos a partir de la validación de la metodología ARCAL RLA/5/048 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua. Además, en el Anexo 8 se muestra un cuadro resumen con dichos resultados.

Eficiencia del método ARCAL RLA/5/048

La eficiencia total del método fue calculada mediante la ecuación 3.15. Por lo que fue necesaria la preparación en el laboratorio de una muestra patrón, utilizando el patrón NIST-01, con una actividad teórica de 1.00 Bq/L. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Conteos de solución de referencia NIST-01 y de muestra blanco para cálculo de la eficiencia del método.

No	Conteos para solución de referencia NIST-01		Conteos del fondo	
	CPM	CPS	CPM	CPS
1	221.93	3.70	42.23	0.70
2	218.93	3.65	42.60	0.71
3	217.50	3.63	42.07	0.70
4	239.97	4.00	43.22	0.72
5	231.13	3.85	43.03	0.72
6	215.03	3.58	43.70	0.73
Promedios	224.08	3.73	42.81	0.71

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.15 en la ecuación 3.15, se obtiene la eficiencia global del método de extracción o factor de calibración, para el patrón NIST-01.

$$E_{fm} = \frac{3.73 - 0.71}{1.00} = 3.01$$

Por lo que, para el cálculo de la actividad de radio (^{226}Ra) en las muestras patrón preparadas, el valor de la eficiencia de extracción global utilizado fue 3.01.

I. Linealidad

Se prepararon 7 patrones, utilizando como material de referencia el patrón NIST-01, con diferentes actividades de radio (^{226}Ra) cada uno, abarcando un rango de 0.18 Bq/L hasta 2.01 Bq/L (ver Tabla 4.16).

Tabla 4.16 Conteos de muestras patrón para linealidad de metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

Actividad teórica (Bq/L)	CPM	CPS	Actividad medida (Bq/L)
0.18	75.95	1.27	0.17
0.46	138.83	2.31	0.52
0.64	182.38	3.04	0.77
0.82	216.78	3.61	0.96
1.00	241.65	4.03	1.10
1.55	348.85	5.81	1.69
2.01	404.82	6.75	2.00

A partir de los resultados de las mediciones de las muestras, se genera un gráfico de concentración vs. respuesta (ver Figura 4.5), que permite evaluar el comportamiento de la curva.

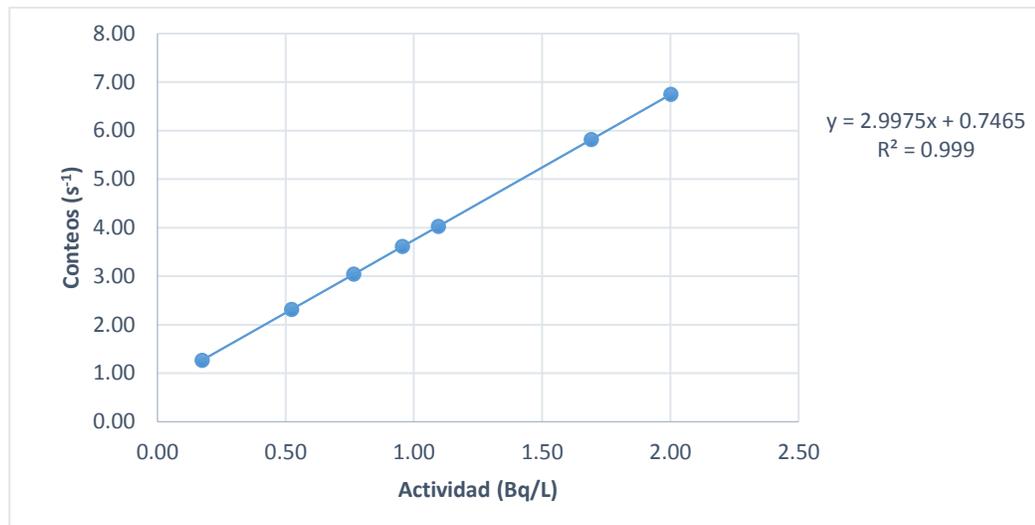


Figura 4.5 Gráfico de actividad (Bq/L) vs. conteos por segundo (s⁻¹) de radio (²²⁶Ra).

Adicionalmente, para confirmar la linealidad del método, se procede a realizar la evaluación estadística t-Student. La hipótesis nula, en este caso establece que no existe correlación lineal significativa entre la actividad de radio (²²⁶Ra), (Bq/L) y los CPS.

De la Figura 4.5, se tiene que $r^2 = 0.999$ y $r = 0.999$, por lo que al sustituir en la ecuación 2.12, se obtiene:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{|0.999|\sqrt{7-2}}{\sqrt{1-0.999}} = 70.63$$

Luego se encuentra que con un nivel de confianza del 95%, y para n-2 grados de libertad, el valor de $t_{\text{calculado}} = 2.57$. Como $t_{\text{calculado}} > t_{\text{tabulado}}$, se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que sí hay una correlación lineal significativa entre las actividades (Bq/L) y los CPS.

En conclusión, el método puede ser aplicado en la detección y cuantificación de radio (^{226}Ra), en muestras de agua subterránea (pozos perforados) con un volumen de 1L, en un rango de medición de 0.18 Bq/L hasta 2.01 Bq/L. En dicho rango se obtienen conteos (mediante el equipo de centelleo líquido), directamente proporcionales a la cantidad de radio (^{226}Ra) presente en las muestras.

II. Sensibilidad

El factor de sensibilidad se calcula utilizando la ecuación 2.13; con base a los resultados obtenidos para la linealidad se toma en cuenta la desviación estándar de 3 muestras patrón (S_i) y la pendiente del gráfico concentración vs. respuesta (m). Se presentan los resultados obtenidos para la sensibilidad del método en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Factor de sensibilidad del método para el análisis de radio (^{226}Ra).

Actividad teórica (Bq)	Actividad medida (Bq)	Desviación estándar (Bq)	Pendiente (s^{-1}/Bq)	Factor de sensibilidad ($\text{s}^{-1}/\text{Bq}^2$)
0.18	0.17	0.01	2.99	225.87
0.82	0.96	0.02		185.14
2.01	1.97	0.02		150.56

De la Tabla 4.17, se observa que la sensibilidad del método disminuye con el aumento de la actividad de radio (^{226}Ra). En otras palabras, la habilidad del método para detectar pequeñas variaciones en la concentración de radio (^{226}Ra) presente en una muestra de agua, es mayor a bajas concentraciones.

III. Límites

Fueron preparadas 7 muestras blanco para el análisis, en este caso para el cálculo de los límites del método. Estas son presentadas en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Conteos de fondo de radio (^{226}Ra) en muestras blanco.

Muestra	Fecha y hora de preparación	CPM
Primer muestreo	06/04/2018 16:20	43.20
Segundo muestreo	14/05/2018 16:40	44.10
Tercer muestreo	07/06/2018 16:10	43.25
Cuarto muestreo	25/07/2018 15:56	42.20
Quinto muestreo	20/06/2018 11:55	42.62
Linealidad	15/06/2018 10:46	44.82
Blanco A	04/04/2018 16:09	42.23
Promedio		43.20

a. Límite de detección (LoD)

El límite de detección o actividad mínima detectable (AMD) se calcula con la ecuación 3.19, tomando en cuenta los resultados de las 7 muestras blanco para un volumen de muestra de 1L, un tiempo de medición del 1000 min considerando el valor del factor de corrección por decaimiento durante la medición (f_D) y del factor de corrección por decaimiento (f_C).

A partir de la ecuación 3.16 se obtiene el factor de corrección por decaimiento (f_C), para un tiempo total de crecimiento de 30 días (43,200 min) y una constante de decaimiento de radón (^{222}Rn) de $1.26 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$:

$$f_C = 1 - e^{-(1.26 \cdot 10^{-4}) \cdot (43,200)} = 0.996$$

Luego, se obtiene el factor de corrección por decaimiento durante la medición (f_D), utilizando la ecuación 3.18 y un tiempo de medición de 60 minutos:

$$f_D = \frac{(1.26 * 10^{-4})(60)}{1 - e^{-(1.26 * 10^{-4})(60)}} = 1.004$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.19, se obtiene el valor del AMD.

$$AMD = \frac{4.66 \sqrt{\frac{43.20}{1000}} (1.004)}{(60)(1)(3.01)(0.996)} = 0.005 \text{ Bq/L}$$

Por lo tanto, la actividad más baja de radio (^{226}Ra) que puede ser detectada confiablemente por el método es de 0.005 Bq/L.

b. Límite de cuantificación (LoQ)

Es calculado utilizando la ecuación 3.6. De igual forma, se toma en cuenta el promedio de los resultados de las 7 muestras de agua destilada, con una desviación estándar de 0.9759 CPM del valor del fondo de radio (^{226}Ra).

$$LoQ = 43.20 + 10(0.98) = 52.96 \text{ CPM} = 0.074 \frac{\text{Bq}}{\text{L}}$$

De modo que la actividad más baja de radio (^{226}Ra) que puede ser detectada mediante el método, con un nivel aceptable de precisión y veracidad, corresponde a 0.074 Bq/L.

c. Límite crítico (Lc)

El límite crítico (Lc) es calculado utilizando la ecuación 3.7; para un tiempo de conteo de 1000 min y una desviación estándar de 0.9759 CPM del valor del fondo de radio (^{226}Ra).

$$Lc = 1.64 \sqrt{\frac{2(43.20)}{1000}} = 0.48 \text{ CPM}$$

En la Tabla 4.19 se presentan los límites obtenidos. No es posible presentar el límite crítico en actividad (Bq/L), ya que los conteos obtenidos fueron similares a los conteos de fondo. Por último, se observa que el criterio de aceptabilidad se cumple, ya que $Lc < LoD \ll LoQ$.

Tabla 4.19 Límites calculados para la metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

	CPM	Actividad (Bq/L)
Límite de detección (LoD/AMD)	46.88	0.005
Límite crítico (Lc)	0.48	-
Límite de cuantificación (LoQ)	52.96	0.074

IV. Exactitud

a. Veracidad

i. Sesgo

El sesgo se calcula utilizando la ecuación 2.14 y tomando como base los resultados obtenidos de las 7 muestras patrón que fueron preparadas para el cálculo de la linealidad del método. En la Tabla 4.20 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.20 Sesgo en muestras patrón para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Sesgo (%)
0.18	0.17	-0.95
0.46	0.52	6.64
0.64	0.77	12.59
0.82	0.96	13.30
1.00	1.10	9.03
1.55	1.69	13.86
2.01	2.00	-0.82

Las muestras de 0.64 Bq/L, 0.82 Bq/L y 1.55 Bq/L presentan un sesgo mayor al establecido por el criterio de aceptación ($\pm 10\%$), lo que significa que el valor de la actividad medida en dichas muestras se aleja de la actividad teórica preparada. Lo cual pudo haber sido provocado a raíz de alguna particularidad en el proceso de preparación o medición de las muestras patrón; tal como la presencia de factores que afectan la transferencia de energía radiante dentro del equipo de centelleo líquido durante la medición.

ii. Recuperación

Los porcentajes de recuperación son calculados a partir de la ecuación 2.15 y se muestran en la Tabla 4.21. De igual forma, fueron utilizados los resultados obtenidos de las 7 muestras patrón que fueron preparadas para el cálculo de la linealidad del método.

Tabla 4.21 Porcentajes de recuperación para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Lectura del blanco (CPM)	Recuperación (%)
0.18	0.17	43.20	89.68
0.46	0.52		112.48
0.64	0.77		118.23
0.82	0.96		115.04
1.00	1.10		108.05
1.55	1.69		108.32
2.01	2.00		99.13

De la Tabla 4.21 se observa que el porcentaje de recuperación para la muestra de 0.18 Bq/L es menor al establecido por el criterio de aceptación (%R>95%). Por lo que se concluye, que a una baja actividad de radio (^{226}Ra) presente en una muestra de agua, el porcentaje de recuperación disminuye. Es decir que el rendimiento del método, en cuanto al proceso de extracción a bajas concentraciones de radio (^{226}Ra), es menor.

b. Precisión

i. Repetibilidad

Se realizaron 7 mediciones repetitivas bajo las mismas condiciones, de cada uno de los siguientes patrones: 0.18 Bq/L, 0.82 Bq/L y 2.00 Bq/L, preparados para la gráfica de la linealidad. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Actividad de las muestras patrón para análisis de Repetibilidad del método.

Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
0.18	15/06/2018 11:01	17/07/2018 19:16	0.17
		17/07/2018 20:18	0.18
		17/07/2018 21:21	0.16
		17/07/2018 22:23	0.18
		17/07/2018 23:26	0.17
		18/07/2018 0:28	0.15
		18/07/2018 1:31	0.14
Promedio (Bq/L)			0.17
Desviación estándar (%s)			1.33
Coeficiente de variación (%CV)			0.11
0.82	15/06/2018 10:52	30/07/2018 19:30	0.96
		30/07/2018 20:31	0.97
		30/07/2018 21:33	0.96
		30/07/2018 22:35	0.97
		30/07/2018 23:38	0.93
		31/07/2018 0:40	0.94
		31/07/2018 1:43	0.97
Promedio (Bq/L)			0.96
Desviación estándar (%s)			1.62
Coeficiente de variación (%CV)			0.03
2.01	15/06/2018 10:57	23/07/2018 15:04	1.95
		23/07/2018 16:06	2.00
		23/07/2018 17:08	1.98
		23/07/2018 18:11	1.97

Continúa en pág. 145

Tabla 4.22 Actividad de las muestras patrón para análisis de Repetibilidad del método. Continuación

Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
		23/07/2018 19:13	1.99
		23/07/2018 20:16	1.96
		23/07/2018 21:18	1.96
Promedio (Bq/L)			1.97
Desviación estándar (%s)			1.99
Coeficiente de variación (%CV)			0.02

A partir de en la Tabla 4.22, se observa que para las 3 muestras preparadas bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos cumplen con el criterio de evaluación del método; ya que para ninguna muestra se obtuvo un porcentaje de desviación estándar mayor al 10%. Por lo que se demuestra que el método es preciso bajo condiciones de repetibilidad.

iii. Reproducibilidad

Las 2 muestras de radio (^{226}Ra) de 2 Bq/L preparadas utilizando el patrón CIAN, y con diferente coctel cada una (grado centelleo y HPLC), fueron medidas durante 3 semanas, en diferentes días. Los resultados son presentados en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Actividades obtenidas a partir de prueba de reproducibilidad para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

Tipo de coctel	Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
Centelleo	1.99	20/06/2018 11:56	24/07/2018 15:31	1.94
			30/07/2018 17:25	1.96
			07/08/2018 17:54	1.96
Promedio (Bq/L)				1.95
Desviación estándar (%s)				1.10
Coeficiente de variación (%CV)				0.01
HPLC	1.99	20/06/2018 12:02	24/07/2018 16:33	2.00
			30/07/2018 18:28	1.98
			07/08/2018 18:56	1.96
Promedio (Bq/L)				1.98
Desviación estándar (%s)				2.32
Coeficiente de variación (%CV)				0.03

Se realizó también una evaluación estadística t-Student, para determinar si existen diferencias significativas entre la media de las series de datos. En este caso la hipótesis nula establece que no existen diferencias significativas entre las medias de los dos grupos de datos (muestra con coctel grado centelleo y con HPLC).

Utilizando la ecuación 3.8, se procede a calcular el valor de t_{cal} como se muestra a continuación:

$$t_{calculado} = \frac{|-0.03|}{\left(\frac{0.02}{\sqrt{3}}\right)} = 2.16$$

Luego se tiene que con un nivel de confianza del 95%, y para 2 grados de libertad, el valor de $t_{\text{tabulado}} = 4.30$. Como $t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$, se acepta la hipótesis nula, lo cual indica que no hay diferencias significativas entre las medias de ambas series de datos.

Se concluye que, al realizar un cambio en una condición analítica, en este caso el tipo de tolueno utilizado en la preparación del coctel de centelleo, no se alteran los resultados de los análisis; ya que cumplen con los criterios de aceptabilidad, demostrando así que el método es preciso bajo condiciones de reproducibilidad.

V. Robustez

Para conocer la capacidad del método de no ser afectado por variaciones pequeñas de algunos factores, se evalúa el cambio de analista y de pH.

d. Cambio de analista

Cada analista preparó y realizó la medición de una muestra de 0.82 Bq/L, utilizando el patrón NIST-01 (ver Tabla 4.24).

Tabla 4.24 Prueba de robustez con cambio de analista para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

Analista	Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)
I	0.82	0.86	0.88	1.10	0.01
		0.88			
		0.88			

Continúa en pág. 148

Tabla 4.24 Prueba de robustez con cambio de analista para metodología de análisis de radio (^{226}Ra). Continuación

Analista	Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)
II	0.82	0.95	0.95	3.17	0.11
		0.99			
		0.92			
III	0.82	0.96	0.96	1.00	0.01
		0.97			
		0.96			

Es necesario verificar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de las 3 muestras preparadas por diferentes analistas. Para esto se realiza una evaluación estadística F de Fisher. En este caso, la hipótesis H_0 establece que no existen diferencias significativas entre los resultados de las 3 muestras preparadas por diferentes analistas.

Luego, con 2 grados de libertad de numerador, 4 grados de libertad del denominador, y con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se obtiene que $F_{\text{tabulada}} = 6.94$. Posteriormente, a partir de la ecuación 3.9 se obtiene que $F_{\text{prueba}} = 16.02$.

Como $F_{\text{prueba}} > F_{\text{tabulada}}$, se rechaza la hipótesis H_0 , lo cual indica que sí existen diferencias significativas entre los resultados de las muestras preparadas por diferentes analistas.

Se concluye que el analista juega un papel muy importante en la preparación y medición de las muestras para análisis de radio (^{226}Ra) en agua; esto es

evidenciado no solo mediante la prueba estadística F de Fisher, sino también por la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados, puesto que a pesar de que todos cumplen con el criterio de aceptabilidad, el analista II presenta valores mayores, en comparación con los analistas I y III.

e. Cambio de pH

Se prepararon 3 muestras con diferente pH utilizando el patrón CIAN (ver Tabla 4.25).

Tabla 4.25 Prueba de robustez con cambio de pH para metodología de análisis de radio (^{226}Ra).

pH	Actividad teórica (Bq/L)	Actividad medida (Bq/L)	Promedio (Bq/L)	Desviación estándar (%)	CV (%)	Sesgo
9	1.99	1.93	1.92	1.17	0.01	-6.85
		1.91				
		1.93				
10	1.99	1.96	1.97	1.07	0.01	-2.28
		1.98				
		1.96				
11	1.99	1.93	1.90	2.74	0.04	-8.48
		1.91				
		1.88				

Inicialmente se realiza una evaluación estadística F de Fisher, para verificar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de las 3 muestras preparadas con diferentes valores de pH. En este caso, la

hipótesis H_0 establece que no existen diferencias significativas entre los resultados de las 3 muestras.

Luego, con 2 grados de libertad de numerador, 4 grados de libertad del denominador, y con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se obtiene que: $F_{tabulada} = 6.94$. Posteriormente, a partir de la ecuación 3.9:

$$F_{prueba} = \frac{3.20 * 10^{-3}}{3.60 * 10^{-4}} = 8.89$$

Como $F_{prueba} > F_{tabulada}$, se rechaza la hipótesis H_0 , lo que indica que sí existen diferencias significativas entre los resultados de las muestras de pH 9, 10 y 11.

La muestra con pH 10, presenta la menor desviación estándar y el menor sesgo, lo que indica que su actividad medida es la que más se asemeja al valor teórico preparado.

Se concluye que una modificación en las condiciones de pH en la muestra para análisis de radio (^{226}Ra) en agua, afecta los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método. Por lo que la precipitación del radio (^{226}Ra) durante la preparación de las muestras de agua, debe efectuarse a pH 10 para obtener resultados satisfactorios.

VI. Trazabilidad

Se lleva a cabo una evaluación mediante la prueba t-Student para verificar si los resultados de las mediciones se encuentran bajo la propiedad de trazabilidad. La hipótesis nula, en este caso, establece que los resultados obtenidos a partir del método son trazables para la muestra patrón preparada.

En la ecuación 3.13 se utilizan los resultados de la muestra de 0.20 Bq/L, preparada con el patrón NIST-01 para el análisis de la linealidad y repetibilidad del método, los cuales fueron: actividad de radio (^{226}Ra) promedio de 0.17 Bq/L con una desviación estándar de 0.01.

$$t_{cal} = \frac{|0.18 - 0.17|}{\sqrt{\left(\frac{0.1}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{\sqrt{6}}\right)^2}} = 0.35$$

Luego, se tiene que con un nivel de confianza del 95%, y para 6 grados de libertad, el valor de $t_{tabulado} = 2.45$.

Como $t_{tabulado} > t_{calculado}$, se acepta la hipótesis nula y se concluye que los resultados que fueron obtenidos mediante el método, son trazables para la muestra patrón preparada en el laboratorio.

VII. Cartas de Control

Se realizó un seguimiento semanal de la actividad de 3 muestras patrones diferentes, preparadas a partir de los patrones NIST-01, IRD y CIAN, con una actividad teórica de 1, 1 y 2 Bq/L, respectivamente. Se muestran los resultados obtenidos a partir de las mediciones semanales de las muestras en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 Registro de mediciones semanales de la actividad de radio (^{226}Ra) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN.

Actividad teórica	Fecha y hora de preparación	CPM	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
1.00 Bq/L NIST-01	04/04/2018 16:25	233.18	20/06/2018 19:37	1.05
		222.98	28/06/2018 20:18	0.99
		224.42	04/07/2018 19:18	1.00
		220.6	11/07/2018 23:33	0.98
		227.15	18/07/2018 16:11	1.02
		223.78	26/07/2018 21:18	1.00
		222.33	08/08/2018 19:39	0.94
		217.47	15/08/2018 21:13	0.95
		219.80	22/08/2018 21:43	0.95
Promedio				0.99
Desviación estándar (%s)				3.67
Coeficiente de variación (%CV)				0.14
0.99 Bq/L IRD	04/04/2018 16:29	365.88	20/06/2018 17:37	1.02
		349.38	28/06/2018 21:18	0.96
		350.73	04/07/2018 20:18	0.97
		352.68	12/07/2018 0:33	0.97
		353.55	18/07/2018 17:15	0.98
		353.68	26/07/2018 22:21	0.98
		354.75	08/08/2018 20:41	0.95
		356.95	15/08/2018 23:17	0.98
		350.63	22/08/2018 22:46	0.95
Promedio				0.97
Desviación estándar (%s)				2.03

Continúa pág. 153

Tabla 4.26 Registro de mediciones semanales de la actividad de radio (^{226}Ra) en las muestras preparadas con los patrones NIST-01, IRD y CIAN.

Continuación

Actividad teórica	Fecha y hora de preparación	CPM	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
Coeficiente de variación (%CV)				0.04
1.99 Bq/L CIAN	04/04/2018 16:33	725.90	20/06/2018 18:37	2.08
		710.32	28/06/2018 22:18	2.03
		701.25	04/07/2018 21:18	2.00
		700.02	12/07/2018 1:33	2.00
		698.28	26/07/2018 23:24	1.99
		692.15	08/08/2018 21:44	1.94
		703.25	15/08/2018 22:16	2.00
		704.82	22/08/2018 23:49	1.99
Promedio				2.00
Desviación estándar (%s)				4.04
Coeficiente de variación (%CV)				0.08

De la Tabla 4.26 se observa que la muestra preparada con el patrón CIAN presentó una mayor desviación estándar, en comparación con las muestras preparadas con los patrones NIST-01 e IRD. A pesar de ello, las 3 muestras cumplen con el criterio de aceptabilidad para el valor de la desviación estándar. En las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los gráficos de control que fueron obtenidos.

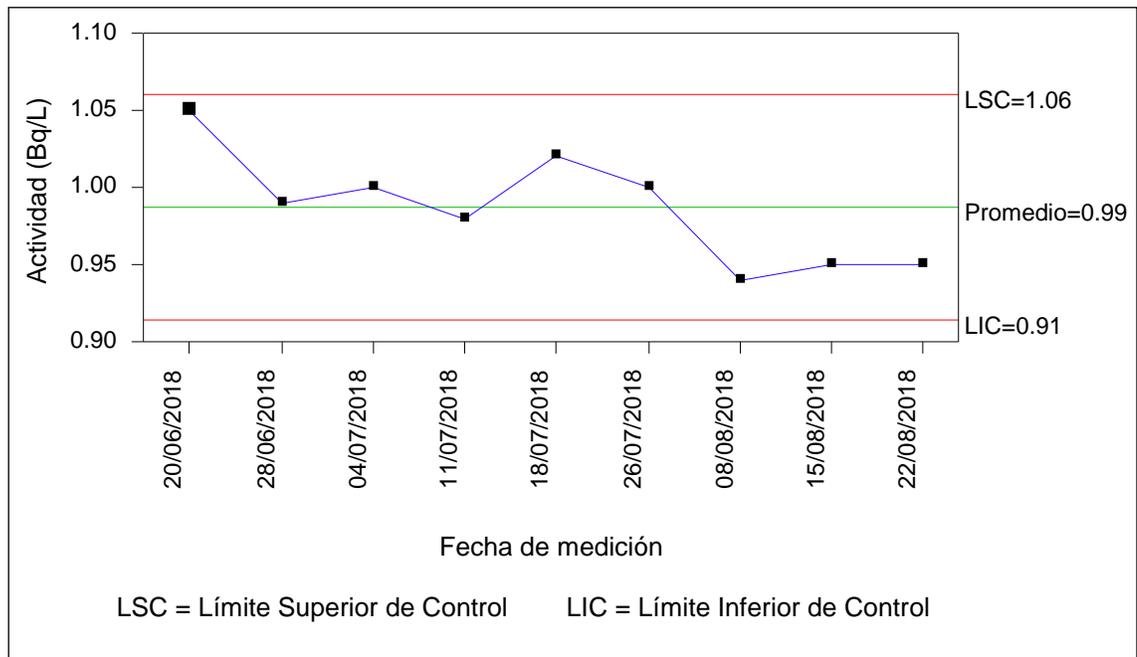


Figura 4.6 Gráfico de control de actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón NIST-01.

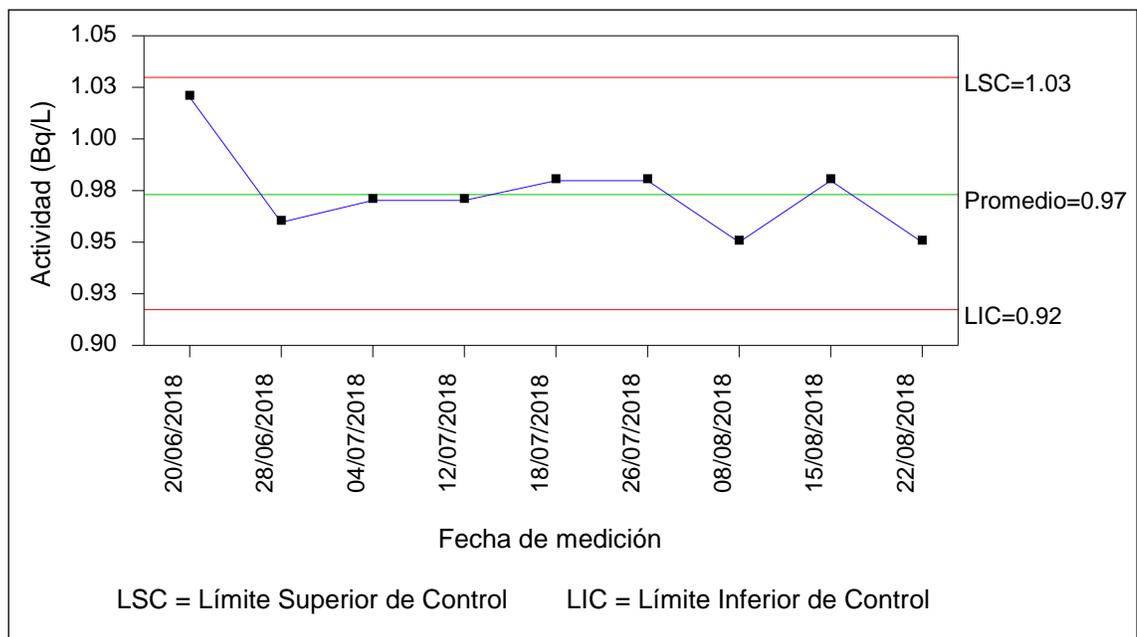


Figura 4.7 Gráfico de control de actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón IRD.

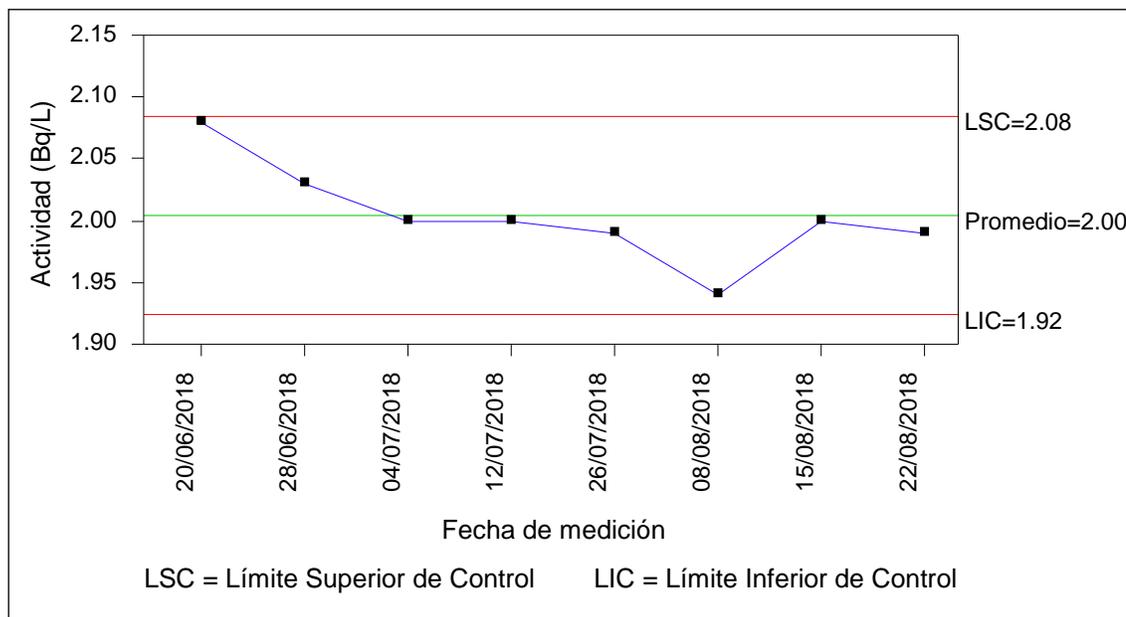


Figura 4.8 Gráfico de control de actividad de radio (^{226}Ra) en muestra patrón CIAN.

Cada una de las muestras utilizadas en la elaboración de las cartas de control, fueron medidas en mayo de 2018, para el cálculo de la eficiencia del método. Cuando se inició con las mediciones para la creación de las cartas de control, para la primera medición, el lapso de tiempo entre mediciones fue de 2 meses a diferencia de las siguientes mediciones, cuyo lapso fue de 1 semana.

Por lo tanto, se dice que la primera medición de cada una de las muestras, se realizó bajo una condición diferente a la de las siguientes mediciones. Esto es demostrado a partir de las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8; ya que en todas ellas se presenta que la actividad obtenida a partir de la primera medición es mayor a la obtenida para el resto de mediciones. Se observa que todos los resultados se encuentran distribuidos alrededor del promedio, y además dentro de los límites de control. Por lo que el proceso de medición de cada una de las

muestras patrón se encontró bajo control; demostrando así la estabilidad de los patrones de medición durante varios meses.

VIII. Curva de seguimiento

Noakes (1992) demostró que en una muestra de agua el comportamiento de la actividad de radio (^{226}Ra), en función del tiempo, presenta después de su preparación un incremento acelerado durante los primeros 5 días y al haber transcurrido alrededor de 30 días (tiempo necesario para el equilibrio secular), el crecimiento del radio (^{226}Ra) permanece aproximadamente constante (ver Figura 4.9). Por lo que se preparó una muestra patrón de 2 Bq/L utilizando el patrón CIAN, la cual después de su preparación fue medida mediante el equipo de centelleo líquido, una vez cada semana.

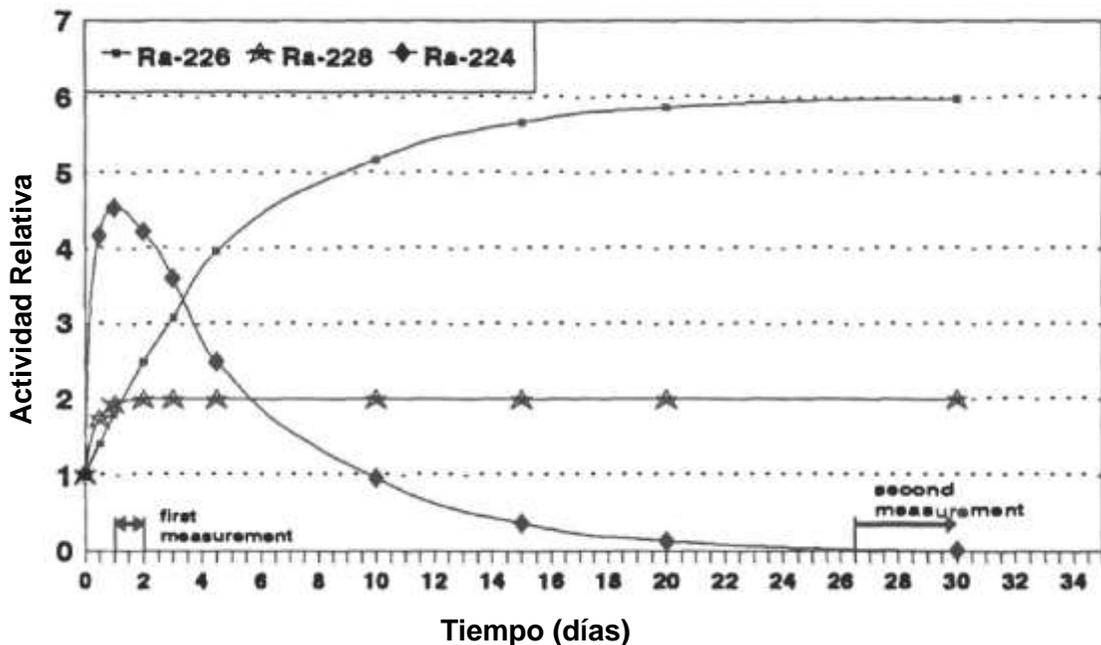


Figura 4.9 Cambio en la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra preparada. Fuente: (Chalupnik & Lebecka , 1992).

En la Tabla 4.27 y Figura 4.10 se muestra el crecimiento de la actividad de radio (^{226}Ra) en la muestra preparada en el laboratorio, evidenciándose que, transcurridos los 30 días necesarios para el equilibrio secular, la concentración alcanza un valor que permanece casi constante con respecto al tiempo.

Tabla 4.27 Registro de crecimiento de la actividad de radio (^{226}Ra) en muestra preparada.

Actividad teórica (Bq/L)	Fecha y hora de preparación	CPM	Fecha y hora de medición	Actividad medida (Bq/L)
1.99	20/06/2018 11:58	598.17	28/06/2018 19:18	1.71
		672.77	04/07/2018 18:18	1.93
		687.95	11/07/2018 21:33	1.98
		699.15	18/07/2018 15:49	2.02
		688.97	26/07/2018 19:13	1.98
		685.40	08/08/2018 17:34	1.94
		691.18	16/08/2018 0:20	1.98
		682.32	23/08/2018 0:52	1.94

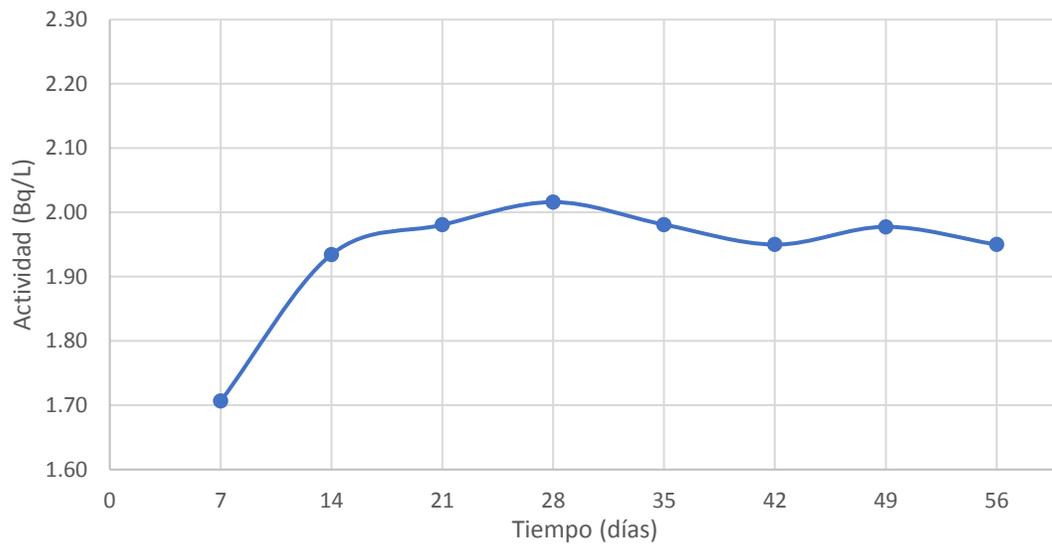


Figura 4.10 Curva de equilibrio entre los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestra patrón CIAN.

4.2. ANÁLISIS DE RADÓN (^{222}Rn) EN SITIOS DE MUESTREO

A partir de la aplicación del método ASTM D5072-09, se detectó la presencia de radón (^{222}Rn) en las muestras que fueron recolectadas en los 5 sitios muestreados durante las jornadas de muestreos, las cuales se realizaron en las fechas presentadas en la Figura 4.11.

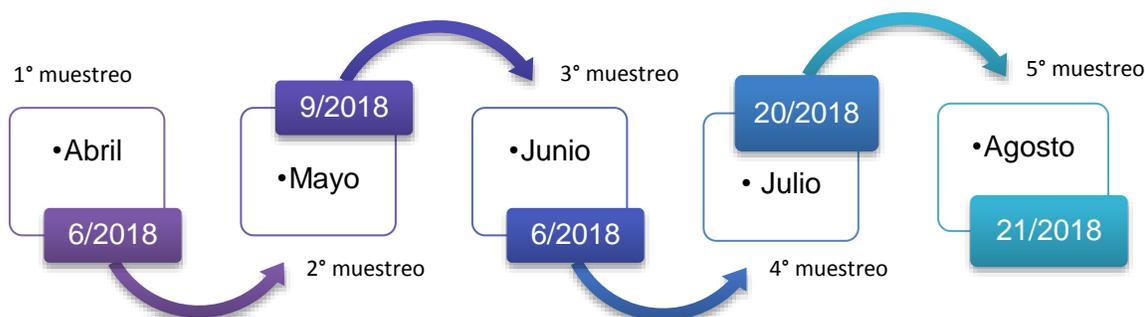


Figura 4.11 Fechas de ejecución de jornadas de muestreos.

4.2.1. Comparación con el régimen de precipitación

La época lluviosa del año 2018 inició aisladamente en la zona norte del departamento de Morazán, entre el 1 y el 10 de abril; seguidamente, se extendió a las zonas central y occidental, del 11 al 30 de abril. Sin embargo, el promedio de lluvias en el mes de abril 2018, fue de 137 milímetros; dicha cantidad superó más de tres veces la normal, y lo convirtió en el mes más lluvioso desde el año 1971 a escala nacional, siendo gobernado por el fenómeno de la Niña, tal como se muestra en la Figura 4.12 (MARN, 2018). Por lo que se considera que las 5 jornadas de muestreos se realizaron dentro de la época lluviosa.

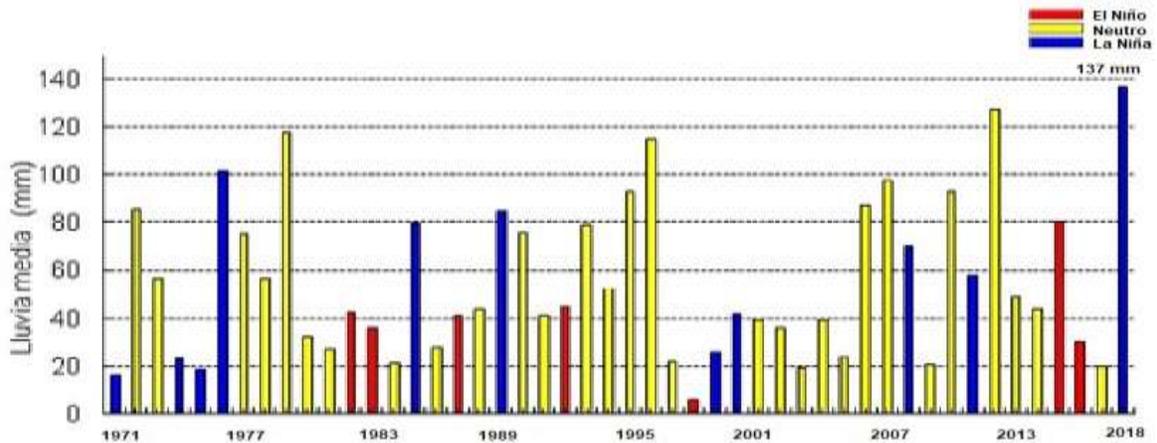


Figura 4.12 Promedio de lluvia en meses de abril, desde el año 1971 hasta el año 2018. Variable de lluvia nacional. Fuente: (MARN, 2018).

4.2.2. Medición de parámetros fisicoquímicos

La recolección de las muestras se realizó mediante una válvula de muestreo que pertenece a la planta de bombeo, en la cual el agua ya se encuentra tratada y con destino al suministro de agua potable; lo cual se realizó con el fin de estimar la radiactividad presente en el agua al momento de ser distribuida a la población. Es importante determinar las propiedades fisicoquímicas de las muestras para evaluar su posible relación con las actividades de radón (^{222}Rn) encontradas.

Las propiedades fisicoquímicas medidas mediante la sonda multiparámetros YSI Professional Plus en las muestras de agua recolectadas durante las jornadas de muestreos, se presentan en la Tabla 4.28.

Tabla 4.28 Propiedades fisicoquímicas en muestras de agua de consumo humano medidas en cada sitio de muestreo en el periodo de estudio.

Sitio de muestreo	Fecha de muestreo	pH	Cloruros (mg/L)	Conductancia (µs/cm)	TDS (g/L)	Oxígeno disuelto		Temperatura de recolección (°C)
						(mg/L)	(%)	
La Gloria	06/04/2018	6.93	83.69	361.00	0.24	11.14	143.20	25.30
	09/05/2018	7.40	152.14	355.90	0.23	12.59	154.70	25.40
	06/06/2018	7.45	110.13	381.80	0.25	9.94	120.90	25.50
	20/07/2018	7.20	64.10	362.90	0.24	11.02	132.90	25.60
El Espino	06/04/2018	6.34	432.62	1087.00	0.55	9.01	121.10	25.40
	09/05/2018	6.53	650.37	670.00	0.44	8.99	117.00	30.50
	06/06/2018	6.64	550.40	675.00	0.44	11.86	138.10	29.30
	20/07/2018	6.51	446.11	699.00	0.44	7.90	102.60	24.60
Centroamé-rica	06/04/2018	6.48	989.88	813.00	0.52	7.30	100.80	29.80
	09/05/2018	6.71	1148.00	910.00	0.53	7.67	105.20	30.50
	06/06/2018	6.84	303.67	695.00	0.45	9.21	116.90	32.30
	20/07/2018	6.61	972.68	799.00	0.52	5.51	75.80	32.20
El Socorro	06/04/2018	6.69	585.90	600.00	0.39	9.77	127.20	28.60
	09/05/2018	6.93	741.43	650.00	0.40	8.85	114.30	28.70

Continúa en pág. 162

Tabla 4.28 Propiedades fisicoquímicas en muestras de agua de consumo humano medidas en cada sitio de muestreo en el periodo de estudio. Continuación

Sitio de muestreo	Fecha de muestreo	pH	Cloruros (mg/L)	Conductancia (µs/cm)	TDS (g/L)	Oxígeno disuelto		Temperatura de recolección (°C)
						(mg/L)	(%)	
	06/06/2018	6.79	605.72	818.00	0.45	7.85	102.00	28.20
	20/07/2018	6.72	791.37	660.00	0.42	6.41	84.60	28.30
Río Urbina	06/04/2018	6.61	390.79	550.00	0.35	7.80	105.10	28.50
	09/05/2018	6.83	399.97	610.00	0.36	7.86	106.80	30.00
	06/06/2018	6.68	522.14	572.00	0.37	6.51	88.00	28.20
	20/07/2018	6.68	379.12	567.00	0.36	5.65	76.40	30.80

A partir de la Tabla 4.28, se muestra que el pH varió en un rango de 6.32 en muestras de agua del sitio El Espino hasta 7.45 del sitio La Gloria; por lo que se puede aseverar que el agua potable en la zona de estudio se encontró a pH neutro durante el periodo de monitoreo. Además, las temperaturas promedio en las que fueron recolectadas las muestras fueron:

La Gloria: 28.45°C

El Espino: 28.55°C

Centroamérica: 31.33°C

El Socorro: 28.75°C

Río Urbina: 31.18°C

Al realizar un análisis entre los parámetros fisicoquímicos y la actividad medida, no fue posible identificar una tendencia entre ambas condiciones; sin embargo esto es satisfactorio, ya que demuestra que no existe una causa que provoque una situación en la que los parámetros fisicoquímicos cambien en la misma proporción que la radiactividad; aliviando el hecho de buscar causas posibles, que podrían tener un impacto negativo como el caso de los cloruros, que podría evidenciar aguas maduras provenientes de fallas con actividad volcánica. En la investigación no se detectó ningún caso.

4.2.3. Evaluación cualitativa de la presencia de radón (^{222}Rn)

Se presenta el espectro de referencia teórico en la Figura 4.13 a) y el espectro obtenido a partir de una muestra recolectada en el sitio Río Urbina, durante la cuarta jornada de muestreo en la Figura 4.13 b). Al realizar la comparación entre ambos espectros, se identifican en cada uno de éstos los 3 picos energéticos, correspondientes al radón (^{222}Rn), polonio (^{218}Po) y polonio (^{214}Po); lo cual permite confirmar cualitativamente la presencia del gas radón (^{222}Rn) en la muestra que fue sujeta a análisis.

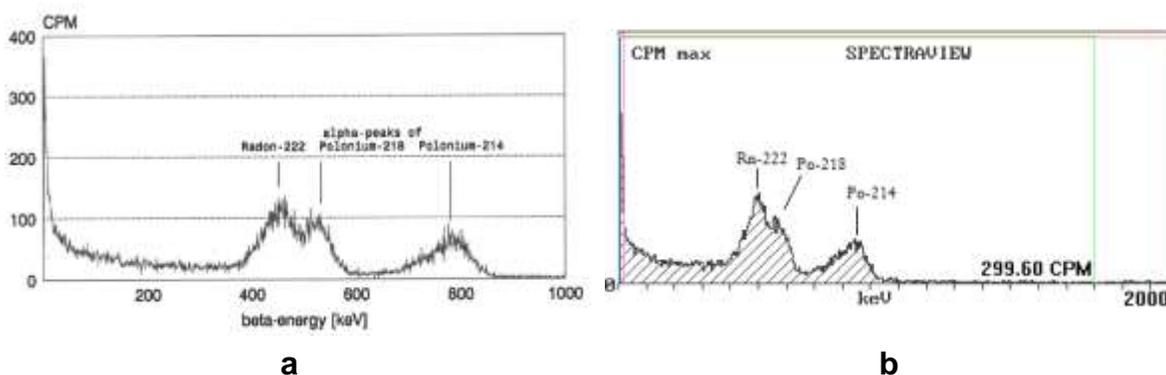


Figura 4.13 Comparación de espectros de radón (^{222}Rn) en equipo de centelleo líquido.

Fuente: Software SpectraView.

Asimismo, en la Figura 4.14, se muestra el espectro obtenido a partir de la medición de la muestra blanco de radón (^{222}Rn), correspondiente al cuarto muestreo, el cual solamente muestra radiación de fondo al inicio del espectro.

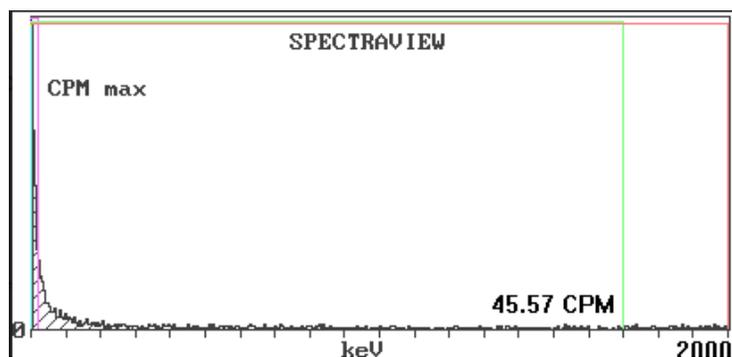


Figura 4.14 Espectro emitido por una muestra blanco en equipo de centelleo líquido.

Fuente: Software SpectraView.

4.2.4. Evaluación cuantitativa de la presencia de radón (^{222}Rn)

Una vez confirmada la presencia del gas radón (^{222}Rn) en las muestras de agua de forma cualitativa, se presenta evidencia cuantitativa con las respectivas actividades medidas para cada muestra. En la Tabla 4.29 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de las muestras de agua que fueron recolectadas.

Tabla 4.29 Actividad medida del gas radón (^{222}Rn) en cada sitio de muestreo en el periodo de estudio.

Sitio de muestreo	Fecha de muestreo	Código de muestra	Actividad de radón (^{222}Rn) (Bq/L)
La Gloria	06/04/2018	$^{222}\text{Rn}101$	0.39 ± 0.16
	09/05/2018	$^{222}\text{Rn}201$	0.57 ± 0.09
	06/06/2018	$^{222}\text{Rn}301$	0.42 ± 0.15
	20/07/2018	$^{222}\text{Rn}401$	0.61 ± 0.10
	21/08/2018	$^{222}\text{Rn}501$	0.47 ± 0.13
El Espino	06/04/2018	$^{222}\text{Rn}102$	2.31 ± 0.10
	09/05/2018	$^{222}\text{Rn}202$	2.30 ± 0.10
	06/06/2018	$^{222}\text{Rn}302$	2.03 ± 0.09
	20/07/2018	$^{222}\text{Rn}402$	2.15 ± 0.10
	21/08/2018	$^{222}\text{Rn}502$	1.72 ± 0.09
Centroamérica	06/04/2018	$^{222}\text{Rn}103$	1.17 ± 0.09
	09/05/2018	$^{222}\text{Rn}203$	2.02 ± 0.09
	06/06/2018	$^{222}\text{Rn}303$	1.03 ± 0.09
	20/07/2018	$^{222}\text{Rn}403$	2.04 ± 0.09
	21/08/2018	$^{222}\text{Rn}503$	1.70 ± 0.09
El Socorro	06/04/2018	$^{222}\text{Rn}104$	1.86 ± 0.09
	09/05/2018	$^{222}\text{Rn}204$	2.04 ± 0.09
	06/06/2018	$^{222}\text{Rn}304$	1.90 ± 0.09
	20/07/2018	$^{222}\text{Rn}404$	1.94 ± 0.09
	21/08/2018	$^{222}\text{Rn}504$	1.57 ± 0.09
Río Urbina	06/04/2018	$^{222}\text{Rn}105$	3.97 ± 0.15
	09/05/2018	$^{222}\text{Rn}205$	5.98 ± 0.23
	06/06/2018	$^{222}\text{Rn}305$	4.36 ± 0.16
	20/07/2018	$^{222}\text{Rn}405$	5.02 ± 0.19
	21/08/2018	$^{222}\text{Rn}505$	4.38 ± 0.16

En la Figura 4.15 se presenta la ubicación de los sitios de muestreo en el mapa hidrogeológico, en relación a la concentración promedio de radón (^{222}Rn) encontrado en cada sitio.

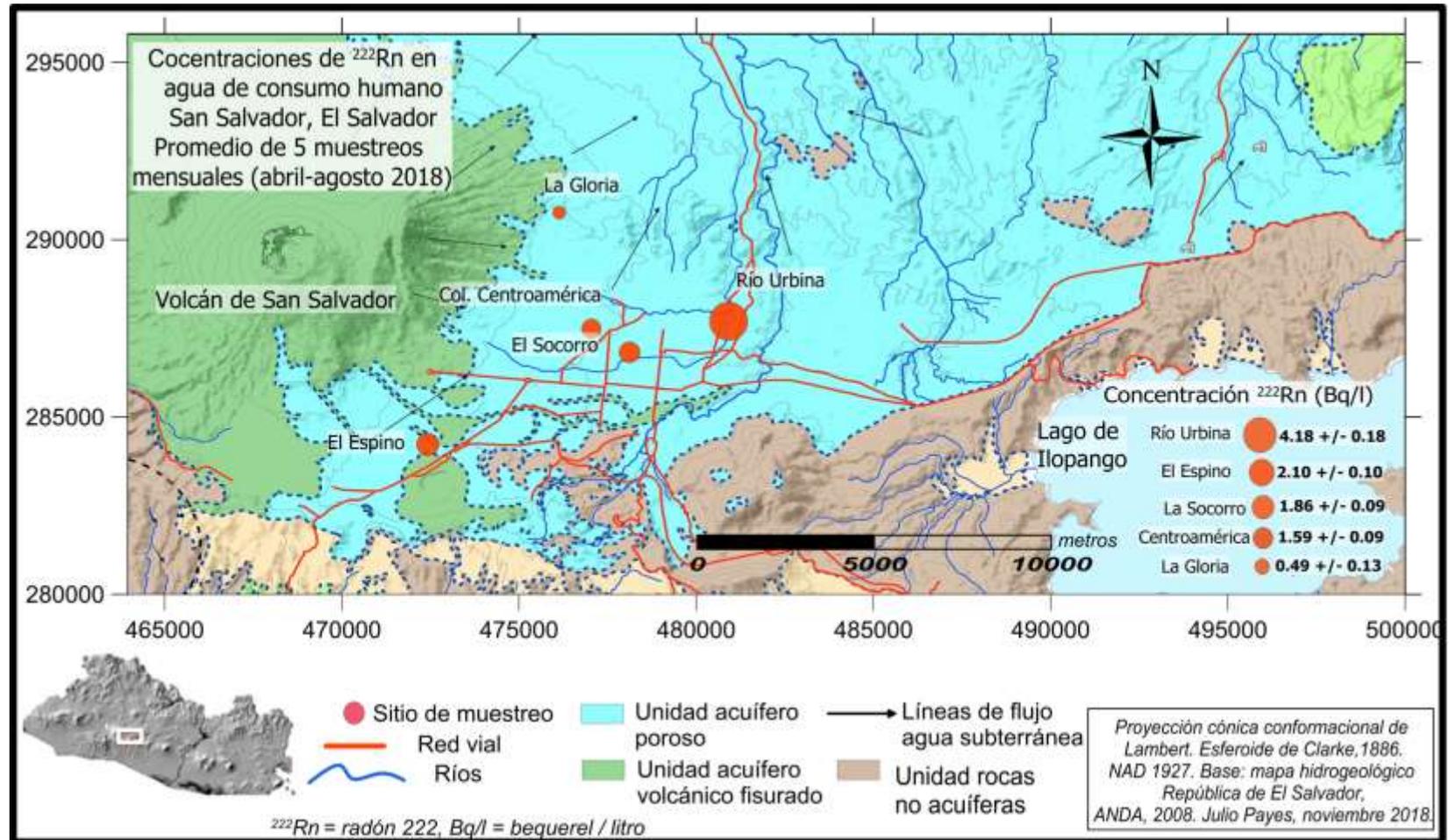


Figura 4.15 Ubicación de los sitios de muestreo en el mapa hidrogeológico.

Como se puede observar en la Figura 4.15 los sitios que presentan una actividad menor con respecto a los demás son El Espino y el sitio La Gloria, mientras que el sitio con mayor concentración es el Río Urbina esto se puede estimar debido a:

- a. Debido a la altitud de cada sitio, así como El Espino y La Gloria se encuentran en la zona alta del AMSS, donde según el mapa hidrogeológico (ANDACOSUDE, 2008) se ubica la principal zona de recarga, localizada en la estructura volcánica: siendo el Volcán de San Salvador y el Picacho, donde la fracturación y el carácter escoriáceo de los flujos de lava, hacen posible que aproximadamente un máximo de 25% de las precipitaciones se infiltren. Por lo que, se puede estimar que las bajas concentraciones encontradas en esta zona se debe a la recarga del acuífero, así como también se puede estimar que la razón por la cual el Río Urbina presenta concentraciones altas de radón (^{222}Rn), es debido a que se encuentra en la zona baja del AMSS, por lo que el agua subterránea del acuífero tiene un mayor recorrido, arrastrando todo el radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) que encuentra a su paso desde la zona de recarga.

- b. Asimismo, se debe de tomar en cuenta como posible causa de esta diferencia de concentraciones que, para el sitio Río Urbina como muestra el modelo hidrogeológico en el centro (AMSS) establece la presencia de dos sistemas acuíferos, el primero de ellos profundo y del tipo fisurado de gran extensión que sobreyace a una Unidad No Acuífera determinada por un basamento de carácter impermeable, y el segundo poroso de extensión limitada (ANDACOSUDE, 2008). Esto se puede observar en las líneas de flujo en la Figura 4.15 y como resultado de la presencia de dos sistemas acuíferos se presenta una alta concentración de radón (^{222}Rn) en El Río Urbina. Cabe mencionar que tales estimaciones necesitan de investigaciones posteriores tomando más puntos en el AMSS para poder confirmar lo estimado.

En la Figura 4.16 se presenta un gráfico de elevación, en el que se encuentran ubicados los sitios de muestreo a partir de sus coordenadas geográficas y altitud; observándose que el sitio con mayor altitud es El Espino y el más bajo es el Río Urbina.

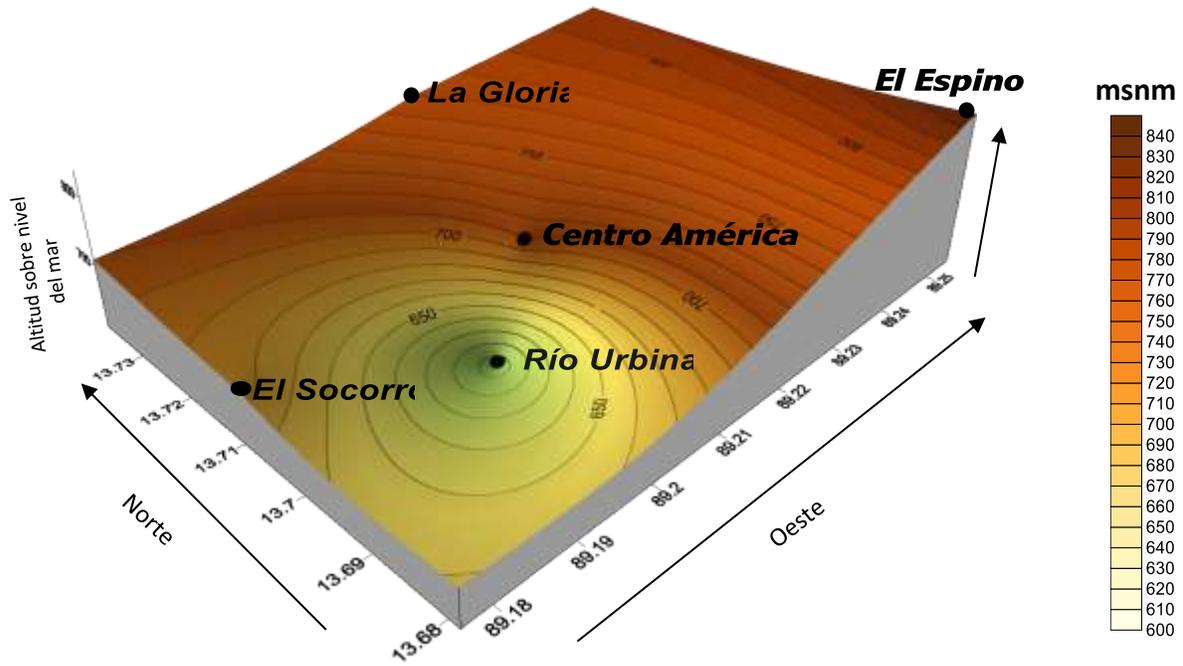
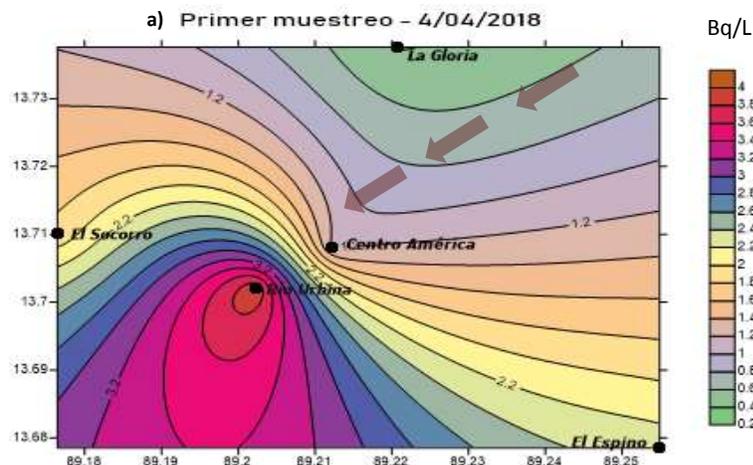


Figura 4.16 Gráfico de elevación con la ubicación de los 5 sitios muestreados.

A partir de lo anterior se presenta en la Figura 4.17, las curvas de nivel correspondientes a cada jornada de muestreo, las cuales permiten realizar una posible correlación del comportamiento del radón (^{222}Rn) presente en la zona de estudio, a partir de las actividades medidas para cada sitio de muestreo.



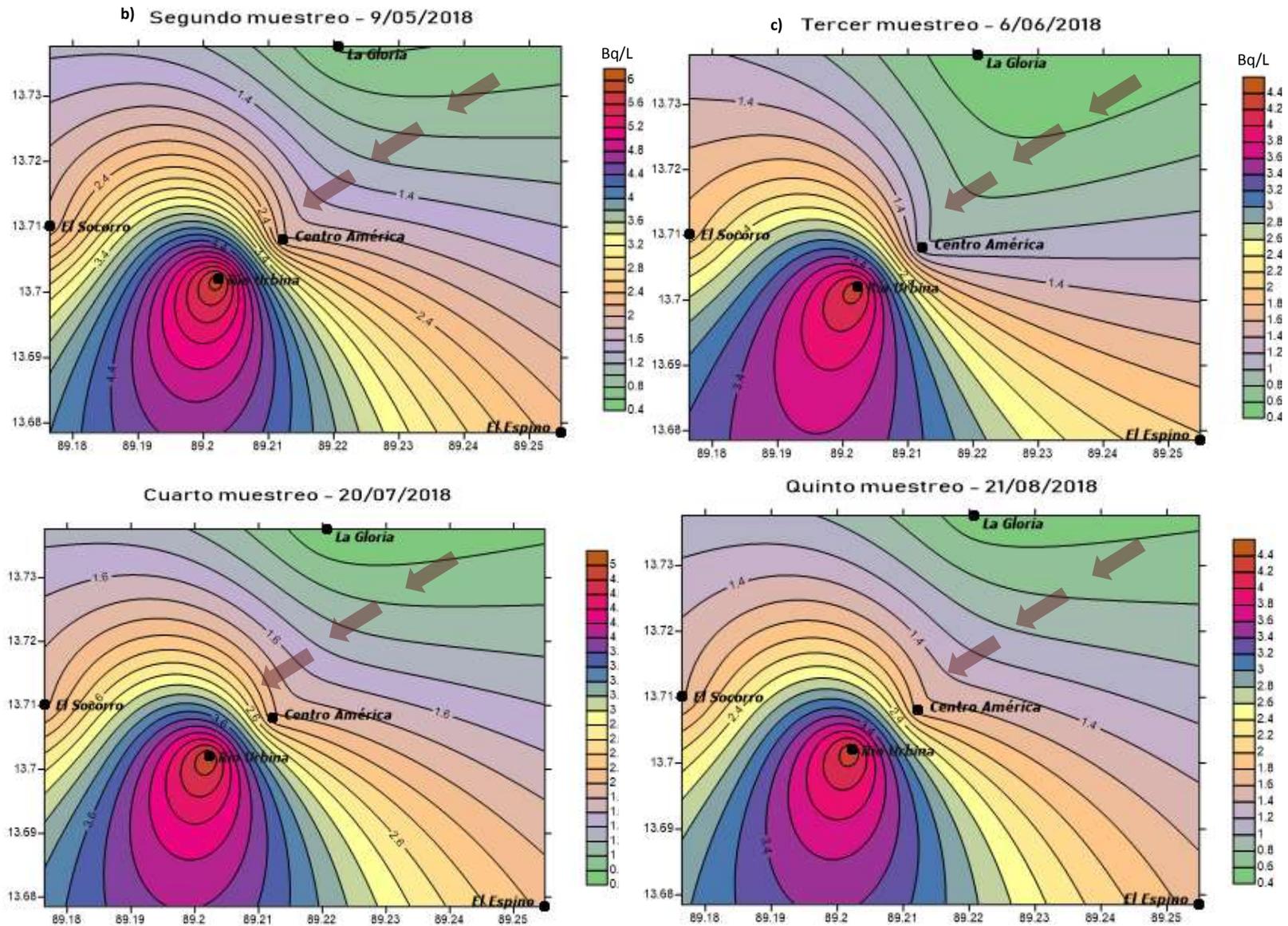


Figura 4.17 Flujo de actividad de radón (^{222}Rn) para los 5 sitios muestreados.

Se observa que la actividad de radón (^{222}Rn) aumenta en dirección al sur y en dirección al este para las 5 jornadas de muestreos, donde el sitio con mayor actividad fue el Río Urbina, y el de menor El Espino. Al traslapar los 5 muestreos, tal y como se muestra en la Figura 4.18, se observa como en cada jornada de muestreo se presentó una tendencia similar de aumento en la concentración de actividad; sin embargo, también se presenta una estimación del comportamiento de las concentraciones de radón (^{222}Rn) en otros sitios cercanos a las zonas de estudio, que pueden ser incluidos en próximas investigaciones. Asimismo, se compara con la altitud de los sitios, revelando que el sitio Río Urbina, además de tener la mayor actividad de radón (^{222}Rn), posee la menor altitud entre todos los sitios muestreados, lo cual da lugar a la posibilidad de que al ser el punto más bajo se encuentre más próximo a alguna fuente de radón (^{222}Rn). Por otro lado, personal de ANDA informó que en el sitio de muestreo La Gloria, el agua se encuentra mezclada con aguas provenientes de la fuente San Ramón, por lo que esto podría alterar la cantidad de radón (^{222}Rn) presente en dicho punto.

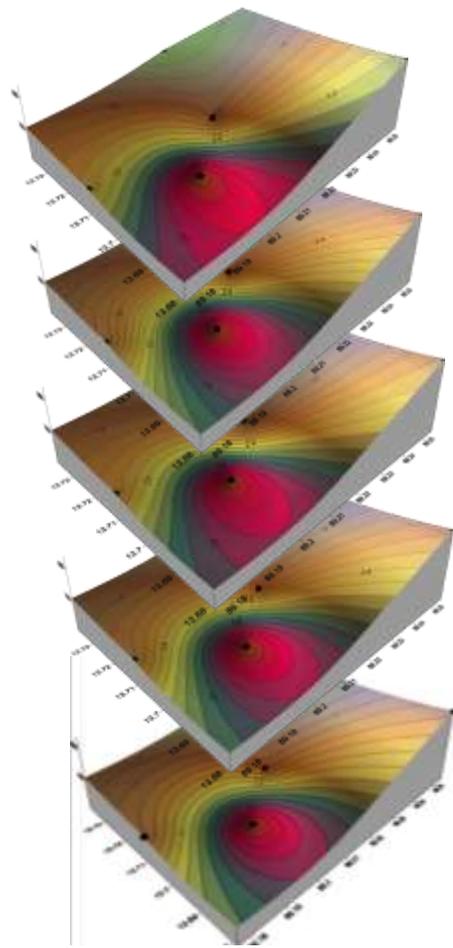


Figura 4.18 Curvas de nivel para los cinco muestreos realizados.

En la Figura 4.19 se muestra que el comportamiento de la actividad de radón (^{222}Rn) en los sitios de muestreo a lo largo del periodo de estudio fue la misma, tomando una forma senoidal, con dos crestas para los meses mayo y julio; y tres valles en los meses abril, junio y agosto.

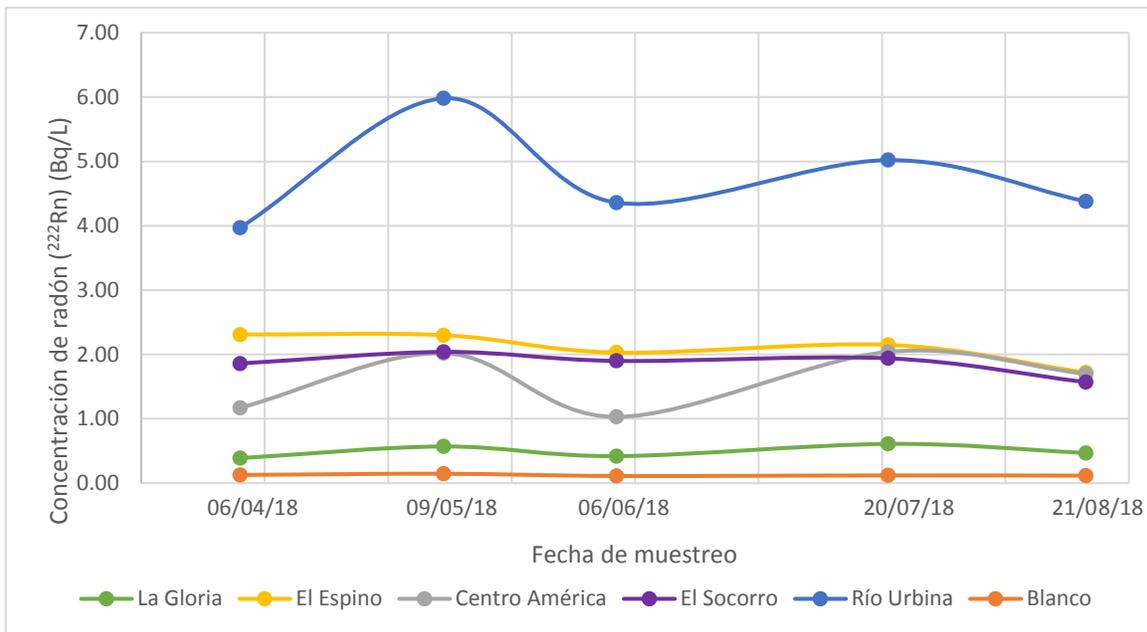


Figura 4.19 Comparación de actividad de radón (^{222}Rn) obtenida para cada sitio de muestreo.

Se observa que los sitios El Espino, Centroamérica y El Socorro se encontraron con valores de actividad de radón (^{222}Rn) muy próximos entre ellos, caso contrario del sitio La Gloria y Río Urbina, los cuales se encontraron muy distantes y forman los máximos y mínimos de todas las mediciones. Se resalta también la fluctuación de cada sitio, donde El Espino, El Socorro y La Gloria se mantuvieron con menor fluctuación en un periodo de 5 meses; caso contrario el Río Urbina y Centroamérica, que poseen ondas con mayor amplitud, las cuales representan mayores cambios en las actividades medidas, es decir una mayor variación en los resultados.

Además, se identifica a partir del análisis de la Figura 4.20 que las mayores concentraciones de radón (^{222}Rn) fueron encontradas en el mes de mayo. Asimismo, lo anterior se refleja a partir de la Figura 4.21, la cual indica que las actividades promedio en mayo se ubicaron por arriba de 2.5 Bq/L, seguido por el mes de julio con

un promedio arriba de 2 Bq/L y los meses de agosto, junio y abril, con un promedio en el rango de 1.5 Bq/L y 2.0 Bq/L.

Con respecto a la altitud, se espera que la actividad de radón (^{222}Rn) aumente a menor altitud; sin embargo, entre mayor es la altitud, se pierde esta tendencia como en el caso del sitio El Espino, lo cual puede ser evidencia de la presencia de aguas infiltradas que aumentan el flujo en el sitio y a su vez en su recorrido; parte del agua desemboca en otros cuerpos de agua, disminuyendo el contenido de radón (^{222}Rn) como en el caso del sitio Centroamérica, en el cual desciende la actividad.

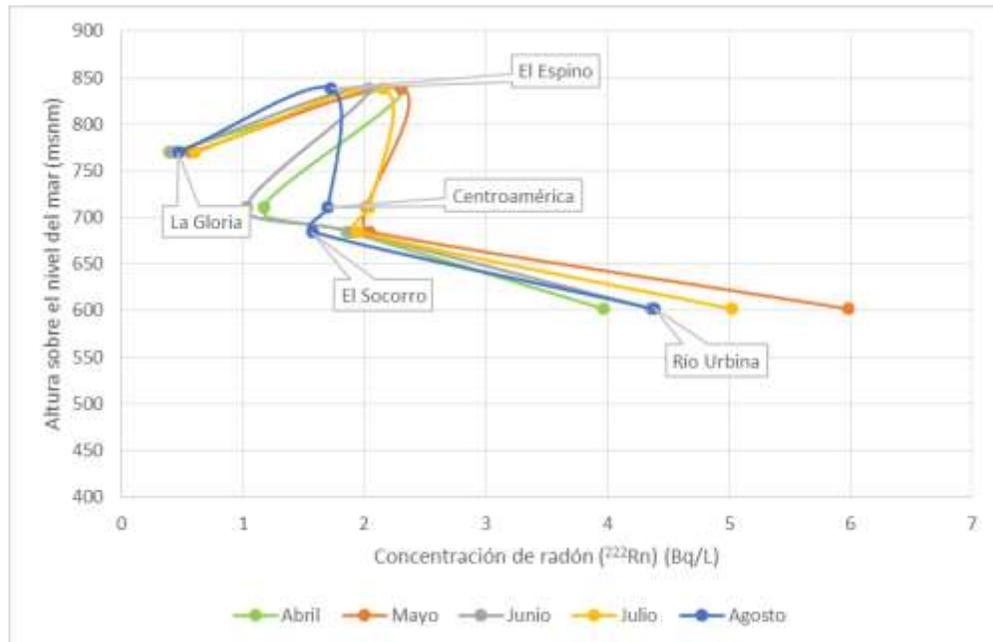


Figura 4.20 Relación entre altura geográfica y concentración de radón (^{222}Rn).

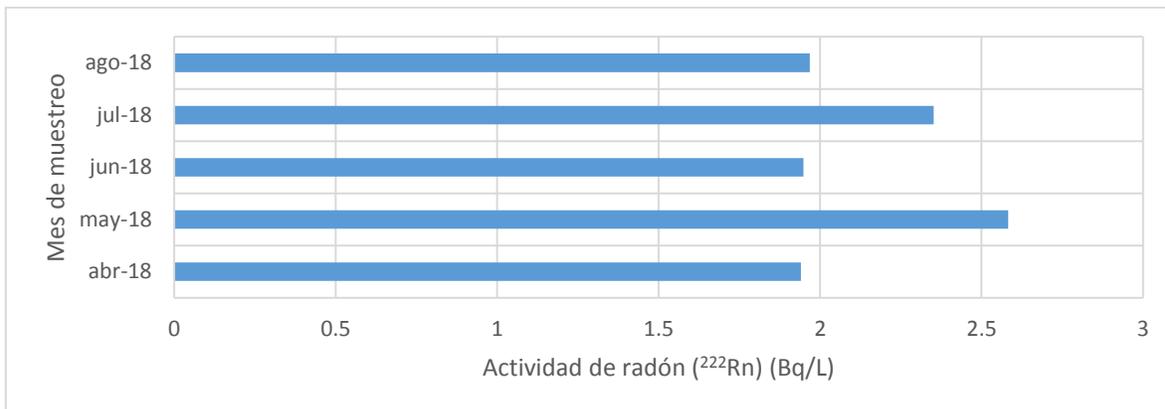


Figura 4.21 Promedio mensual de actividad de radón (²²²Rn).

Compilando los resultados obtenidos a partir del análisis de radón (²²²Rn) en las muestras de agua recolectadas en los 5 sitios de muestreo, se obtiene la Figura 4.22, la que permite observar la actividad medida de radón (²²²Rn) durante cada muestreo e indica claramente que en el sitio Río Urbina se encontró la mayor actividad de radón (²²²Rn) y en el sitio La Gloria la menor.

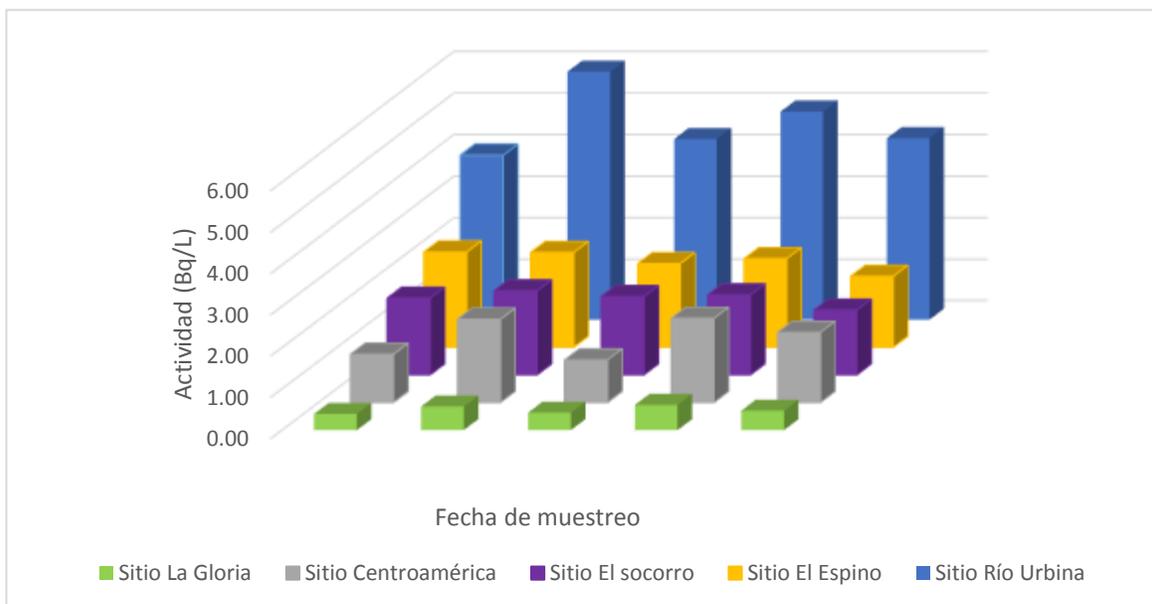


Figura 4.22 Actividad de radón (²²²Rn) por sitio para los 5 muestreos.

Por último, la actividad promedio se muestra en la Figura 4.23 y Figura 4.24. Observándose al sitio Río Urbina con 4.74 Bq/L, seguido de El Espino con 2.10 Bq/L, El Socorro con 1.862 Bq/L, Centroamérica con 1.59 Bq/L y el de menor actividad, el sitio La Gloria con 0.49 Bq/L.

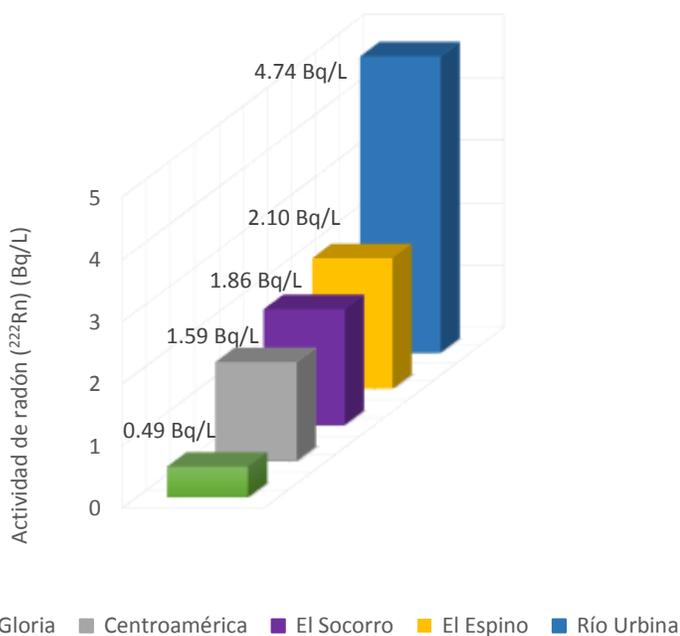


Figura 4.23 Comparación de actividad de radón (^{222}Rn) promedio entre cada sitio de muestreo.



Figura 4.24. Actividad promedio de radón (^{222}Rn) en jornadas de muestreos.

4.2.5. Relación de la actividad de radón (^{222}Rn) con Reglamento Técnico Salvadoreño

En la Figura 4.25 se realiza una comparación entre el promedio de la actividad medida de radón (^{222}Rn) para cada sitio de muestreo, con la actividad máxima permisible por el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano, la cual es de 11 Bq/L; observándose que, a partir de las muestras recolectadas, ningún sitio de muestreo supera dicho valor; sin embargo, el sitio Río Urbina se encuentra más próximo que el resto de los sitios a dicha actividad.

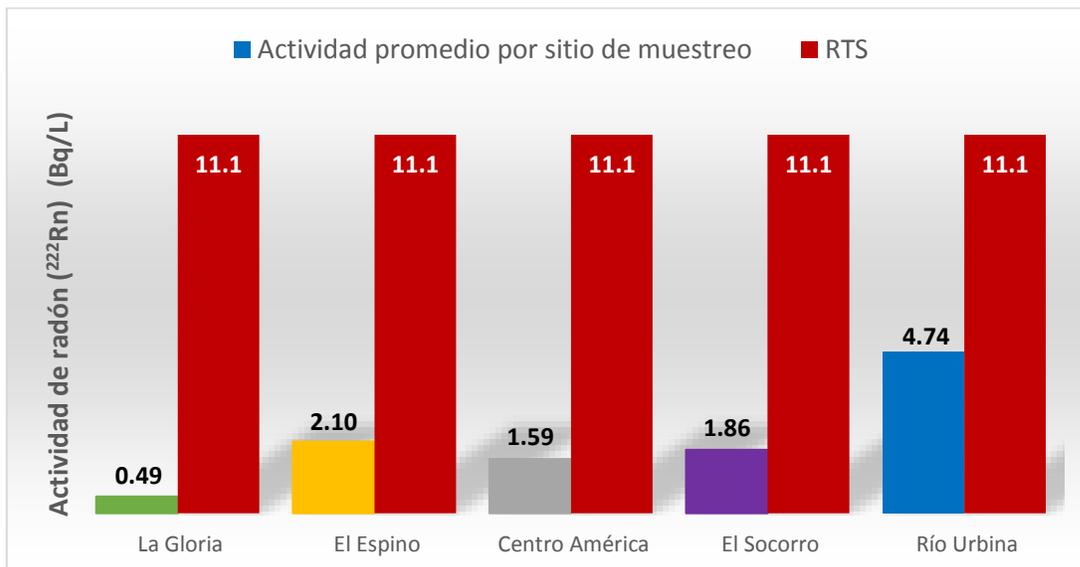


Figura 4.25 Comparación de la actividad de radón (^{222}Rn) promedio por sitio de muestreo, con valor máximo permisible por el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano.

A pesar de lo anterior, es necesario realizar un monitoreo de la radiactividad de radón (^{222}Rn) en los pozos muestreados, en especial en el sitio Río Urbina, y de esa forma verificar si la actividad de radón (^{222}Rn) se encuentra o no por debajo del límite máximo recomendado por el RTS. Ante dicha vigilancia se lograría de ser

necesario (ante un alza elevada de dicho isótopo radiactivo), tomar medidas preventivas, tal y como la creación de un sistema de aireación que permita el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera, antes de ser distribuida mediante la red de consumo de la población; evitando que la población abastecida consuma agua radiológicamente contaminada.

Por lo tanto, se da apertura a nuevas investigaciones que abarquen la evaluación de la radiactividad en agua para consumo humano, abastecida ya sea por otros acuíferos del país o de otros cuerpos de agua, utilizados con dicho objetivo.

Es importante aclarar que la actividad de radón (^{222}Rn) que fue medida durante los muestreos, corresponde a la que se encuentra disuelta en el agua destinada al consumo humano. Sin embargo, al momento de abrir alguna válvula para el consumo de agua, parte del radón (^{222}Rn) se escapa a través del aire. Por lo tanto, la inhalación de este isótopo radiactivo al momento del consumo humano hace necesario posteriores estudios con metodologías destinadas a medir radiactividad en aire.

4.3. ANÁLISIS DE RADIO (^{226}Ra) EN SITIOS DE MUESTREO

En la Tabla 4.30 se presentan los resultados de los conteos, obtenidos en los sitios de muestreo a partir de la aplicación del método ARCAL RLA/5/048 y la técnica de centelleo líquido.

Tabla 4.30 Conteos obtenidos a partir de los muestreos para análisis de radio (^{226}Ra).

Sitio de muestreo	Fecha de muestreo	Código de muestra	CPM
La Gloria	06/04/2018	^{226}Ra 101	43.48
	09/05/2018	^{226}Ra 201	44.52
	06/06/2018	^{226}Ra 301	44.40
	20/07/2018	^{226}Ra 401	44.32
El Espino	06/04/2018	^{226}Ra 102	43.28
	09/05/2018	^{226}Ra 202	46.82
	06/06/2018	^{226}Ra 302	42.92
	20/07/2018	^{226}Ra 402	44.65
Centroamérica	06/04/2018	^{226}Ra 103	42.83
	09/05/2018	^{226}Ra 203	43.67
	06/06/2018	^{226}Ra 303	40.97
	20/07/2018	^{226}Ra 403	43.82
El Socorro	06/04/2018	^{226}Ra 104	42.98
	09/05/2018	^{226}Ra 204	45.03
	06/06/2018	^{226}Ra 304	44.48
	20/07/2018	^{226}Ra 404	42.45
Río Urbina	06/04/2018	^{226}Ra 105	45.07
	09/05/2018	^{226}Ra 205	44.68
	06/06/2018	^{226}Ra 305	44.63
	20/07/2018	^{226}Ra 405	45.62

De la Tabla 4.30 se observa que todos los conteos obtenidos se encuentran por debajo de 46.88 CPM y 52.96 CPM, que corresponden a los límites de detección y de cuantificación, respectivamente; por lo que la metodología aplicada no permite detectar ni cuantificar la actividad del radio (^{226}Ra) disuelto en las muestras de agua colectadas en el presente estudio. Cabe señalar que el promedio de conteos de blanco para radio (^{226}Ra) correspondiente al fondo, fue de 43.19 CPM.

Además, se verifica si existen diferencias significativas entre los conteos, generados a partir de las jornadas de muestreo y los respectivos conteos de fondo, mediante una evaluación estadística t-Student; obteniéndose que el $t_{\text{tabulado}} (3.18) > t_{\text{calculado}} (2.07)$, de modo que no existen diferencias significativas entre ambas series de datos; por lo que los conteos de radio (^{226}Ra) correspondientes a los sitios de muestreo son similares a los conteos de fondo, tal y como se muestra en la Figura 4.26.

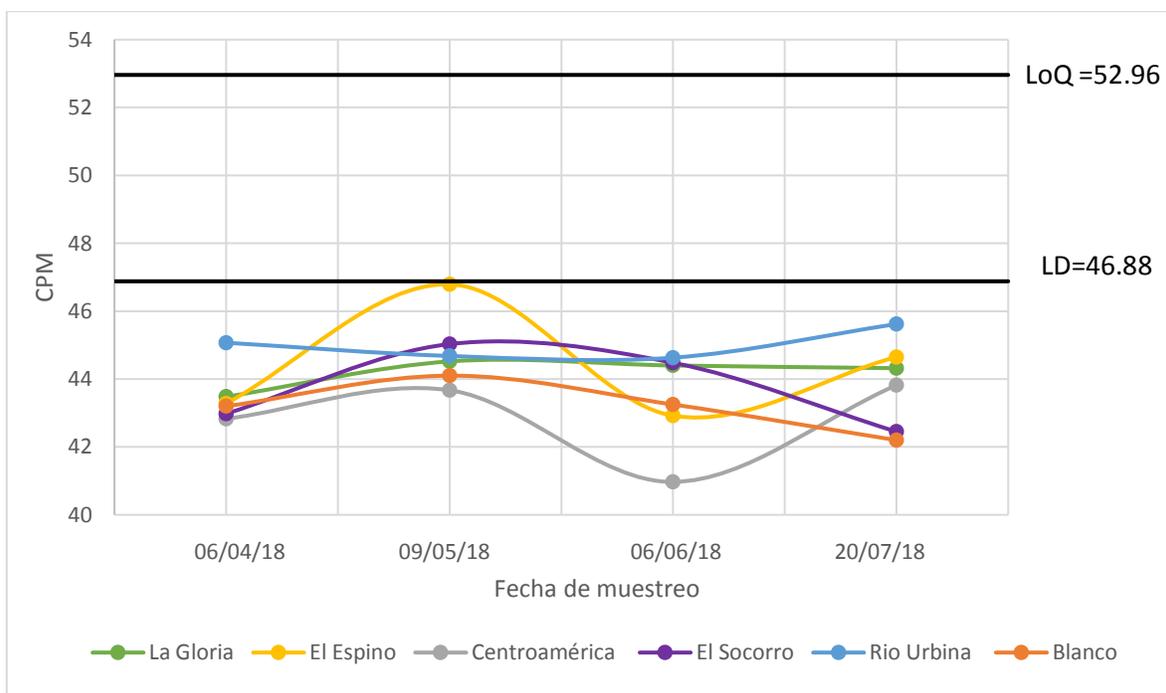


Figura 4.26 Comparación de conteos de radio (^{226}Ra) para cada sitio muestreado.

Se observa en la Figura 4.26 que los conteos de 46.82 CPM obtenidos para el sitio El Espino durante el segundo muestreo, se aproximan al límite de detección de la metodología analítica aplicada.

A pesar de que fue posible detectar y cuantificar la actividad del gas radón (^{222}Rn) en las muestras de agua recolectadas en los sitios de muestreo, no se logró detectar en ellas la presencia del radio (^{226}Ra) en concentraciones superiores al límite de detección de la metodología utilizada. Lo anterior pone de manifiesto el hecho de que, en el agua subterránea, el radón (^{222}Rn) es uno de los elementos radiactivos más comunes con una alta movilidad, gracias al hecho de ser un gas noble. Sin embargo, en el caso del radio (^{226}Ra), la movilidad no es significativa y se ve altamente influenciada por las propiedades fisicoquímicas del agua del acuífero, tales como el pH, salinidad, condiciones redox e iones disueltos (cloruros, sulfatos, hidróxidos, óxidos y sales); asimismo, la concentración de radio (^{226}Ra) puede variar por procesos de adsorción, filtración, precipitación y formación de complejos.

Por último, en la Figura 4.27 se presenta una carta de control que permite suponer que mediante el equipo de centelleo líquido es posible detectar la presencia de radio (^{226}Ra) en una muestra de agua, cuando ésta presenta conteos por arriba del promedio de conteos de fondo más 3 veces su desviación estándar ($\bar{x} + 3s$). De modo que para el sitio El Espino, durante el segundo muestreo, existe la posibilidad de haber detectado la presencia de radio (^{226}Ra) disuelto en la muestra de agua recolectada.

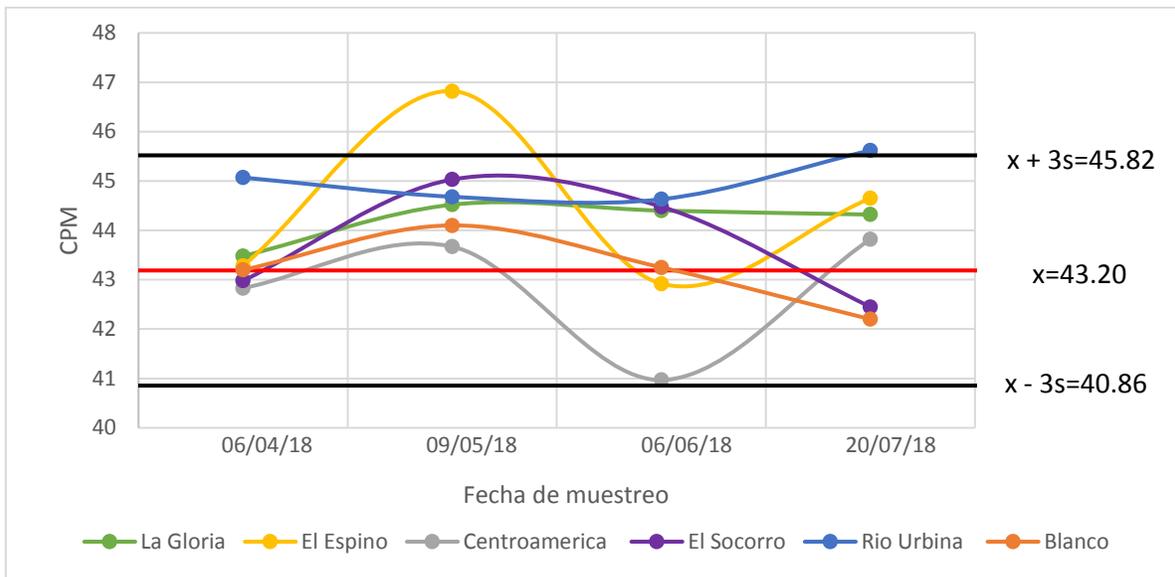


Figura 4.27 Carta de control de conteos de radio (^{226}Ra) obtenidos en cada sitio de muestreo.

CONCLUSIONES

- I. Las metodologías analíticas ASTM D5072-09 y ARCAL RLA/5/0/48, que fueron empleadas para el análisis de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de agua de consumo humano, se encuentran revalidadas, lo cual se manifiesta a partir del cumplimiento de los parámetros de validación con los requisitos establecidos, garantizando confianza para su empleo en cualquier estudio que incluya medición de actividad en radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) en muestras de fuentes de agua potable.
- II. Existe radón (^{222}Rn) en matrices de agua subterránea (pozos perforados de la ANDA) alimentados por el acuífero de San Salvador, comprobando así la presencia de radionúclidos de origen natural en el agua destinada al consumo humano.
- III. No se detectó radio (^{226}Ra) en las muestras de agua recolectadas en los sitios de muestreos (pozos perforados de la ANDA) alimentados por el acuífero de San Salvador, debido a que los resultados obtenidos fueron inferiores al límite de detección de la metodología analítica (0.005 Bq/L); sin embargo, no se asegura su inexistencia, debido a que el radio (^{226}Ra) es el radionúclido del cual proviene el gas radón (^{222}Rn). Por lo que se recomienda utilizar un equipo moderno, donde el límite de detección sea mucho menor, y los resultados no sean cercanos al fondo. De ese modo, se posibilitaría la medición de la actividad de radio (^{226}Ra) en muestras de agua.
- IV. El radio (^{226}Ra) no se encontró presente en las muestras de agua recolectadas; sin embargo, la existencia de radón (^{222}Rn) evidencia la presencia de sus progenitores, radio (^{226}Ra) y uranio (^{238}U); además de sus descendientes, tales como el polonio (^{218}Po) y polonio (^{214}Po) en la geología de la zona.

- V. El sitio de muestreo con mayor actividad radiológica fue el correspondiente al Río Urbina con una actividad promedio de 4.74 ± 0.18 Bq/L, el cual cuenta con la menor altura sobre el nivel del mar, por otro lado el sitio de muestreo con menor presencia de actividad radiológica fue el correspondiente al sitio La Gloria con una actividad promedio de 0.49 ± 0.13 Bq/L durante un periodo de 5 meses perteneciente al rango de abril-agosto del año 2018 dentro del AMSS, lo que indica que se pudo cuantificar actividad radiológica en todas las muestras de agua destinada a consumo humano de los sitios de muestreo en estudio.
- VI. La actividad radiológica de las muestras recolectadas de agua de consumo humano perteneciente a los pozos perforados de ANDA abastecidos por el acuífero de San Salvador, se encontró por debajo de la actividad máxima permisible por el RTS 13.02.01:14 para agua de consumo humano; por lo tanto, se puede asegurar únicamente que bajo las condiciones de recolección, las muestras de agua de consumo humano perteneciente a los pozos perforados de ANDA en los sitios La Gloria, El Espino, Centroamérica, El Socorro y Río Urbina abastecidos por el acuífero de San Salvador cumplen con el parámetro radiológico.
- VII. No fue posible detectar relación entre parámetros fisicoquímicos del agua muestreada con la actividad de radón (^{222}Rn) presente, debido a que el periodo de evaluación fue insuficiente para determinar una dependencia entre parámetros; sin embargo, los datos obtenidos se prestan a posteriores investigaciones que podrían requerir las propiedades fisicoquímicas de las zonas de estudio.

RECOMENDACIONES

- I. Realizar un monitoreo periódico de la actividad radiológica del agua que es destinada para el consumo humano en los sitios La Gloria, El Espino, Centroamérica, El Socorro y en especial el río Urbina, que pertenecen al AMSS. Lo anterior resulta necesario tomando en cuenta las fluctuaciones que se manifestaron en la actividad de radón (^{222}Rn) durante el periodo de muestreo.
- II. Generar un conjunto de datos que permitan establecer una posible relación entre las propiedades fisicoquímicas del fluido y la actividad de radón (^{222}Rn) presente; mediante un análisis frecuente de muestras de agua en diferentes sitios durante largos periodos de tiempo.
- III. Desarrollar un estudio geológico en aquella zona que permita verificar su influencia sobre la actividad radiológica del agua en la zona de estudio.
- IV. Dado que en los resultados obtenidos a partir de la validación de las metodologías analíticas se encontraron diferencias significativas entre las mediciones realizadas por diferentes analistas, se recomienda que la preparación y medición de muestras sea realizada por analistas capacitados y con pericia analítica, evitando así posibles errores sistemáticos en los resultados.
- V. Crear una base de datos e incluir en ella los resultados analíticos obtenidos a partir del presente trabajo, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los radionúclidos radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra), y compararlo con los límites máximos permisibles establecidos en el RTS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado Casas, J. L. (2003). *Aplicaciones de la espectrometría alfa en la caracterización de isótopos de radio y uranio en residuos industriales y matrices ambientales*. (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla, España.
- Alfaro, R., Segovia, N., Martínez, V., Peña, P., López, M., Armienta, M., y Seldel, J. (2001). *Determinación de la calidad del agua y contenido de radón en pozos localizados en la Cuenca de Cuitzeo*. Michoacán, México.
- ANDA. (Octubre de 1998). *Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados*. Obtenido de Normas Técnicas para abastecimiento de agua potable y alcantarillados de aguas negras: http://www.anda.gob.sv/wp-content/uploads/2015/03/normas_tec_abast_m11.pdf
- ANDA. (13 de marzo de 2015). *Administración Nacional de Acueductos Alcantarillados*. Obtenido de Calidad del agua, potabilización: <http://www.anda.gob.sv/calidad-del-agua/potabilizacion/>
- ANDA. (2017). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. *Boletín Estadístico*. San Salvador.
- ANDA-COSUDE. (2008). *Mapa Hidrogeológico de El Salvador*. San Salvador: Water and Earth Science Associates Ltd.
- ARCAL. (2005). Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe. *Proyecto RLA/5/048 ARCAL LXXIX: Armonización regional de los requisitos técnicos y específicos de calidad para el control de la contaminación radiactiva de alimentos*.
- ASTM. (2009). American Society for Testing and Materials . *Standard Test Method for Radon in Drinking Water*.
- Barrera de Calderón, M. L. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador*. (Tesis de maestría). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Berenguer Subils, J. (1995). *NTP440: Radón en ambientes interiores*. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Burcham, W. E. (1974). *Nuclear Physics/An Introduction*. London: Reverté.

- Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina .
- Cardona Hernández , M. A., Fierro Arias, L., Cabrera Pérez , A., y Vidal Flores, A. A. (2017). Efectos de la radiación electromagnética en la piel. *Revista Mexicana Dermatol*, 292-302.
- Centro Español de Metrología. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología, Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*. España.
- Cervantes González, P. d., y Manchado Martín, A. (2002). Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de flujos que drenan la Sierra del Rosario (Pinar del Río-La Habana) para su utilización en la salud. La Habana, Cuba: Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.
- Chalupnik, S. & Lebecka , J. (1992). Determination of radio-226, radio-228 and radio-232 in water and aqueous solutions by liquid scintillation counting. En J. Noakes, F. Schonhofer , & H. Polach, *Liquid Scintillation Spectrometry* (págs. 397-400). Viena: The Austrian Society for Liquid Scintillation Spectrometry.
- Comités Técnicos de Normalización del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2008). *Norma Salvadoreña NSO 13.07.01:08 de agua potable. Segunda actualización*. San Salvador. El Salvador: Diario Oficial.
- Comités Técnicos de Normalización del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2009). *Norma Salvadoreña NSO 13.07.02:08 de agua envasada. Primera actualización*. San Salvador. El Salvador: Diario Oficial.
- Cooper, J., & Myra, J. (s.f.). *An analytical method for radium in environmental samples by the use of liquid scintillation counting*. Australian.
- Dávila Rangel, I. (2001). *Caracterización radiológica de agua potable en las ciudades de Zacatecas y Guadalupe, del Estado de Zacatecas, México*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Zacatecas, México.
- Degering, D., Dietrich, N., Kruger , F., Scheiber , J., Wolfgramm , M., & Kohler, M. (2016). Radium isotope concentrations in deep geothermal fluid as finger prints of the aquifer rocks. *European Geothermal Congress*, 1-5.

- dePaul, V. & Szabo, Z. (2007). *Occurrence of Radium-224, Radium-226 and Radium-228 in Water from the Vincentown and Wenonah-Mount Laurel Aquifers, the Englishtown Aquifer System, and the Hornerstown and Red Bank Sands, Southwestern and South-Central New Jersey*. Virginia: Geological Survey Scientific Investigations Report .
- DIGESTYC. (2017). Dirección General de Estadística y Censos. *Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM)* . El Salvador.
- Duffau. (2010). *Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: aspectos generales sobre la validación de métodos*. Chile.
- Environmental Protection Agency (EPA) . (1999). *Part II: Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations; Radon - 222; Proposed Rule*.
- EPA. (2015). *Environmental Protection Agency* . Obtenido de Manual Informativo sobre el radón: La guía para proteger a su familia y a usted del radón.
- Feng, C., & Li, Z. (2012). *Handbook of Radon : Properties, Applications, and Health*. Hauppauge, N.Y. : Nova Science Publishers, Inc. .
- Filippini, J. M. (1988). *Los procesos de sorción de cationes pequeños sobre arcillas*. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Fisher, S. (2001). Geologic and Geochemical Controls on Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water from Oil, Gas and Geothermal Operations. *Kentucky Geological Survey* , 139-150.
- Fuente Lastra, M. (2015). *Puesta a punto de un sistema de medida de radón en agua aplicado al estudio en acuíferos*. (Tesis de fin de grado). Universidad de Cantabria, España.
- Galán López, M. (2003). *Puesta a punto de un espectrómetro de centelleo líquido para la determinación de radón en muestras de agua*. Madrid, España.
- García Vindas, J. (1999). *Transport du radon en milieu poreux (expérimentation et modélisation) : implication pour la réalisation et l'interprétation de mesures "in situ"*. (These de doctorat). Universidad Mont Pellier II, Francia.
- García Vindas, J. R. (2000). Influencia de la precipitación sobre la concentración del radón en el suelo: Simulación en laboratorio y comparación con datos de campo. *Revista Geológica de América Central*, 77-85.

- Garzón, R. (1992). *Radón y sus Riesgos*. Universidad de Oviedo, España.
- Gleick, P. H. (1996). Water resources. En S. Schneider , *Encyclopedia of Climate and Weather, vol 2*. (págs. 817-823). Oxford University, New York, USA.
- Grau Carles, A. (2002). *Aplicación de la técnica de centelleo en fase líquida a la calibración de mezclas de radionucleidos por descomposición espectral*. (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, España.
- Horiuchi , K., Ishii , T., & Kobayashi, M. (1993). Liquid Scintillation Counting Measurement of Radon from Seepage Groundwater in Lake Biwa, Japon. En J. Noakes , F. Schonhofer , & H. Polach , *Liquid Scintillation Spectrometry* (págs. 383-390). Arizona: Radiocarbon Publishers, University of Arizona.
- Ibarra Turcios, A. M., Campos Jarquín, U., y Rivera, F. J. (2017). *Unidad Ecológica Salvadoreña* . Obtenido de Propuestas básicas para elaborar una Política Nacional Hídrica: <http://www.unes.org.sv/wp-content/uploads/2017/01/Propuestas-politica-nacional-hidrica.pdf>
- Illanes , L. y Pérez , A. (2013). *Tomografía por emisión de positrones. Fundamentos y Aplicaciones Clínicas*. Universidad Nacional de La Plata, Argentina .
- Instituto de Salud Pública de Chile . (2010). *Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: "Aspectos generales sobre la validación de métodos"*. Santiago .
- ISO 13164-1: *Water quality, Radon-222. Part 1: General Principles*. (2013).
- ISO 5667-1: *Toma y preservación de muestras*. (1997).
- ISO 5667-2: *Calidad del agua. Guía para las técnicas de muestreo*. (1991).
- ISO 5667-3: *Calidad del agua. Directrices para la preservación y manejo de las muestras*. (2003).
- Kappel , R., Keller , G., Kreienbrock, L., & Nickels , R. (1992). An epidemiological study using passive radon measurement by liquid scintillation counting. En J. Noakes , F. Schonhofer, & H. Polach, *Liquid Scintillation Spectrometry* (págs. 319-323). Viena: The Austrian Society for Liquid Scintillation Spectrometry.
- L'Annunziata , M. F. (2007). *Radioactivity Introduction and History*. USA: Elsevier.
- L'Annunziata, M. F. (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis*. USA: Elsevier.

- Magaña, M. I. (2018). *Gases Difusos en exploración geotérmica*. El Salvador.
- Malcom, B. (s.f.). *An Analytical Method for Radium in Environmental Samples by the Use of Liquid Scintillation Counting*. Australian Radiation Laboratory.
- Marín Díaz , Ó. A. (2014). *Medida del contenido de material radiactivo en las aguas de consumo humano por centelleo líquido en la Ciudad de Medellín*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- MARN. (2018). *Informe 2. Finaliza época seca e inicia la lluviosa 2018 en El Salvador*. El Salvador.
- Martínez, J. L. (20 de Julio de 2016). *Agua subterránea*. Obtenido de SlideShare: <https://www.slideshare.net/JoseLuisMartinez66/clase-aguas-subterranas>
- MDE. (1999). Programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. En *Calidad del agua* (págs. 86-87). Colombia: Sena.
- Michelson, A. (07 de 05 de 2017). *Interferencia*. Obtenido de http://materias.df.uba.ar/f2bygaa2017c1/files/2012/07/RESUMEN_INTERFERENCIA.pdf
- Mosqueda Peña, F. (2009). *Desarrollo de procedimientos para la determinación de radioisótopos en muestras ambientales mediante técnicas de bajo recuento por centelleo líquido y radiación Cerenkov*. Centro de Investigación, Tecnología e Innovación. Universidad de Huelva, España.
- OMS. (1983). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Criterios de Salud Ambiental 25: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc25.htm>
- OMS. (2011). Organización Mundial de la Salud . *Guías para la calidad del agua potable: Cuarta Edición*.
- OPAMSS. (2014). Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador. *The mayor council and the planning office for Metropolitan Area of San Salvador, as a model for urban management*. El Salvador.
- Ordoñez Gálvez , J. J. (2011). *Aguas Subterráneas-Acuíferos*. Sociedad Geográfica de Lima, Perú.
- Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica (OSARTEC). (2018). *RTS 13.02.01:14 Agua. Agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad*. . San Salvador: Diario Oficial.

- Outola, I., Nour, S., Kurosaki, H., Inn, K., La Rosa, J., Lucas, L., & Koepenick, K. (2008). Investigation of radioactivity in selected drinking water samples from Maryland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Vol. 277*, 155-159.
- Payes Hernández, J. E. (2016). *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Obtenido de Radiactividad Natural en Aguas de Consumo Humano y Ambiental. Estudio Preliminar:* https://www.conacyt.gob.sv/?page_id=887
- PNUMA. (2016). Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente . *Radiación: Efectos y Fuentes.*
- Quindós, L. (1995). *Un gas radioactivo de origen natural.* Consejo de Seguridad Nuclear. Universidad de Cantabria, España.
- Rábago Gómez, D. (2013). *Aplicación de un sistema de monitorización de la concentración de gas radón en el agua de una instalación termal.* Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Roba, C. A., Codrea, V., Moldovan, M., Baciú, C., & Cosma, C. (2010). Radon and radium content of some cold and thermal aquifers from Bihor County (northwestern Romania). *Geofluids*, 571-585.
- Rodríguez Carpio, J. R. (2013). *Cuantificación de la actividad de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) aplicando la técnica de centelleo líquido en aguas termales del Cerro Pacho, Lago de Coatepeque, departamento de Santa Ana.* (Tesis de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Romo de Vivar, A. y Delgado, G. (2011). *Química, Universo, Tierra y Vida.* Grupo Fondo de Cultura Económica, México.
- RTS. (2018). *Reglamento Técnico Salvadoreño 13.02.01:14 Agua. Agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad.* San Salvador: Diario Oficial.
- Santillan, A. (2018). *Transporte convectivo de masa.* México.
- UESEPA. (2000). United States Environmental Protection Agency. *National Primary Drinking Water Regulations. Radionuclides. Final Rule.* United States.

- Umaña Hernández, R. F. (2008). *Evaluación de metodología para medición de tritio en agua*. (Tesis de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- US NAS. (1999). National Academy of Sciences, Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water. *Risk assessment of radon in drinking water*. Washington D.C.: National Academy Press.
- Varillas Espinoza, M., Contreras Barrientos, A. y Rossello Churquipa, C. (2013). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Obtenido de Normas ASTM relacionadas a la Hidrogeología: <https://es.scribd.com/doc/159838411/Normas-Astm-Grupo>
- Villalba, L., Colmenero Sujo, L. y Cabrera Montero, M. (2004). *Determinación de radón-222 en muestras de agua de pozos y domicilio de las ciudades de Chihuahua y Aldama*. México.
- Villalobos, I. C. (2018). Obtenido de Consultoría en Hidrogeología y Perforación de Pozos de Agua: <https://pozoswellva.blogspot.com/>
- Vindas, J. G. (1999). Influencia de la precipitación sobre la concentración del radón en el suelo: Simulación en laboratorio y comparación con datos de campo. *Revista Geológica de América Central*, 23, 80.
- Vinson, D., Vengosh, A., Hirschfeld, D., & Dwyer, G. (2009). Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA). *Chemical Geology*, 159-171.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition*.
- Zapeczka, O., & Szabo, Z. (1986). Natural Radioactivity in Ground Water- A Review. *National Water Summary-Ground Water Quality: Hydrologic Conditions and Events*, 50-57.

GLOSARIO

Actividad: Número de desintegraciones por segundo que experimenta una muestra, es decir, es la disminución del número de núcleos por unidad de tiempo, representa la velocidad de desintegración y es conocida también como tasa de desintegración.

Adsorción: Se considera como una operación de separación gas-sólido o líquido-sólido.

Analito: Componente de una muestra, del cual se pretende determinar su presencia o cantidad.

Andesítico: Roca volcánica de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasa y varios otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda. También puede haber cantidades menores de sanidina y cuarzo.

Basalto: Es una roca ígnea volcánica de color oscuro, rica en silicatos de magnesio y hierro, y en sílice, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.

Calibración: Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Conductividad: Capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica.

Efecto fotoeléctrico: Proceso en el que un fotón incide sobre un cátodo de material fotosensible, éste emite un electrón con una energía cinética que depende de la frecuencia del fotón y del material del cátodo.

Espectro electromagnético: Conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.

Fluorescencia: Proceso de emisión en el cual las moléculas son excitadas por la absorción de radiación electromagnética.

Fondo atenuable: Es producto de procesos que se desarrollan en el cóctel de centelleo o en la muestra en estudio. Resultado de las interacciones de la radiación cósmica o medioambiental con el cóctel de centelleo.

Fondo no atenuable: Producto de sucesos externos a la solución centelladora. Cabe señalar que la radiación cósmica, la radiactividad ambiental y la intrínseca de los materiales del detector, son causantes externas de dicho problema.

Hipótesis nula: Suposición que se utiliza para negar o afirmar un suceso en relación a algún o algunos parámetros de una población o muestra.

In-situ: Expresión latina que significa en el sitio o en el lugar, y suele utilizarse para designar un fenómeno observado o una manipulación en el lugar.

Intersticio: Espacios vacíos que quedan entre los átomos que forman la red cristalina de un material, así como también el espacio hueco entre los granos de una roca.

Lixiviación: Operación unitaria cuyo objetivo es disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él.

Longitud de onda: Es la distancia existente entre dos planos inmediatos de partículas del medio que están en el mismo estado de movimiento.

Magma: Mezcla fundida de composición silicatada, que contiene cristales en suspensión y gases disueltos (H_2O ; CO_2) y que se origina por fusión parcial de la corteza o del manto superior.

Matriz: Componentes presentes en una muestra, menos el analito.

Negatrón: Partícula beta negativa, mayormente conocida como electrón (β^-).

Neutrino: Partícula subatómica sin carga y masa pequeña, que acompaña la emisión de partículas beta. Puede ser de dos tipos, con propiedades similares, pero con espín opuesto: el antineutrino ($\bar{\nu}$) y el neutrino (ν).

Nivel freático: Nivel por debajo del cual el suelo y las rocas están permanentemente mojados (o saturados). El agua que se encuentra por debajo del nivel freático se denomina agua subterránea.

Oxígeno disuelto: Medida del oxígeno que se encuentra disuelto en el agua.

Permeabilidad: Capacidad de un material de permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad del fluido es despreciable.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia, indica la concentración de iones de hidrogeno (H^+) presentes.

Piroclasto: Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica. Petrológicamente, los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica solidificados en algún momento de la erupción, más frecuentemente durante su recorrido aéreo.

Plioceno: División de la escala temporal geológica que pertenece al periodo Neógeno.

Porosidad: Relación existente entre el volumen de vacíos o espacios ocupados por el agua, y el volumen total del material.

Positrón: Antipartícula del electrón, cuya masa y espín son iguales al de un electrón. Su carga eléctrica es de igual magnitud, pero de sentido contrario. Es conocido también como una partícula beta positiva (β^+).

Precipitado: Sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química.

Procesos diagenéticos: Transformaciones ocurridas sobre los sedimentos hasta el metamorfismo o la meteorización de la nueva roca

Radiación: Es el transporte o la propagación de energía en forma de partículas u ondas.

Salinidad: Contenido de sales minerales disueltas en un cuerpo de agua.

Sólidos totales disueltos: Suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua.

Solubilidad: Máxima cantidad de soluto que se disolverá en una cantidad dada de disolvente a una temperatura específica.

Sorción: Término técnico que responde a la traducción literal de la palabra inglesa sorption. Se refiere al fenómeno en el cual un sólido o líquido atrapa especies moleculares o atómicas, alojándolas en su región interna o en su superficie (interfase), y agrupa tres conceptos de fundamental importancia, que son absorción, adsorción y precipitación superficial.

Valor de referencia: Valor de una magnitud que sirve como base de comparación con valores de magnitudes de la misma naturaleza.

ANEXOS

ANEXO 1. CADENAS DE DESINTEGRACIÓN

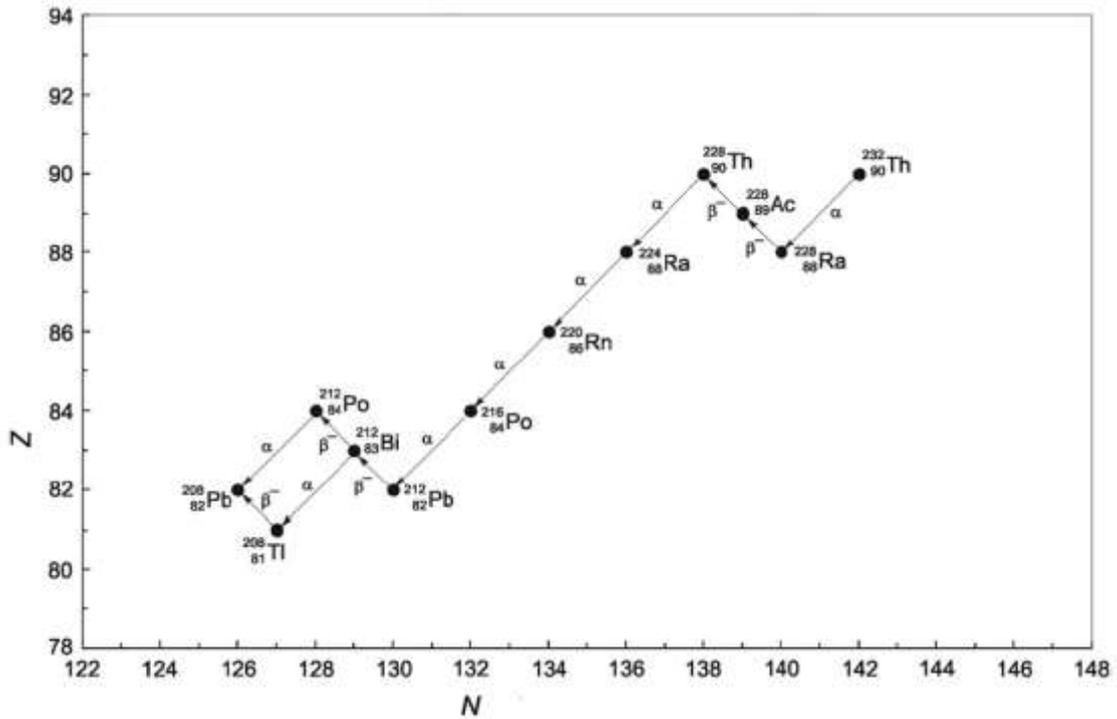


Figura A.1 Cadena de desintegración del torio (^{232}Th). Fuente: (L'Annunziata, 2012).

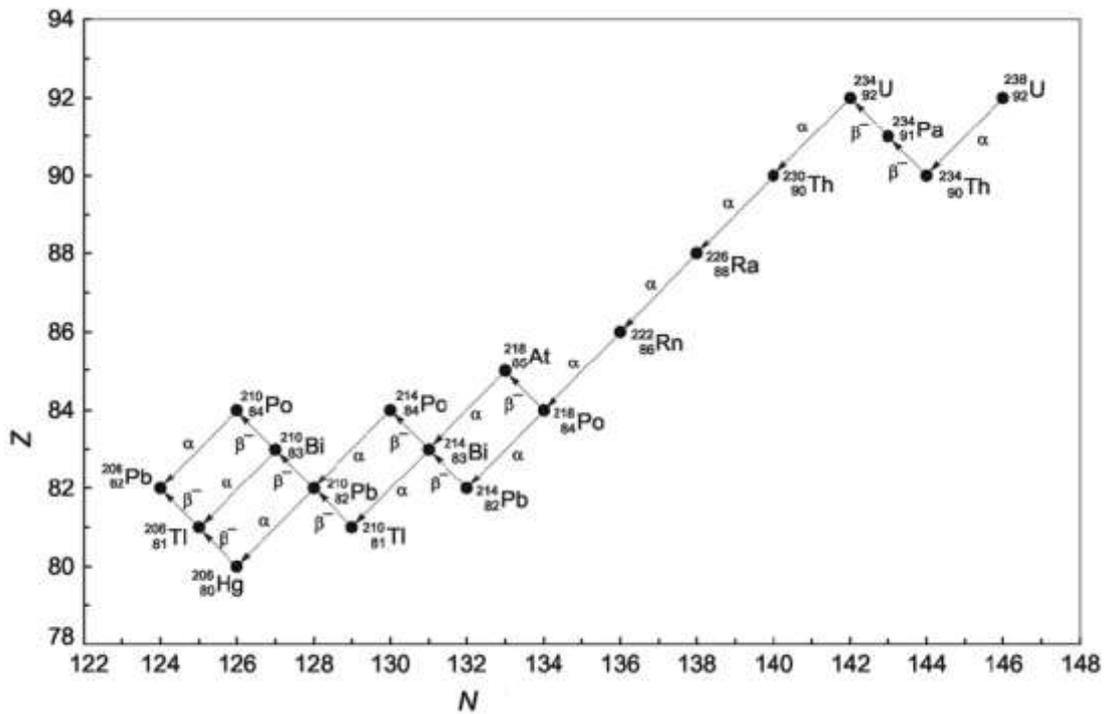


Figura A.2 Cadena de desintegración del uranio (^{238}U). Fuente: (L'Annunziata, 2012).

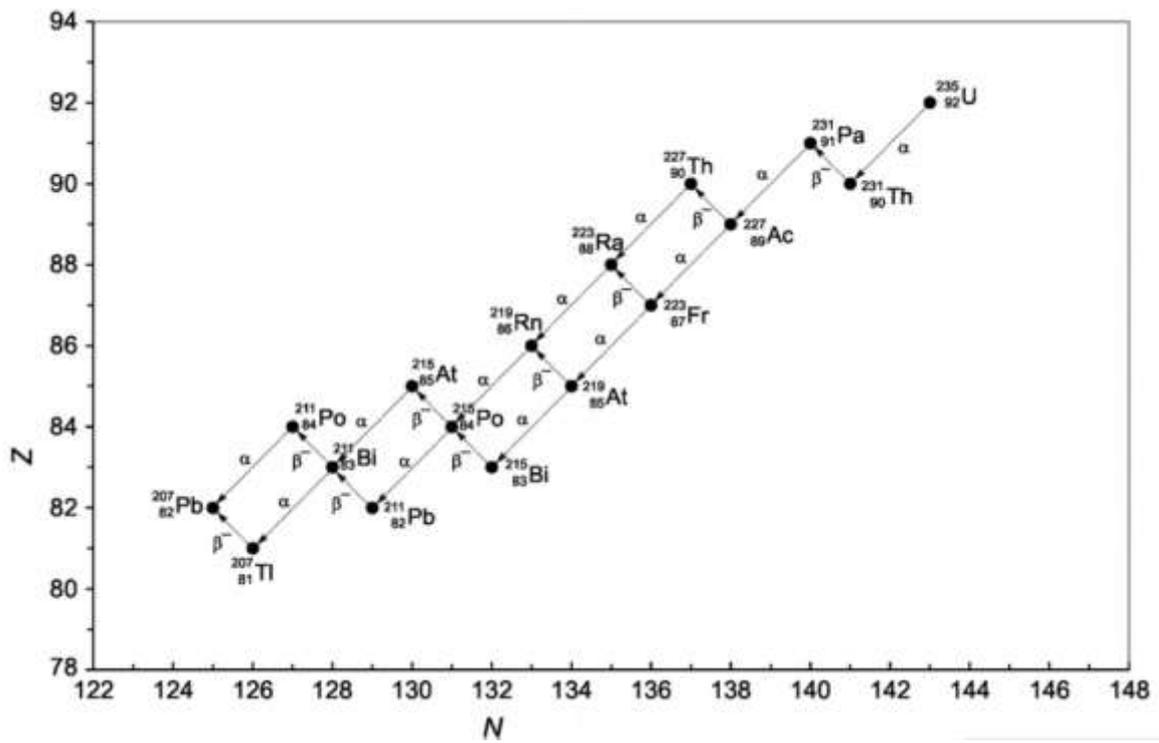


Figura A.3 Cadena de desintegración del uranio (^{235}U). Fuente: (L'Annunziata, 2012).

ANEXO 2. CICLO HIDROLÓGICO

En la Figura A.4 se presenta un diseño general de como el agua cumple con un balance hídrico, donde no existe diferencia en las salidas y entradas de masas, demostrando que el agua no se genera ni se destruye simplemente sigue un ciclo hidrológico.

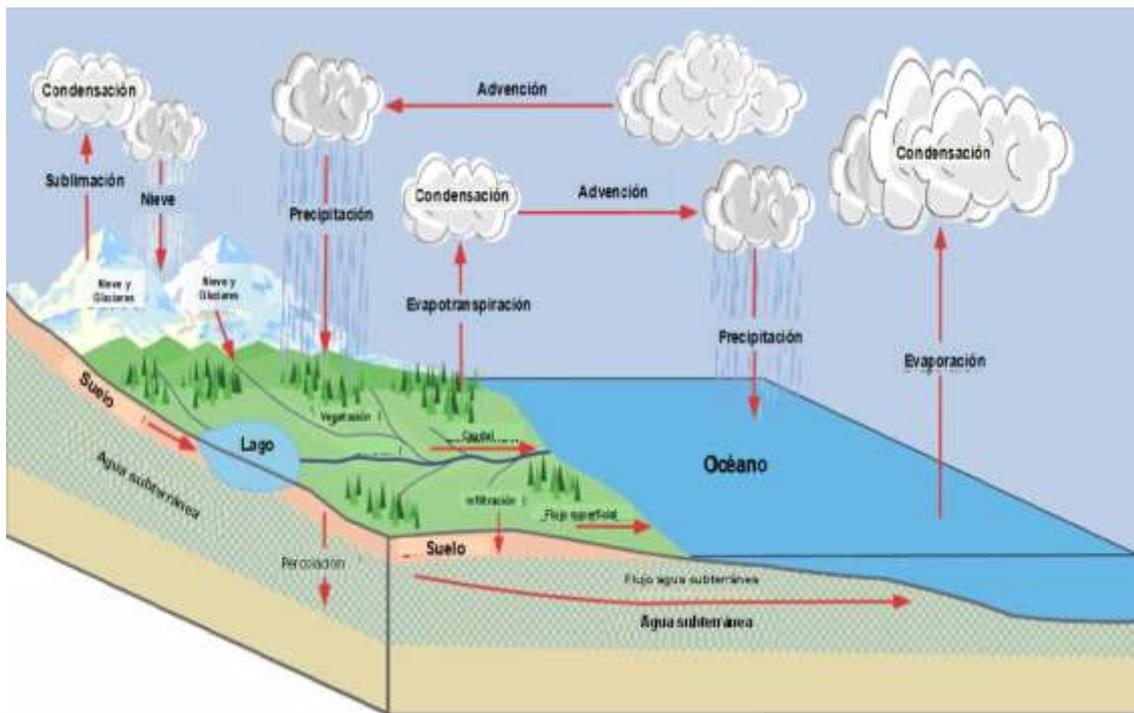


Figura A.4 Representación del ciclo hidrológico. Fuente: (Ordoñez Gálvez , 2011).

a. Definición

Según Aranda (1992), un ciclo hidrológico es una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y al volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y re evaporación.

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente. Este ciclo es posible gracias a la intervención del sol, que al emitir energía hasta la tierra permite la elevación del agua por evaporación, aumentando su temperatura e impulsándola a un cambio de estado. Por otra parte, la gravedad de la tierra es la encargada de descender (proceso de precipitación) el agua que ha sido condensada.

b. Proceso

Tomando un punto de inicio para el proceso hidrológico, nos ubicamos en los océanos y mares salados, estos cuerpos de agua representan entre 93% a 97% de la cantidad total de agua que hay en la hidrósfera que es alrededor de 1500 millones de km³ (Campos Aranda, 1998). Esta agua es evaporada para posteriormente ser transportada con el movimiento del aire sobre los continentes, cuando el aire se empieza a saturar de vapor de agua se da paso a una condensación del vapor en pequeñas gotas llamadas núcleos de condensación que al sufrir bajas temperaturas se convierten en núcleos de hielo. Por otra parte, los núcleos de condensación que descienden pueden llegar a capas de aire más caliente, en dicho momento se evapora y entra en ciclos de condensación-evaporación (regeneración) formando nubes que caen en forma continua por su peso y muy lentamente por la acción de la resistencia del aire.

Las nubes por lo tanto dan origen a la precipitación del agua donde una parte se evapora durante su caída y otra cae sobre la superficie de la tierra, a partir de este proceso se pueden reconocer dos clasificaciones de la masa de agua que precipita sobre la superficie:

- i. Aguas retenidas:** Conformadas por el agua retenida por la superficie de la tierra como vegetación, edificios, carreteras, huecos terrestres que luego de un período de tiempo se evapora nuevamente hacia la atmós-

fera, otra parte del agua se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos que desembocan en ríos conduciendo las aguas a los lagos, embalses, mares donde se evaporan o se infiltran en la tierra.

- ii. **Aguas infiltradas:** Conformadas por el agua que al caer sobre la superficie de la tierra es infiltrada, penetrando el terreno y rellenando poros o viajando en fracturas, fallas del interior de la tierra.

Una parte del agua forma humedad en los suelos, donde se evapora hacia la atmósfera o es transpirada por las plantas (evapotranspiración) y la otra parte desciende formando agua subterránea. Este proceso de absorción se da gracias a los terrenos de la superficie terrestre, que permiten que el agua se introduzca al ser permeables como por ejemplo cuando se encuentra arena, arcilla. Ambas partes se mueven hacia las zonas bajas de la tierra y luego se integran en ríos para fluir hacia los océanos.

El deshielo de la nieve también se une al agua precipitada para formar el agua subterránea, donde desciende hacia el interior de la tierra y cesa en el momento en que se interpone una capa de rocas impermeables y su transporte se da mediante rocas permeables hasta alcanzar un nivel llamado “nivel freático”, cuando esto sucede se forma un reservorio de agua denominado acuífero.

El término acuífero es utilizado para hacer referencia a formaciones geológicas consistentes a veces en rocas porosas (arenas, gravillas, etc.) o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) las cuales contienen agua. El agua subterránea que se encuentra almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico, no se encuentra al alcance inmediato del ser humano, por lo que para ser aprovechada se deben de realizar excavaciones y pozos.

Los tres tipos de acuíferos representados en la Figura A.5 son:

- i. **Acuífero libre:** Se reconoce porque su nivel freático es el mismo que la superficie de la tierra al no encontrar material impermeable sobre él.
- ii. **Acuífero confinado:** Se reconoce porque contiene dos capas impermeables una sobre él y otra por debajo, a pesar de acumular agua a través de material permeable.
- iii. **Acuífero semiconfinado:** Es cuando el techo o la base del acuífero no es totalmente impermeable.

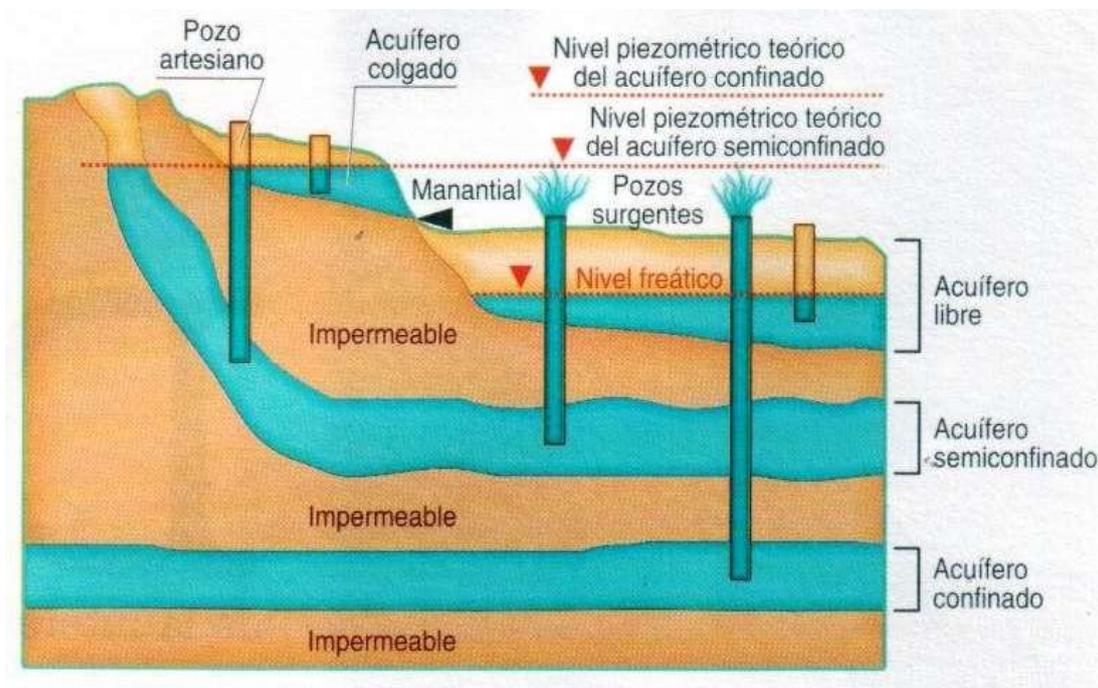


Figura A.5 Tipos de acuíferos existentes al interior de la tierra. Fuente: (Martínez, 2016).

El agua subterránea fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y caudal de base de los ríos. La mayoría de estos devuelve el agua a los mares o la lleva a cuencas cerradas donde se evapora. También se puede formar una fuente en un corte del terreno donde hay un acuífero. Pero también se puede extraer de forma artificial sacándola al exterior mediante la construcción de pozos. Un pozo es una perforación vertical o direccional

en el terreno hasta llegar a la zona donde hay agua subterránea acumulada (Ordoñez Gálvez , 2011).

El agua subterránea representa unas veinte veces más que el total de las aguas superficiales de la tierra, de ahí la importancia de esta agua como reserva y recurso de agua dulce, a pesar que como se muestra en la Figura A.6 del total del agua dulce terrestre el 30.1% es agua subterránea.

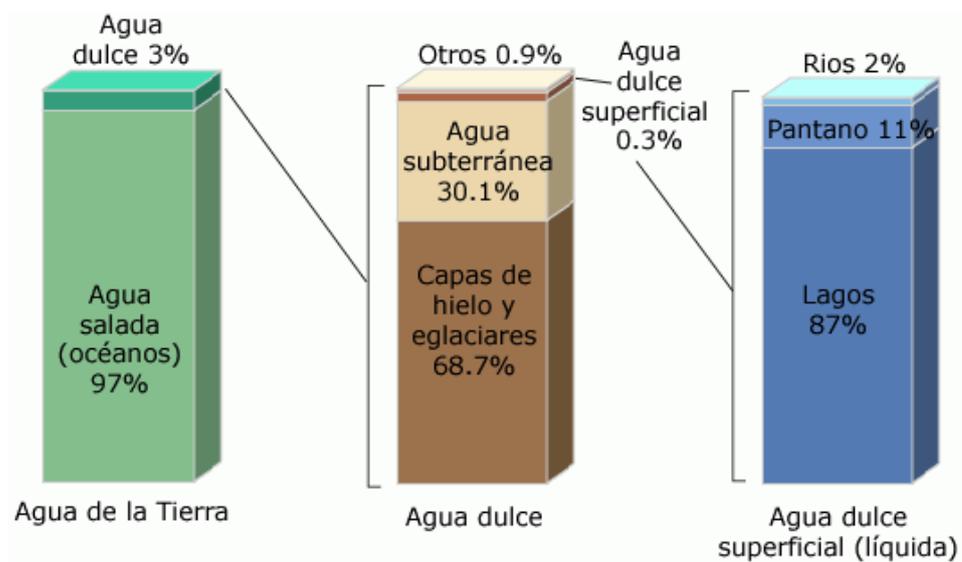


Figura A.6 Porcentaje de agua en la tierra. Fuente: (Gleick, 1996).

ANEXO 3. ETIQUETA REPRESENTATIVA DE MUESTRAS

Se incluyó en la etiqueta: No de muestra, código, fecha de recolección, hora de recolección, ubicación y observaciones. En la Figura A.7 se presenta el diseño de las etiquetas que fue utilizado.

The image shows a sample identification label with a black border and rounded corners. At the top, there is a black box with the text "UES-FIA-EIQA" in white. Below this, the label contains several fields for data entry:

- No de Muestra:** _____
- Código:** _____
- Elemento a medir:** radón (^{222}Rn) radio (^{226}Ra)
- Ubicación:** _____
- Nombre del muestreador:** _____
- Descripción de la muestra:** _____

Figura A.7 Etiqueta utilizada para la identificación de muestras.

ANEXO 4. SELECCIÓN DE ENVASE PARA EL ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Se realizó el análisis de radón (^{222}Rn) utilizando el método ASTM D5072-09 en dos muestras de agua de chorro. Cada muestra fue recolectada utilizando un recipiente de diferente de material, uno de vidrio y otro de plástico tipo PE. Las actividades que fueron obtenidas se muestran en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Resultados obtenidos en la prueba de selección de envase de recolección de muestras.

No	Actividad de radón (^{222}Rn) (Bq/L)	
	Recipiente de vidrio	Recipiente de plástico
1	0.68	0.57
2	0.65	0.54
3	0.42	0.46
4	0.48	0.53

Se procede a realizar la evaluación estadística t-Student para verificar si existen diferencias significativas entre los resultados. La hipótesis nula, en este caso establece que no existe correlación entre las actividades de radón (^{222}Rn) (Bq/L) de la muestra recolectada con un recipiente de plástico tipo PE y la otra con uno de vidrio.

Se determina el valor de $t_{\text{calculado}}$

$$t_{\text{calculado}} = \frac{X_{\Delta}}{\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right)} = \frac{|0.03|}{\left(\frac{0.09}{\sqrt{4}}\right)} = 0.76$$

Luego el valor de t_{tabulado} se encuentra en la Tabla A.2 con un nivel de confianza del 95%, y para 3 grados de libertad. Obteniéndose $t_{\text{tabulado}} = 3.18$.

Tabla A.2 Valores de $t_{\text{crítico}}$ para la prueba estadística t-Student.

2 colas $\alpha/2$	80% 0.10	90% 0.05	95% 0.025
1	3.078	6.314	12.706
2	1.886	2.920	4.303
3	1.638	2.353	3.182
4	1.533	2.132	2.776

Fuente: (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010).

Como $t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$, se acepta la hipótesis nula, lo cual indica que no hay diferencias significativas entre las actividades (Bq/L) de la muestra recolectada con un recipiente de plástico tipo PE y la otra con uno de vidrio.

ANEXO 5. SELECCIÓN DE VOLUMEN DE MUESTRA A RECOLECTAR

Durante el 3er muestreo, en cada sitio fueron recolectadas las muestras para análisis de radón (^{222}Rn) por duplicado. El primer grupo de muestras (A) se recolectó mediante un recipiente de vidrio con capacidad de 1 L, mientras que para el segundo grupo (B) se utilizó un vial de plástico para la recolección de 0.1 L de muestra, al cual inmediatamente se le añadió 0.1 L de coctel de centelleo. Los resultados son presentados en la Tabla A.3.

Tabla A.3 Resultados obtenidos en la prueba de cambio de volumen de recolección.

Código de muestra	Sitio de muestreo	Actividad (Bq/L)	
		A	B
301	La Gloria	0.34	0.07
302	El Espino	1.63	0.12
303	Centroamérica	0.83	0.05
304	El Socorro	1.53	0.10
305	Rio Urbina	3.52	0.18

Se requiere comprobar si existen diferencias significativas entre las actividades obtenidas para un volumen de recolección de 1L y un volumen de 10 ml. Por lo que es necesario realizar una evaluación estadística t-Student.

En este caso, la hipótesis nula establece que no existen diferencias significativas entre las actividades de los grupos de muestras A y B.

Se procede a calcular el valor de $t_{calculada}$ como se muestra a continuación:

$$t_{calculada} = \frac{1.47}{\left(\frac{1.16}{\sqrt{5}}\right)} = 2.81$$

Luego el valor de t_{tabulado} se encuentra en la Tabla A.2 con un nivel de confianza del 95%, y para 4 grados de libertad.

$$t_{\text{tabulado}} = 2.78$$

Como $t_{\text{calculado}} > t_{\text{tabulado}}$, se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que si hay diferencias significativas entre las medias de ambas series de datos.

Por lo tanto, el volumen de muestra recolectado es una variable importante cuando se analiza radón (^{222}Rn) en agua.

ANEXO 6. HOJAS DE MUESTREO

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio La Gloria en primera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	1	Nombre del sitio	La Gloria		
Fecha de muestreo		06/04/2018			
Radionúclido	Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)			
Código de muestra		²²² Rn 101	²²⁶ Ra 101	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		9:25 am	9:28 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		9:27 am	9:29 am	13°44'15.3"N	89°13'14.4"OE
				Altura (m)	
				770	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	11.14 (143.2%)
pH	6.93	Cloruros (mg/L)	83.69	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.2373
Conductividad (µs/cm)	361.0	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	25.30
OBSERVACIONES					
Ubicado en Residencial La Gloria. Hay inyección del pozo San Ramón (en la misma zona). La muestra de agua tomada es de mezcla.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Espino en primera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	2	Nombre del sitio	El Espino		
Fecha de muestreo		06/04/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 102	²²⁶ Ra 102	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:01 am	10:04 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		10:02 am	10:05 am	13°40'42.7"N	89°15'17.6"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	9.01 (121.1%)
pH	6.34	Cloruros (mg/L)	432.62	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.5525
Conductividad (µs/cm)	1087.0	Cantidad de Cl (mg/L)	1.00	Temperatura (°C)	30.50
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, existe poca vegetación a los alrededores de los 3 pozos ubicados en la zona.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Centroamérica en primera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	3	Nombre del sitio	Centroamérica		
Fecha de muestreo		06/04/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 103	²²⁶ Ra 103	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		12:14 pm	12:17 pm	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		12:17 pm	12:18 pm	13°42'29.1"N	89°12'44.1"OE 711
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	7.3 (100.8%)
pH	6.48	Cloruros (mg/L)	989.88	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.5200
Conductividad (µs/cm)	813.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.30	Temperatura (°C)	32.30
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos están ubicados en una zona pequeña, además se encuentran en las cercanías de una comunidad y de una zona comercial.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Socorro en primera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	4	Nombre del sitio	El Socorro		
Fecha de muestreo		06/04/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 104	²²⁶ Ra 104	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:41 am	11:40 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		11:42 am	11:41 am	13°42'7.4"N	89°12'8.4"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	9.77 (127.2%)
pH	6.69	Cloruros (mg/L)	585.90	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.39
Conductividad (µs/cm)	600	Cantidad de Cl (mg/L)	1.00	Temperatura (°C)	28.20
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, hay poca presencia de vegetación en los alrededores de los 2 pozos. La planta tiene una alta capacidad de almacenamiento de agua.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Río Urbina en primera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	5	Nombre del sitio	Río Urbina		
Fecha de muestreo		06/04/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 105	²²⁶ Ra 105	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:06 am	11:05 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		11:07 am	11:06 am	13°42'36.1"N	89°10'35.2"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	7.80 (105.1%)
pH	6.61	Cloruros (mg/L)	390.79	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.3510
Conductividad (µs/cm)	550	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	30.80
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos no se encuentran totalmente visibles, además, están ubicados en una barranca con vegetación.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio La Gloria en segunda jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	1	Nombre del sitio	La Gloria		
Fecha de muestreo		09/05/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 201	²²⁶ Ra 201	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		9:05 am	9:01 am	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		9:06 am	9:02 am	13°44'15.3"N	89°13'14.4"OE 770
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	12.59 (154.7%)
pH	7.40	Cloruros (mg/L)	152.14	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.2314
Conductividad (µs/cm)	355.90	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	25.90
OBSERVACIONES					
Ubicado en Residencial La Gloria. Hay inyección del pozo San Ramón (en la misma zona). La muestra de agua tomada es de mezcla.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Espino en segunda jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Adriana Rodríguez		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	2	Nombre del sitio	El Espino		
Fecha de muestreo		09/05/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 202	²²⁶ Ra 202	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		9:43 am	9:41 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		9:45 am	9:42 am	13°40'42.7"N	89°15'17.6"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	8.99 (117%)
pH	6.53	Cloruros (mg/L)	650.37	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4420
Conductividad (µs/cm)	670	Cantidad de Cl (mg/L)	0.60	Temperatura (°C)	29.30
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, existe poca vegetación a los alrededores de los 3 pozos ubicados en la zona.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Centroamérica en segunda jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	3	Nombre del sitio	Centroamérica		
Fecha de muestreo		09/05/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 203	²²⁶ Ra 203	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:18 am	10:15 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		10:19 am	10:16 am	13°42'29.1"N	89°12'44.1"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	7.67 (105.2%)
pH	6.71	Cloruros (mg/L)	1148.00	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.5265
Conductividad (µs/cm)	910	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	32.3
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos están ubicados en una zona pequeña, además se encuentran en las cercanías de una comunidad y de una zona comercial.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Socorro en segunda jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Adriana Rodríguez		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	4	Nombre del sitio	El Socorro		
Fecha de muestreo		09/05/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 204	²²⁶ Ra 204	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:41 am	10:37 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		10:42 am	10:38 am	13°42'7.4"N	89°12'8.4"OE
				Altura (m)	
				685	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	8.85 (114.30%)
pH	6.93	Cloruros (mg/L)	741.43	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4030
Conductividad (µs/cm)	650	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	28.30
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, hay poca presencia de vegetación en los alrededores de los 2 pozos. La planta tiene una alta capacidad de almacenamiento de agua.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Río Urbina en segunda jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA						
BITACORA						
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA		
N.º de pozo	5	Nombre del sitio	Río Urbina			
Fecha de muestreo		09/05/2018				
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)			
Código de muestra		²²² Rn 205	²²⁶ Ra 205	UBICACIÓN GEOGRÁFICA		
Hora de inicio		11:16 am	11:13 am	Coordenadas geográficas		Altura (m)
Hora de finalización		11:17 am	11:14 am	13°42'36.1"N	89°10'35.2"OE	608
PROPIEDADES DEL AGUA						
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)		7.86 (106.8%)
pH	6.83	Cloruros (mg/L)	399.97	Sólidos totales disueltos (g/L)		0.3640
Conductividad (µs/cm)	610	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)		31.30
OBSERVACIONES						
Los 3 pozos no se encuentran totalmente visibles, además, están ubicados en una barranca con vegetación.						

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio La Gloria en tercera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Adriana Rodríguez		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	1	Nombre del sitio	La Gloria		
Fecha de muestreo		06/06/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 301	²²⁶ Ra 301	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:02 am	9:55 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		10:03 am	9:57 am	13°44'15.3"N	89°13'14.4"OE
				Altura (m)	
				770	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	9.94 (120.90%)
pH	7.45	Cloruros (mg/L)	110.13	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.2509
Conductividad (µs/cm)	381.80	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	25.50
OBSERVACIONES					
Ubicado en Residencial La Gloria. Hay inyección del pozo San Ramón (en la misma zona). La muestra de agua tomada es de mezcla.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Espino en tercera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	2	Nombre del sitio	El Espino		
Fecha de muestreo		06/06/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 302	²²⁶ Ra 302	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:34 am	10:28 am	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		10:35 am	10:29 am	13°40'42.7"N	89°15'17.6"OE
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	11.86 (138.1%)
pH	6.64	Cloruros (mg/L)	550.40	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4420
Conductividad (µs/cm)	675.00	Cantidad de Cl (mg/L)	0.80	Temperatura (°C)	24.60
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, existe poca vegetación a los alrededores de los 3 pozos ubicados en la zona.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Centroamérica en tercera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Adriana Rodríguez		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	3	Nombre del sitio	Centroamérica		
Fecha de muestreo		06/06/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 303	²²⁶ Ra 303	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:14 am	11:05 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		11:16 am	11:06 am	13°42'29.1"N	89°12'44.1"OE
				Altura (m)	
				711	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	9.21 (116.9%)
pH	6.84	Cloruros (mg/L)	303.67	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4485
Conductividad (µs/cm)	695.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	28.60
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos están ubicados en una zona pequeña, además se encuentran en las cercanías de una comunidad y de una zona comercial.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Socorro en tercera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	4	Nombre del sitio	El Socorro		
Fecha de muestreo		06/06/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 304	²²⁶ Ra 304	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:34 am	11:28 am	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		11:35 am	11:30 am	13°42'7.4"N	89°12'8.4"OE 685
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	7.85 (102.00%)
pH	6.79	Cloruros (mg/L)	605.72	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4485
Conductividad (µs/cm)	818.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.00	Temperatura (°C)	28.5
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, hay poca presencia de vegetación en los alrededores de los 2 pozos. La planta tiene una alta capacidad de almacenamiento de agua.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Río Urbina en tercera jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Adriana Rodríguez		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	5	Nombre del sitio	Río Urbina		
Fecha de muestreo		06/06/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 305	²²⁶ Ra 305	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		12:01 pm	11:55 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		12:03 pm	11:57 am	13°42'36.1"N	89°10'35.2"OE
				Altura (m)	
				608	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	6.51 (88%)
pH	6.68	Cloruros (mg/L)	522.14	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.3705
Conductividad (µs/cm)	572	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	31.30
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos no se encuentran totalmente visibles, además, están ubicados en una barranca con vegetación.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio La Gloria en cuarta jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	1	Nombre del sitio	La Gloria		
Fecha de muestreo		20/07/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 401	²²⁶ Ra 401	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		10:55 am	10:57 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		10:56 am	10:59 am	13°44'15.3"N	89°13'14.4"OE
				Altura (m)	
				770	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	11.02 (132.9%)
pH	7.20	Cloruros (mg/L)	64.10	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.2366
Conductividad (µs/cm)	362.9	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	25.60
OBSERVACIONES					
Ubicado en Residencial La Gloria. Hay inyección del pozo San Ramón (en la misma zona). La muestra de agua tomada es de mezcla.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Espino en cuarta jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	2	Nombre del sitio	El Espino		
Fecha de muestreo		20/07/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 402	²²⁶ Ra 402	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:21 am	11:20 am	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		11:22 am	11:21 am	13°40'42.7"N	89°15'17.6"OE 839
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	7.9 (102.6%)
pH	6.51	Cloruros (mg/L)	446.11	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4420
Conductividad (µs/cm)	699.00	Cantidad de Cl (mg/L)	0.80	Temperatura (°C)	29.80
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, existe poca vegetación a los alrededores de los 3 pozos ubicados en la zona.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Centroamérica en cuarta jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	3	Nombre del sitio	Centroamérica		
Fecha de muestreo		20/07/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 403	²²⁶ Ra 403	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		11:55 am	11:57 am	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		11:56 am	11:58 am	13°42'29.1"N	89°12'44.1"OE
				Altura (m)	
				711	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	5.51 (75.8%)
pH	6.61	Cloruros (mg/L)	972.68	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.5200
Conductividad (µs/cm)	799.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.30	Temperatura (°C)	32.20
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos están ubicados en una zona pequeña, además se encuentran en las cercanías de una comunidad y de una zona comercial.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio El Socorro en cuarta jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE LA ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Andrea Sigüenza		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	4	Nombre del sitio	El Socorro		
Fecha de muestreo		20/07/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 404	²²⁶ Ra 404	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		12:43 pm	12:45 pm	Coordenadas geográficas	
Hora de finalización		12:44 pm	12:47 pm	13°42'7.4"N	89°12'8.4"OE
				Altura (m)	
				685	
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	6.41 (84.6%)
pH	6.72	Cloruros (mg/L)	791.37	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.4225
Conductividad (µs/cm)	660.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	30.00
OBSERVACIONES					
Ubicado en las cercanías de la calle principal, hay poca presencia de vegetación en los alrededores de los 2 pozos. La planta tiene una alta capacidad de almacenamiento de agua.					

Hoja de muestreo de agua subterránea para el sitio Río Urbina en cuarta jornada de muestreo.

HOJA DESCRIPTIVA DE MUESTREO EN POZOS DE ANDA					
BITACORA					
Nombre del responsable		Karla Morales		FOTOGRAFÍA	
N.º de pozo	5	Nombre del sitio	Río Urbina		
Fecha de muestreo		20/07/2018			
Radionúclido		Radón (²²² Rn)	Radio (²²⁶ Ra)		
Código de muestra		²²² Rn 405	²²⁶ Ra 405	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Hora de inicio		12:20 pm	12:24 pm	Coordenadas geográficas	Altura (m)
Hora de finalización		12:22 pm	12:25 pm	13°42'36.1"N 89°10'35.2"OE	608
PROPIEDADES DEL AGUA					
Olor	Inodoro	Color	Incoloro	Oxígeno disuelto (mg/L)	5.65 (76.4%)
pH	6.68	Cloruros (mg/L)	379.12	Sólidos totales disueltos (g/L)	0.3575
Conductividad (µs/cm)	567.00	Cantidad de Cl (mg/L)	1.10	Temperatura (°C)	31.30
OBSERVACIONES					
Los 3 pozos no se encuentran totalmente visibles, además, están ubicados en una barranca con vegetación.					

ANEXO 7. PLAN DE VALIDACIÓN DE METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

PLAN DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO ASTM D5072-09 PARA LA EX- TRACCIÓN DE RADÓN (²²²Rn)

1. Alcance de la validación:

Método	Método ASTM D5072-09 para la extracción de radón (²²² Rn) y su medición en el equipo de centelleo líquido.					
Analito	Radón (²²² Rn)					
Matrices	Agua de pozo perforado, destinada al consumo humano					
Tipo	Validación retrospectiva		Validación prospectiva		Verificación	

2. Diseño experimental:

Matrices de las muestras	Agua de pozo perforado, destinada al consumo humano
Blanco matriz	Agua destilada
Material de referencia	Patrón NIST-01

Tabla A.4 Parámetros de desempeño para la evaluación de la metodología para determinación de radón (^{222}Rn).

Parámetro		¿Se hará?		N.º de análisis	Resultado a evaluar	Criterios de aceptabilidad	
		Si	No				
Selectividad			X	--	--	--	
Linealidad		X		7	Gráfico de concentración vs respuesta, conocido como función respuesta.	$R^2 > 0.99$ y $t_{\text{calculado}} > t_{\text{crítico}}$	
Sensibilidad		X		3	N/A	N/A	
Límites	Límite de Detección (LoD)	X		7	Promedio	$\text{LoD} < 0.01 \text{ Bq/L}$	
	Límite de Cuantificación (LoQ).	X		7	Promedio	$\text{LoD} < \text{LoQ}$	
	Límite Crítico (Lc)	X		7	Promedio	$\text{Lc} < \text{LoD} < < \text{LoQ}$	
Exactitud	Veracidad	Sesgo	X		3	Promedio	$S' \pm 10\%$
		Recuperación	X		7	Concentración de analito adicionado	$R > 95\%$
	Precisión	Repetibilidad	X		3	Desviación estándar y coeficiente de variación	$s < 10\%$
		Reproducibilidad	X		6	Desviación estándar y coeficiente de variación	$s < 10\%$
Robustez		Analista	X		3	Desviación estándar	$s < 10\%$
		Aireación y temperatura	X		4	Desviación estándar	$s < 10\%$
Incertidumbre		X		Todas las muestras	Derivadas parciales	$U(A) < 10\%$	
Trazabilidad		X		7	Concentraciones de muestras patrón	$t_{\text{calculado}} < t_{\text{crítico}}$	

3. Materiales, insumos y equipos necesarios para desarrollar la validación:

<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hielera • Material de laboratorio (probeta, beaker, gotero, etc.) • Micropipeta de volumen fijo de 2000 mL y puntas de pipetas • Imanes • Viales de plástico • Porta muestras para el equipo de centelleo líquido • Guantes • Cinta de teflón • Cronometro • Material de limpieza (lavavajillas líquido, cepillo para lavar cristalería, etc.)
<p>Reactivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • POPOP (1-4 bis 2-(5 feniloxazolil) benceno) grado centelleo líquido. • PPO (2,5 difenil oxazol) grado centelleo líquido. • Tolueno grado centelleo
<p>Equipo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de centelleo líquido

PLAN DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO ARCAL RLA/5/0/48 PARA LA EXTRACCIÓN DE RADIO (²²⁶Ra)

1. Alcance de la validación:

Método	Método ARCAL RLA/5/0/48 para la extracción de radio (²²⁶ Ra) y su medición en el equipo de centelleo líquido.					
Analito	Radio (²²⁶ Ra).					
Matrices	Agua de pozo perforado, destinada al consumo humano					
Tipo	Validación retrospectiva		Validación prospectiva		Verificación	

2. Diseño experimental:

Matrices de las muestras	Agua de pozo perforado, destinada al consumo humano
Blanco matriz	Agua destilada
Material de referencia	Patrón NIST-01

Tabla A.5 Parámetros de desempeño para la evaluación de la metodología para determinación de radio (^{226}Ra).

Parámetro		¿Se hará?		N.º de análisis	Resultado a evaluar	Criterios de aceptabilidad	
		Si	No				
Selectividad			X	--	--	--	
Linealidad		X		7	Gráfico de concentración vs respuesta, conocido como función respuesta.	$R^2 > 0.99$ y $t_{\text{calculado}} > t_{\text{crítico}}$	
Sensibilidad		X		3	N/A	N/A	
Límites	Límite de Detección (LoD)	X		7	Promedio	$\text{LoD} < 0.01 \text{ Bq/L}$	
	Límite de Cuantificación (LoQ).	X		7	Promedio	$\text{LoD} < \text{LoQ}$	
	Límite Crítico (Lc)	X		7	Promedio	$\text{Lc} < \text{LoD} < \text{LoQ}$	
Exactitud	Veracidad	Sesgo	X		3	Promedio	$S' \pm 10\%$
		Recuperación	X		7	Concentración de analito adicionado	$R > 95\%$
	Precisión	Repetibilidad	X		3	Desviación estándar y coeficiente de variación	$s < 10\%$
		Reproducibilidad	X		-	Desviación estándar y coeficiente de variación	$s < 10\%$
Robustez		Analista	X		3	Desviación estándar	$s < 10\%$
		pH	X		3	Desviación estándar	$s < 10\%$
Incertidumbre		X		Todas las muestras	Derivadas parciales	$U(A) < 10\%$	
Trazabilidad		X		7	Concentraciones de muestras patrón	$t_{\text{calculado}} < t_{\text{crítico}}$	

3. Materiales, insumos y equipos necesarios para desarrollar la validación:

<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Material de laboratorio (probeta, beaker, agitador de vidrio, vidrio de reloj, papel para medir pH, gotero, etc.) • Micropipeta de volumen fijo de 2000 mL y puntas de pipetas • Imanes • Viales de vidrio • Recipientes contenedores de muestras para la centrifuga • Porta muestras para el equipo de centelleo líquido • Guantes • Cinta de teflón • Cronometro • Material de limpieza (lavavajillas líquido, cepillo para lavar cristalería, etc.)
<p>Reactivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • POPOP (1-4 bis 2-(5 feniloxazolil) benceno) grado centelleo líquido. • PPO (2,5 difenil oxazol) grado centelleo líquido. • Tolueno grado centelleo • CaHPO₄ (fosfato ácido de calcio). • HNO₃ (ácido nítrico) concentrado. • HCl (ácido clorhídrico) concentrado.
<p>Equipo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de centelleo líquido • Centrifuga • Parrilla de calentamiento con agitación magnética

ANEXO 8. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS DE RADÓN (²²²Rn) Y RADIO (²²⁶Ra) EN AGUA.

Tabla A.6 Resultados para validación de metodología ASTM D5072-09 para análisis de radón (²²²Rn) en agua.

Parámetro		Prueba realizada	Resultado obtenido		Criterio de aceptabilidad
Linealidad		Curva de calibración y evaluación estadística t-Student.	R ² = 0.9943		R ² >0.99
			t _{calculado} (29.53) > t _{tabulado} (2.57)		t _{calculado} > t _{tabulado}
Sensibilidad		$\gamma = \frac{m}{Si}$	Muestra (Bq/L)	Factor (s⁻¹/Bq²)	N/A
			0.46	21.13	
			4.57	15.81	
			11.87	5.14	
Limites	Límite de detección (LoD)	$AMD = \frac{4.66 \sqrt{\frac{cpm_f}{t_m}} (f_D)(f_S)}{60(V)(E_{fm})(f_c)}$	0.08 Bq/L		LoD<0.01Bq/L
	Límite de cuantificación (LoQ)	LoQ = 0 + 10s	0.32 Bq/L		LoD<LoQ
	Límite crítico (Lc)	$Lc = 1.64 \sqrt{\frac{2B}{T_m}}$	0.04 Bq/L		Lc<LoD<<LoQ

Continúa en pág. 235

Tabla A.6 Resultados para validación de metodología ASTM D5072-09 para análisis de radón (²²²Rn) en agua. Continuación

Parámetro		Prueba realizada	Resultado obtenido		Criterio de aceptabilidad	
Exactitud	Veracidad	Sesgo	$S' = X - X_a$	Muestra (Bq/L)	S' (%)	S' ± 10%
				0.46	1.00	
				0.91	34.00	
				2.74	71.00	
				4.57	-15.00	
				7.31	28.00	
				9.13	4.00	
	11.87	5.00				
	Recuperación	$\%R = \frac{C_e - C_o}{C_a} * 100$	Muestra (Bq/L)	R (%)	R > 95%	
			0.46	95.46		
			4.57	93.96		
	Precisión	Repetibilidad	Desviación estándar para cada muestra	Muestra (Bq/L)	s (%)	s <10%
0.46				4.00		
4.57				5.41		
Reproducibilidad		Uso de tolueno grado centelleo	s (%) =	4.00	s <10% t _{tabulado} > t _{calculado}	
			s (%) =	12.00		
		Uso de tolueno grado HPLC	t _{tabulado} (4.303) > t _{calculado} (4.29)			

Continúa en pág. 236

Tabla A.6 Resultados para validación de metodología ASTM D5072-09 para análisis de radón (^{222}Rn) en agua. Continuación

Prueba realizada	Prueba realizada	Prueba realizada			
Robustez	Cambio de analista para la preparación y medición muestras Prueba F de Fisher	Muestra	s (%)	s <10% $F_{\text{prueba}} > F_{\text{tabulada}}$	
		I	4.86		
		II	4.76		
		III	0.97		
			$F_{\text{prueba}} (24.36) > F_{\text{tabulada}} (5.14)$		
	Cambio de temperatura de transporte Prueba t-Student	Muestra	s (%)	s <10% $t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$	
		Hielera	0.36		
		Temp Ambiente	3.07		
			$t_{\text{tabulado}} (4.30) > t_{\text{calculado}} (3.14)$		
	Efecto de aireación Prueba t-Student	Muestra	s (%)	s <10% $t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$	
		Aireada	1.47		
		No aireada	4.40		
		$t_{\text{calculado}} (6.80) > t_{\text{tabulado}} (4.30)$			
Trazabilidad	Evaluación estadística t-Student	$t_{\text{tabulado}} (2.37) > t_{\text{calculado}} (0.64)$		$t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$	

Tabla A.7 Resultados para validación de metodología ARCAL RLA/5/0/48 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua.

Parámetro		Prueba realizada	Resultado obtenido		Criterio de aceptabilidad	
Linealidad		Curva de calibración y evaluación estadística t-Student.	R ² = 0.999		R ² > 0.99	
			t _{calculado} (70.63) > t _{tabulado} (2.57)		t _{calculado} > t _{tabulado}	
Sensibilidad		$\gamma = \frac{m}{\text{Si}}$	Muestra (Bq/L)	Factor (s⁻¹/Bq²)	N/A	
			0.18	225.87		
			0.82	185.14		
			2.01	150.56		
Limites	Límite de detección (LoD)	$\text{AMD} = \frac{4.66 \sqrt{\frac{\text{cpm}_f}{t_m}} (f_D)(f_S)}{60(V)(E_{fm})(f_c)}$	46.89 CPM	0.005 Bq/L	LoD < 0.01 Bq/L	
	Límite de cuantificación (LoQ)	LoQ = 0 + 10s	52.96 CPM	0.074 Bq/L	LoD < LoQ	
	Límite crítico (Lc)	$L_c = 1.64 \sqrt{\frac{2B}{T_m}}$	0.48 CPM	--	Lc < LoD << LoQ	
Exactitud	Veracidad	Sesgo	$S' = X - X_a$	Muestra (Bq/L)	S' (%)	S' ± 10%
				0.18	-0.95	
				0.46	6.64	
				0.64	12.59	
				0.82	13.30	
				1.00	9.03	
				1.55	13.86	
				2.01	-0.82	

Continúa en pág. 238.

Tabla A.7 Resultados para validación de metodología ARCAL RLA/5/0/48 para análisis de radio (²²⁶Ra) en agua.
Continuación

Parámetro			Prueba realizada	Resultado obtenido		Criterio de aceptabilidad	
	Recuperación		$\%R = \frac{C_e - C_o}{C_a} * 100$ Continuación	Muestra (Bq/L)	R (%)	R > 95%	
				0.18	89.68		
				0.46	112.48		
				0.64	118.23		
				0.82	115.04		
				1.00	108.05		
				1.55	108.32		
	2.01	99.13					
	Precisión	Repetibilidad		Desviación estándar para cada muestra	Muestra (Bq/L)	s (%)	s < 10%
					0.18	1.33	
0.82					1.62		
Reproducibilidad		Uso de tolueno grado centelleo		s = 1.10 %	$t_{\text{tabulado}} (4.30) > t_{\text{calculado}} (2.16)$	s < 10% $t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$	
				Uso de tolueno grado HPLC			s = 2.32 %
Robustez			Cambio de analista para la preparación y medición muestras Prueba F de Fisher	Muestra	s (%)	s < 10% $F_{\text{prueba}} > F_{\text{tabulada}}$	
				I	1.10		
				II	3.17		
				III	1.00		
				$F_{\text{prueba}} (16.02) > F_{\text{tabulada}} (6.94)$			

Continúa en pág. 239

Tabla A.7 Resultados para validación de metodología ARCAL RLA/5/0/48 para análisis de radio (^{226}Ra) en agua.
Continuación

Parámetro	Prueba realizada	Resultado obtenido		Criterio de aceptabilidad
	Cambio de pH en la preparación de muestras Prueba F de Fisher	Muestra (pH)	s (%)	s <10% $F_{\text{prueba}} > F_{\text{tabulada}}$
		9	1.17	
		10	1.07	
		11	2.74	
Trazabilidad	Evaluación estadística t-Student	$t_{\text{tabulado}} (2.45) > t_{\text{calculado}} (0.35)$		$t_{\text{tabulado}} > t_{\text{calculado}}$