

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICION 2018



TEMA: DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL RADÓN ( $^{222}\text{Rn}$ ) EN FUENTES  
TERMALES DE ÁREAS GEOTÉRMICAS

**PRESENTAN:**

Karla María Morales Navarro

Andrea Ivonne Sigüenza Díaz

**ASESOR:** Licda. María Inés Magaña

M.Sc. Julio Payes

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2018.

## ÍNDICE

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	2
3. OBJETIVOS .....	3
3.1. Objetivo General.....	3
3.2. Objetivo Específicos .....	3
4. MARCO TEORICO .....	4
4.1. Conceptos básicos .....	4
4.1.1. Radiactividad .....	4
4.1.2. Línea de decaimiento .....	4
4.1.3. Equilibrio secular .....	5
4.1.4. Gas noble Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	6
4.1.5. Isótopos.....	6
4.1.6. Mecanismo de transferencia.....	7
4.2. Componentes de un sistema geotérmico.....	7
4.2.1. Aguas superficiales.....	7
4.2.2. Aguas termales.....	8
4.2.3. Reservorio .....	10
4.3. Proyectos geotérmicos .....	11
4.3.1. Fases de un proyecto geotérmico.....	12
4.3.2. Aporte del área Geoquímica en estudios de factibilidad .....	13
4.4. Importancia de la medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en proyectos geotérmicos .....	15
4.5. Método ASTM D5072-09 para determinar radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua .....	16
4.5.1. Proceso de centelleo líquido.....	17
5. MARCO METODOLÓGICO .....	18
5.1. Etapa de campo .....	18
5.1.1. Ubicación.....	19
5.1.2. Materiales y equipo.....	19
5.1.3. Pretratamiento de las muestras de agua para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	21
5.1.4. Procedimiento para la recolección de muestras.....	22

5.1.5.	Muestreo en fumarolas .....	23
5.1.6.	Muestreo en pozos geotérmicos .....	25
5.2.	Etapa de Laboratorio .....	26
5.2.1.	Ubicación de laboratorio .....	26
5.2.2.	Equipo de centelleo líquido .....	27
5.2.3.	Materiales e instrumentos necesarios para análisis .....	28
5.2.4.	Procedimiento aplicado para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de agua .....	30
6.	ANÁLISIS DE DATOS .....	36
7.	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	38
7.1.	Relación entre parámetros fisicoquímicos y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	46
8.	CONCLUSIONES .....	54
9.	RECOMENDACIÓN .....	55
10.	AGRADECIMIENTOS .....	56
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
12.	APÉNDICES (GRÁFICAS Y DATOS ADICIONALES) .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1:	Cadena de desintegración radioactiva uranio ( $^{238}\text{U}$ ) .....	5
Figura 4-2:	Equilibrio radiactivo entre radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	6
Figura 4-3:	Esquema de aguas termales de origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración con aguas endógenas .....	10
Figura 4-4:	Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal .....	11
Figura 4-5:	Fases de un proyecto geotérmico según .....	12
Figura 4-6:	Espectro teórico del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y sus descendientes .....	16
Figura 4-7:	Secuencia de eventos que se desarrollan durante el proceso de centelleo líquido .....	17
Figura 4-8:	Viales utilizados en el equipo de centelleo líquido .....	17
Figura 5-1:	Frasco recolector .....	19
Figura 5-2:	Hielera .....	20
Figura 5-3:	Frascos plásticos .....	20
Figura 5-4:	Termómetro termocupla .....	20
Figura 5-5:	GPS .....	20
Figura 5-6:	Condiciones óptimas para el transporte y almacenamiento de muestra agua para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	21

Figura 5-7: Fumarola El Playón, Santa Rosa y equipo para muestreo .....	23
Figura 5-8: Despeje del área de muestreo, .....	24
Figura 5-9 Sistema embudo-manguera, fijado con material rocoso.....	24
Figura 5-10: Recolección de muestra de vapor condensado de un pozo Geotérmico para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	25
Figura 5-11: Muestra de líquido separado de un pozo Geotérmico para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).....	25
Figura 5-12: Equipo de centelleo líquido del CIAN-FIA-UES.....	27
Figura 5-13: Componentes del equipo de centelleo líquido.....	27
Figura 5-14 : Utilización de Vial .....	28
Figura 5-15: Instrumentos de laboratorio utilizados en el análisis .....	29
Figura 5-16: Componentes del método basado en la norma ASTM D5072-09 .....	30
Figura 5-17: Proceso de extracción e inyección de mezcla coctel-analito radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) ..	33
Figura 5-18: Almacenamiento del vial en un casete del equipo.....	33
Figura 5-19: Procedimiento global de la metodología empleada para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de aguas termales que pertenecen a campos geotérmicos de El Salvador .....	34
Figura 5-20: Sistema de medición de parámetros fisicoquímicos en muestras de fuentes termales.....	35
Figura 6-1: Espectro obtenido de la muestra de la fumarola "El Playón".....	36
Figura 6-2: Espectro obtenido para una muestra de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).....	36
Figura 7-1: Descripción de sitios de muestreo en Berlín .....	39
Figura 7-2: Descripción de sitios de muestreo en Ahuachapán.....	41
Figura 7-3: Presentación de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Bq/L por áreas muestreadas .....	41
Figura 7-4: Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las áreas muestreadas. ....	42
Figura 7-5: Presentación de resultados en grafica radial .....	43
Figura 7-6: Relación de la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Bq/ L con la fuente el playón, fumarola El Playón y un pozo Geotérmico. ....	44
Figura 7-7: Perfil de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en El Playón. ....	46
Figura 7-8: relación entre temperatura y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras.....	48
Figura 7-9: relación entre cloruros y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras. ....	49
Figura 7-10: relación entre pH y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras. ....	50
Figura 7-11: Relación entre pH y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras. ....	51
Figura 7-12: Comparación de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) promedio por sitio de muestreo con respecto al valor indicado en el RTS 13.02.01:14 .....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Gases difusos en campo geotérmico .....	13
Tabla 4-2: Elementos medidos en matrices de agua superficial y geotérmica .....	15
Tabla 4-3: Solutos primarios posibles para la utilización en equipo de centelleo líquido .	18
Tabla 4-4 Solutos secundarios posibles para la utilización en equipo de centelleo líquido	18
Tabla 5-1: Sitios de muestreo elegidos para el análisis.....	19
Tabla 5-2. Pasos de la Etapa de transferencia.....	32
Tabla 6-1: Datos recolectados .....	38
Tabla 7-1: Actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el sitio de muestro El Playón .....	43
Tabla 12-1: Código de sitios de muestreo.....	58
Tabla 12-2. Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en los sitios de muestreo.....	58

## RESUMEN

Se presenta una metodología para determinar la presencia y medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aguas termales, fumarolas y un pozo geotérmico como un aporte a la matriz de medición en exploración. Se hizo uso del Método ASTM D5072-09, que fue seleccionado ya que se contaba con los materiales, reactivos, el equipo de centelleo líquido y el uso del laboratorio del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES). Para la recolección de muestras se seleccionaron 3 zonas; Berlín, San Vicente y Ahuachapán, solamente en la zona de Ahuachapán se pudieron repetir algunos sitios de medición esto debido a la disponibilidad de tiempo. Además, se determinó de manera cualitativa y cuantitativa la presencia de radón en las tres zonas muestreadas, en una fumarola y en un pozo geotérmico.

Dentro de los resultados que se obtuvieron se encontraron concentraciones en el rango entre  $0.03 \pm 1.27$  a  $20.72 \pm 0.67$  Bq/L. Siendo la concentración más alta de  $20.72 \pm 0.67$  Bq/L encontrada en las aguas termales de Santa Teresa con una  $T=69$  °C en la zona de Ahuachapán, en esta misma zona se muestreó la fuente El Playón donde se tuvo la oportunidad de fijar tres puntos de recolección de muestra para tomarlas periódicamente en los 3 días que se visitó ese campo geotérmico, a partir de estos resultados se aprecia la dinámica de este gas, ya que la concentración varía respecto al tiempo de medición y el sitio que se ha fijado para la toma de muestra. Sin embargo, es la misma fuente, lo que indica que las concentraciones no se pueden predecir, es de monitorearlas periódicamente, esta variación en la concentración del radón se debe a la litología de la zona, los flujos de agua, permeabilidad del suelo, fallas activas, y las condiciones termodinámicas: presión, temperatura.

Asimismo, se determinó la presencia de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en la fuente termal El Playón, en la fumarola y en un pozo geotérmico; ubicado estos 3 sitios en la misma zona de Ahuachapán y también se pudo estimar a través de una relación entre parámetros fisicoquímicos y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), de dónde proviene este gas presente en las fuentes. Los resultados que se obtuvieron de la fuente El Playón en un punto de medición fijado fueron: temperaturas altas, pH ácido, TDS bajos, lo que indica que esta fuente recibe el aporte de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por parte de la fumarola. A partir de los resultados obtenidos en la investigación se puede concluir que la presencia y medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aguas termales, fumarolas y un pozo geotérmico puede ser utilizada como técnica de medición en exploración.

Sin embargo, con los resultados que se obtuvieron podría afectar en la calidad de agua que las personas utilizan para diferentes usos, por tal motivo se recomienda realizar un estudio para evaluar periódicamente la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) como en las fuentes: El Salitre, Agua Shuca, El playón, Aguas termales Santa Teresa y la fuente Aponía.

## INTRODUCCIÓN

Desde su origen en nuestro planeta y su atmósfera se ha dado la presencia natural de diferentes elementos radiactivos. Entre estos se encuentra el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que es un gas radiactivo de origen natural que tiene un periodo de semidesintegración ( $T_{1/2}$ ) de 3.8 días. Es decir, el tiempo necesario para que el número de átomos se reduzca a la mitad. Se forma como el producto de la desintegración del radio con  $T_{1/2}=1600$  años, el cual es miembro de la serie radiactiva del uranio ( $^{238}\text{U}$ ). El uranio y el radio se encuentran naturalmente en suelos y rocas, proporcionando una fuente continua de radón.

Una de las principales características que se conoce del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con referencia a investigaciones previas es que este ha contribuido a determinar la existencia de fallas activas en campos geotérmicos, la permeabilidad del suelo, infiriendo de esta manera la localización de fuentes de calor y del reservorio geotérmico. Teniendo en cuenta que en la emanación del gas radón se puede citar la investigación realizada por (Santiago H, 2004) donde pudo observar la existencia de una variación en las concentraciones de radón registradas en las aguas termales, atribuyendo estas variaciones a que el Radón depende de las condiciones del entorno como: Flujo de agua subterránea, permeabilidad del suelo, densidad del suelo y las condiciones termodinámicas: presión, temperatura.

Por lo tanto, el interés, de la presente investigación se centra en la presencia y medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aguas termales como un aporte a la matriz de medición en exploración, ya que actualmente se obtiene únicamente a partir de medición in situ con técnicas de desgasificación difusa en campos geotérmicos. En ese mismo sentido la investigación comprende una fase de campo y una de laboratorio; utilizando la metodología para el análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua termal dictada por la norma D5072-09 "Standard Test Method for Radón in Drinking Water" de American Society for Testing and Materials (ASTM), (Varillas, Barrientos y Churquipa, 2013).

Al mismo tiempo puesto que el radón es un gas radioactivo respirable su presencia en concentraciones anormales es considerada por la normativa internacional como un riesgo para la salud humana. Por lo cual se considera una temática de interés para evaluarse en una futura investigación.

Por lo tanto esta investigación contribuirá a crear una base técnica con posibilidad de uso como técnica exploratoria en la búsqueda del recurso geotérmico en el país y cuantificar la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para determinar si las fuentes termales muestreadas dentro de los campos geotérmicos puede ser consumida por las comunidades que habitan en la zona y de esa manera aportarle al área ambiental un nuevo parámetro para monitoreo y concientización a la población acerca de este efecto a la salud.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La geoquímica estudia el origen, distribución y evolución de los elementos químicos en la Tierra, es por ello, junto con la geología y geofísica, que ha tenido un papel importante en la exploración y explotación de un recurso geotérmico. Sin embargo, en las mediciones que se han realizado durante la exploración geotérmica, no se ha tomado en consideración la concentración de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las fuentes termales como un complemento de la investigación y prospección geotérmica, ya que la medida en continuo de la concentración de radón en agua es útil para conocer el origen y principales características del acuífero o manantial en el que se encuentra.

Así, por ejemplo, a partir de una concentración base de radón en el agua, un incremento de la misma estará relacionado con un aporte al acuífero de agua subterránea si se observa alta concentración de radón, mientras que una disminución será debida a aguas superficiales y/o de lluvia que presentan concentraciones de radón muy bajas. Con referencia a lo anterior se generará una serie de datos donde se cuantificará la concentración de la actividad de radón en un pozo geotérmico, en un condesado de fumarola y en algunas fuentes termales que se encuentren relacionadas con un campo geotérmico y fuentes superficiales que no interactúan directamente con éste, con el propósito de generar datos y que sea complementado con investigaciones posteriores. Dadas las condiciones que anteceden un aumento en la concentración de radón puede determinar fallas activas, y estas estar asociadas a las fuentes termales, si éstas se ubican cerca o en una posible falla y además relaciona el fenómeno con la posibilidad de que exista una fuente de calor de la cual provienen; es por tal motivo la importancia de monitorear las fuentes termales en un sitio de interés geotérmico.

En este sentido se ha decidido cuantificar la concentración de radón presente en las fuentes termales de Ahuachapán, Berlín y San Vicente, ya que en la actualidad existe muy pocas o ninguna investigación respecto a esta práctica. Es por esto que resulta de mucho interés realizar esta investigación, analizar las concentraciones medidas para establecer un sistema de medición de Radón en aguas superficiales y sentar las bases para caracterizarlas químicamente y relacionarlas con un posible reservorio geotérmico.

## 2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es un gas radiactivo que se presenta gracias a una serie de decaimientos que experimenta el progenitor uranio; este gas viaja a través de los espacios que encuentran libre al interior de la tierra, por lo tanto, se puede establecer que estos espacios corresponden a grietas en las rocas, fallas, fisuras que se generan a través de los sismos y microsismos que se dan constantemente en el suelo. Lo anterior indica que al haber presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el medio que se analiza, existe permeabilidad al interior de la tierra que es considerado como una de las condiciones importantes en el momento de considerar una zona como posible objetivo de exploración para futura explotación geotérmica, por otra parte, al existir radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) existen todos sus progenitores y sus descendientes liberando energía en su decaimiento (a través de partículas alfa), dándole un aporte al gradiente geotérmico. En investigaciones anteriores se afirmó que existe una correlación significativa entre el contenido de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y los cloruros en aguas termales (Carpio, 2013). comprobando la importancia de la medición de uno o ambos parámetros en el monitoreo volcánico, dando otro punto a favor del gas como posible elemento de consideración al momento de detectar aguas maduras de origen geotérmico; también se considera la posibilidad de encontrar una relación entre la temperatura presente en las fuentes termales con la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), debido a la presencia de la dependencia entre la radiactividad alfa con la sílice, y a su vez la sílice con la temperatura. Por lo tanto, es de interés el estudio de la cantidad de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en aguas termales como un aporte en la búsqueda del recurso geotérmico para una zona de estudio.

Sin embargo, a pesar que este gas pueda ser satisfactorio para ubicar sistemas geotérmicos, es altamente perjudicial para la salud de las personas al encontrarse por encima de los límites permisibles por la normativa RTS 13.02.01:14 (Reglamento Técnico Salvadoreño) por lo tanto, es importante también cuantificar la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para tener evidencia que sustente una posterior evaluación del agua como apta o no apta para consumo humano desde el punto de vista radiológico y de esa manera aportarle al área ambiental un nuevo parámetro para monitoreo y concientización a la población acerca de este efecto a la salud.

Por lo anterior, se presenta la investigación como un aporte en la fase de exploración de un proyecto geotérmico para el área de Geoquímica y como una colaboración al área ambiental; destacando su relevancia por ser un estudio que no se ha realizado en el país, y en beneficio del desarrollo científico y ambiental de nuestra nación, como una base a nuevos estudios para seguir generando nuevas herramientas que amplíen la búsqueda de recursos naturales que proporcionen energía disponible para el ser humano.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo General

Determinar la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en fuentes termales, estableciendo una línea base para su posible uso como herramienta en la fase exploratoria de proyectos geotérmicos.

#### 3.2. Objetivo Específicos

1. Describir el aporte de la existencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en fuentes termales dentro de la fase exploratoria de proyectos geotérmicos.
2. Detallar una metodología validada para medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de agua termal destinada al uso en exploración geotérmica.
3. Comparar la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en muestras de fuentes termales con la normativa propuesta para el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en la Normativa Técnica Salvadoreña (RTS).

## 4. MARCO TEORICO

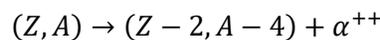
### 4.1. Conceptos básicos

#### 4.1.1. Radiactividad

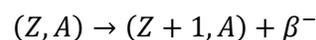
La radiactividad es un fenómeno en el cual el núcleo atómico emite espontáneamente partículas atómicas o radiaciones electromagnéticas transformándose en otro diferente al original.

Un Isótopo, Son aquellos átomos que tienen igual número atómico (Z) pero difieren en el número másico (A), por lo tanto poseen un número diferente de neutrones, aunque representen el mismo elemento químico.

Cuando un isótopo radioactivo emite una partícula alfa ( $\alpha$ ), se transforma en otro isótopo con número atómico (Z) inferior en dos unidades al del núcleo original y una masa atómica (A) inferior en cuatro unidades.



Cuando un isótopo radioactivo emite partículas beta ( $\beta$ ), se emite un electrón negativo, el núcleo conserva su masa atómica pero su número atómico aumenta en una unidad.



#### 4.1.2. Línea de decaimiento

Algunos átomos son estables por naturaleza, mientras que otros son inestables. Los átomos con núcleos inestables, que se transforman espontáneamente, liberando energía en forma de radiación, son conocidos como radionucleidos. Dicha energía puede interactuar con otros átomos e ionizarlos. La ionización es el proceso mediante el cual los átomos pasan a estar cargados positiva o negativamente debido a la ganancia o pérdida de electrones. La radiación ionizante tiene suficiente energía para desplazar a los electrones fuera de su órbita dando lugar a átomos cargados denominados iones. La emisión de dos protones y dos neutrones se denomina desintegración alfa y la emisión de electrones, desintegración beta. Con frecuencia, el nucleido inestable está en un estado tan excitado que la emisión de partículas no es suficiente para estabilizarlo. Entonces, genera una intensa emisión de energía en forma de radiación electromagnética, constituida por fotones, que se denomina rayos gamma.

Aun cuando todos los radionucleidos son inestables, algunos son más inestables que otros. Por ejemplo, las partículas en el núcleo de un átomo de uranio ( $^{238}\text{U}$ ) (con 92 protones y 146 neutrones) apenas son capaces de mantenerse agrupadas. Con el tiempo, un grupo

de dos protones y dos neutrones se separan del átomo y son emitidos en forma de partícula alfa, transformando el uranio ( $^{238}\text{U}$ ) en torio ( $^{234}\text{Th}$ ) (con 90 protones y 144 neutrones). Pero el torio ( $^{234}\text{Th}$ ) también es inestable y se transforma, aunque por un proceso diferente. Mediante la emisión de electrones de alta energía, partículas beta, y la conversión de un neutrón en un protón, se convierte en protactinio ( $^{234}\text{Pa}$ ) con 91 protones y 143 neutrones. Este, a su vez, es muy inestable y se convierte rápidamente en uranio-234; así sucesivamente el átomo continúa emitiendo partículas y transformándose, hasta convertirse finalmente en plomo ( $^{206}\text{Pb}$ ), con 82 protones y 124 neutrones, el cual es estable, así como se puede observar en la Figura 4 -1. Hay muchas de estas secuencias de transformación, o desintegración radiactiva que es como se denomina. (PNUMA, 2016)

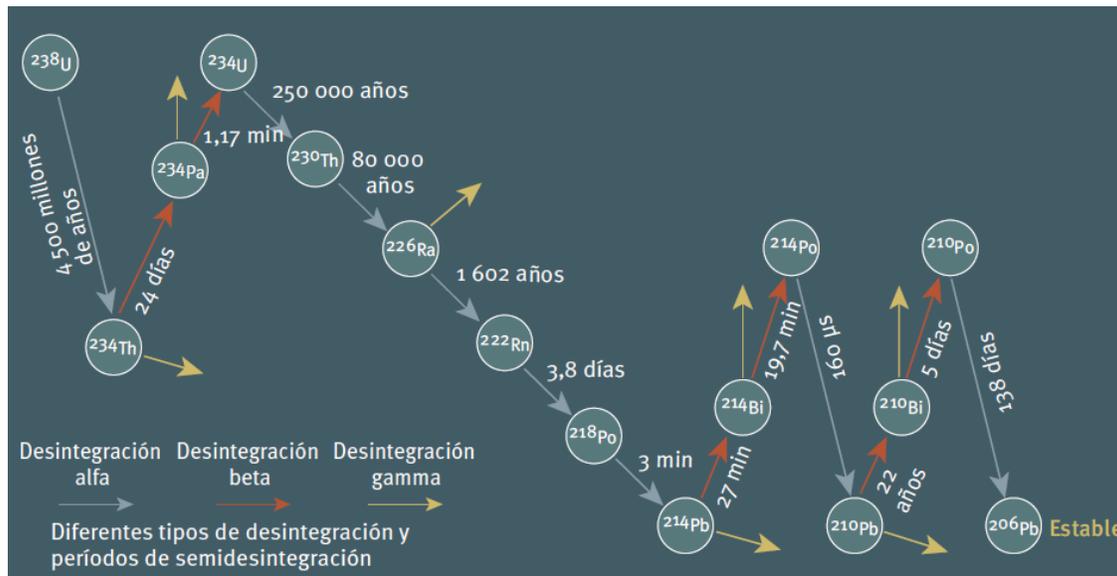


Figura 4-1: Cadena de desintegración radioactiva uranio ( $^{238}\text{U}$ ) Fuente: (PNUMA, 2016)

#### 4.1.3. Equilibrio secular

Dos situaciones generales se pueden producir por el decaimiento de una serie radiactiva. Primero, que los núcleos padres tengan más longevidad (semividas grandes) que los núcleos progenie ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ), y segundo, el caso contrario ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ). Considerando el primer caso, un estado de equilibrio radiactivo se alcanza cuando la relación de las tasas de desintegración de los núcleos padres y de su progenie es constante. Obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

Para el caso límite de la ecuación (1) donde  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ , se obtiene:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

Para el radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se establece el caso llamado equilibrio secular, el cual se alcanza al llegar a los 30 días (Figura 4-2), debido a que  $\lambda^{226}\text{Ra}$  ( $1,36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ )  $\ll$   $\lambda^{222}\text{Rn}$  ( $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ).

De forma general, un valor elevado de  $\lambda$  equivale a una semivida pequeña. Para el caso de radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), sus semividas son de 1600 años y 3.825 días, respectivamente. La ecuación (2) indica que la vida del padre es tan larga que su actividad no decrece en forma notoria durante muchas vidas del núcleo hijo.

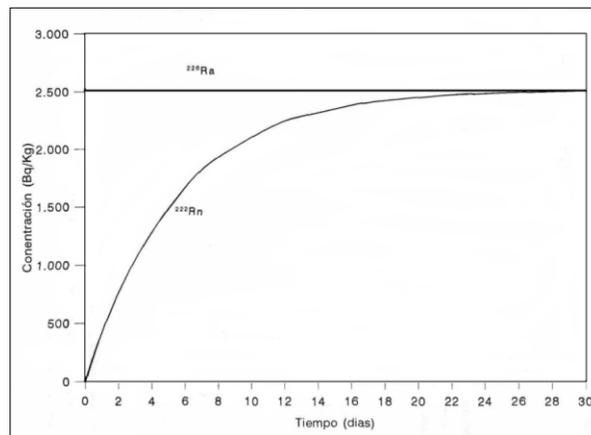


Figura 4-2: Equilibrio radiactivo entre radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y radón ( $^{222}\text{Rn}$ ). (Carpio, 2013)

#### 4.1.4. Gas noble Radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es un elemento químico con 86 protones, es el primer elemento en cada una de las cadenas de decaimiento que no es un metal; pertenece al grupo de los gases nobles, es incoloro, inodoro y es un gas radioactivo.

#### 4.1.5. Isótopos

Se conocen veintisiete isótopos del radón desde el radón ( $^{200}\text{Rn}$ ) hasta el radón ( $^{226}\text{Rn}$ ), pero tres de ellos son los más estudiados debido a su abundancia: radón ( $^{219}\text{Rn}$ ), radón ( $^{220}\text{Rn}$ ) y radón ( $^{222}\text{Rn}$ ). Existe tres series de desintegración radioactiva, del actinio, del torio y del uranio. El tiempo de vida media de la mayoría de los isótopos del radón es menor a una hora, excepto para el radón ( $^{210}\text{Rn}$ ) con 2.5 horas, el radón ( $^{211}\text{Rn}$ ) con 14.7 horas y el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con 3.823 días, (3 días, 19 horas y 45 minutos), de tiempo de semivida. Así el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), por tener el mayor tiempo de semivida y ser más abundante, es el más útil para estudios geohidrológicos.

#### 4.1.6. Mecanismo de transferencia

La solubilidad del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el agua decrece al aumentar la temperatura. Se incrementa de manera lineal al aumentar la presión. De esta manera, por su solubilidad, el radón pasa a formar parte del agua subterránea. Por la ocurrencia y características del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), como radioactividad, abundancia, solubilidad en agua y en aire, proporciona información importante de los ambientes geohidrológicos de los que proviene.

La presencia del gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) de las aguas termales es un proceso que depende de las variables características del fluido, del medio litológico, elementos y compuestos disueltos en el agua. El radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por ser un gas su energía cinética hace que las partículas tiendan a expandirse en todo el volumen en que se encuentren, en este caso las partículas de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) 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 ( $^{222}\text{Rn}$ ) permitiendo la emigración a partir de gradientes de concentración y en flujos convectivos gradientes de presión, (Gómez, 2013).

De todo el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) producido por desintegración del radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) en los granos de las rocas, la fracción que consigue escapar de los mismos y pasar a ocupar el volumen de poros disponible 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 ( $^{222}\text{Rn}$ ) formado, lo frena en el poro, adquiriendo éste, a partir de ese momento, libertad para moverse. Una vez que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) escapa de la estructura de la roca y se mueve dentro de los espacios de poro, dentro de fracturas o fuera de las rocas, puede transportarse libremente, mediante flujo convectivo o advectivo, en el seno de algún gas transportador (gases fumarólicos,  $\text{CO}_2$ , etc); o por simple difusión.<sup>1</sup> Un gran número de factores afectan el transporte del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el subsuelo, algunos de estos son: tipos de roca, presencia de agua, coeficiente de difusión y geometría del poro (Ayala Estrada, 2009)

## 4.2. Componentes de un sistema geotérmico

### 4.2.1. Aguas superficiales

La hidrósfera alude a toda el agua en, sobre o por encima de la superficie de la Tierra; en los océanos, ríos o lagos, bajo la Tierra o en el aire. De igual forma las manifestaciones

---

<sup>1</sup> 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.

hidrotermales, como las fumarolas, constituyen un excelente instrumento para la previsión de las erupciones, puesto que, sobre la base de un modelo, permiten reconocer anticipadamente, los cambios que ocurren en el estado de la actividad volcánica mucho antes de que aparezcan los primeros fenómenos detectables con los métodos geofísicos de vigilancia volcánica.

#### 4.2.2. Aguas termales

Aguas termales son todas aquellas que emanan de la superficie a una temperatura de 5°C mayor que la ambiental. Estas aguas poseen factores energéticos como una potente ionización, mineralización, radiactividad, gases y variaciones de pH.

Las aguas de origen meteórico que se infiltran en el subsuelo descienden por gravedad hacia capas más profundas, elevando su temperatura en el curso de su circulación subterránea. Estas aguas pueden ascender posteriormente hasta la superficie, a través de las fisuras y fracturas existentes en las rocas. Este es sin lugar a dudas el origen más frecuente de las aguas termales, denominándose comúnmente origen geotérmico.

##### 4.2.2.1. 4.2.2.1 Clasificación

Las aguas termales se pueden clasificar según Carpio (2013) por:

##### Temperatura:

- ❖ Aguas termales frías (menos de 20 °C)
- ❖ Aguas hipotermas (20-35 °C)
- ❖ Aguas mesotermas (35-45 °C)
- ❖ Aguas hipertermas (45-100 °C)
- ❖ Aguas supertermas (100-150 °C) (vulcanismo y geotermia)

##### Composición:

- ❖ Aguas minerales ferruginosas: presentan fundamentalmente hierro en su composición.
- ❖ Aguas cloruradas: presentan cloro.
- ❖ Aguas minerales sulfuradas y sulfurosas: con azufre.
- ❖ Aguas minerales sulfatadas: aparte de azufre pueden incluir sodio, calcio, magnesio o cloro en su composición.
- ❖ Aguas minerales bicarbonatadas: con bicarbonato. Pueden ser sódicas, cálcicas, mixtas, cloruradas o sulfatadas.
- ❖ Aguas minerales carbónicas o gaseosas: alto contenido de CO<sub>2</sub> disuelto.
- ❖ Aguas radioactivas: presencia de uranio (<sup>238</sup>U) y radio (<sup>226</sup>Ra).
- ❖ Aguas radónicas: isótopos de radón (<sup>222</sup>Rn) con contenido mayor a 67 Bq/L.

## Mineralización:

- ❖ Oligominerales, menos de 100 mg/litro.
- ❖ Mineralización muy débil, entre 101 y 250 mg/litro.
- ❖ Débil mineralización, entre 251 y 500 mg/litro.
- ❖ Mineralización media, entre 501 y 1500 mg/litro.
- ❖ Fuerte mineralización, más de 1500 mg/litro.
- ❖ Mineralización marina o hipermarina, igual o superior al agua de mar.

### 4.2.1. Fuente de calor

Hay dos tipos de fuentes de calor que originan las aguas termales:

- El calor subterráneo normal (gradiente térmico).
- El calor producido por el decaimiento de elementos radioactivos y por el calor proveniente de las partes más profundas de la Tierra.

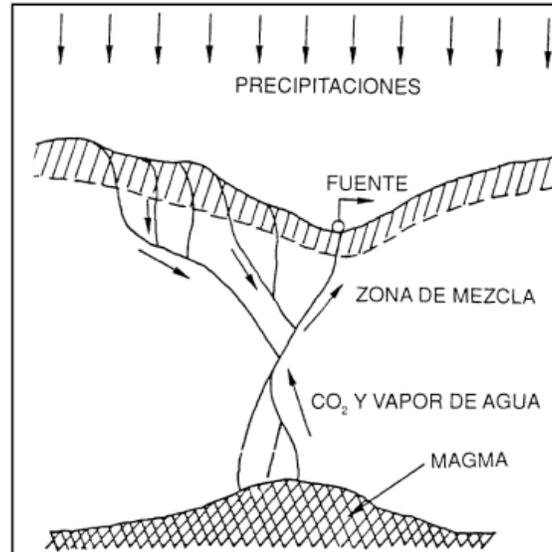
La fuente de calor puede ser una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo, una cámara magmática o gases calientes de origen magmático. Generalmente la fuente de calor presenta temperaturas mayores a los 600 °C. Estas fuentes se pueden encontrar a diferentes profundidades, mayores a dos kilómetros.

En el primer caso las aguas termales ocurren fuera de las regiones volcánicas debido al simple calentamiento bajo el suelo de profundos manantiales subterráneos. La energía proviene del calor normal de la corteza terrestre que corresponde a un aumento de entre 25 y 30 °C por km de profundidad, denominado gradiente geotérmico, que es una variable indicativa del potencial geotérmico de un sitio. Entre más profundo se encuentren las aguas subterráneas, más calor recibirán de la Tierra, y si encuentran en su camino alguna ruptura o falla que así lo propicie, se canalizan hacia la superficie brotando en forma de naciente termal.

Cuando el origen es volcánico (mágmatco) son el resultado de la combinación de aguas subterráneas que se han calentado por rocas volcánicas que a su vez lo han sido por el magma interno del volcán y el gradiente geotérmico es superior al normal. Respecto a las aguas de origen magmático se puede afirmar que existe la posibilidad de que como consecuencia de la cristalización de los magmas se liberen 70 constituyentes volátiles que pueden escaparse en forma de fumarolas, compuestas esencialmente de hidrógeno y vapor de agua, junto con elementos como flúor, cloro, azufre, carbono, fósforo, boro, CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S. La composición en sales y la temperatura de estas aguas termales de origen endógeno, con independencia de la roca de la que proceden, son relativamente constantes y de carácter hipertermal. De forma análoga, las aguas juveniles o endógenas pueden

también proceder de la consolidación de lavas y de vapor de agua de origen volcánico, acompañados generalmente de gases como el anhídrido carbónico, nitrógeno, sulfhídrico, fluorhídrico, etc.

Es de esperar que, las aguas termales puedan tener también un origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración reciente con aguas endógenas como se puede ver en la Figura 4-3.



**Figura 4-3:** Esquema de aguas termales de origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración con aguas endógenas Fuente: (Carpio, 2013)

#### 4.2.3. Reservorio

El calor natural y la elevada presión existente en el interior del globo terrestre producen el magma (roca fundida). Cuando el magma está presente a profundidades lo suficientemente someras para calentar la roca sobre yacente, y la roca está impregnada de agua atrapada en el subsuelo, se crean acumulaciones (reservorios geotérmicos) de fluido sobrecalentado. El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua meteórica puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos. El fluido geotermal es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico, ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Esta agua a menudo contiene sustancias químicas disueltas y gases tales como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc. La Figura 4-4 es una representación muy simplificada de un sistema geotérmico ideal.

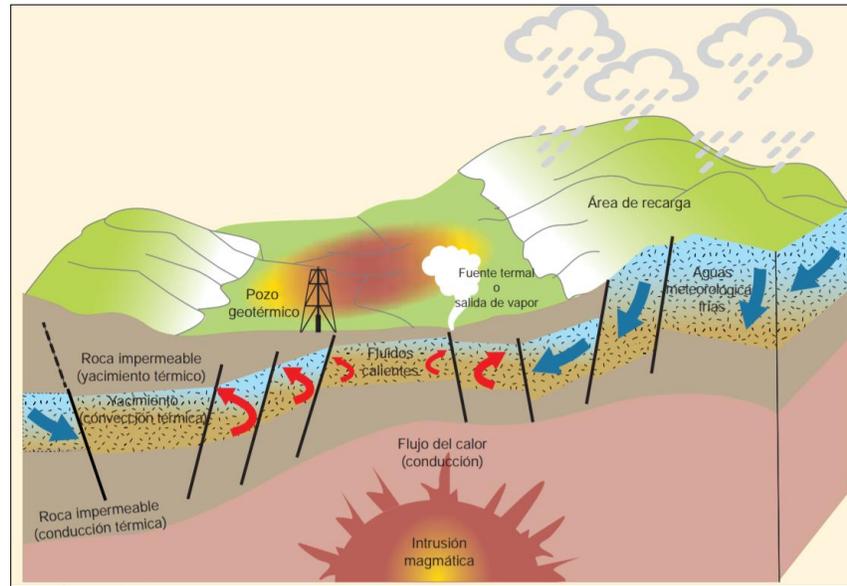


Figura 4-4: Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (ESPM, 2012)

### 4.3. Proyectos geotérmicos

Un proyecto geotérmico es una secuencia de fases integradas que se llevan a cabo para lograr identificar, explorar y explotar la energía que se encuentra al interior de la tierra. La organización latinoamericana de energía OLADE divide un proyecto geotérmico en las siguientes fases mostradas en la Figura 4-5.

### 4.3.1. Fases de un proyecto geotérmico

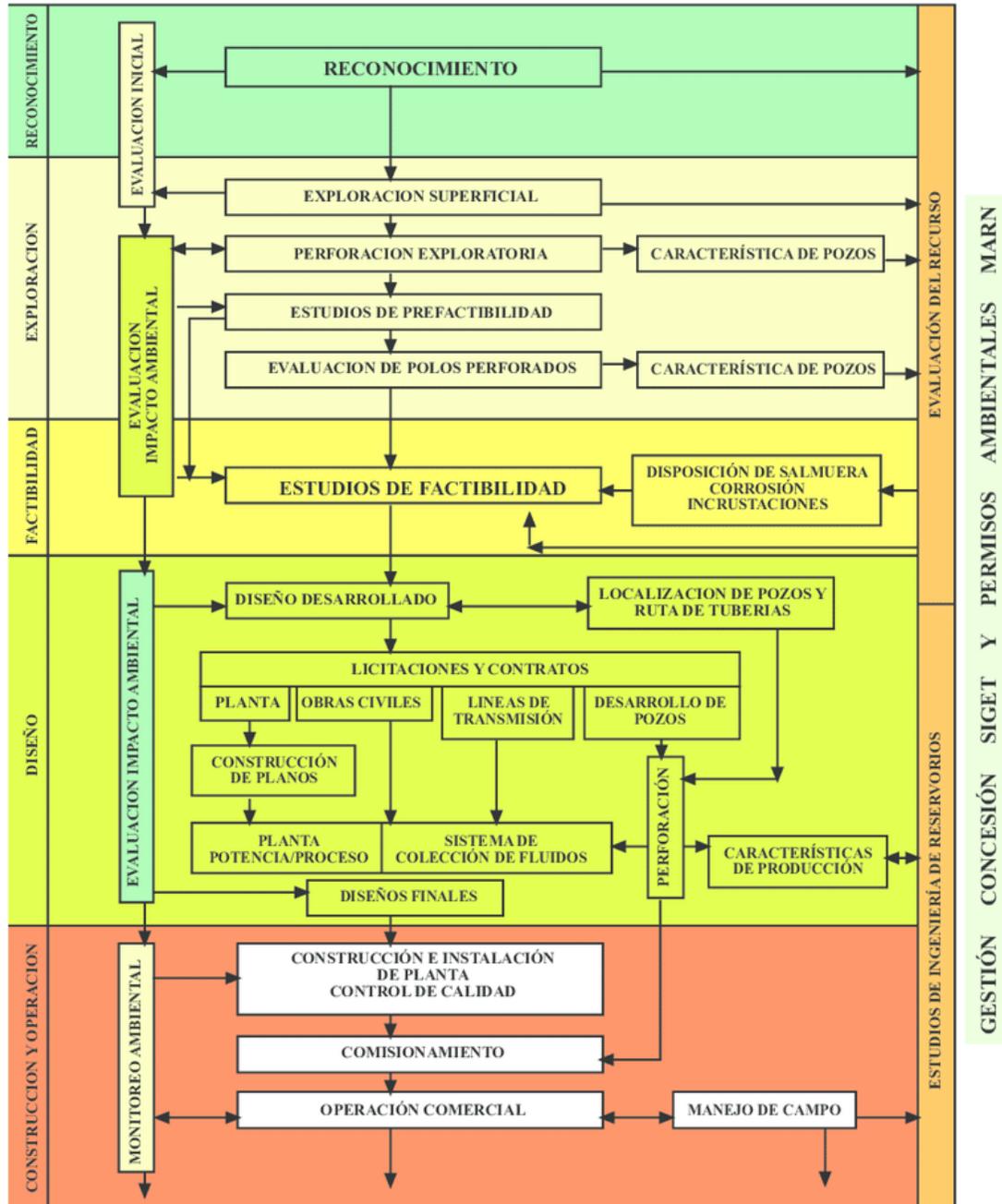


Figura 4-5: Fases de un proyecto geotérmico según (OLEADE, 1994)

#### 4.3.2. Aporte del área Geoquímica en estudios de factibilidad

La geoquímica de superficie en esta etapa consiste en un control periódico de pozos de agua, arroyos, ríos y manantiales (termales y fríos) seleccionados ex profeso, ya sea para determinar la evolución del sistema geotérmico o para llevar el control ambiental de los recursos naturales, mediante mediciones de temperatura, caudales y el muestreo y análisis de las aguas en distintos períodos del año. Dándole especial atención a las manifestaciones termales, tratando de detectar los cambios en su temperatura y composición que pudiesen ser indicativos de una comunicación estrecha con el yacimiento y de las variaciones que sucedan en el mismo como consecuencia de su explotación.

En la actualidad El Salvador cuenta con un desarrollo de dos campos geotérmicos y el desarrollo de dos proyectos geotérmicos, donde se han aplicado cada etapa presentada anteriormente. Dentro del área geoquímica se han analizado cada uno de los elementos mencionados para el estudio de prefactibilidad además de la técnica de medición de gases difusos. En las tablas 4-1 y 4-2 se muestra la recopilación de los elementos y compuestos analizados por el área geoquímica.

Éstos son medidos de forma tanto in situ<sup>2</sup> como ex situ<sup>3</sup> y están divididos según la matriz en donde se encuentran disueltos.

**Tabla 4-1: Gases difusos en campo geotérmico**

Gases difusos		
Medición in situ		
Elemento	Símbolo	Aporte de su presencia en campo geotérmico
Radón	<sup>222</sup> Rn	Lo liberan rocas sometidas a procesos relacionados con ascenso de magma (calentamiento, deformación y fracturas). Altas concentraciones en superficie permiten identificar regiones de alta permeabilidad.
Torón	<sup>220</sup> Rn	Identifica áreas de alta permeabilidad y se pueden hacer estimaciones sobre la velocidad de los flujos debido a que tiene una vida media de 55.6 segundos. Ambos gases sugieren movimiento convectivo y advectivo.

<sup>2</sup> La medición in situ se refiere a que el método de medición se realiza en el punto de recolección de la muestra

<sup>3</sup> La medición ex situ se refiere a que el método de medición se realiza luego de recolectar y trasladar la muestra hacia un laboratorio.

Gases difusos		
Medición in situ		
Mercurio	Hg	Asociado con estructuras volcánicas activas, por lo que proviene directamente de la desgasificación de magma. Se vaporiza en profundidad y su emisión se da desde sistemas geotérmicos activos de alta temperatura hacia la superficie, por medio de difusión a través de regiones permeables.
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Utilizado en forma efectiva como trazador de desgasificación del magma debido a su baja solubilidad en fundidos de silicatos (rocas). Es una herramienta para cuantificar los cambios en la actividad geotermal en superficie.
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	Este gas se origina en la alteración de rocas del reservorio, o puede ser de origen magmático, en muchos sistemas es producto del pirólisis a partir de las rocas. Está en un alto contenido en vapor separado a alta temperatura.
Medición ex situ		
Helio	He	Se desplaza hacia la superficie a través de zonas donde existe permeabilidad vertical, por lo que, si se puede desplazar fácilmente por tales zonas, sugiere que proviene de fuentes profundas.
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	Permite inferir direcciones de flujo ascendente, alto contenido en ambientes de alta temperatura, incrementa al incrementar ésta.
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	Altas concentraciones en sistemas geotérmicos de baja temperatura, origen magmático importa únicamente en áreas de subducción, puede provenir de los gases de la atmósfera que se disuelve en aguas meteóricas.
Metano	CH <sub>4</sub>	Permite inferir direcciones de flujo ascendente, Puede derivarse de rocas sedimentarias cercanas a la superficie conteniendo materia orgánica.
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Aporta con la búsqueda de permeabilidad de la zona
Argón	Ar	Gas noble que al ser inerte presenta evidencia de permeabilidad en la zona de estudio.
Kriptón	Kr	Al igual que el argón manifiesta la presencia de permeabilidad al no involucrarse en ningún intercambio químico.
Agua	H <sub>2</sub> O	Evidencia la presencia de un posible reservorio al presentarse como vapor en muestras de gases que se extraen del terreno.

**Tabla 4-2:** Elementos medidos en matrices de agua superficial y geotérmica

Elementos en matrices de agua superficial y geotérmica	
Sodio (Na)	Carbonatos (CO <sub>3</sub> )
Potasio (K)	Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )
Calcio (Ca)	Sílice (SiO <sub>2</sub> )
Magnesio (Mg)	Boro (B)
Litio (Li)	Arsénico (As)
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	Cesio (Cs)
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	Rubidio (Rb)

Cada uno de estos elementos y compuestos mencionados en la tabla 4-1 y 4-2 aportan información necesaria a la hora de explorar una nueva zona de estudio por lo que se considera una buena herramienta de exploración.

Por lo tanto, la presente investigación se centra en la presencia y medición de radón (<sup>222</sup>Rn) en aguas termales como un aporte a la matriz de medición en exploración, ya que actualmente se obtiene únicamente a partir de medición in situ con técnicas de desgasificación difusa en campos geotérmicos. Esta investigación contribuirá a crear una base técnica con posibilidad de uso como técnica exploratoria en la búsqueda del recurso geotérmico en el país.

#### 4.4. Importancia de la medición de radón (<sup>222</sup>Rn) en proyectos geotérmicos

El desarrollo del recurso geotérmico consiste en la identificación, extracción y uso de la energía de estos reservorios de fluido sobrecalentado. Es por ello que durante la etapa de reconocimiento geotérmico la geoquímica es una herramienta útil porque provee estimaciones en las temperaturas del subsuelo, mediante el análisis, cálculo e interpretación de geotermometría química; otra herramienta práctica es el muestreo de fluidos y gases, (Coronado y Garciadiego, 2015), además la técnica de gases difusos que es utilizada en la exploración volcánica y posteriormente usada para la exploración geotérmica.

En ese mismo sentido se conoce con referencia a investigaciones previas que el radón (<sup>222</sup>Rn) ha contribuido a determinar la existencia de fallas activas en campos geotérmicos, infiriendo de esta manera la localización de fuentes de calor y del reservorio geotérmico. En este orden de ideas se puede citar la investigación realizada por Santiago (2004), donde pudo observar la existencia de una variación en las concentraciones de radón (<sup>222</sup>Rn) registradas en las aguas termales, atribuyendo estas variaciones a que el radón (<sup>222</sup>Rn) depende de las condiciones del entorno como:

- ✓ Flujo de agua subterránea
- ✓ Permeabilidad del suelo
- ✓ Densidad del suelo
- ✓ Condiciones termodinámicas: presión, temperatura.

Puesto que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es un gas radioactivo respirable su presencia en concentraciones anormales es considerada por la normativa internacional como un riesgo para la salud humana ya que, en muchas zonas, principalmente rurales, se utilizan aguas de origen subterráneo que emanan en pozos, fuentes o manantiales para consumo y usos domésticos. En consecuencia, de encontrar elevadas concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en algunas de estas fuentes de aguas termales pueden originar un riesgo radiológico para la salud que podría hacerlas no recomendables para su consumo, o convendría tomar ciertas medidas de precaución. El ingreso de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) al organismo humano se puede dar a través de dos vías principales: por inhalación de aire que en consecuencia existe el riesgo de desarrollar cáncer pulmonar y por ingestión de agua existiendo el riesgo de enfermar de cáncer estomacal. (Organización Mundial de la Salud, 2016)

#### 4.5. Método ASTM D5072-09 para determinar radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua

La metodología a emplear para analizar radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua termal es la que dicta la norma D5072-09 “Standard Test Method for Radón in Drinking Water” de American Society for Testing and Materials (ASTM), (Varillas, Barrientos y Churquipa, 2013).

Este método se utiliza para la medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), además de sus descendientes polonio ( $^{218}\text{Po}$ ) y polonio ( $^{214}\text{Po}$ ) a partir de un proceso que se da en el equipo de centelleo líquido, que consiste en cuantificar la señal emitida en forma de espectro por el decaimiento del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en las muestras. La Figura 4-6 muestra el espectro teórico sujeto a comparación para la búsqueda de presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras líquidas.

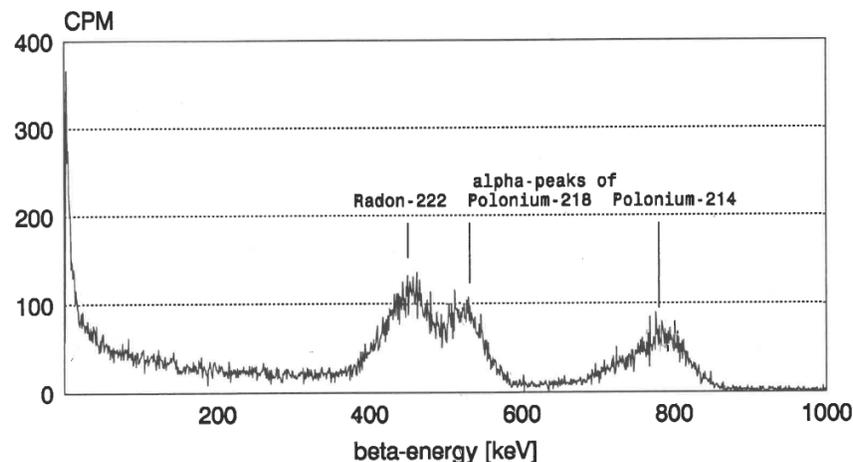
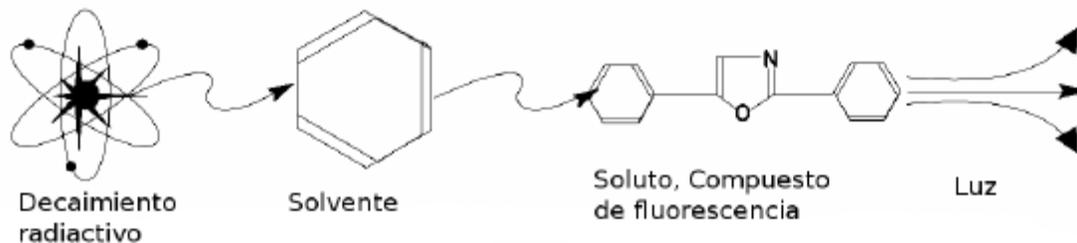


Figura 4-6: Espectro teórico del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y sus descendientes Fuente: (Noakes, Schonhofer & Polach, 1992).

#### 4.5.1. Proceso de centelleo líquido

El decaimiento como se explica anteriormente genera energía, y ésta es absorbida por las moléculas del solvente en el que se encuentra, lo que permite transferir la energía hacia dos solutos centelladores que deben ir disueltos en el solvente, la primera transferencia se logra a partir de la captación de la energía de radiación ionizante por el solvente trasladándola al soluto que se le denomina primario, luego éste permite la conversión de la energía ionizante a fotones de luz visible, para luego realizar la segunda transferencia hacia el otro soluto denominado secundario, éste emite los fotones con una mayor longitud de onda con el fin de adecuarla para su posterior conversión en señal eléctrica.

Estos fotones son detectados por dos tubos fotomultiplicadores (PMT), conformados por un ánodo y un cátodo cada uno de ellos, donde los dinodos que los componen permiten transformar de cada fotón una cascada de electrones, amplificando un impulso eléctrico que es lo que genera una señal captada y transformada por un convertidor analógico-digital (ADC) para ser contabilizada, en la Figura 4-7 se observa dicho proceso.



**Figura 4-7:** Secuencia de eventos que se desarrollan durante el proceso de centelleo líquido. Fuente: (Marín Díaz, 2014).

El solvente utilizado debe poseer las propiedades necesarias que permitan que el coeficiente de difusión del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) sea mayor que el que posee en la matriz donde se encuentra, con el fin de encerrar el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en la muestra en una menor cantidad de solvente facilitando la extracción de ésta en depósitos llamados viales con capacidad de 200 ml los cuales son los que se utilizan para la medición en el equipo, éstos viales pueden ser de vidrio con bajo contenido de potasio ( $^{40}\text{K}$ ) y de plástico como se muestran en la Figura 4-8; sin embargo, en estudios anteriores se ha demostrado una mayor recuperación de concentración de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en los viales de vidrio con bajo contenido de potasio ( $^{40}\text{K}$ ).



**Figura 4-8:** Viales utilizados en el equipo de centelleo líquido

Por último, los solutos primario y secundario que pueden ser utilizados por el equipo se muestran en la tabla 4-3 y 4-4.

**Tabla 4-3:** Solutos primarios posibles para la utilización en equipo de centelleo líquido

Soluto	Abreviación
2,5-dieniloxazol (más popular)	PPO
2,5-difenil-1,3,4-oxadiazol	PPD
2-Fenil-5-(4-difenilil)-1,3,4-oxadiazol	PBD

**Tabla 4-4** Solutos secundarios posibles para la utilización en equipo de centelleo líquido

Soluto	Abreviación
1,4-bis-2-(5-fenilo-xazolil)-benceno	POPOP
1,4-bis-2-(4-metil-5-feniloxazolil)- benceno	Dimetil POPOP
p-Bis-(o-metilestiril)-benceno	Bis-MSB
Benceno	-

## 5. MARCO METODOLÓGICO

La metodología de investigación llevada a cabo se enfoca en dos etapas, la primera se basa en la aplicación de una metodología en conformidad a las normas ISO 5667-1, 2 y 3 e ISO 13164 - 1 al momento de la extracción de muestras en campo, denominándola “Etapa de campo” y la segunda etapa se concentra en la aplicación de la metodología analítica de laboratorio basada en la norma ASTM D5072-09 radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua, la cual se encuentra adaptada y validada para un litro de muestra, “Etapa de laboratorio”.

Las metodologías son empleada con el objetivo de evaluar si existe actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en agua de fuentes termales, que pertenecen a campos geotérmicos en El Salvador, donde:

- Analito: Radón ( $^{222}\text{Rn}$ )
- Matriz: Fuentes termales
- Muestra: Agua perteneciente a fuentes termales

A continuación, se explican cada una de las etapas.

### 5.1. Etapa de campo

En la etapa de campo se detallan los pasos a seguir para una toma de muestra adecuada, esta etapa es muy importante ya que de ésta depende la conservación del analito en el recipiente contenedor, si ésta no se hace adecuadamente, los resultados no serán representativos, dando concentraciones del analito de interés erróneas.

La toma de muestra consiste en la recolección de 1 L de agua en los sitios de muestreos elegidos previamente, además es de interés tomar muestras para evaluar algunos

parámetros fisicoquímicos del agua que pertenece a las fuentes termales elegidas con el fin de conocer el estado en el que se encuentra el agua al momento de recolección, así como su registro creando una base para estudios posteriores que relacionen concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con las propiedades medidas.

### 5.1.1. Ubicación

La toma de muestras se realizó en fuentes termales de tres áreas geotérmicas de El Salvador: Berlín, San Vicente y Ahuachapán, y los sitios que se escogieron se presentan en la tabla 5-1, teniendo 4 sitios en Berlín, 2 en San Vicente y 6 en Ahuachapán, haciendo un total de 12 sitios de muestreo y un total de 36 muestras.

También se colectó una muestra de pozo geotérmico y de condensado de una fumarola.

**Tabla 5-1:** Sitios de muestreo elegidos para el análisis

Campo geotérmico	Sitios de muestreo		
	Fuentes termales	Fumarola	Pozo
Berlín	F79	-	-
	F83		
	El Tigre- Montañita abajo		
	El Riyito		
San Vicente	Infiernillo Ciego	-	-
	Agua Agría		
Ahuchapan	El Salitre	El Playón	pozo geotérmico
	La labor		
	Agua Shuca		
	El Playón		

### 5.1.2. Materiales y equipo

Los materiales y equipo necesario para llevar a cabo el muestreo son los que se presentan a continuación:

#### *Frascos de recolección*



**Material:** vidrio borosilicato

**Capacidad:** 1 L con resistencia a temperaturas menores o igual a 120 °C aproximadamente.

**Descripción:** Es necesario un frasco por cada sitio de interés, además, un día antes del muestro es necesario forrar el orificio con tres capas de cinta teflón con el objetivo de sellarlo y evitar que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que se encuentra en las muestras se difunda hacia el exterior.

**Figura 5-1:** Frasco recolector

## Hielera



Figura 5-2: Hielera

**Capacidad:** Es necesario utilizar la capacidad suficiente para el almacenamiento de todos los frascos recolectores, más la cantidad de hielo necesaria para lograr temperaturas bajas en muestras de altas temperatura.

Es recomendable que la hielera no supere el tamaño justo para los frascos, para evitar el choque continuo entre los depósitos al momento del transporte.

## Frascos plásticos



Figura 5-3: Frascos plásticos

**Material:** plástico resistente a altas temperaturas

**Capacidad:** 1 L

**Descripción:** Los frascos se utilizan para recolectar muestras de agua en los sitios de interés destinadas a la medición de propiedades fisicoquímicas en el laboratorio.

## Termómetro termocupla



Figura 5-4: Termómetro termocupla

**Descripción:** La termocupla es necesaria para medir la temperatura en las aguas de los sitios de muestreo, no es recomendable utilizar termómetros convencionales, debido a la dificultad de medición por altas temperaturas del fluido.

## GPS



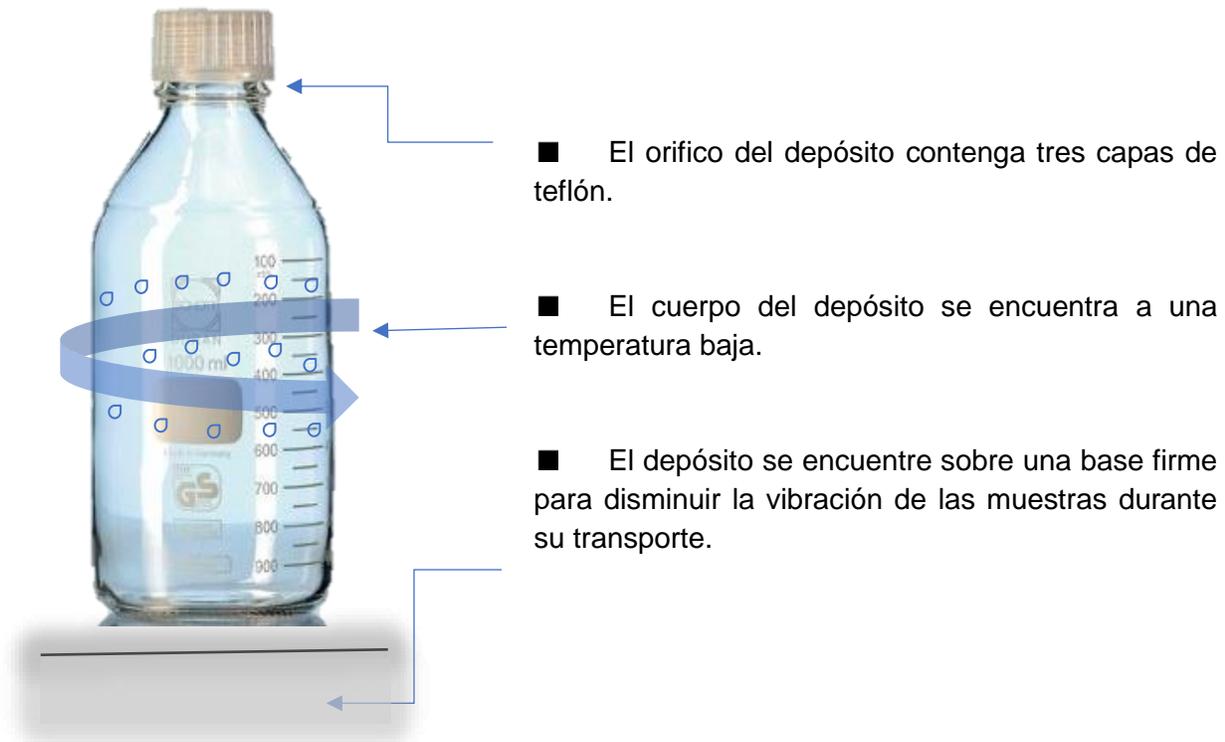
Figura 5-5: GPS

**Descripción:** Con el GPS se registran las coordenadas y altura de los sitios de muestreo.

Para lograr éxito en la recolección de muestras es necesario dejar listo un día antes el material y equipo a utilizar en campo.

### 5.1.3. Pretratamiento de las muestras de agua para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras, debido a que es un gas inerte se difunde fácil y libremente a través de distintos medios, teniendo especial relevancia el aire por su alto coeficiente de difusión. Por lo tanto, debido a su naturaleza gaseosa el mayor riesgo es la fuga de éste, por lo que es necesario que, durante el almacenamiento y transporte de la muestra, se tomaran las medidas que se detallan En la Figura 5-6



**Figura 5-6:** Condiciones óptimas para el transporte y almacenamiento de muestra agua para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

Además, es necesario tomar en cuenta que al momento de recolectar la muestra no se debe dejar un espacio vacío dentro del recipiente, debe ir completamente lleno de agua, esto debido a que el gas necesita un espacio mínimo para poder transportarse al aire, y si esto sucede, no se obtendrá la cantidad real de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que existe en la muestra.

#### 5.1.4. Procedimiento para la recolección de muestras

##### 5.1.4.1. Muestras destinadas para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El muestreo se realiza conforme a las normas ISO 5667-1, 2 y 3 e ISO 13164 - 1 para la toma de muestras de agua para la medición de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).





La investigación se extendió a la búsqueda de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en un pozo Geotérmico y una fumarola.

### 5.1.5. Muestreo en fumarolas

Selección del punto de la matriz de muestreo

El muestreo se realizó en la fumarola “El Playón” Santa Rosa campo Geotérmico Ahuachapán.

El equipo utilizado se presenta en la Figura 5-7. Es necesario cada uno de ellos para una toma de muestra representativa.

Donde se observa:

1. Hielera
2. Embudo
3. Pala
4. Frascos



Figura 5-7: Fumarola El Playón, Santa Rosa y equipo para muestreo

### Acondicionamiento de la Fumarola

Para la extracción del vapor proveniente de la fumarola es necesario orientarlo por el sistema embudo-manguera hacia los recipientes de almacenamiento.



**Figura 5-8:** Despeje del área de muestreo,

Al ubicar la fumarola, ésta contiene a su alrededor condensado y material rocoso que obstruye la salida del vapor, por lo tanto, se vuelve necesario despejar el área que rodea la fumarola, con ayuda de la pala, tal como se muestra en la Figura 5-8.

### Instalación del sistema embudo-manguera

Al despejar la salida del vapor y sus alrededores, se coloca el sistema embudo-manguera y se fija sellando con material rocoso con el sistema ya instalado tal como se muestra en la Figura 5-9, evitando lo mejor posible que el vapor no escape por los alrededores del sistema.

### Toma de muestra

Se lleva a cabo a partir de la extracción de la muestra por medio de la conexión de la manguera con un bulbo de condensación creando un vacío en el orificio superior del bulbo, posteriormente se traslada la muestra a un frasco recolector, se realiza este proceso hasta que se logre llenar por completo el frasco recolector, posteriormente se tapa y se almacena a baja temperatura.

Sin embargo, se recomienda validar una metodología que logre captar la muestra directamente en el frasco recolector evitando que el vapor que ingresa al frasco se escape por el orificio.



**Figura 5-9** Sistema embudo-manguera, fijado con material rocoso.

### 5.1.6. Muestreo en pozos geotérmicos

Toma de muestra de un pozo geotérmico se realizó a partir de:

#### *Materiales*

---

- ✓ Hielo.
- ✓ Cubeta.
- ✓ Manguera.
- ✓ Serpentín.
- ✓ Recipiente de vidrio para recolectar la muestra.

#### *Procedimiento*

---

- 1- Ubicarse en la boquilla de muestreo que posee el vapor ducto, para poder recolectar la muestra de vapor condensado.
- 2- En la salida de la válvula se conecta un serpentín mediante una manguera como se puede observar en la Figura 5-10 y 5-11.
- 3- El serpentín deberá estar sumergido en una cubeta con hielo para que el vapor se condense debido a las altas temperaturas.
- 4- A la salida del serpentín saldrá el líquido que se ha condensado, y éste se recolecta en los envases de vidrio para las muestras de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).



**Figura 5-10:** Recolección de muestra de vapor condensado de un pozo Geotérmico para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )



**Figura 5-11:** Muestra de líquido separado de un pozo Geotérmico para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

## 5.2. Etapa de Laboratorio

En esta fase para evaluar la presencia de radón( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras de fuentes termales, fumarola y fluido geotérmico fue necesario el uso de metodologías validadas que garantizan la confiabilidad de los resultados, en la tabla 12.2 del apartado de apéndice se presentan algunos detalles acerca de los resultados. El método que es aplicado para el desarrollo de la investigación es:

### ■ Método ASTM D5072-09 para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ):

La norma fue seleccionada debido a que se cuenta con el equipo, materiales y reactivos necesarios para desarrollar la metodología que establece, además de contar con la validación del método que se hizo anteriormente.

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, que permite concentrar el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) de una muestra de un litro de agua a un vial de 20 ml propio para el equipo de centelleo líquido en el que se realiza el respectivo análisis. Antes del análisis correspondiente a las muestras recolectadas estas deberán transportarse y mantenerse a bajas temperaturas.

En esta etapa se presenta la metodología aplicada para el análisis de las muestras una vez recolectada, éstas deben ser analizadas al momento de llegar al lugar de medición, sin embargo si no es posible, se puede almacenar a baja temperatura antes de completar 48 horas posterior a su recolección, esto se da debido a la corta semivida que contiene el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) de 3.8 días, lo que evidencia la existencia de una relación indirecta con respecto a la actividad del analito y el tiempo transcurrido desde la toma de muestra, este tiempo es corregido con el Método ASTM D5072-09 al momento de la evaluación de actividad, sin embargo afirma que lo hace para el período mencionado.

### 5.2.1. Ubicación de laboratorio

La etapa de laboratorio se desarrolló con el apoyo del personal y el uso del laboratorio del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES).

## 5.2.2. Equipo de centelleo líquido

Se trabajó con el equipo de centelleo líquido TRICARB-2100 PACKARD, para la detección de la radiación ionizante generada por los radionúclidos radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), el cual está ubicado en las instalaciones del CIAN-FIA-UES (Ver Figura 5-12).



Figura 5-12: Equipo de centelleo líquido del CIAN-FIA-UES.

En la Figura 5-13 se presentan las partes que integran el equipo:

1. **Cuerpo de medición:** En éste se colocan casetes porta viales, aislados de la luz para mayor eficiencia en la medida, en éste reposan los viales al momento de su medición.
2. **Monitor:** En éste se reflejan los espectros característicos de las muestras, así como sus resultados en el momento de la medición.
3. **Impresora:** En ésta se registran los resultados con la hora de inicio de medición, donde los espectros pueden ser grabados en cassette compacto.



Figura 5-13: Componentes del equipo de centelleo líquido

### 5.2.3. Materiales e instrumentos necesarios para análisis.

#### 5.2.3.1. Viales

El vial es un frasco con una capacidad de 20 mL que se utiliza para introducir el coctel de centelleo que contiene el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) recolectado en la muestra, tanto el vial como el coctel son importantes en el proceso de análisis, ya que sus características pueden influir en los resultados obtenidos por el equipo de centelleo líquido. El tipo de vial utilizado para el análisis de las muestras de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en la investigación es polietileno (PET) tal como se muestra en la Figura 5-14 a). Con referencia en los resultados obtenidos por (Carpio, 2013) el cual realizó pruebas de diferenciación de los tipos de viales con los que cuenta el laboratorio para utilizar en el análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de agua, concluyó que los viales de centelleo tipo PET tienen una mayor resolución gráfica para los radionúclidos radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y su progenie que los viales de vidrio. Esto puede deberse a que los viales de vidrio cuentan con contenidos de potasio ( $^{40}\text{K}$ ) mayores a la cantidad óptima de recuperación que se menciona en el apartado 4 pág. 17.

Los viales al momento de su utilización deben adaptarse con cinta teflón sobre su orificio, tal como se muestra en la Figura 5-14 b) esto se realiza con la finalidad de sellar la tapa y evitar la fuga del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), además una vez introducida la mezcla coctel-radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se debe limpiar el cuerpo del vial con etanol, de la forma en que se muestra en la Figura 5-14 c) antes de introducirlo al equipo con el fin de evitar que exista alguna interferencia con respecto a la transparencia del frasco, ya que al suceder esto, alteran la medición en el equipo.



Figura 5-14 : Utilización de Vial

### 5.2.3.2. Instrumentos de laboratorio

A continuación, en la Figura 5-15, se detalla datos sobre el uso de los instrumentos utilizados en laboratorio.

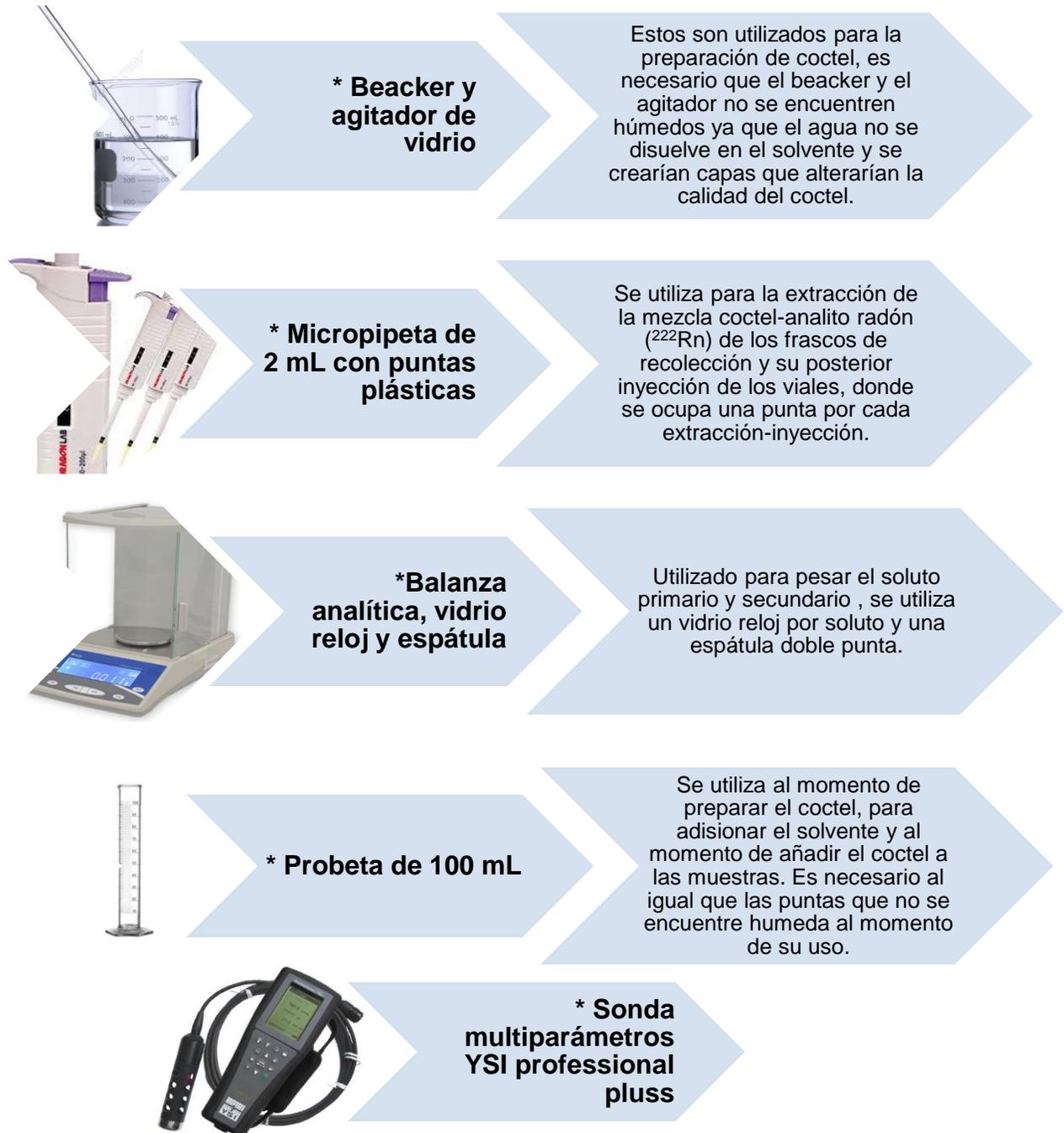


Figura 5-15: Instrumentos de laboratorio utilizados en el análisis

### 5.2.3.3. Componentes del método basado en la norma ASTM D5072-09

El método es validado para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en matrices con fuentes de agua, para 1 L de muestra y 40 mL de solvente conteniendo dos solutos centelladores.

Para esta investigación se presenta en la Figura 5-16 los detalles de los insumos necesarios con respecto a los componentes que incluye la norma.

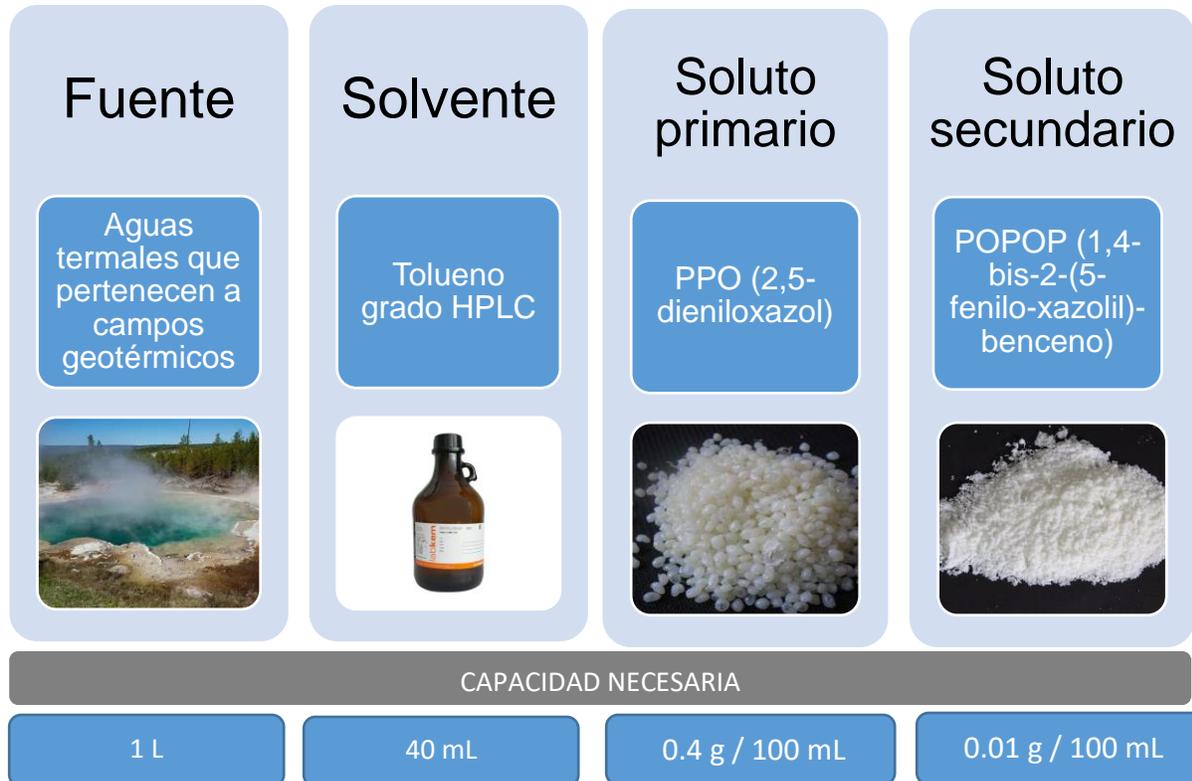


Figura 5-16: Componentes del método basado en la norma ASTM D5072-09

### 5.2.4. Procedimiento aplicado para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de agua

Para medir las muestras dentro del equipo de centelleo líquido es necesario realizar unas adaptaciones de las muestras recolectadas, por eso se presentan 3 procesos que conforman el procedimiento realizado en conformidad a lo norma ASTM D5072-09.

**Proceso 1:** Preparación del coctel

**Proceso 2:** Etapa de transferencia

**Proceso 3:** Extracción e inyección de mezcla coctel-analito

#### 5.2.4.1. Preparación del coctel de centelleo

El coctel es una mezcla utilizada para facilitar la transferencia del analito de interés desde la muestra de 1 L hasta el vial de 20 mL de capacidad, que contiene la propiedad de emisión de fluorescencia al recibir la radiación beta generada por la desintegración del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), necesaria para permitir la detección por los tubos fotomultiplicadores como se menciona en el apartado teórico.

La mezcla contiene el solvente tolueno grado HPLC, el soluto primario (PPO) y el soluto secundario (POPOP).

El coctel se prepara de la siguiente manera:

1. Pesar 0.4 g de soluto primario (PPO)
2. Pesar 0.01g de soluto secundario (POPOP)
3. Se disuelve el soluto primario y secundario en 100 mL de tolueno grado HPLC

La cantidad de coctel a preparar depende de la cantidad de muestras a analizar, por lo tanto, es necesario preparar la cantidad adecuada tomando en cuenta que para cada muestra se necesitan 40 mL de coctel incluyendo una muestra extra de agua destilada llamada "blanco".

La apariencia que se debe obtener del coctel es:

- **Color:** Transparente
- **Olor:** Característico del compuesto orgánico Tolueno
- **Fases:** líquida, Se debe obtener una mezcla completamente homogénea

Es recomendable que en el momento de la preparación del coctel y análisis de las muestras se utilice mascarilla para gases, con el fin de evitar la inhalación abundante del tolueno.

#### 5.2.4.2. Etapa de transferencia

El proceso de transferencia se da, en el momento que la muestra y el coctel se ponen en contacto, para realizar esto son necesario los pasos mostrados en la tabla 5-2.

Tabla 5-2. Pasos de la Etapa de transferencia

PASOS	ILUSTRACIÓN
<p>1 Extraer de la muestra la cantidad necesaria de agua hasta dejar 1 litro en el frasco recolector.</p>	
<p>2 Agregar a la muestra 40 mL de coctel, creando dos fases, la superior conformada por el coctel y la inferior por el agua de muestra.</p>	
<p>3 Cerrar el frasco lo más fuerte posible para evitar el derramamiento de la mezcla en el siguiente paso.</p>	
<p>4 Agitar vigorosamente la mezcla por un minuto observando la formación de burbujas en la parte superior de la mezcla. Con el fin de incitar la transferencia del radón (<math>^{222}\text{Rn}</math>) presente en el agua de muestra al coctel.</p>	
<p>5 Dejar reposar hasta observar la desaparición de todas las burbujas de la capa superior manteniéndose incolora, aproximadamente dentro de un período de 3 minutos. Si no se logra esta apariencia y las burbujas permanecen sobre la capa superior, agregar entre 2 a 5 gramos de sal, con el fin de precipitar los sólidos disueltos que provocan el burbujeo.</p>	

### 5.2.4.3. Extracción e inyección de mezcla coctel-analito

El proceso final empieza al momento de lograr la separación de fase de las muestras, en este punto ya se puede afirmar que se ha transferido el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en la muestra de agua hacia el coctel, obteniendo una mezcla coctel-analito, dónde el analito es radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

Se empieza con la extracción de 20 mL de la mezcla coctel – analito que contienen los frascos de recolección y su posterior inyección con la micropipeta de 2 mL de capacidad en los viales de plástico previamente forrados con teflón sobre el orificio y rotulados sobre la tapadera (recordando que el cuerpo del vial no debe tener interferencia con su textura y color original).

En la Figura 5-17 se muestra de forma gráfica este proceso.



Figura 5-17: Proceso de extracción e inyección de mezcla coctel-analito radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

Una vez inyectada la mezcla, se limpian las paredes del vial con etanol y se coloca sobre un casete porta vial como se muestra en la Figura 5-18.



Figura 5-18: Almacenamiento del vial en un casete del equipo

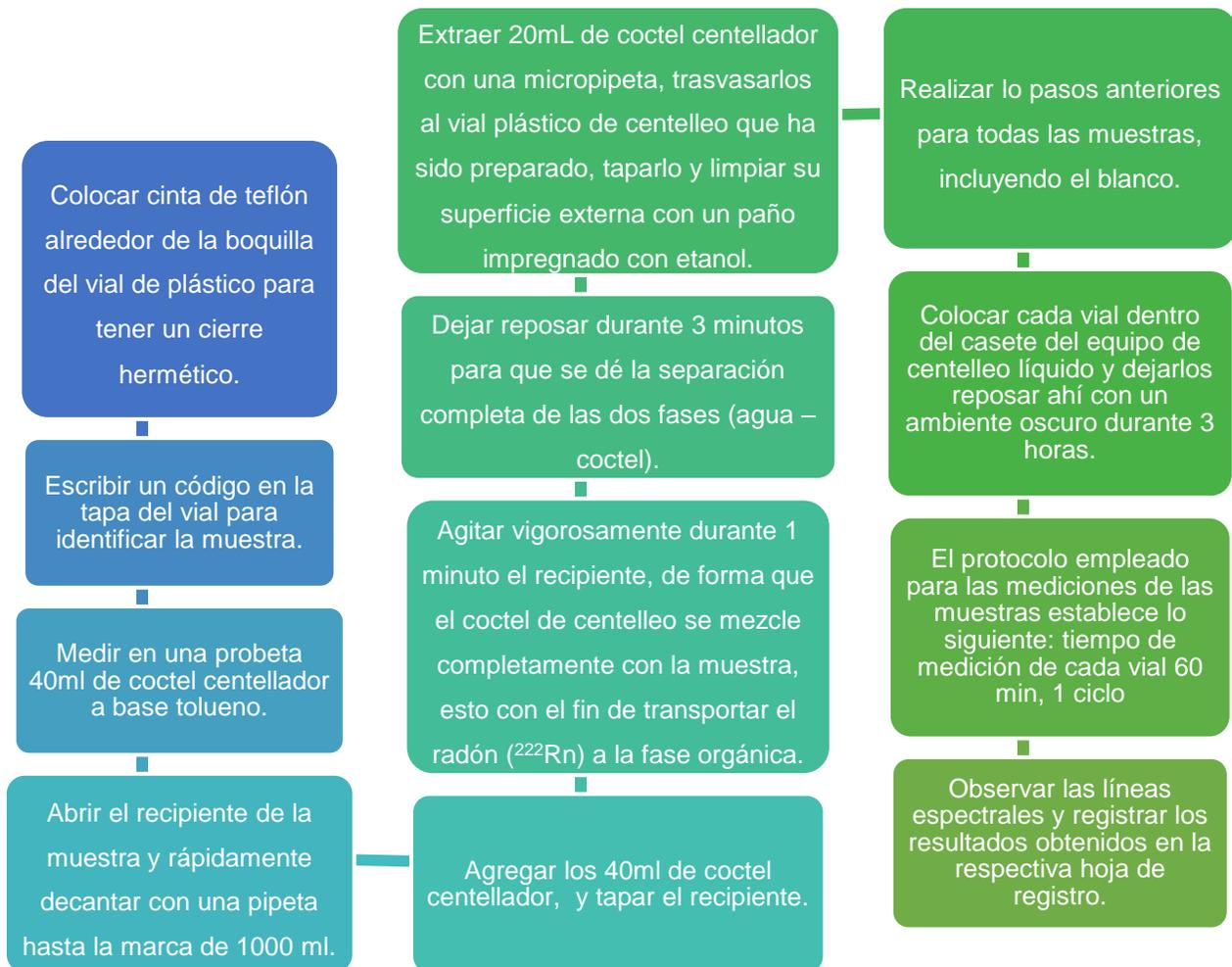
Una vez listos los viales en el casete se introduce dentro del equipo y se registra el orden de las muestras en caso que se analicen más de una muestra.

Para finalizar se dejan reposar los viales en el casete porta vial dentro del equipo por tres horas para lograr el equilibrio secular en la mezcla coctel analito y se programa el equipo para una medición de una hora para cada muestra.

#### 5.2.4.4. Preparación de muestra “blanco”

La metodología incluye una muestra “blanco”, la cual consiste en agregar 1 L de agua destilada a un frasco recolector y tratarla tal como las muestras recolectadas en campo, aplicando en ella todos los procesos mencionados anteriormente, además es recomendable aplicar cada paso sobre esta muestra primero, para detectar cualquier error cometido, y corregirlo antes de aplicarlos a la muestra de interés.

A continuación, en la Figura 5-19, se presenta un esquema que sintetiza el procedimiento global con el fin de facilitar la comprensión de los procesos integrados.



**Figura 5-19:** Procedimiento global de la metodología empleada para análisis de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en muestras de aguas termales que pertenecen a campos geotérmicos de El Salvador

#### 5.2.4.5. Muestras destinadas para análisis de parámetros fisicoquímicos

Para la medición de parámetros fisicoquímicos, la muestra recolectada para dichos análisis se vierte en un beaker de 1000 mL para luego introducir los electrodos de la sonda multiparámetros YSI profesional pluss en ella, por un período aproximado de 5 minutos, con el fin de estabilizar los datos medidos por la sonda.

En la Figura 5-20 se muestra la forma en que se midieron los parámetros fisicoquímicos, los cuales fueron:

- ✓ Cloruros
- ✓ Oxígeno disuelto
- ✓ Sólidos totales
- ✓ Conductividad
- ✓ pH



**Figura 5-20:** Sistema de medición de parámetros fisicoquímicos en muestras de fuentes termales

## 6. ANALISIS DE DATOS

Utilizando el método ASTM D5072-09 se logró detectar la presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en los sitios de muestreo. Los resultados de interés obtenidos con el equipo son:

- ✓ Espectro característico de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

La evidencia de la presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se observa a partir de la sensibilidad del equipo que presenta la señal representativa del analito, en la Figura 6.1 se observa la señal presentada por la muestra correspondiente a la fumarola El Playón con el fin de presentar una comparación con la señal teórica del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y confirmar cualitativamente su existencia.

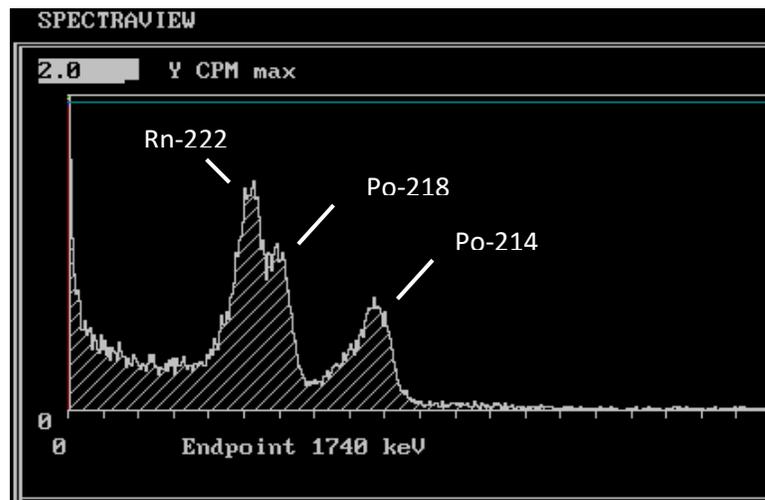


Figura 6-1: Espectro obtenido de la muestra de la fumarola "El Playón".

A continuación, se muestra en la Figura 6.2 el resultado de la medición del blanco para determinar los conteos de fondo, la imagen solamente muestra alguna radiación de fondo al inicio del espectro.

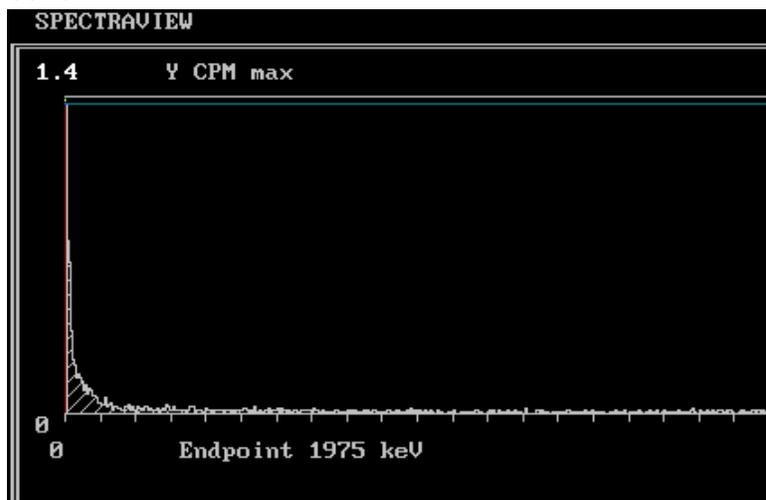


Figura 6-2: Espectro obtenido para una muestra de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

✓ Conteos por minuto (CPM)

Una vez confirmada la presencia de forma cualitativa se presenta su evidencia de forma cuantitativa con las respectivas concentraciones para cada muestra, a partir de los conteos por minutos obtenidos. Los resultados de CPM de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) medidos en las muestras se convierten en actividad a partir de la siguiente ecuación:

$$AC = \frac{R_n}{(CF)(D)(V_a)} \quad \text{ec1}$$

Dónde:

$AC$	Concentración de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) (Bq/L)
$R_n$	Tasa de conteos netos ( $\text{s}^{-1}$ )
$CF$	Factor de calibración
$D$	Factor de corrección por decaimiento
$V_a$	Volumen de la muestra analizada

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

$$R_n = R_a - R_b \quad \text{ec2}$$

Dónde:

$R_a$	Tasa de conteo de la muestra ( $\text{s}^{-1}$ )
$R_b$	Tasa de conteos del blanco ( $\text{s}^{-1}$ )

Y el factor de corrección por decaimiento ( $D$ ) a partir de:

$$D = e^{\left(-\frac{0.693(T)}{t_{\frac{1}{2}}}\right)} \quad \text{ec3}$$

Dónde:

$T$	Tiempo transcurrido en días desde la colección de la muestra
$t_{\frac{1}{2}}$	Tiempo de semivida del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) (3,82 días) <sup>4</sup>

Utilizando las ecuaciones anteriores se obtuvieron las actividades de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Bq/L de las muestras analizadas de fuentes termales, fumarolas y de un pozo geotérmico, estos resultados se presentan en la tabla 12-2 en los apéndices. Asimismo se presenta a continuación un ejemplo de cálculo para la fuente F79 que obtuvo conteos de 156.6 CPM:

<sup>4</sup> De acuerdo con el método ASTM (2009), el tiempo de semivida del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es 3,82 días

Tabla 6-1: Datos recolectados

<b>Hora recolección de muestra</b>	09:33 a.m.
<b>Fecha de recolección</b>	06/11/2018
<b>Hora medición de muestra</b>	01:29 a.m.
<b>fecha de medición</b>	07/11/2018
<b>T (días)</b>	0.664
<b>Ra (s<sup>-1</sup>)</b>	2.61
<b>Rb (s<sup>-1</sup>)</b>	0.756
<b>CF</b>	0.897
<b>Va(L)</b>	1
<b>t<sub>1/2</sub></b>	3.82

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 1,2 y 3 se obtiene:

$$R_n = 2.61 - 0.756$$

$$R_n = 1.855$$

$$D = e^{\left(-\frac{0.693(0.664)}{3.82}\right)}$$

$$D = 0.886$$

$$AC = \frac{1.855}{(0.897)(0.886)(1)}$$

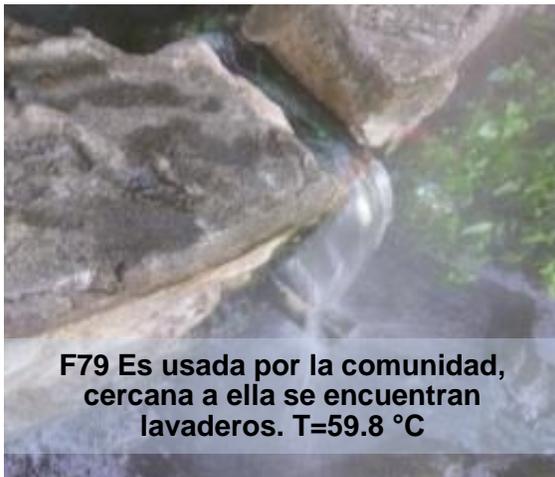
$$AC = 2.33 \text{ Bq/L}$$

Cabe agregar que de las 3 áreas muestreadas solo se realizaron los análisis completos de todas las variables fisicoquímicas a los sitios ubicados en Ahuachapán, los datos obtenidos se presentan en la tabla 12.2 del apartado de apéndice.

## 7. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

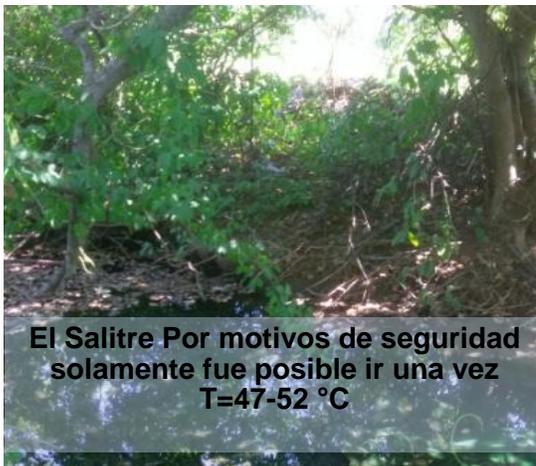
Las muestras de agua de fuentes termales para el análisis de radón (<sup>222</sup>Rn) siempre se intentaron tomar en el punto más cercano a la propia surgencia para minimizar la contaminación por la atmósfera y los procesos de desgasificación de las aguas durante su recorrido por el río. Sin embargo, en algunos puntos como en Agua Shuca, Aguas termales de Santa Teresa, debido a dificultades técnicas se recolectó la muestra en una pileta con agua que fluye en menor cantidad. Los sitios donde se recolectó la muestra, se describen a continuación:

✓ Berlín



**Figura 7-1:** Descripción de sitios de muestreo en Berlín

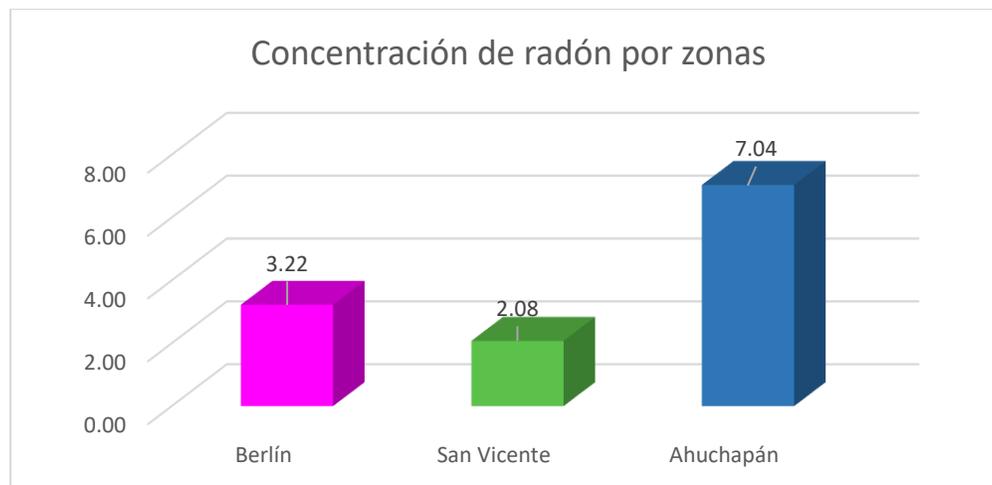
✓ Ahuachapán





**Figura 7-2:** Descripción de sitios de muestreo en Ahuachapán

Un promedio de los resultados obtenidos de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las tres áreas de recolección de muestras se presentan en la Figura 7-3; Berlín, San Vicente y Ahuachapán. Cabe agregar que donde más cantidad de muestras se recolectaron fue en Ahuachapán, por la cantidad de sitios de recolección para esa área. Es así que las concentraciones encontradas en el área de Ahuachapán fueron mayores en comparación a las otras dos zonas, además se han considerado las concentraciones encontradas en la fumarola y en algunas fuentes que tienen relación con los gases de fumarola.



**Figura 7-3:** Presentación de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Bq/L por áreas muestreadas

Mediante la presentación gráfica de la Figura 7-4 se puede observar claramente los altos niveles de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presentes en una fumarola, dicha actividad fue de 14.14 Bq/L. Además, se puede observar también las actividades encontradas en El Riyito, El Salitre, Agua Shuca, El Playón y Aponía que al igual al de la fumarola presenta altas concentraciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

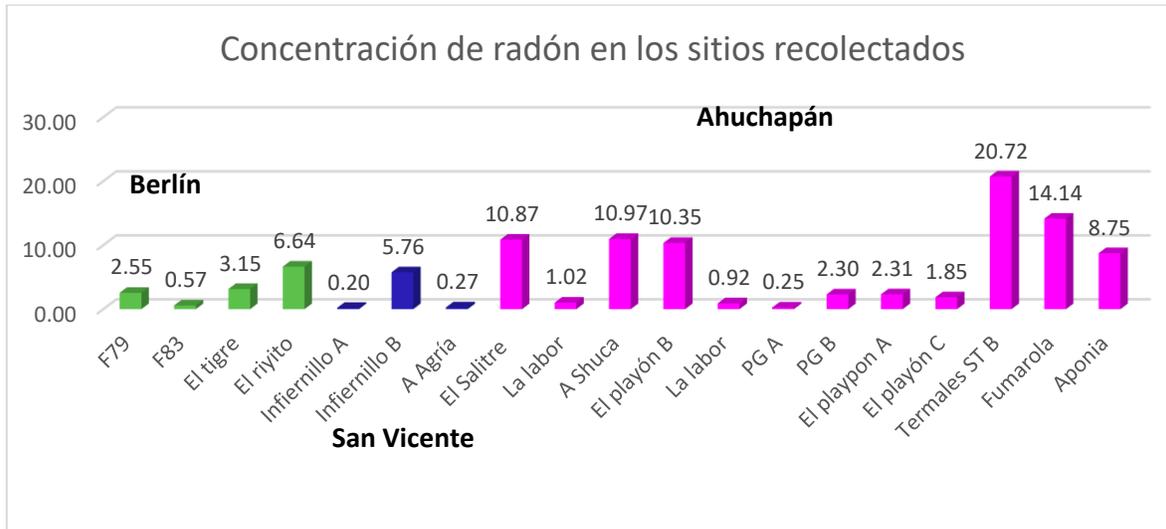
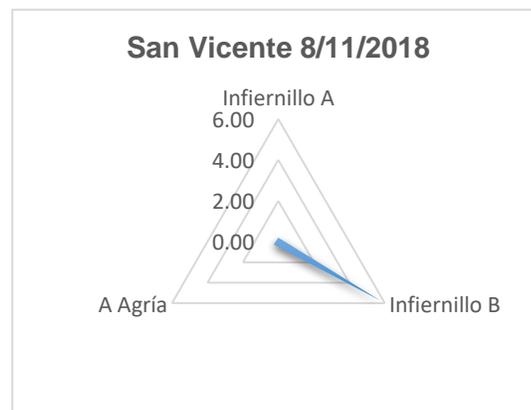


Figura 7-4: Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las áreas muestreadas.

También se presenta gráficas radiales en la (Figura 7-5) para poder observar claramente las concentraciones más altas obtenidas de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por cada muestreo en las fechas que se realizaron.



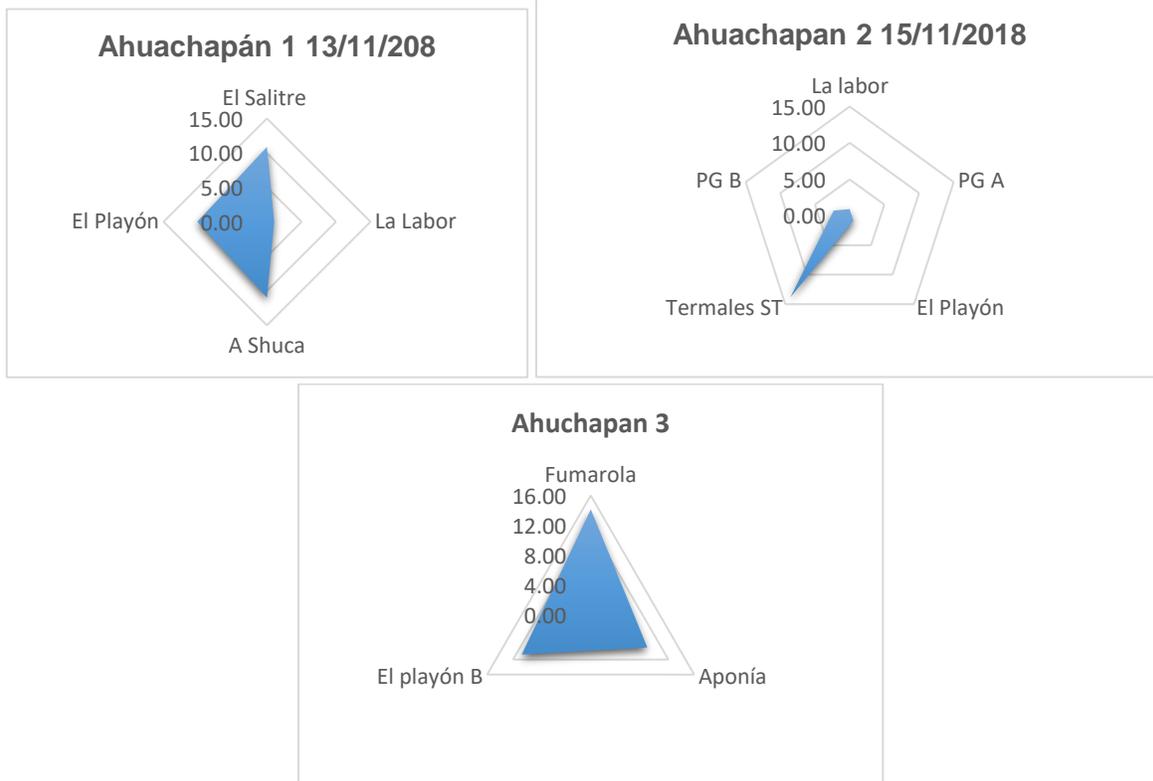
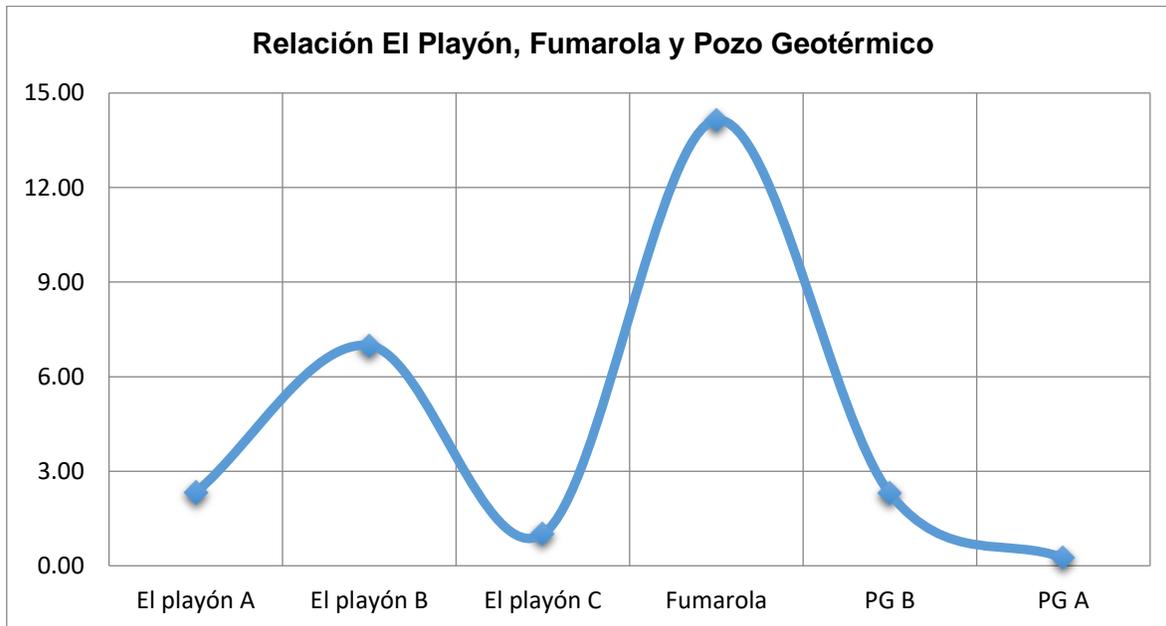


Figura 7-5: Presentación de resultados en grafica radial

Además, se realizó un análisis solo para la parte El Playón en Ahuachapán, ya que por cuestiones técnicas fue el único sitio donde se pudo repetir por tres días la toma de muestra. Los resultados de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) de cada sitio se presentan en la tabla 7-1. Estos resultados se graficaron y se presentan en las Figuras 7-6 y 7-7 para un análisis más detallado.

Tabla 7-1: Actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el sitio de nuestro El Playón

Sitios	13/11/2018	15/11/2018	19/11/2018	promedio
El playón A	2.31	0.54	4.12	2.32
El playón B	10.1	0.22	10.64	6.99
El playón C	0.61	1.85	0.55	1
Fumarola		14.14		14.14
PG B			2.3	2.3
PG A			0.25	0.25



**Figura 7-6:** Relación de la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en Bq/ L con la fuente el playón, fumarola El Playón y un pozo Geotérmico.

El radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) está en constante emisión desde el interior de la Tierra hacia la atmósfera. Es así que al encontrar fisuras o pequeñas grietas sobre la superficie, la emisión de este gas será mayor, como consecuencia de lo descrito se puede observar en la Figura 7-6 que la fumarola presenta altos niveles de concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), en comparación a las fuentes termales y las medidas en el pozo geotérmico sin embargo, las concentraciones bajas de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) encontradas en el pozo se deben a que éste es vapor dominante, lo que significa que durante el transporte desde el interior de la tierra hasta la superficie el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se escapó, ya que la difusión en el aire es mayor. La variabilidad de las concentraciones encontradas en los puntos seleccionados en la fuente El Playón se explica más adelante con mayor detalle.

### Perfil del sitio de muestreo del Playón

Los muestreos del sitio “El Playón” perteneciente al campo geotérmico de Ahuachapán, se realizaron sobre tres puntos distintos con el motivo de observar la dinámica con la que se presenta la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) a lo largo de la fuente, un punto en la parte cercana a la fumarola (Playón B) que se encuentra en el sitio, otro cerca del punto anterior, pero con temperaturas menores y el tercero en una zona con menor altitud y con temperaturas bajas, además se recolectó una muestra en la fumarola, y en un pozo geotérmico.

De los datos presentados en la tabla 7-1, se observa que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el segundo muestreo varía con respecto a los otros dos. La dinámica de este gas es muy extensa, por lo que se necesita un estudio que incluya la geología de la zona y el patrón de flujo del fluido, además de muestreos periódicos, que permitan generar mayor información acerca

de la fluctuación de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ). Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el sitio Playón B, se encuentra muy cercana a la fumarola y según los parámetros medidos, posee alta temperatura, lo que permite una emisión de gases constante, Además el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) al poseer una alta afinidad por el aire, y con el impulso de altas temperaturas se da un movimiento convectivo y advectivo que permite el ascenso de fluidos a la superficie, fenómeno que se da en desgasificación difusa y ésta asociado el movimiento convectivo a la isoterma de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Magaña, 2004) dando lugar a que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) escape rápidamente del agua, lo que da lugar a encontrar desde actividad muy bajas como los  $0.22\text{ Bq/L}$  en el caso del segundo muestro hasta actividades elevadas como en el caso del primer con actividad de  $10.10\text{ Bq/L}$  y el tercer muestreo con actividad de  $10.64\text{ Bq/L}$ .

En la gráfica presentada en la Figura 7-6 y 7-7 se logra identificar la forma en la que se comporta el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el sitio, donde el Punto Playón B contiene mayor actividad que el punto cercano con menor temperatura (punto Playón A), lo que podría significar que gran cantidad del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que se encuentra en el punto Playón B se difunde a través del aire antes de llegar al punto Playón A, sin embargo la actividad presentada por ese punto difiere en menor medida con el punto Playón C, por lo tanto los cambios significativos entre el Punto Playón B con los otros dos podrían ser gracias a que la alta temperatura que posee impulsa la difusión del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el aire evitando que permanezcan en la fase acuosa, por otro lado se observa que el Punto Playón B contiene las mayores temperaturas disminuyendo en puntos más alejados de ella. Dando como resultado que en el Punto Playón B y el punto Playón A se tuvo que escapar la cantidad suficiente de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para disminuir una actividad promedio de  $7\text{ Bq/L}$  a una actividad promedio de  $2.32\text{ Bq/L}$  y al mismo tiempo entre el punto A con mayor altura y el punto Playón C una cantidad que disminuya una actividad promedio de  $2.32\text{ Bq/L}$  a una actividad promedio de  $1.00\text{ Bq/L}$ .

Por otro lado, se observa que el agua muestreada en el Punto Playón B se incorpora a una corriente proveniente del nacimiento del agua termal del sitio y el punto cercano a ella se recolecta luego de esta mezcla, lo que podría haber alterado la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por dilución.

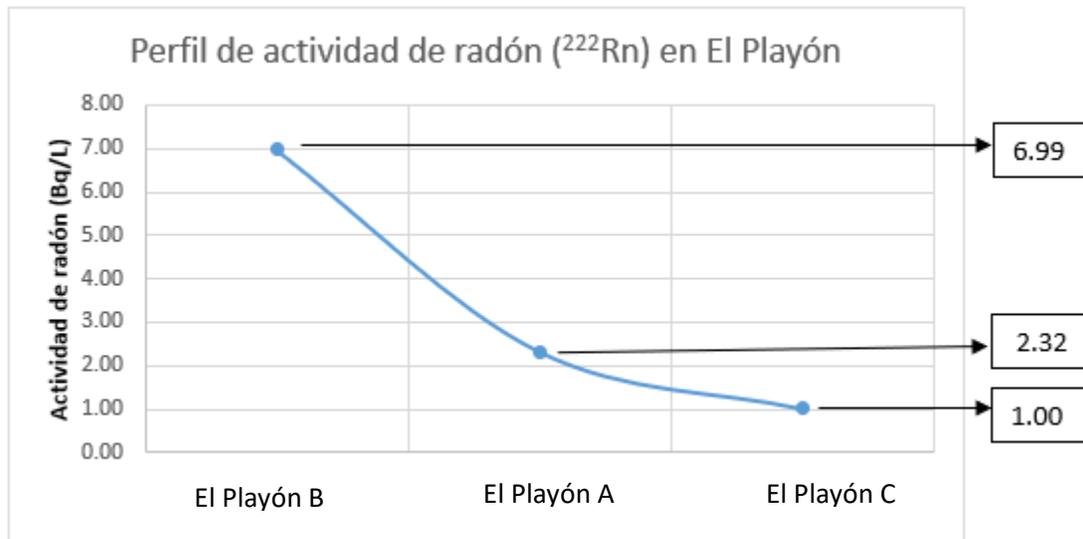


Figura 7-7: Perfil de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en El Playón.

La cantidad suficiente de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para disminuir de aproximadamente 7 Bq/L a 2.32 Bq/L y al mismo tiempo entre el punto Playón A de la zona de extracción para consumo y el punto Playón C existen más dinámicas que hacen que la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) bajen de 2.32 Bq/L a 1.00 Bq/L.

Este análisis es importante para identificar que es posible tener distinta actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en una misma fuente, lo cual se debe a la cantidad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que se difunde en el aire a lo largo de su trayectoria, la dilución por mezcla con el agua que viaja antes de su difusión en el agua termal y otros posibles factores geológicos y/o geofísicos.

### 7.1. Relación entre parámetros fisicoquímicos y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

Una vez confirmada la presencia de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), en fuentes termales, es necesario evaluar el posible origen de este gas, para estimar si existe relación con el recurso geotérmico. Por consiguiente, se evaluó un método estadístico basado en curvas de intervalo de confianza que toman en cuenta la dispersión de los datos, ya que éstos son experimentales y están propensos a cualquier error en la medida, tomando la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) medida en las muestras de fuentes termales, con respecto a:

- ✓ Temperatura
- ✓ Cloruros
- ✓ pH
- ✓ sólidos totales disueltos (TDS)

Estos parámetros fueron elegidos con base en la teoría, que evidencia el aporte favorable de estas propiedades en el recurso geotérmico. La cuales son:

- **Temperatura:** A partir de ella se estima la cantidad de calor posible de aprovechar, por lo tanto, es de interés encontrar aguas termales con altas temperaturas, ya que estas son manifestaciones superficiales de la dinámica al interior de la tierra.
- **Cloruros:** son iones conservativos los cuales al encontrarse en mayores concentraciones presentan una huella geotérmica, permitiendo por lo tanto ser un medio de correlación para estimar el origen del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en las muestras termales
- **pH:** Es importante en la investigación porque podría indicar si el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en el agua, forma parte de un arrastre de gases por trayectoria del fluido, por influencia de fumarolas, o por una posible influencia de aguas geotérmicas.
- **Sólidos totales disueltos (TDS):** Es importante porque al encontrarse en menor concentración, dan mayor soporte a la idea que los gases presentes en las muestras pertenecen a gases aportados por fumarolas, ya que éstas al presentarse en forma de vapor, no presentan concentraciones elevadas de sólidos disueltos.

A continuación, se presenta los resultados de las correlaciones mencionadas, tomando en cuenta las muestras de las aguas termales del campo geotérmico de Ahuachapán. Sin embargo, se recomienda realizar el estudio de esta relación en aguas termales que pertenecientes al campo Geotérmico de Berlín y San Vicente en posteriores investigaciones, ya que existe evidencia de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

### Relación de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) versus Temperatura

En la Figura 7-8 se muestra la relación entre la temperatura con respecto a la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en todas las muestras de agua termal recolectadas en campo.

Se logra observar que 10 de los 14 sitios se encuentran adentro de las curvas de intervalo de confianza con una tendencia directamente proporcional positiva, a excepción del sitio Agua Shuca, Aponía y La Labor que se localizan afuera de la relación planteada.

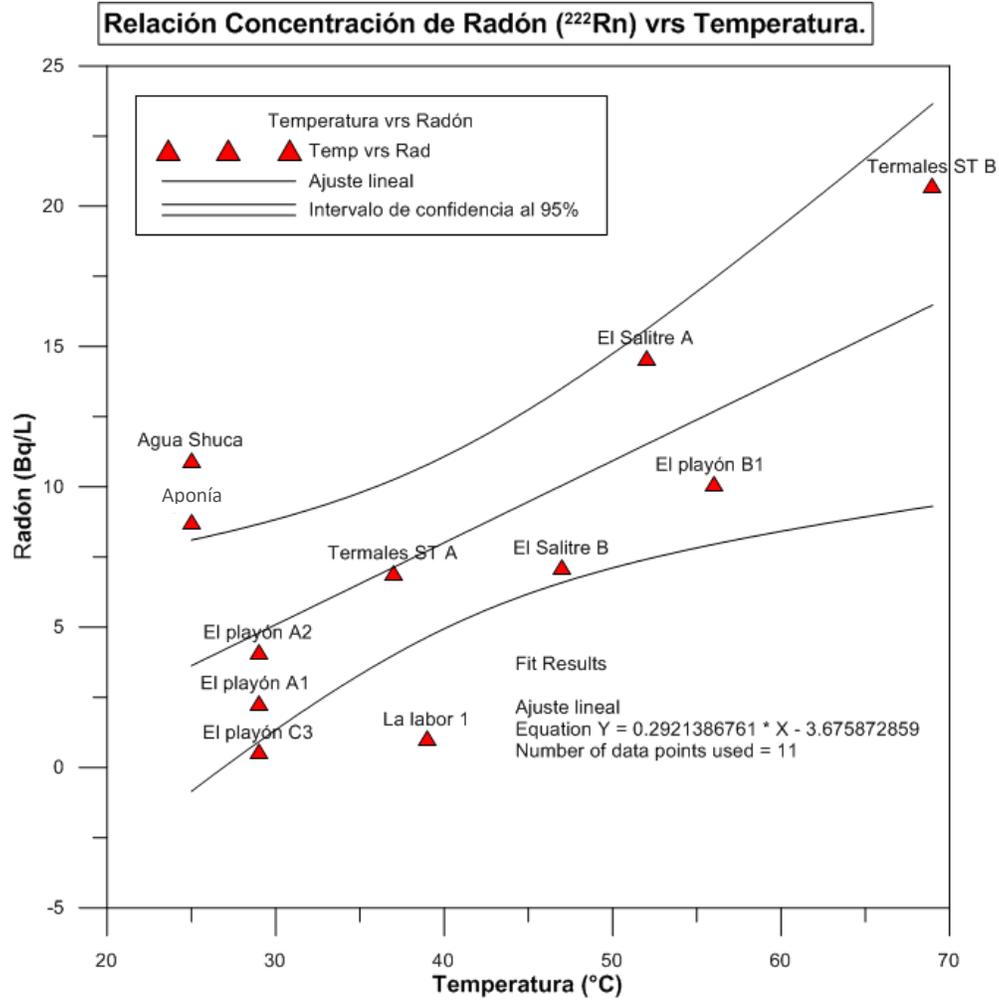


Figura 7-8: relación entre temperatura y actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) en las muestras.

**Relación de actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) versus Cloruros**

En la Figura 7.9 se muestra la relación entre la concentración de cloruros con respecto a la actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) donde se logran presenciar una diferencia significativa entre dos grupos de datos, que al realizar un análisis más detallado, se logra observar una tendencia directamente proporcional con pendiente positiva con el grupo superior, éste a la vez al verificar en la Figura 7-9, corresponde a los sitios de mayor temperatura al igual que el grupo inferior donde se encuentran la mayoría de sitios con menor temperatura, sin embargo el sitio Aponía y Agua Shuca siguen presentando singularidades, debido a que no presentan altas temperaturas y se incluyen dentro de la tendencia directa generada por los sitios calientes.

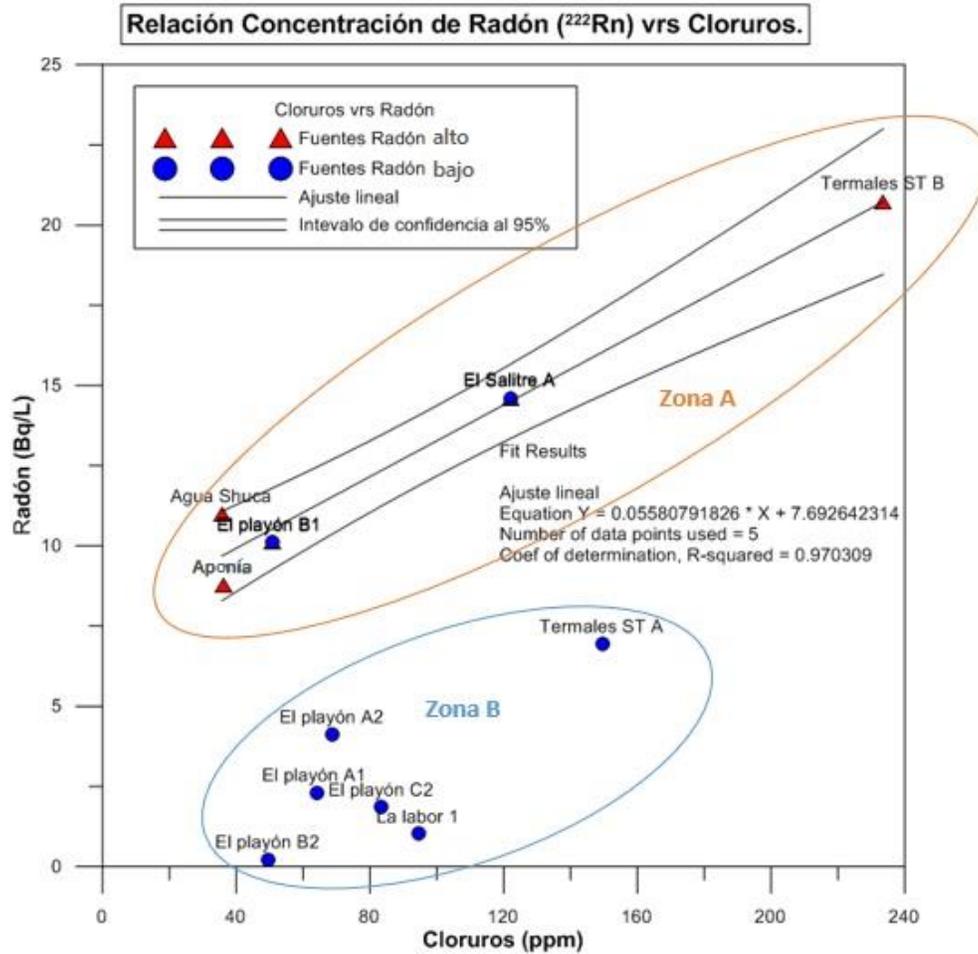


Figura 7-9: relación entre cloruros y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras.

### Relación de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) versus pH

En la Figura 7-10 se relaciona la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con respecto al pH, que a pesar de su mayor dispersión en los resultados se observa que la mayoría de sitios se encuentran dentro de las curvas de intervalos de confianza, pero en esta ocasión con una relación directamente proporcional con pendiente negativa, indicando que a menores pH se encuentra mayor actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ). Sin embargo, el único sitio que se encuentra más alejado de las curvas es El Salitre.

Por otro lado, una serie de puntos se localizan con pH cercanos a 7 (puntos neutros) y otra con pH menor a 7 (puntos ácidos), pero en menor cantidad.

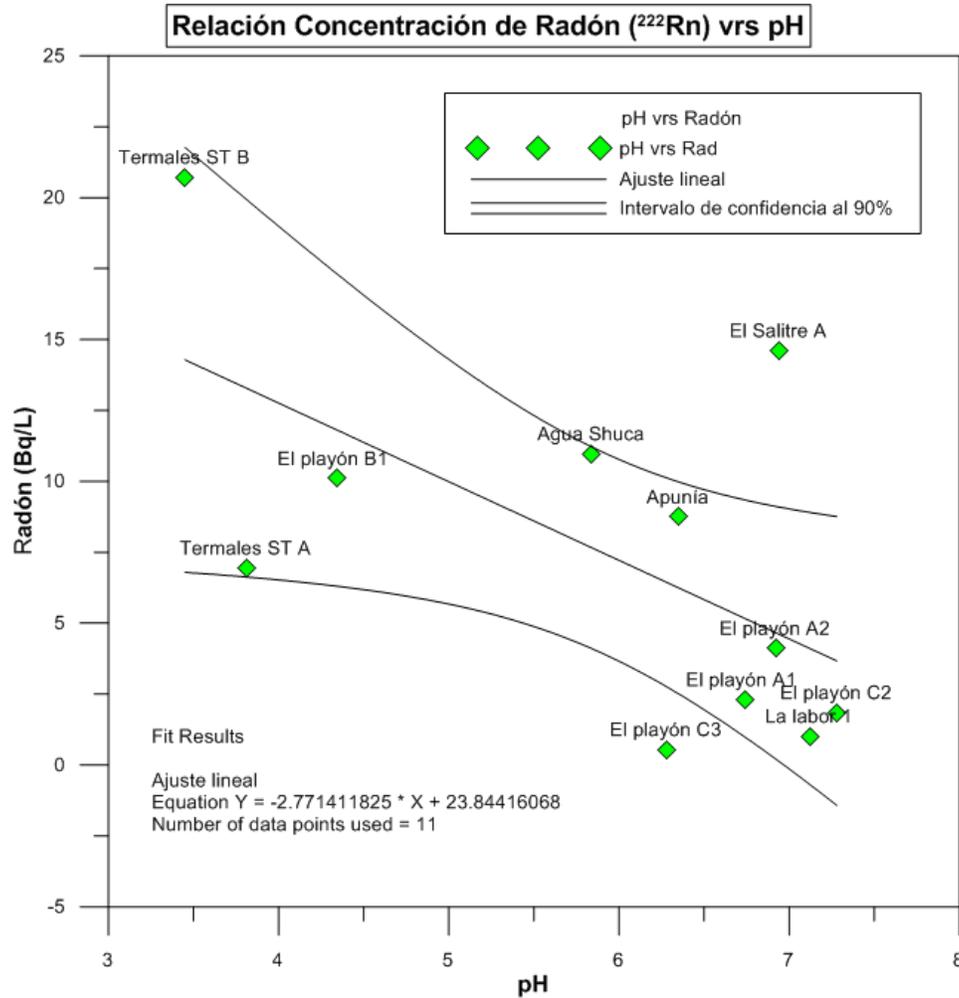


Figura 7-10: relación entre pH y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en las muestras.

### Relación de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) versus concentración de sólidos totales disueltos (TDS)

En la Figura 7-11 se observa el comportamiento de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) frente al comportamiento de los TDS en los sitios de muestreo de Ahuachapán, donde al enfocarse sobre los puntos que se encuentran con mayor actividad se presenta distinto comportamiento de TDS, presentándose en los sitios Aguas termales de Santa Teresa y El Playón B bajas concentraciones de TDS y en el sitio Agua Shuca mayores concentraciones.

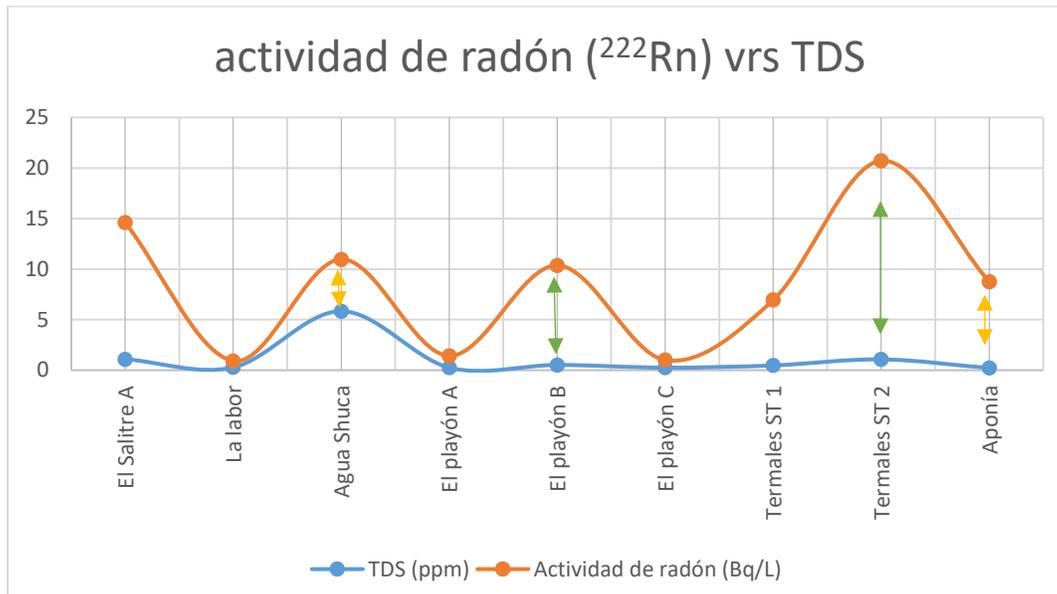


Figura 7-11: Relación entre pH y actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) en las muestras.

### Análisis estadístico integrado

A continuación, se propone una explicación acerca de la relación entre los parámetros fisicoquímicos y la actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) encontrada en algunos sitios, así como una posible explicación de las alteraciones presentadas respecto a la tendencia normal.

### Sitios Agua Shuca y Aponía

Con referencia en las 4 gráficas anteriores, se puede observar que estas fuentes contienen alto contenido de radón (<sup>222</sup>Rn).

En la Figura 7-8 se observa que tanto la fuente Agua Shuca como Aponía se encuentran con bajas temperaturas, alrededor de 25°C con un contenido relativamente alto de radón (<sup>222</sup>Rn), esto se vuelve representativo debido a que las muestras que tienen alrededor de los 30°C han presentado actividad de radón (<sup>222</sup>Rn) dentro de un intervalo de [ 0 – 5] Bq/L, aumentando su actividad mediante un incremento de temperatura, por otra parte al evaluar la Figura 7-9 se observa que el contenido de cloruro es bajo para ambos sitios y por último la Figura 7-11 muestra un alto contenido de TDS.

Con respecto a los parámetros fisicoquímicos que se midieron en la fuente Aponía, se registró un pH de 6.35 que es un valor casi neutro lo que indica que esta fuente es influenciada por un acuífero somero superficial y por agua meteórica, al igual que en Agua Shuca con un pH de 5.84 es agua más ácida lo que indica que tiene una mayor influencia del agua meteórica y probablemente medianamente influenciada por vapores fumarólicos que son ácidos. Sin embargo, estas fuentes presentan alto contenido de sólidos disueltos y baja cantidad de cloruros se puede inferir entonces que el alto contenido de radón (<sup>222</sup>Rn)

se da mayormente en consecuencia del arrastre del gas en su transporte hacia la superficie pasando por rocas que posiblemente contengan alto contenido de Uranio ( $^{238}\text{U}$ ) y radio ( $^{226}\text{Ra}$ ).

### Sitios El Salitre

Caso contrario El Salitre presenta temperaturas alrededor de los  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una cantidad de cloruros un poco mayor a 120 ppm formando parte del grupo superior de tendencia en la gráfica de la Figura 7-9 (zona A). Sin embargo, en la Figura 7-10, se encuentra alejado de la relación generada, con un pH neutro, cuando se esperarían valores ácidos si se acoplara a la tendencia, esto podría indicar que se trata de un punto de descarga de fluidos geotérmicos ya que el agua neutra, la elevada temperatura, la cantidad considerable de cloruros con respecto al resto de sitios y la cantidad baja de TDS, recopilan varios argumentos a favor de esta estimación.

### Sitio Termales de Santa Teresa

De este sitio se tienen dos muestras, una fría "Termales st A" y otra con la mayor temperatura de los sitios muestreados, sin embargo, en el punto con temperatura más baja se observó que en el lugar de estudio se le adiciona agua de origen desconocido con temperaturas bajas, estimadas alrededor de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que genera un descenso de la temperatura original del fluido, esto se evidencia en las gráficas anteriores ya que al ingresar agua posiblemente la cantidad de cloruros, y de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) disminuyó por disolución, además de aumentar su pH, revelando que el agua agregada no tenía relación alguna con el agua termal, confirmando con la cantidad de TDS debido a la similitud de esta entre el punto frío y punto caliente, lo que permite estimar que la cantidad de TDS no se ve prácticamente alterada por el agua agregada. Por lo tanto, se toma como agua termal el punto caliente, dónde debido a la baja cantidad de sólidos, la alta temperatura, la acidez del agua, la cantidad de cloruros, evidencia que el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en el sitio proviene de una fumarola. Dando un mayor soporte a la estimación con la evidencia de alta actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en fumarolas, confirmada por resultados presentados anteriormente en la fumarola el Playón.

### El Playón

El sitio El Playón se presenta en dos puntos de la misma manera que el anterior, sin embargo, el punto Playón C se extrajo de un lugar muy próximo a la fumarola muestreada por lo que los comportamientos analizados a continuación solo confirman el aporte de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por parte de la fumarola. Donde se encuentran temperaturas altas, pH ácido, TDS bajos y al igual que el sitio anterior forma parte del grupo A en la relación encontrada entre los cloruros y la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

De manera general se pudo observar que además de una relación entre parámetros fisicoquímicos y actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), a partir de las gráficas anteriores se puede estimar de dónde proviene el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente.

Por otra parte, se logró establecer una relación entre cloruros y la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para muestras con alta temperatura que luego del análisis de cada sitio y sabiendo que estos sitios pertenecen a un campo geotérmico, se podría abrir la posibilidad que esta relación sirva para encontrar huella geotérmica, ya que los tres puntos representativos en ella, El Playón, El Salitre y Termales de Santa Teresa presentan sospechas de huella geotérmica.

## 7.2. Relación de actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con el reglamento técnico RTS 13.02.01:14

A continuación, en la Figura 7-12, se compara la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) para cada sitio de muestreo con la actividad máxima permisible por el reglamento técnico RTS 13.02.01:14 que fue elaborado a partir de la normativa de la EPA. El valor máximo permisible es de 11.1 Bq/L para consumo humano.

Se puede observar mediante la gráfica que las actividades de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) obtenidas en las fuentes El Salitre, Agua Shuca, El playón parte caliente, Aguas termales Santa Teresa y la fuente Aponía, resultaron con altos contenidos de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y muy cercanos o como en el caso de Aguas termales Santa Teresa sobrepasan el valor del límite permisible por el reglamento técnico RTS 13.02.01:14. Por lo que se recomienda coleccionar evidencia que sustente una futura evaluación de estas fuentes, si son aptas para consumo humano desde el punto de vista radiológico. Tomando en cuenta el reglamento de protección radiológica, que contempla la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que una persona puede estar expuesta en su lugar de trabajo.

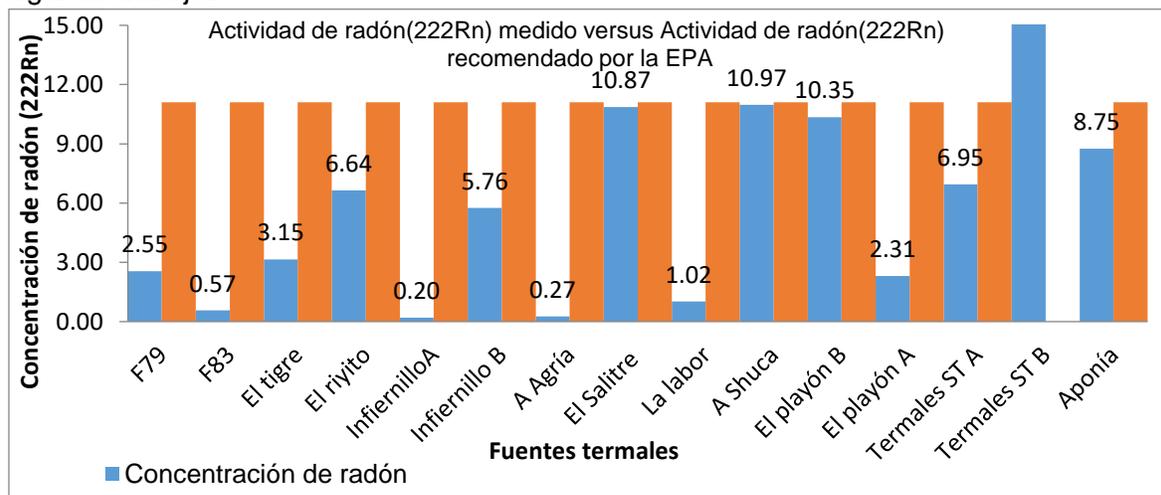


Figura 7-12: Comparación de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) promedio por sitio de muestreo con respecto al valor indicado en el RTS 13.02.01:14

## 8. CONCLUSIONES

- ✓ Existe radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en pozos geotérmicos con actividades de 0.25 Bq/L y 2.30 Bq/L en vapor y líquido geotérmico separado respectivamente, sin embargo, no se puede establecer que esta es la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) total presente en las fases separadas del pozo, ya que es un pozo de características vapor dominante y la mayor parte del gas se escapa en el flujo de vapor antes que se realice su recolección. Sabiendo la preferencia del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) por la fase vapor y que es potenciado además por altas temperaturas, se puede afirmar que a pesar que no se logró medir con la metodología de extracción de muestra la actividad real de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el pozo, existen valores arriba de los 2.30 Bq/L presentes en el agua separada.
- ✓ Hay presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en la fumarola “El Playón” con una actividad medida relativamente alta de 14.14 Bq/L evaluada sin equipo adecuado para la extracción de las muestras debido a que no forma parte de los fines de este estudio, sin embargo, es de esperar que con equipo adecuado se logre una actividad significativamente mayor que la encontrada.
- ✓ Dentro de los tres campos geotérmicos analizados: Berlín, San Vicente y Ahuachapán se encuentran radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) disueltos en aguas termales, encontrando una actividad promedio de 3.22 Bq/L, 2.08 Bq/L y 7.30 Bq/L en cada campo respectivamente.
- ✓ Según los resultados obtenidos, las aguas termales de San Vicente, Berlín, Ahuachapán tienen en disolución gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), esto evidencia la presencia radiactiva de radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y uranio ( $^{238}\text{U}$ ) en la geología de la zona.
- ✓ La evaluación de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en aguas termales es una herramienta con potencial en la Etapa exploratoria de un proyecto geotérmico, ya que no solo existe actividad del gas en pozos geotérmicos y manifestaciones hidrotermales además se encuentra relación con la temperatura, pH y Cloruros, propiedades que se consideran en la búsqueda del recurso geotérmico.
- ✓ A partir de las relaciones encontradas entre la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con temperatura, cloruros, pH y TDS se pueden dar una idea del mecanismo de transferencia del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) a las aguas termales. Es de utilidad para identificación de fuentes afectadas por fluido geotérmico, gases de fumarolas y posibles estructuras activas, permitiendo establecer información que revele posibilidades de huella geotérmica en aguas termales.
- ✓ Existe una correlación significativa entre el contenido de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y cloruros, caracterizando las aguas muestreadas en dos grupos, zona fría y zona caliente comprobando la importancia de la medición de ambos parámetros en el monitoreo geotérmico.

## 9. RECOMENDACIÓN

Se recomienda validar una metodología de extracción de muestras en pozos y fumarolas que no permitan el escape del gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) al momento de su recolección, estableciendo un muestreo periódico de las fumarolas y fuentes termales para estudiar y analizar el comportamiento de la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) con los parámetros fisicoquímicos cloruros, pH con el fin de cuantificar con mayor precisión la incidencia de fluidos geotérmicos sobre ellas.

Se recomienda la evaluación de una mayor cantidad de sitios de aguas termales, para los campos geotérmicos que pertenecen a Berlín y San Vicente, así como análisis en función del tiempo, para lograr identificar la dinámica de estas aguas en función a la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente, estableciendo un perfil más completo acerca de esta nueva herramienta de exploración.

Debido a los resultados obtenidos, podría considerarse la Implementación de la técnica de centelleo líquido como exploración geotérmica en El Salvador.

Los resultados obtenidos de la concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) son relativamente altos en las fuentes: Agua Shuca, Termales de Santa Teresa, Aponía y El Playón. Por lo que se recomienda coleccionar evidencia que sustente una futura evaluación de estas fuentes, si son aptas para consumo humano desde el punto de vista radiológico. Tomando en cuenta el reglamento de protección radiológica, que contempla además la actividad de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) que una persona puede estar expuesta en su lugar de trabajo.

## 10. AGRADECIMIENTOS.

A Dios y a la Virgen María por iluminar nuestro camino y permitirnos concluir con éxito una etapa más en nuestra vida.

Gracias a las autoridades por la realización del Diplomado en Geotermia para América Latina, edición 2018; la empresa La Geo, UNU-GTP y la Universidad de El Salvador han sido una experiencia llena de muchos conocimientos y aprendizaje que pondremos en práctica en nuestra vida profesional y personal. Además, a nuestros asesores Licda. María Inés Magaña y M. Sc. Julio Payes, por haber compartido con nosotras durante este proceso investigativo gran parte de sus conocimientos. Su paciencia y motivación han sido fundamentales para concluir con nuestro trabajo.

Agradecemos profundamente a: Claudia Miranda, Tatiana Mejía y Lic. Ramiro por acompañarnos en todo el proceso. También al equipo de Laboratorio de la Geo por el apoyo brindado en los viajes de campo para la recolección de muestras de agua; a Noel López por habernos facilitado su experiencia y conocimiento.

Sin dejar de lado a nuestra familia que, con su inmenso apoyo, cálida y cariñosa compañía ha estado presente en cada uno de los pequeños pasos que formaron parte de este gran proyecto.

A todos ¡GRACIAS!

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Ayala Estrada, A. (2009). *Medición de Radón-222 en Ambientes Geohidrológicos en la Fracción Central de México*. México.
- Carpio, J. R. (2013). *EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RADIOLÓGICOS RADÓN (222Rn) Y RADIO (226Ra) EN MATRICES DE AGUA SUBTERRÁNEA DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR*. El Salvador.
- Coronado y Garciadiego. (2015). *METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL A PARTIR DE DATOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA FASE DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO*. EL SALVADOR.
- Dirección General de industria, Energía y Minas. (s.f.). *Guía de Energía Geotérmica*. Madrid.
- ESPM. (2012). *Manual de Geotermia: Cómo planificar y financiar la generación de electricidad*. Washington D.C.
- Gómez, D. R. (2013). *APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE GAS RADÓN EN EL AGUA DE UNA INSTALACIÓN TERMAL*. España.
- Magaña, M. I., López, D., Barrios, L.A., Perez, N. M., Padrón, E. and Henríquez, E., 2004: Diffuse and convective degassing of soil gases and heat at the TR6 Zapotillo hydrothermal discharge zone, Brelín Geothermal Field, El Salvador. *Geothermal Resources Council trans.* 28, 485-488.
- Marzolf, N. C. (2015). *EMPRENDIMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA*. Colombia.
- OLADE. (1994). *GUÍA PARA ESTUDIOS DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD GEOTÉRMICOS*. Quito-Ecuador.
- Organización Mundial de la Salud. (junio de 2016). *El radón y sus efectos en la salud*. Obtenido de <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- PNUMA. (2016). *Radiación efectos y fuentes*. Obtenido de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation\\_Effects\\_and\\_sources-2016Radiation\\_-\\_Effects\\_and\\_Sources\\_SP.pdf.pdf?sequence=7&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources_SP.pdf.pdf?sequence=7&isAllowed=y)
- Santiago H, P. (2004). *Determinación de los parámetros dinámicos del gas radón en aguas termales y potables del distrito Miranda, Edo. Falcón*. Maracaibo.
- Varillas, Barrientos y Churquipa. (2013). *Universidad Nacional Mayor de San Carlos*. Obtenido de Normas ASTM relacionadas a la hidrología: <https://es.scribd.com/doc/159838411/Normas-Astm-Grupo>

## 12. APÉNDICES (GRÁFICAS Y DATOS ADICIONALES)

Tabla 12-1: Código de sitios de muestreo

Sitio de Muestreo	Codigo Fuente
<b>Berlin</b>	
F79	F79
F83	F83
El Tigre- Montañita abajo	El Tigre
El Riyito	El Riyito
<b>San Vicente</b>	
Infiernillo Ciego Arriba	Infiernillo A
Infiernillo Ciego Abajo	Infiernillo B
Agua Agría	A Agría
<b>Ahuchapan</b>	
El Salitre parte alta	El Salitre A
El Salitre parte baja	El Salitre B
La labor	La labor
Agua Shuca	A Shuca
El playón partefria Arriba	El playón A
El playón parte caliente Arriba	El Playón B
El playón parte fria Abajo	El Playón C
La labor	La labor
Pozo Geotermico Vapor condensado	PG A
Pozo Geotermico Vapor dominante agua liquida separada	PG B
Aguas Termales Santa Teresa Frio	Termales ST A
Aguas Termales Santa Teresa Caliente	Termales ST B
Fumarola	Fumarola
Aponía	Aponía

Tabla 12-2. Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) presente en los sitios de muestreo.

Zona	Fecha Muestreo	Sitio de Muestreo	T (°C)	Concentración de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )
BERLÍN	06/11/2018	F79	59.80	2.34 ± 0.1 2.75 ± 0.11
		F83	66.40	0.57 ± 0.11 0.56 ± 0.11

Zona	Fecha Muestreo	Sitio de Muestreo	T (°C)	Concentración de radón ( <sup>222</sup> Rn)
		El Tigre- Montañita abajo	42.00	2.68± 0.11 3.61± 0.14
		El Riyito	38.50	6.68± 0.23 6.60± 0.23
SAN VICENTE	08/11/2018	Infiernillo Ciego	30.50	0.23 ±0.21 0.17 ±0.28
		Infiernillo Ciego Abajo	32.00	5.38 ±0.2 6.13 ±0.25
		Agua Agría	42.50	0.51 ±0.11 0.03 ±1.27
AHUCHAPAN 1	13/11/2018	El Salitre parte alta	52.00	14.61 ±0.5
		El Salitre parte baja	47.00	7.13 ±0.25
		La labor	39.00	1.02 ±0.09
		Agua Shuca, sin nacimiento empozada	25.00	10.97 ±0.38
		El Playón A	29.00	2.31 ±0.1
		El Playón B	56.00	10.10 ±0.35
AHUCHAPAN 2	15/11/2018	El Playón C	30.00	0.61 ±0.11
		La labor	40.00	0.83 ±0.11 1.00 ±0.1
		Pozo AH-17 Agua líquida separada	21.10	2.30 ±0.1
		Pozo AH-17 Vapor Condesado	26.40	0.25 ±0.27
		El Playón A	29.00	0.54 ±0.14
		El Playón B	57.00	0.22 ±0.29
AHUCHAPAN 3	19/11/2018	El Playón C	28.00	1.85 ±0.09
		Aguas Termales ST	37.00 69.00	6.95 ±0.23 20.72 ±0.67
		Fumarola	97.00	14.14 ±0.44
		Aponía	25.00	8.75 ±0.28
		El Playón A	31.00	4.12 ±0.14
		El Playón B	56.00	10.64 ±0.34
		El Playón C	29.00	0.55 ±0.16