



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE RADÓN “Rn-222” DISUELTO EN LAS  
AGUAS TERMALES DE LA CIUDAD DE BAÑOS DE AGUA SANTA

Autor

Jhonatann Andres Sambache Lisintuña

Año  
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE RADÓN “Rn-222” DISUELTO EN LAS  
AGUAS TERMALES DE LA CIUDAD DE BAÑOS DE AGUA SANTA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y  
Remediación

Profesor Guía

MSc. Yasser Alejandro González Romero

Autor

Jhonatann Andres Sambache Lisintuña

Año

2019

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

“Declaro haber dirigido este trabajo, Análisis de la presencia de radón “Rn-222” disuelto en las aguas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa, a través de reuniones periódicas con el estudiante Jhonatann Andres Sambache Lisintuña, en el semestre 201910, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Yasser Alejandro González Romero  
Máster en Ingeniería Ambiental  
C.I: 070373762-7

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR**

“Declaro haber revisado este trabajo, Análisis de la presencia de radón “Rn-222” disuelto en las aguas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa, de Jhonatann Andres Sambache Lisintuña, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Rasa Zalakeviciute  
Doctor of Engineering Science  
C.I: 175707679-7

## **DECLARACIÓN DEL AUTORÍA DEL ESTUDIANTE**

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

Jhonatann Andres Sambache Lisintuña  
C.I: 172317433-8

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por la vida, guía y fortaleza durante esta trayectoria. A mi Madre, Cristina por el amor incondicional que siempre ha sabido brindarme y por ser mi apoyo en cada etapa de mi vida. A mis abuelitos, Lasteña y Segundo por el inmenso cariño y dedicación a lo largo de mi vida. Al Ing. Alejandro González por la impartición de sus conocimientos y todo el apoyo brindado durante este trabajo de titulación.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi Madre por todo el amor, esfuerzo, motivación y por siempre creer en mí, sin ella esto no sería posible. A mis Abuelitos Lasteña y Segundo que han sido mis segundos padres, y con cada una de sus enseñanzas y consejos sembraron en mí los valores correctos para ser una persona de bien. Ahora sus anhelos se ven reflejados.

Este logro es tuyo Madre.

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se planteó evaluar la concentración de Rn-222 disuelto en los tres balnearios (El Salado, La Virgen y Santa Ana) que cuentan con vertientes naturales en la ciudad de Baños de Agua Santa en la Provincia de Tungurahua, así también la estimación de tasas de dosis efectiva por inhalación mediante la cuantificación de la actividad del radionúclido presente en las piscinas de los balnearios. Para la medición de Rn-222 disuelto se utilizó el equipo portátil RAD7 (detector en estado sólido) y el accesorio H<sub>2</sub>O aplicando los protocolos de muestreos establecidos en los manuales del equipo y del accesorio. El estudio se desarrolló durante los meses de agosto y septiembre de 2018 con un total de cuatro semanas de medición obteniendo un valor promedio semanal por piscina y por balneario. Además, se realizó un análisis por espectrometría gamma con el detector de germanio hiperpuro (GeHP) mediante una muestra de agua para cada uno de los balnearios, dicho procedimiento se realizó en el laboratorio de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares, adicionalmente se realizó la medición de la tasa de dosis en las piscinas del balneario con la utilización del equipo detector LUDLUM. Los niveles de concentración de Rn-222 en El Salado se encontraron en un promedio de 0.3 Bq/L, en La Virgen 0.8 Bq/L y 0.9 Bq/L en Santa Ana. Estos valores no superan los límites establecidos por la EPA (11.1 Bq/L) y (100 Bq/L) por el Comité Europeo para radón disuelto en agua. La tasa de dosis estimada mediante los modelos de inhalación de la UNSCEAR no representa un riesgo por exposición al Rn-222 en todos los puntos que fueron monitoreados con valores que van desde 0.0007 mSv/año hasta 0.0011 mSv/año los cuales no sobrepasan el límite establecido (1.1 mSv/año). Las concentraciones de Rn-222 disuelto se encuentra relacionada directamente con la presencia e interacción del Ra-226 presente en la geomorfología de la zona, los relieves montañosos altos donde se encuentran ubicados los balnearios presentan una interacción baja como se evidencia en los valores de Rn-222 disuelto evaluados en los balnearios de la ciudad de Baños.

**Palabras clave:** Vertientes, Rn-222 disuelto, RAD7 y accesorio H<sub>2</sub>O, modelo de inhalación, tasa de dosis.

## ABSTRACT

In this thesis, it was considered to evaluate the concentration of Rn-222 dissolved in the three spas (El Salado, La Virgen and Santa Ana) that have natural slopes in the city of Baños de Agua Santa in the province of Tungurahua, as well as the estimation of effective dose rates by inhalation by quantifying the activity of the radionuclide present in the swimming pools of the spas. For the measurement of the dissolved Rn-222, the RAD7 portable equipment (solid state detector) and H<sub>2</sub>O accessory were performed using the established sampling protocols. The study was developed during the months of August and September of 2018 with a total of four weeks of measurements obtaining average weekly values in the swimming pools and the spa. In addition, an analysis was conducted by Gamma spectrometry with the HPGe Detector by a sample of water for each of the spas. This procedure was carried out in the laboratory of the "Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares". The measurements of the dose rate in the swimming pools of the spa were carried out using the LUDLUM detector. The levels of Rn-222 in El Salado were found on average of 0.3 Bq/L, in the Virgin 0.8 Bq/L and 0.9 Bq/L in Santa Ana. These values do not exceed the limits established by the EPA (11.1 Bq/L) and by the European Committee for Radon (100 Bq/L) dissolved in water. The estimated dose rate using the inhalation models of the UNSCEAR does not represent a risk for exposure to the Rn-222 at all monitoring points with values ranging from 0.0007 mSv/year to 0.0011 mSv/year which do not exceed the limit (1.1 mSv/year). The concentrations of the dissolved Rn-222 is directly related to the presence and interaction of the Ra-226 present in the geomorphology of the area, the high mountainous terrain where the spas are located present a low interaction As evidenced in the values of Rn-222 dissolved evaluated in the spas of the city of Baños.

**Key words:** Sheds, Rn-222 dissolved, RAD7 and accessory H<sub>2</sub>O, inhalation model, dose rate.

# ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance.....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivo General .....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Radiación .....	4
2.1.1. Radiación no ionizante.....	5
2.1.2. Radiación Ionizante .....	5
2.2. Exposición externa .....	6
2.3. Exposición interna.....	6
2.4. Radiación alfa .....	6
2.5. Periodo de semidesintegración.....	7
2.6. Material radiactivo de origen natural.....	8
2.7. Radón (Rn-222).....	9
2.7.1. Radón en agua .....	9
2.7.2. Afectación del radón al ser humano.....	11
2.8. Detectores de radón en agua.....	12
2.8.1. Detector germanio hiperpuro .....	12
2.8.2. Detectores alfa de estado sólido.....	13
2.9. Estudios realizados con RAD7.....	14
2.10. Seguridad Radiológica.....	15
2.11. Marco Normativo.....	15
2.11.1. Cuerpo regulador en Ecuador.....	15
2.11.2. Normas Internacionales .....	16

3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	18
3.1. Esquema metodológico .....	18
3.2. Selección de área de estudio .....	18
3.3. Ubicación del área de estudio.....	21
3.4. Fechas de monitoreo.....	23
3.5. Puntos de muestreo.....	24
3.5.1. Balneario El Salado .....	24
3.5.2. Balneario La Virgen .....	25
3.5.3. Balneario Santa Ana.....	26
3.6. Medición de parámetros físicos y químicos .....	27
3.7. Recolección de muestras .....	29
3.8. Determinación de la concentración de radón.....	31
3.8.1. Equipo Rad7 y accesorio H <sub>2</sub> O.....	31
3.8.2. Protocolo de medición de radón en agua.....	33
3.9. Análisis de la concentración de radón en agua.....	36
3.9.1. Software CAPTURE .....	36
3.10. Análisis de la concentración de radionúclidos a través de espectrometría gamma .....	38
3.10.1. Espectrómetro gamma GCDX-40180 .....	38
3.11. Medición de Tasa de Dosis .....	48
3.11.1. Medidor de radiación Gamma Modelo 3-97 .....	48
3.11.2. Medidor de radiaciones Beta y Gamma .....	49
3.12. Calculo de tasa de Dosis por inhalación.....	50
3.13. Generación de mapa de actividad y exposición radiactiva..	51
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	51
4.1. Determinación de la concentración de radón disuelto en el agua mediante el equipo RAD7 y su accesorio H <sub>2</sub> O.....	51
4.1.1. Balneario El Salado .....	51
4.1.2. Balneario La Virgen .....	60

4.1.3. Balneario Santa Ana.....	70
4.2. Calculo de la tasa de dosis anual por inhalación .....	80
4.3. Mapa de exposición radiológica.....	81
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
5.1. Conclusiones.....	83
5.2. Recomendaciones .....	84
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>

## 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La exposición continua al fenómeno de la radiación ha estado presente desde el comienzo de la humanidad. Las radiaciones de origen natural provienen de la distribución de los distintos elementos a lo largo de la superficie terrestre. Mientras radiación de origen artificial el ser humano está expuesto día a día por fines médicos, investigativos o laborales (Real, 2012). Existen dos tipos de radiaciones, la radiación ionizante que interacciona con la materia causando un daño a nivel celular, partículas alfa, beta y rayos gamma, y la radiación no ionizante que son ondas electromagnéticas de menor energía que no producen ningún efecto a la salud por ejemplo los rayos infrarrojos, luz ultravioleta, microondas (Robledo de Dios, y otros, 2017).

El gas radón representa el 88% de la exposición a radiación ionizante de origen natural. En referencia a la dosis efectiva anual el valor promedio es de 1.2 mSv del 2.4 mSv total de dosis efectiva que el ser humano recibe en un periodo de un año (Ferrer, 2015). La dosis efectiva es el resultado de la sumatoria de las dosis equivalentes en mSv, que inciden directamente sobre los tejidos u órganos procedentes de irradiaciones externas o internas (Baraza, Castejón, & Guardino, 2015). La exposición de forma interna a la radiación ionizante se produce cuando un radionúclido es inhalado, ingerido o entra de algún otro modo en el torrente sanguíneo (Organización Mundial de la Salud, 2015).

El radón es un gas radiactivo que proviene de la cadena de desintegración del U-238, el cual está presente en diversas rocas y es progenitor del Ra-226, y este a su vez es el progenitor del Rn-222. La toxicidad del gas radón es ocasionada por la desintegración de sus hijos Po-214, Po-218 y Bi-214 en forma de partículas alfa, las cuales son responsables de la ionización de las células del tejido respiratorio desarrollando daños en el material genético al momento de la inhalación (Ventoso, 2017). El gas radón es la segunda causa

del desarrollo de cáncer de pulmón en la población solo por detrás del tabaco a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2015).

El Rn-222 presenta una mayor concentración en agua por ser un gas noble y no reaccionar con sólidos, tampoco experimentar procesos de precipitación, con lo que el gas permanece en el agua en una fase disuelta (Barskaran, 2016). El gas tiene la capacidad de penetrar los tejidos del tracto respiratorio y causar daños en el epitelio bronquial de los pulmones por medio de la inhalación, donde las partículas alfa causan alteraciones a nivel celular originando el desarrollo del cáncer de pulmón (Goldman & Schafer, 2016).

El propósito de la investigación es evidenciar los niveles de concentración de radiación natural en la matriz agua, y establecer una base de datos con el registro del Rn-222 en el Ecuador específicamente en aguas termales.

## **1.2. Justificación**

La concentración de radiación natural proveniente de la corteza terrestre se encuentra en función de la clase de roca existente en los suelos de la región. En el caso del Ecuador en base a estudios y análisis previos se afirma que la presencia de Uranio y Torio es considerable (NEA & IAEA, 2016). El Rn-222 proveniente de la cadena de desintegración del U-238 en estado gaseoso es emanado directamente a la atmósfera, además que puede adherirse fácilmente a los cuerpos de agua subterráneos existentes, como también a los materiales de construcción. El ser humano puede experimentar una exposición a las partículas alfa y estas a su vez causa un efecto nocivo a las células pulmonares (Navarro, 2015).

En el país existen varias vertientes de aguas termales las cuales son utilizadas para fines recreativos y las mismas no poseen un registro de actividad radiactiva de origen natural. Las investigaciones, estudios y publicaciones en referencia a la radiación de origen natural específicamente al Rn-222 en los

países de Europa y de Oceanía son numerosas con relación a Sudamérica y al Ecuador específicamente. De esta forma se propuso realizar el análisis de la presencia del Rn-222 disuelto en las piscinas de mayor reconocimiento del país como son las piscinas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa de la provincia de Tungurahua.

Este estudio se realizó con la finalidad de evidenciar la actividad del gas Rn-222 disuelto en las piscinas termales y el cálculo de la tasa dosis a la que se exponen los trabajadores, así como los turistas. Se buscó adicionalmente establecer una línea base de estudios para la caracterización del gas Rn-222 disuelto en las diferentes termas del país con el apoyo de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares.

### **1.3. Alcance**

Dentro de este proyecto se analizó la presencia del gas Rn-222 disuelto en las aguas termales de la ciudad de Baños de Agua Santa en sus tres complejos turísticos principales los cuales fueron; termas El Salado, termas La Virgen y termas Santa Ana. La formación geológica y la zona volcánica fue fundamental para el estudio del Rn-222 disuelto en la matriz agua, la cual es distribuida desde las vertientes hacia las piscinas termales por medio de tubería. La exposición a este gas radica en el tiempo de permanencia en estos lugares donde el radón disuelto se convierte en una fuente fija de radiación. El análisis de las concentraciones entre la vertiente y el agua que llega a la piscina para el uso recreacional fueron los puntos de muestreo dentro de este estudio. El análisis de la afectación a la salud humana por medio de la tasa de dosis recibida se realizó mediante modelos de inhalación establecidos por el UNSCEAR (Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica).

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar la presencia del gas Radón disuelto en las aguas termales que emergen en las vertientes de la Ciudad de Baños de Agua Santa.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Cuantificar las concentraciones de Radón en las vertientes de aguas termales mediante la utilización de métodos activos.
- Estimar la contribución a la dosis efectiva por inhalación del gas radón en el personal de las instalaciones, así como en los turistas.

## **2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Radiación**

La radiación se define como un fenómeno natural en cual existe una transmisión de energía a través del espacio vacío (Mendoza, 2015). Las radiaciones según su longitud de onda se clasifican en radiaciones ionizantes y no ionizantes. Las radiaciones ionizantes poseen una menor longitud de onda y una mayor energía con la que logra dar origen a átomos cargados llamados iones. Las radiaciones no ionizantes, que se caracterizan por su mayor longitud de onda y su menor energía, las cuales no producen la ionización de la materia (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016). La unidad que se representa es electrón voltios (eV), su cuantificación está en función de la cantidad de energía liberada y la fuerza de radiación se posee varios tipos de radiaciones tales como: alfa, gamma, beta, neutrones y electromagnética (EPA, 2016).

### 2.1.1. Radiación no ionizante

La radiación no ionizante proviene de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia, la cual proviene de los fotones que son expulsados por parte de los campos electromagnéticos. La energía correspondiente a cada fotón es igual a la frecuencia de onda (Andrade & Contreras, 2014). Dicha energía es demasiado leve para eliminar los electrones de los átomos y romper los enlaces químicos. Dentro de la radiación no ionizante tenemos la energía electromagnética, la radiación infrarroja y visible (Pérez, 2010).

### 2.1.2. Radiación ionizante

Los átomos inestables que se encuentran en estado de desintegración se denominan radionúclidos los cuales liberan energía en forma de ondas electromagnéticas como rayos gama y rayos x, cuando la energía es liberada en forma de partículas como la radiación alfa, radiación beta y neutrones (OMS, 2016). Las radiaciones ionizantes son peligrosas para la salud humana debido a los efectos inmediatos como náuseas, vómitos, pérdida de cabello y efectos a largo plazo como la leucemia y el cáncer (Caldas, Castellanos, & Hidalgo, 2016).

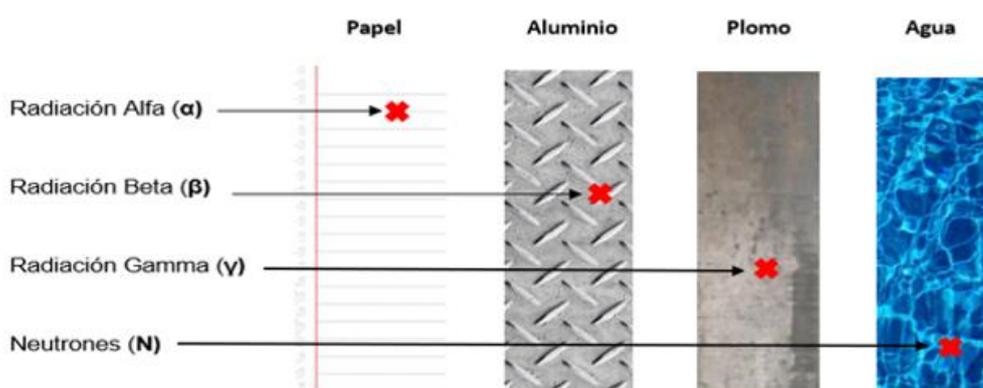


Figura 1. Radiaciones ionizantes con relación a su blindaje.

Adaptado de CC.OO. Castilla y León, 2006.

## **2.2. Exposición externa**

Se define exposición externa cuando el material radiactivo que se encuentra presente en la atmósfera en forma de polvo, aerosoles o líquidos entra en contacto con la piel de una persona. La exposición externa a una radiación ionizante se realiza con fines médicos y disminuye cuando la persona se aleja del campo de radiación o cuando la fuente de radiación se encuentra blindada (OMS, 2016).

## **2.3. Exposición interna**

Una exposición interna se presenta cuando se incorpora al cuerpo un material radiactivo mediante la inhalación, ingesta o por la absorción a través de una herida abierta en la piel, causando de esta forma una irradiación a los tejidos y órganos en su interior. La dosis que recibe un organismo se encuentra en función de las propiedades del radionúclido, su energía, tiempo de irradiación, tiempo de vida media y del mecanismo de respuesta del organismo (González, 2015).

## **2.4. Radiación alfa**

Las partículas alfa se caracterizan por ser partículas pesadas y son núcleos de helio 4 y se encuentran cargados de dos neutrones y dos protones. Estas partículas poseen alto grado de ionización y bajo poder de penetración lo que no les permite transportarse mediante el aire a grandes distancias (Roig, 2013). El núcleo de las partículas alfa posee una mayor cantidad de neutrones que protones lo cual es el resultado de la inestabilidad que presentan estas partículas (Federación de Enseñanzas de Comisiones Obreras de Andalucía, 2009).

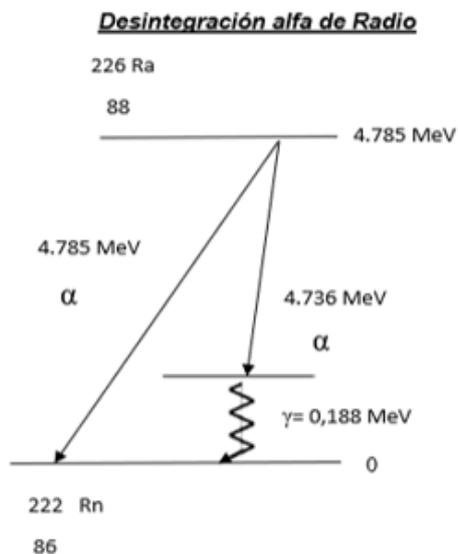
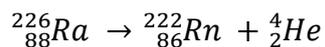


Figura 2. Esquema de decaimiento alfa de Ra-226 a Rn-222.

Adaptado de Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica, 2002.

## 2.5. Periodo de semidesintegración

Es tiempo que necesita un radionúclido para desintegrarse a la mitad de sus átomos, en donde la actividad del radionúclido disminuye a la mitad del valor inicial. Las desintegraciones radiactivas se producen de manera espontánea, pero en una secuencia de tiempo regular. El tiempo difiere en un rango que va de fracciones de segundos a miles de años dependiendo del radionúclido y su naturaleza (Aguilar & Clavero, 2015). La cadena de desintegración del uranio comienza con las trasmutaciones a torio y el cual a veces experimenta el mismo proceso hasta llegar a un átomo de plomo estable el cual es el Pb-206 (ver Figura 3) (Ramírez, 2016).



Figura 3. Cadena de Desintegración de U-238, tiempo de semidesintegración y tipos de radiación.

Adaptado de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016.

## 2.6. Material radiactivo de origen natural

La corteza terrestre se encuentra constituida por varios minerales los cuales contiene radionúclidos de origen natural y están presentes libremente en el medio ambiente, donde su concentración dependerá del tipo de suelo y de las rocas (IAEA, 2011). Dentro de las actividades laborales que involucren la explotación, perforación, actividades mineras la exposición a la radiación de origen natural tiende a ser elevada y es motivación de estudios y aplicación de la protección radiológica. La serie de decaimiento de los radionúclidos (U-238, Th-232 y K-40) son las principales series de desintegración que causan una exposición significativa generando un daño directo a la salud humana (World Nuclear Association, 2016).

## 2.7. Radón (Rn-222)

El Radón es un gas noble de origen natural es incoloro, insípido y no puede ser percibido mediante el olfato ya que no posee un olor específico. El gas radón es resultado de la cadena de desintegración del radionúclido U-238 el cual se encuentra naturalmente en los suelos y las rocas (WHO, 2016). Dentro de la cadena de decaimiento (ver Figura 3), los elementos se encuentran dentro de una molécula con la finalidad de permanecer en estado sólido, y cuando se produce el decaimiento de Ra-226 a Rn-222 da lugar a la irradiación de partículas alfa, por lo que los átomos cambian de estado sólido a estado gaseoso ocasionando la emanación del Rn-222 a la atmósfera hasta el siguiente decaimiento de Po-218 en 3.8 días. Seguidamente decae en Pb-218, la cual es emisión beta y esta a su vez decae a Bi-214 en emisiones alfa. Al final de la cadena decae a Bi-210, Po-210 y Pb-210 hasta llegar Pb-206 el cual es el elemento estable donde termina la cadena del uranio (Espinosa, 2016).

Existen tres isotopos de radón de origen natural entre los cuales se encuentran el Rn-219, Rn-220, Rn-222. Este último es el que se encuentra en mayor abundancia en la naturaleza en las matrices suelo, aire y agua en donde la interrelación de propiedades físicas y químicas hace que la presencia de este gas en varios sitios sea considerable y pueda generar una exposición a radiación, por lo que se considera como gran tema de investigación, así como de cuestiones de protección radiológica (CSN, 2014).

### 2.7.1. Radón en agua

Las concentraciones de Rn-222 en aguas subterráneas se caracterizan en un mayor valor de las rocas volcánicas ácidas. La disolución del Rn-222 está en base a las propiedades de la roca madre de cada zona geográfica y además de la distribución de Ra-226 con relación a la superficie de los poros y fisuras donde se realiza el intercambio con el agua. La vida media del gas radón es

aproximadamente 4 días con un rango que al día 38 desaparecería por desintegración radiactiva (Marrero, 2015).

La disolución del gas se produce por la interacción electroestática entre el dipolo del átomo gaseoso de radón y la molécula polar de agua, que se repite constantemente generando el fenómeno de disolución, al ser un gas noble tienden a formar compuestos llamados hidratos metaestables o clatratos los cuales están relacionados directamente a la solubilidad y movilidad del gas en el medio acuoso. El desplazamiento del gas a lo largo de los acuíferos se encuentra en función de la difusión molecular, la cual consiste en el transporte de materia de una posición a otra por diferencia de concentraciones (Rodríguez, 2013). La riqueza en uranio y las propiedades de la roca que presente el acuífero es la base de la concentración de radón en agua. El radio disuelto representa una fuente de radón considerable al permanecer en la superficie, poros de las rocas y minerales mediante la absorción. Si este fenómeno se produce, las concentraciones de radón en agua serán elevadas y permitiría que el transporte y movimiento del gas llegue a la superficie (Rábago, 2013).

En resumen, el Rn-222 presenta una gran solubilidad en el agua, lo que le permite transportarse y movilizarse a lo largo de grandes distancias en los cuerpos de agua como en las formaciones geológicas. El traspaso de fase líquida a fase gaseosa se produce por un cambio de presión, turbulencias presentes en los acuíferos y fisuras subterráneas que acrecentarán la transferencia a la fase gaseosa (Appleton, 2013).

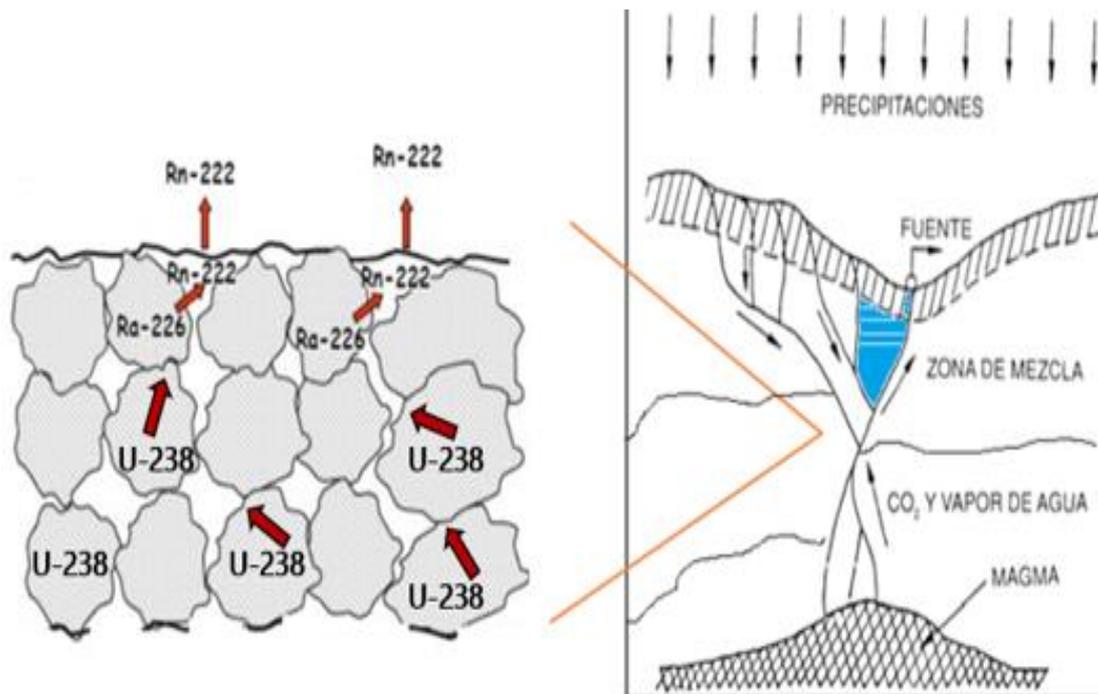


Figura 4. Transferencia de radón y origen de las aguas termales.

Adaptado de Rodríguez, 2013.

### 2.7.2. Afectación del radón al ser humano

El gas radón es considerado como un agente cancerígeno en el año de 1988, este gas es clasificado como carcinógenos en humanos del grupo 1 por el CIIC, el organismo especializado de investigación oncológica de la OMS (WHO, 2016). La afectación se produce cuando las radiaciones se encuentran a nivel celular afectando a las cadenas de ácido desoxirribonucleico (ADN) en un cromosoma causando la muerte de las células y como resultado final la difusión de un órgano en específico como es el caso del radón y su relación directa con el cáncer de pulmón en los seres humanos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016).

## 2.8. Detectores de radón en agua

### 2.8.1. Detector germanio hiperpuro

Este método consiste en la utilización del detector germanio hiperpuro el cual es un semiconductor de germanio que actúa como medio ionizante y que se encuentra localizado al interior del criostato. Este elemento requiere permanecer a temperatura igual a la del nitrógeno líquido (Carrazana, 2017). La obtención del espectro es el resultado de la incidencia del rayo gamma sobre el detector que da origen a la ionización de los electrones, los cuales son recolectados por el campo de electricidad que no supera los 3500 V. El preamplificador se encarga de aumentar la carga y convertir el pulso de corriente en uno de voltaje. Esta señal viaja hasta el amplificador donde aumenta para que el (ADC) logre la transformación de una señal de voltaje a una señal digital. Finalmente, el analizador multicanal elabora un histograma y con el software se obtiene la espectrometría (Juarez, 2014).

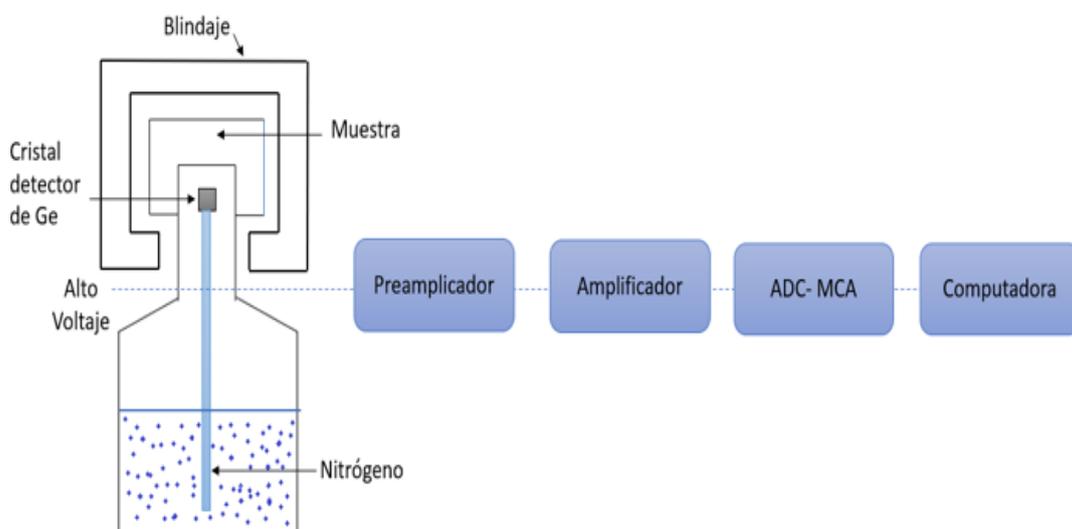


Figura 5. Espectrómetro gamma de Germanio Hiperpuro.

Adaptado de Juárez, 2014.

## 2.8.2. Detectores alfa de estado sólido

### 2.8.2.1. Equipo RAD7 de DurrIDGE

El equipo RAD7 es un detector de radiación específicamente del radioisótopo radón, el cual es un equipo portátil y de medición continua que se basa en la espectrometría alfa para su medición. En su interior posee un detector en estado sólido junto a una cámara de electrodeposición de 0.7 litros en forma esférica recubierta en su interior con un conductor eléctrico y una pequeña bomba en su interior además entre las paredes de la cámara y el detector se aplica un campo eléctrico en donde los descendientes del radón se depositarán en su superficie. La capacidad de convertir la energía de la radiación alfa proveniente del radón y sus descendientes en una señal eléctrica la cual es directamente proporcional a su energía logra obtener una espectrometría directa en poco tiempo de respuesta. El rango de energía de detección del equipo es de 2 a 10 MeV y cuenta con 8 categorías de identificación de los radionúclidos descendientes del Rn-222 y del Rn-220 teniendo un total de 200 canales de 0,05 MeV de anchura para la identificación y reconocimiento de radionúclidos (DurrIDGE Company, 2014).



*Figura 6.* Descripción de los elementos del equipo RAD7.

Tomado de DurrIDGE, 2014.

## 2.9. Estudios realizados con RAD7

### ▪ Irán

En la investigación de radón en agua en la ciudad de Sarein al noroeste de Irán mediante la aplicación de la metodología del equipo RAD7 y su accesorio H<sub>2</sub>O, se analizaron ocho puntos de muestreo los cuales fueron de características termales. Donde obtuvieron valores de concentración de radón en agua entre 0.2 Bq/L y 3.89 Bq/L con un promedio de 1.07 Bq/L en las muestras en general. Las mediciones se realizaron en el mes de enero del año 2011 en función de las características geológicas de la zona al estar en las cercanías del volcán inactivo Savalan (Jalili-Majarehin, Behtash, & Rezaei-Ochbelagh, 2012).

### ▪ Malasia

Durante el año de 2015 en Malasia se realizó una caracterización de varias muestras de agua por parte del Centro de Investigación de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Malasia, donde se analizaron cuatro tipos de agua entre agua de consumo, agua de minerales, agua de grifo y agua de pozo seleccionando cinco muestras por casa tipo de agua variando en la actividad de radón en agua de 2.9 pCi/L hasta 6409 pCi/L. Los valores más alto se presentaron en las muestras de agua de los pozos superando el valor establecido por el USEPA de 300 pCi/L o equivalentes a 11 Bq/L como límite máximo de contaminación por radón (Malik, Rabaiee, & Jaafar, 2015).

### ▪ Nigeria

La finalidad del estudio hecho en Nigeria fue la estimación de tasa de dosis anual por inhalación con la aplicación de modelos predictivos propuestos por el UNSCEAR. El cálculo de la actividad de radón disuelto en las aguas subterráneas se lo realizó con manejo del equipo RAD7 y el accesorio H<sub>2</sub>O, El estudio se llevó a cabo en el año del 2017, en donde se georreferenció tres

puntos para el muestro y se obtuvo un promedio de 30 Bq/L de actividad y 0.07 mSv en el primer punto, 19.5 Bq/L y 0.05 mSv , 81.2 Bq/L y 0.2 mSv en el tercer punto. En promedio general del área de estudio se registró tasas de dosis por inhalación desde 0,005 mSv hasta 0,52 mSv donde no superó el límite establecido de 0,1 mSv por la Unión Europea (Isinkaye & Ajiboye, 2017).

## **2.10. Seguridad Radiológica**

La situación de exposición existente es considerada como una condición de exposición en un medio laboral donde existe radiación de fondo natural o se encuentra expuesto a materiales radiactivos residuales que no contaron con adecuada gestión de desechos. La exposición de radón en lugares de trabajo debe ser controlada por el órgano regulador y por el representante de la empresa donde se debe velar por la baja incidencia del radón si existiera la presencia de este, constatando que no supere los límites permisibles establecidos (IAEA, 2011). Los establecimientos o balnearios termales están considerados como casos particulares de exposición a radón y otros radionúclidos en lugares de trabajo, en los cuales se aprovecha el recurso agua por sus altas propiedades minerales para fines recreativos, rehabilitación y medicinales. Cada balneario se diferencia por el tipo de captación y de las variaciones de temperatura que se realizan en las mismas, lo que varían las concentraciones del radón disuelto (CSN, 2012).

## **2.11. Marco Normativo**

### **2.11.1. Cuerpo regulador en Ecuador**

El Ecuador como país no posee leyes o normativas estrictamente para radionúclidos de origen natural. Entre ellos el radón el cual puede estar presente en lugares de trabajo como edificios, industrias, escuelas y centros recreativos, en los cuales se necesitaría un control y seguimiento dentro del

país. Por el Decreto Supremo 3640, el Reglamento De Seguridad Radiología es el documento que menciona la protección contra los efectos nocivos de la radiación ionizante hacia la salud, el cual fue publicado en el año de 1979 como Registro Oficial N° 798 (Presidencia de la República del Ecuador, 1979)

La institución a cargo de la regulación y control de las fuentes y respectivamente las exposiciones a radiación ionizante, es la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) perteneciente al nuevo Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables consolidado mediante Decreto Ejecutivo N°399 el 15 de mayo de 2018, dicha subsecretaría brinda servicios adicionales con relación a fuentes, equipos, inspección de fugas y análisis de muestras (Presidencia de la República del Ecuador, 2018).

### **Acuerdo Ministerial N° 283**

La Norma técnica para la gestión segura de los desechos radiactivos y fuentes radiactivas selladas en desuso posee un apartado donde se hace referencia a los procesos en cuales existen desechos de carácter radiactivo específicamente de origen natural (NORM) y en su artículo 20 y 31 se pronuncia acerca del procedimiento de manejo de desechos radiactivos y la correcta gestión que se debe cumplir (MEER, 2016).

### **2.11.2 Normas Internacionales**

#### **Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radicación atómica**

En referencia a la dosis efectiva proveniente de la inhalación del gas radón en el Informe de la UNSCEAR en el Anexo B se establece una dosis anual estimada por inhalación al aire de libre de radón no debe superar 1.1 mSv/año.

### **La Agencia de Protección Ambiental (US EPA)**

La Agencia de Protección Ambiental (US EPA) establece un límite más estricto en relación con la concentración de radón en agua. Esta agencia estadounidense considera específicamente un máximo nivel de contaminación por radón disuelto de 300 pCi/L, lo que es proporcional a 11.1 Bq/L en aguas destinadas para el consumo humano. En la actualidad no existe un límite establecido de radón para aguas subterráneas, minerales, termales o de uso recreativo (EPA, s.f).

### **Consejo de la Unión Europea**

La Directiva del Consejo Europeo 2013/51/EURATOM, establece como límite máximo permisible de radón disuelto en aguas para consumo humano 100 Bq/L, este valor permisible se lo considera extremadamente amplio y es utilizado para análisis y discusión de estudios de radón en agua a lo largo de todo el mundo. Este valor ha sido adoptado por la Organización Mundial de la Salud de igual forma para valores máximos de radón disuelto en aguas destinadas al consumo humano (Consejo de la Unión Europea , 2013).

### 3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Esquema metodológico

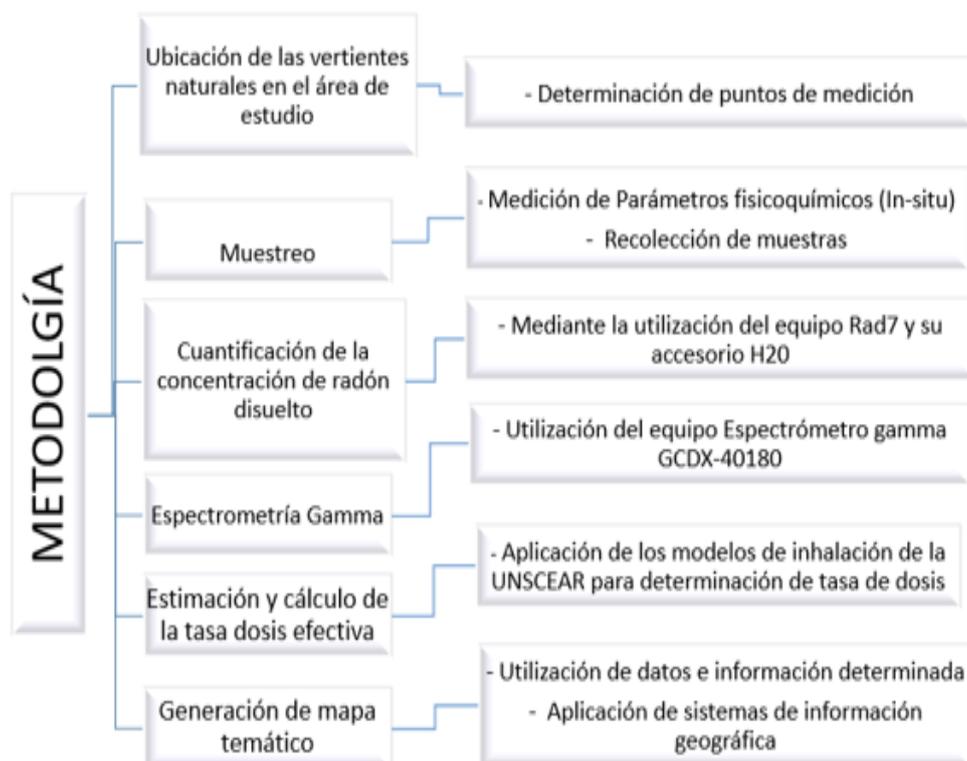


Figura 7. Esquema de metodología.

#### 3.2. Selección de área de estudio

La selección del área de estudio se realizó en base al inventario de aguas termo minerales elaborado por el INAMHI en el año del 2013, donde se enlista las diversas fuentes de aguas que se encuentran registradas para el uso recreacional. La ciudad de Baños a lo largo de la historia ha sido uno de los sitios con mayor afluencia de turistas por sus atractivos naturales en especial sus balnearios con sus aguas ricas en minerales. Su geografía la sitúa en los flancos extremos de la cordillera oriental de los Andes y con una cercanía a las faldas del volcán Tungurahua a lo que se debe a su riqueza hídrica. Dicha

cordillera se encuentra constituida por un basamento Precámbrico sobreyacido de cinturones sublineales prolongados de rocas metamórficas. Tiene una edad Paleozoico-Cretácico inferior y estas a su vez compuestas de granitoides, las rocas metamórficas. Esta zona ha experimentado a lo largo de los tiempos eventos sísmicos y tectónicos a partir del Mesozoico hasta el Cuaternario originando de esta manera cinco formaciones litotectónicas que son: Alao, Guamote, Loja, Salado y Zamora que van de Oeste a Este y que como límites geológicos para dichas formaciones se encuentran las fallas de: Cosanga-Méndez, Baños, Llanganates, Peltectec (Aspden & Litherland, 1992).



Figura 8. Ubicación del área de estudio en el Ecuador.

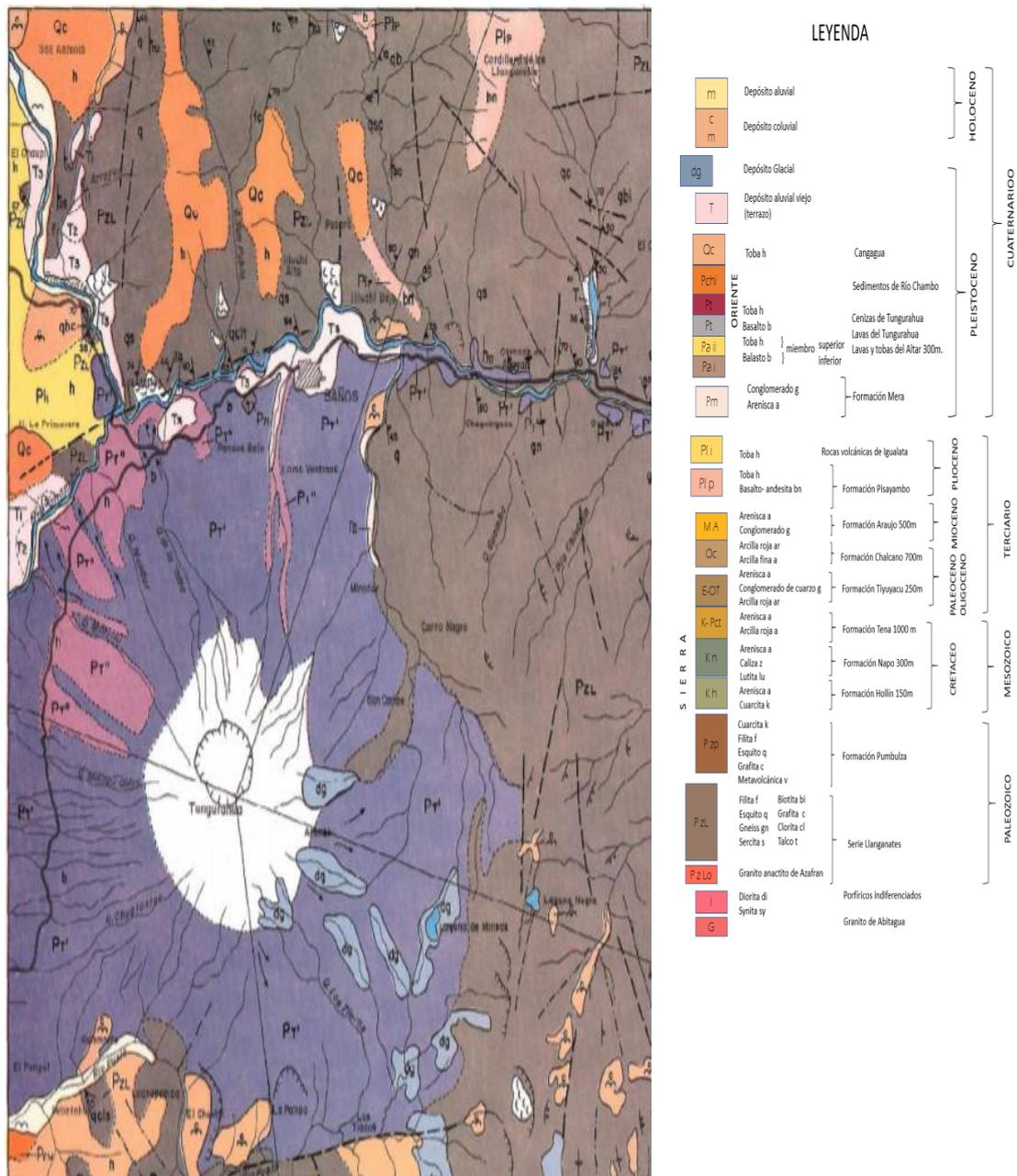


Figura 9. Geología de la ciudad de Baños.

Adaptado de Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, 1980.

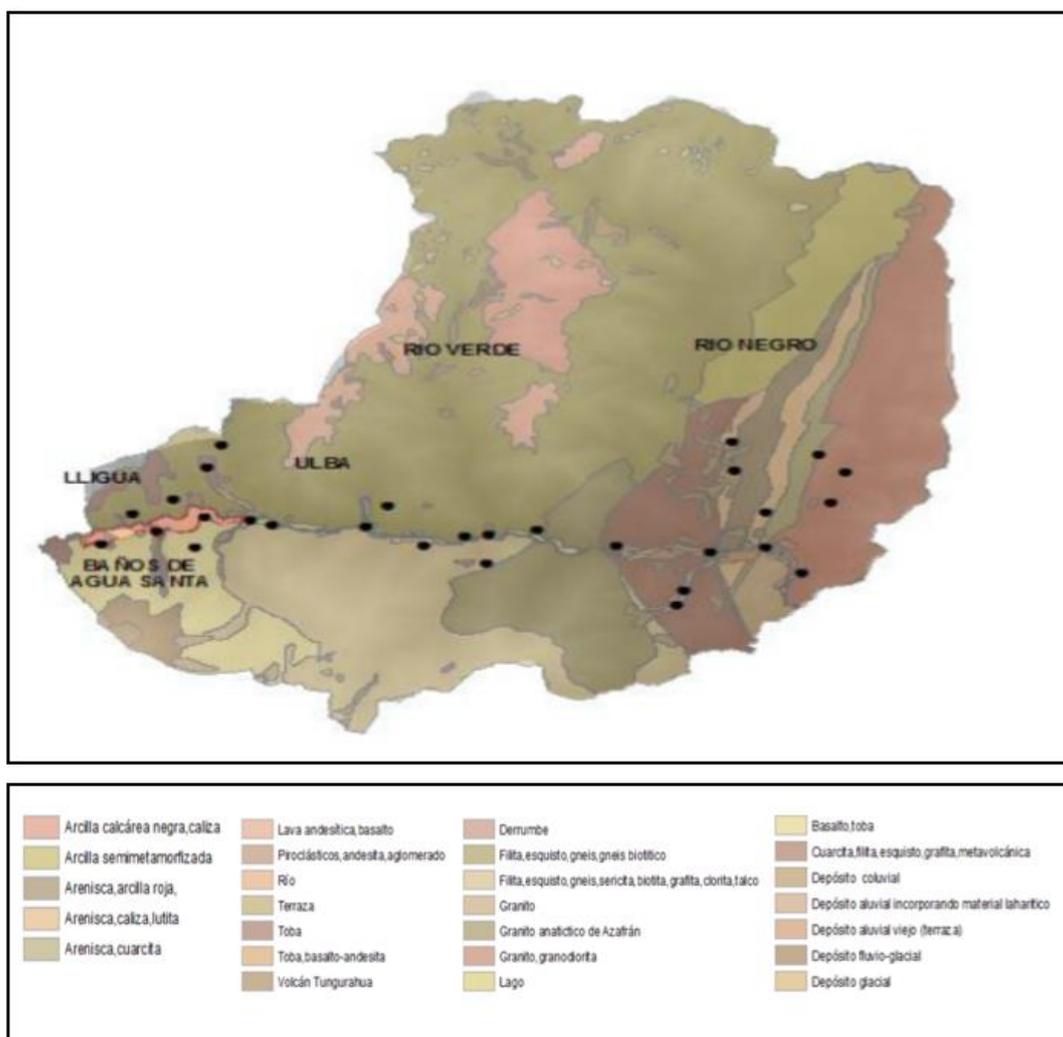


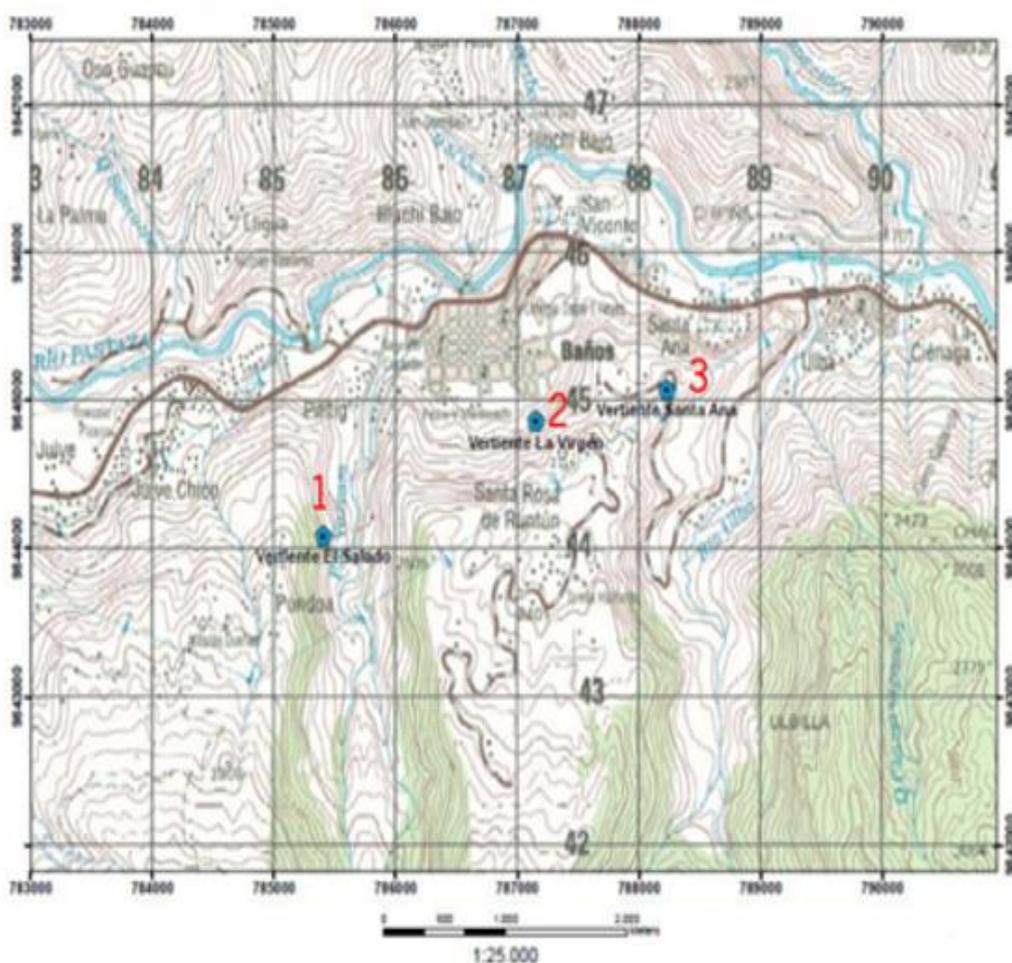
Figura 10. Geología y Topografía del Cantón Baños.

Adaptado de Diagnostico del Cantón Baños de Agua Santa, 2014.

### 3.3. Ubicación del área de estudio

La ciudad de Baños de Agua Santa se encuentra localizada en la Provincia de Tungurahua, a 40 km al este de la ciudad de Ambato y a 170 km de distancia desde Quito. La población de la ciudad es de 20 000 habitantes, la temperatura promedio es de 20° C, y además se encuentra a una altitud 1820 msnm.

Dentro de la ciudad de Baños existe un inventario de 3 vertientes de agua que emergen desde la profundidad del suelo, las aguas provenientes están registradas y autorizadas para el uso de actividades de recreación como es el caso de los balnearios de El Salado, La Virgen y Santa Ana, localizando los puntos en el ingreso de la ciudad, en el centro de la ciudad, y a la salida de la ciudad respectivamente.



*Figura 11.* Ubicación de las vertientes termales dentro de la ciudad de Baños.  
Adaptado de Quinche, 2014.

### 3.4. Fechas de monitoreo

Tabla 1.

*Cronograma de fechas de monitoreo.*

<b>Semana 1</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>
Santa Ana	Miércoles 01/08/2018	
La Virgen	Miércoles 01/08/2018	
El Salado		Jueves 02/08/2018
<b>Semana 2</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>
Santa Ana	Miércoles 29/08/2018	
La Virgen	Miércoles 29/08/2018	
El Salado		Jueves 30/08/2018
<b>Semana 3</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>
Santa Ana	Miércoles 05/09/2018	
La Virgen	Miércoles 05/09/2018	
El Salado		Jueves 06/09/2018
<b>Semana 4</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>
Santa Ana	Miércoles 12/09/2018	
La Virgen	Miércoles 12/09/2018	
El Salado		Jueves 13/09/2018

### 3.5. Puntos de muestreo

#### 3.5.1. Balneario El Salado

El balneario de El Salado se encuentra situado a las afueras de la ciudad en la vía principal de ingreso a la ciudad en las cercanías del río Bascún, la temperatura de sus aguas varía entre los 50-54 °C, y contienen una alta concentración de cloruros, sulfatos y bicarbonatos. La atención al público es todos los días de la semana en horario de 5:00 a.m. a 16:30 p.m.

Tabla 2.

*Información del balneario El Salado*

TERMA/COMPLEJO		EL SALADO	
<b>Provincia</b>	Tungurahua	<b>Localidad</b>	Baños (El Salado)
<b>Propietario</b>	Municipio de Baños	<b>Cuenca Hidrográfica</b>	Pastaza
<b>Uso</b>	Recreacional	<b>Tipo</b>	Volcánica Hipertermal
<b>Proyección</b>	WGS 84	<b>Elevación</b>	1929 m
<b>Zona</b>	17 S	<b>N° de registro de termas</b>	59
<b>ESTE (UTM)</b>	785653	<b>NORTE (UTM)</b>	98444452

Tomado de Senagua, 2013



(a)



(b)

Figura 12. Balneario El Salado.

Adapto de Google Earth, 2018.

(a) Ubicación del balneario El Salado

(b) Piscina cubierta

### 3.5.2. Balneario La Virgen

Este balneario se encuentra ubicado a tres cuadras del centro de la ciudad y también se localiza al pie de la Cascada Cabellera de la Virgen. Sus aguas se caracterizan por su elevada temperatura y su riqueza mineral en azufre, calcio, sodio, potasio y magnesio. El horario de apertura al público es de domingo a domingo en dos horarios uno de 5:00 a.m. a 16:30 p.m. y el segundo de 18:00 a.m. a 21:30 p.m.

Tabla 3.

*Información del balneario La Virgen*

TERMA/COMPLEJO		LA VIRGEN	
<b>Provincia</b>	Tungurahua	<b>Localidad</b>	Baños (La Virgen)
<b>Propietario</b>	Municipio de Baños	<b>Cuenca Hidrográfica</b>	Pastaza
<b>Uso</b>	Recreacional	<b>Tipo</b>	Volcánica Hipertermal
<b>Proyección</b>	WGS 84	<b>Elevación</b>	1832 m
<b>Zona</b>	17 S	<b>N° de registro de termas</b>	60
<b>ESTE(UTM)</b>	787400	<b>NORTE (UTM)</b>	9845225

Tomado de Senagua, 2013



(a)



(b)

*Figura 13. Balneario La Virgen*

Adaptado de Google Earth, 2018.

(a) Ubicación del balneario La Virgen

(b) Piscina número 2 del Balneario.

### 3.5.3. Balneario Santa Ana

El complejo turístico Santa Ana se encuentra ubicado en la salida este de la ciudad con dirección al Puyo en la vía principal, la vertiente de agua termal suministra cantidades menores en comparación a los balnearios mencionados antes, por lo que la atención al público es solo los fines de semana desde el viernes.

Tabla 4.

*Información del balneario Santa Ana.*

TERMA/COMPLEJO		SANTA ANA	
<b>Provincia</b>	Tungurahua	<b>Localidad</b>	Baños (Santa Ana)
<b>Propietario</b>	Municipio de Baños	<b>Cuenca Hidrográfica</b>	Pastaza
<b>Uso</b>	Recreacional	<b>Tipo</b>	Volcánica Hipertermal
<b>Proyección</b>	WGS 84	<b>Elevación</b>	1904 m
<b>Zona ESTE (UTM)</b>	17 S	<b>N° de registro de termas</b>	62
	788477	<b>NORTE (UTM)</b>	9845442

Tomado de Senagua, 2013.



(a)



(b)

*Figura 14.* Balneario Santa Ana.

Adaptado de Google Earth & GAD Municipal del Cantón Baños de Agua Santa, 2018.

(a) Ubicación del balneario Santa Ana

(b) Piscina número 2

### 3.6. Medición de parámetros físicos y químicos

Para la medición de los parámetros se utilizó los equipos descritos en la (ver Tabla 5) los cuales fueron proporcionados por la Universidad de Las Américas y previamente calibrados mediante las metodologías, protocolos y procedimientos internos del laboratorio de la carrera Ingeniería Ambiental para cada uno de los equipos solicitados.

Los parámetros analizados fueron: pH, conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto. Los mismos que fueron tomados de manera in-situ y posteriormente registrados en cada uno de los puntos de medición.

Tabla 5.

*Descripción de equipos utilizados para los parámetros físicos y químicos.*

<b>Parámetro</b>	<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
<b>pH</b>			
<b>Temperatura</b>	Medidor de pH/Temperatura	Milwaukee	MW102
<b>Conductividad eléctrica</b>	Conductímetro	Milwaukee	EC-59
<b>Oxígeno Disuelto</b>	Medidor de oxígeno disuelto	WTW	Oxi-3210

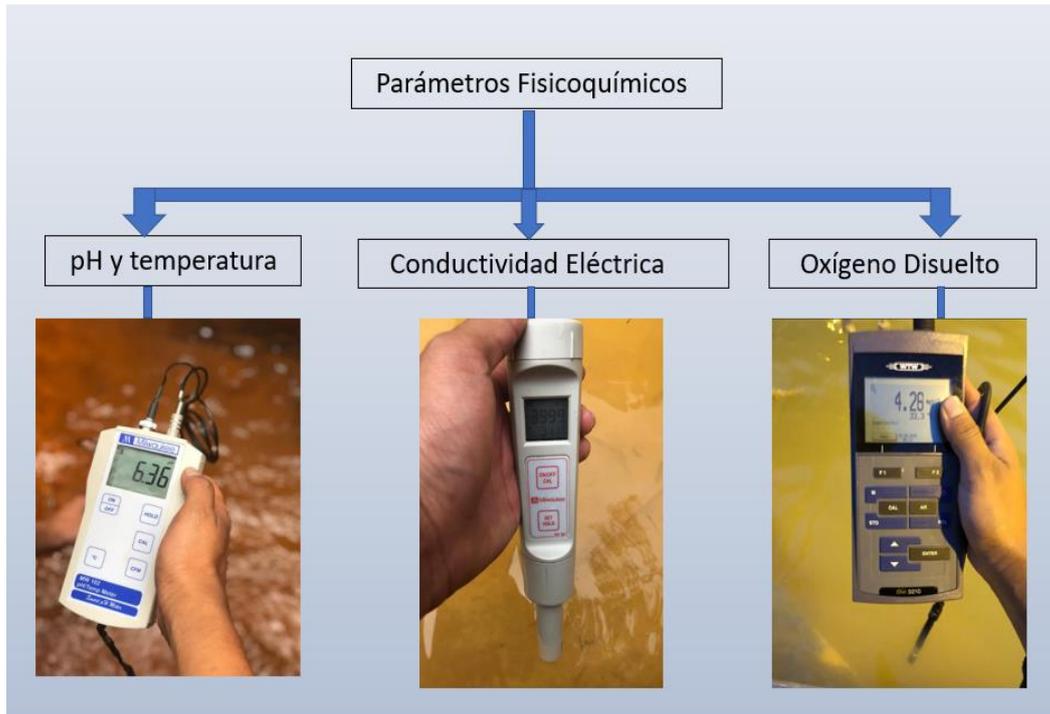


Figura 15. Equipos usados en la medición de parámetros.



Figura 16. Medición de parámetros físicos y químicos.

### 3.7. Recolección de muestras

Para la determinación de radón disuelto en el agua se requirió llenar los viales de 250 ml y 40 ml con el agua de las fuentes y de las piscinas termales que se planteó en el estudio (ver Tabla 6). El muestreo fue un muestreo simple con una réplica por cada punto determinado en las dos piscinas y en la vertiente principal en el caso de Santa y la Virgen (DurrIDGE Company, 2014).

Las botellas son de material de vidrio borosilicatado, se homogenizó la muestra con el agua previamente y seguido se procedió a sumergir la botella y llenarla en el interior asegurándose que no existe la interferencia de la muestra con el aire, ni que exista burbujas de aire en el interior de las muestras. Las muestras fueron recolectadas en las botellas de 250 ml para las piscinas mientras que para las vertientes se utilizaron las botellas pequeñas de 40 ml, ya que las últimas son recomendadas para el análisis de concentraciones altas en agua, para la determinación de radón en agua el equipo RAD7 establece una configuración específica para los volúmenes de agua analizar en los dos casos se debe realizar la configuración previa del protocolo en relación al volumen de agua de la muestra (DurrIDGE Company, 2014).



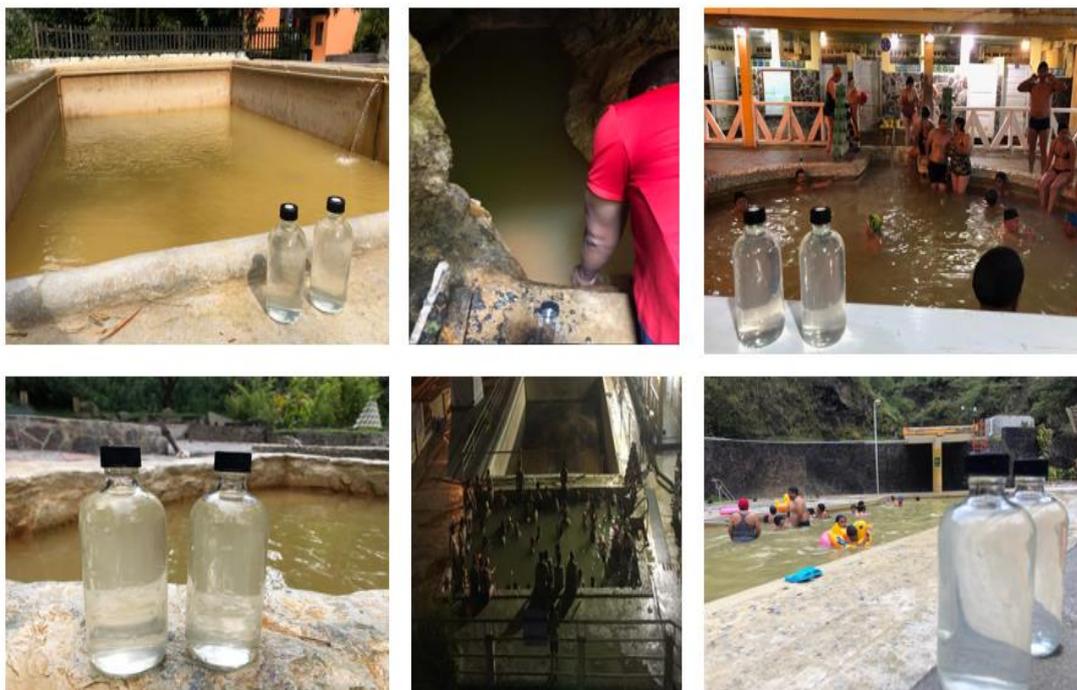
Figura 17. Procedimiento de Muestreo.

Tabla 6.

*Protocolo de análisis establecido por el Equipo*

Protocolo RAD7-H <sub>2</sub> O	Viales/Botellas	Ilustración
Wat-250	250 ml	
Wat-40	40 ml	

Tomado de Manual de RAD7, 2014.



*Figura 18.* Toma de muestras en los puntos seleccionados.

Tabla 7.

*Puntos de muestreo por balneario****El Salado***

<b>Punto</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Muestra</b>	<b>Protocolo</b>
Piscina Abierta	Latitud: 1°24'17.20"S	1	Wat-250
	Longitud: 78°25'57.20"O	1.1	Wat-250
Piscina Cerrada	Latitud: 1°23'54.30"S	2	Wat-250
	Longitud: 78°24'58.90"O	2.1	Wat-250

***La Virgen***

<b>Punto</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Muestra</b>	<b>Protocolo</b>
Piscina 1	Latitud: 1°23'56.60"S	3	Wat-250
	Longitud: 78°25'00.7"O	3.1	Wat-250
Piscina 2	Latitud: 1°23'55.21"S	4	Wat-250
	Longitud: 78°25'3.25"O	4.1	Wat-250
Ojo de agua	Latitud: 1°23'55.60"S	5	Wat-40
	Longitud: 78°25'2.73"O	5.1	Wat-40

***Santa Ana***

<b>Punto</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Muestra</b>	<b>Protocolo</b>
Piscina 1	Latitud: 1°23'47.16"S	6	Wat-250
	Longitud: 78°24'29.06"O	6.1	Wat-250
Piscina 2	Latitud: 1°23'47.00"S	7	Wat-250
	Longitud: 78°24'28.94"O	7.1	Wat-250
Ojo de agua	Latitud: 1°23'47.61"S	8	Wat-40
	Longitud: 78°24'28.99"O	8.1	Wat-40

**3.8. Determinación de la concentración de radón.****3.8.1. Equipo Rad7 y accesorio H2O**

El RAD7 H2O es un accesorio del RAD7 que le permite medir el radón en el agua en una concentración rango de menos de 0.35 Bq/L a más de 14800 Bq/L. El equipo es portátil, funciona con batería, y la medición es rápida. Se puede tener una lectura precisa de radón en el agua dentro de una hora de tomar la muestra. El RAD7 H2O da resultados después de un análisis de 30

minutos con una sensibilidad que iguala o excede la de los métodos de centelleo líquido. El método es simple y sencillo sin la utilización de productos químicos nocivos al momento de la determinación. La impresora inalámbrica muestra una salida grafica mediante el espectro, el cual indica la detección y clasificación por energías de desintegración que se muestran en ventanas como indicadores de radionúclidos detectados.

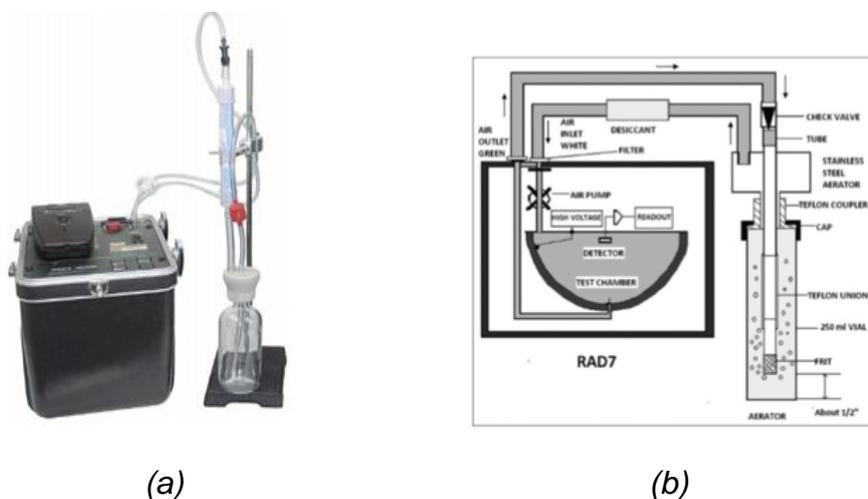


Figura 19. Equipo RAD7

Tomado de Manual de RAD7, 2014.

(a) Equipo RAD7 y accesorio H<sub>2</sub>O

(b) Flujoograma de funcionamiento.

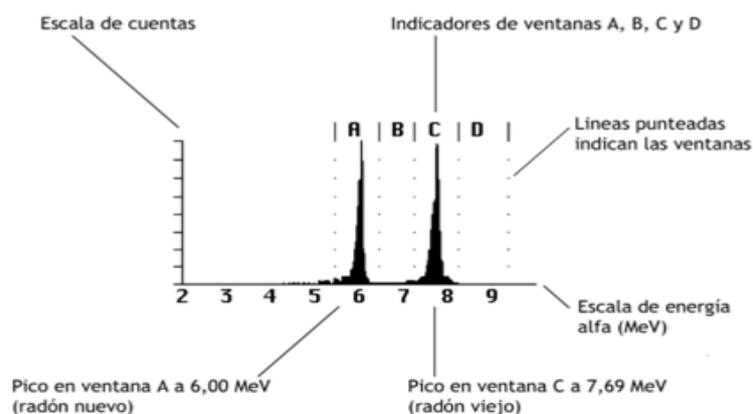


Figura 20. Espectro de resultados del equipo RAD7.

Tomado de Manual de RAD7, 2014.

### **3.8.2. Protocolo de medición de radón en agua**

- 1.- Se debe conectar el equipo con el cable de fuente de energía o se puede trabajar por el equipo con las baterías internas por un periodo de 24 horas.
- 2.- Colocar la impresora portátil en el respectivo lugar, verificando su correcto puesto para la conexión infrarroja.
- 3.- Se debe armar el soporte metálico, ajustando la barrilla metálica a la base y asegurando a la pinza de soporte para el tubo de secado.
- 4.- Colocar el tubo de plástico (40 ml y 250 ml) correspondiente en cada tapa y ajustarlo a las botellas de 40 o 250 ml según como corresponda el caso.
- 5.- Unir la manguera 24" L que contiene la válvula de control a la salida pequeña de la tapa de aireador.
- 6.- Unir la manguera 24" L 1/8 a un filtro RAD7.
- 7.- Ajustar y asegurar el tubo pequeño de secado a la pinza
- 8.- Conectar la manguera que contiene el filtro por su otro extremo al tubo de desecado en la parte superior.
- 9.- Conectar la manguera 3" desde la tapa del aireador a la parte inferior del tubo de desecado.
- 10.- Colocar la conexión entre la manguera y el filtro al INTEL o salida del RAD7.
- 11.- Colocar el otro extremo de la manguera que contiene la válvula al OUTLET o salida del RAD7. (Figura 16).
12. El filtro y la base de la botella deben tener una distancia de 75 mm para las botellas de 40 ml y de 115 mm para las botellas de 250 ml. (Figura 17).
13. Previo a la medición de radón en agua con el equipo montado se debe realizar una purgación para reducir los residuos y disminuir la humedad

relativa del equipo, la humedad debe encontrarse en 6% para poder iniciar la medición en los protocolos 40 ml o 250 ml.

**14.** La purga se realiza con la conexión del tubo grande de secado AL RAD7, donde la manguera que contiene el filtro RAD7 va en la salida INTEL del equipo y el outlet se deja libre solo con la conexión de seguridad que unen el INTEL y el OUTLET, la parte superior del tubo de secado va libre y retirado el tapón de protección.

**15.** Se presiona ENTER en la opción TEST y con las flechas se coloca ENTER en la opción que dice purga, el tiempo recomendado de 10 minutos o si el equipo no ha estado en constante mediciones, se requiere unos 20 a 30 minutos de purgación, hasta que la humedad relativa se encuentre por debajo de los 10% hasta llegar a un 6% donde se puede empezar a realizar la medición. Para parar la purgación se cambia de la opción detener purgación de NO o YES.

**16.** Para verificar que la humedad relativa se encuentra baja y poder empezar la prueba se presiona el botón ENTER en la opción TEST y se elige con las flechas la opción STATUS y se presiona ENTER para observar el estado de los parámetros del equipo.

**17.** Una vez que el RAD7 ha terminado de imprimir el encabezado, vaya a TEST, START y presione ENTER. la bomba funcionará durante cinco minutos, aireando la muestra y entregar el radón al RAD7. El sistema esperará otros cinco minutos. Entonces comenzará contando. Después de cinco minutos, imprimirá una forma abreviada informe. Lo mismo sucederá nuevamente cinco minutos después, y durante dos períodos más de cinco minutos después de eso. Al final de la carrera (30 minutos después del inicio), el RAD7 imprime un resumen, mostrando la lectura promedio de radón de los cuatro ciclos contados, gráfico de barras de las cuatro lecturas, y un acumulativo espectro. El nivel de radón es el del agua, y es calculado automáticamente por el RAD7. Toda la información, excepto el espectro, también se almacena en la memoria, y puede ser impreso o descargado a una PC en cualquier momento.

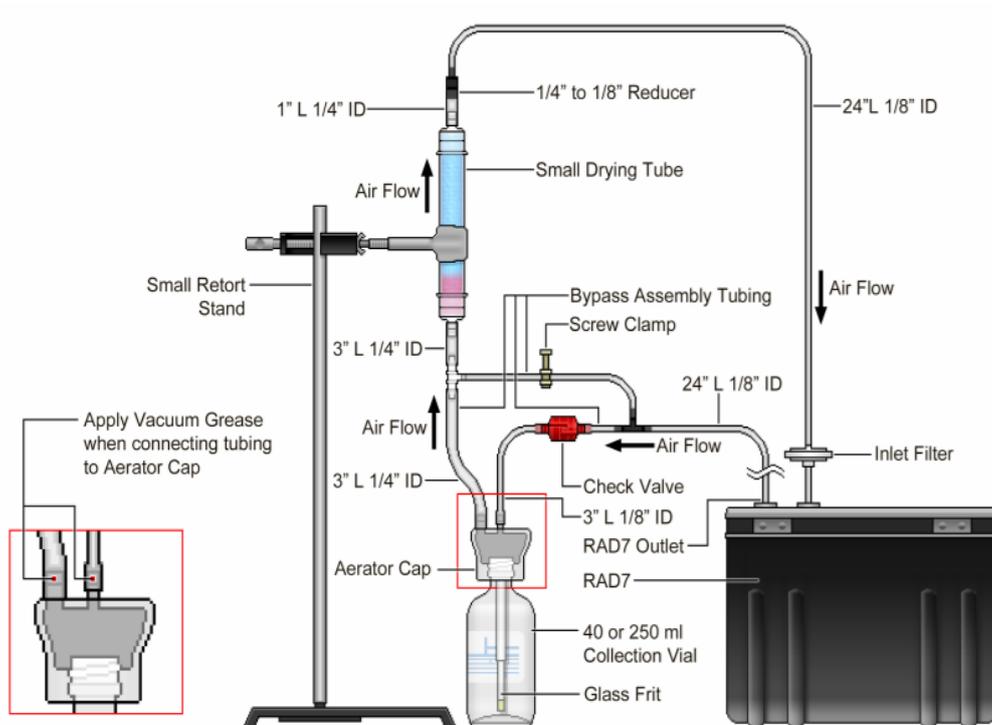


Figura 21. Montaje del equipo RAD7 y su accesorio H<sub>2</sub>O.

Tomado de Manual de RAD7 H<sub>2</sub>O, 2016.

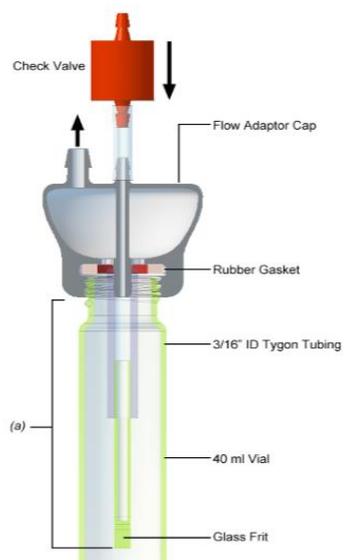


Figura 22. Ensamblaje del filtro y la tapa de aireación.

Tomado de Manual de RAD7 H<sub>2</sub>O, 2016.



*Figura 23.* Medición de radón mediante el equipo RAD7 y su accesorio H<sub>2</sub>O.

### **3.9. Análisis de la concentración de radón en agua**

#### **3.9.1. Software CAPTURE**

Esta herramienta es propia del equipo RAD7 para la transferencia y descarga de las mediciones realizadas hasta una computadora, la serie gráfica y las correcciones que permite realizar en ciertos parámetros, son esenciales a la hora de trabajar con este programa cuando se trata de situaciones aisladas a las condiciones normales del equipo. Se puede realizar monitoreos en tiempo real, representaciones de gráficos (ver Figura 25) y la descarga de los datos mediante conexiones de puertos de USB o sus conectores (ver Figura 24), previamente realizando la instalación del programa en el ordenador. Los datos se pueden descargar especificando el número de medición, un rango de mediciones en específico o todos los datos almacenados en el equipo. Una de las ventajas de esta herramienta radica en la detección por el espectrofotómetro de los elementos radiactivos descendientes del radón (ver Figura 26).

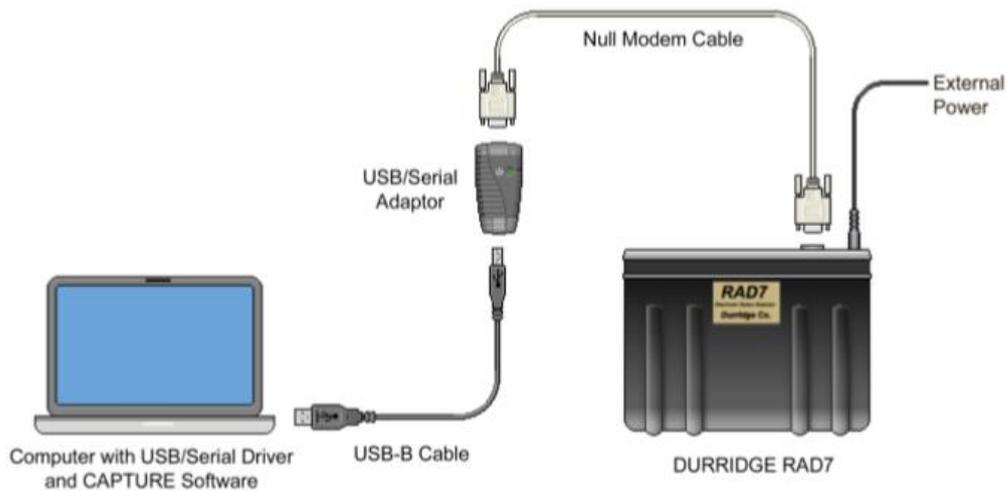


Figura 24. Conexión de equipo hacia el ordenador.

Tomado de Manual de RAD7, 2014.

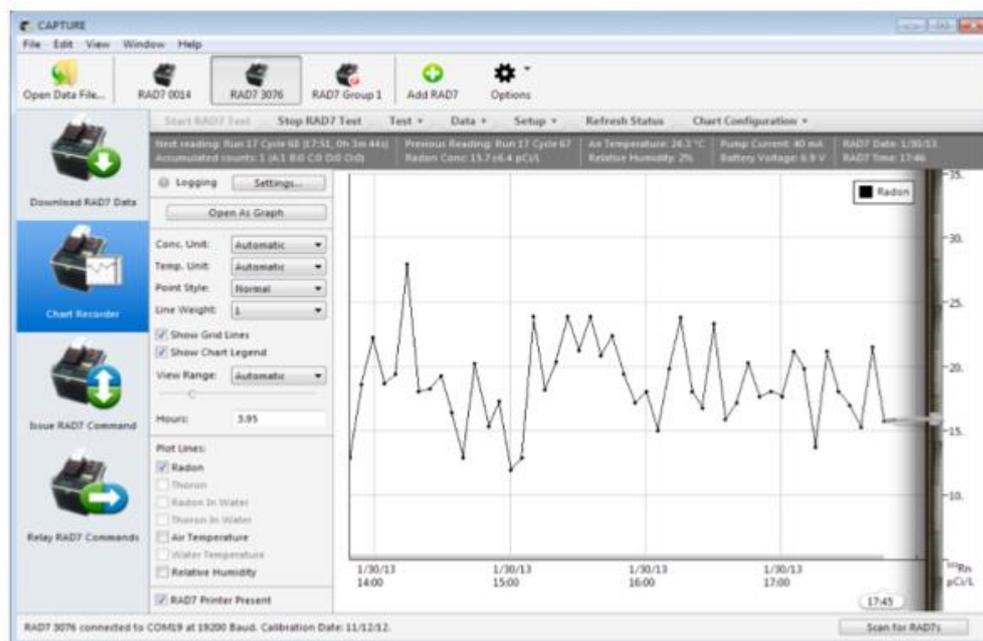


Figura 25. Pantalla del software Capture.

Tomado de Manual de RAD7, 2014.

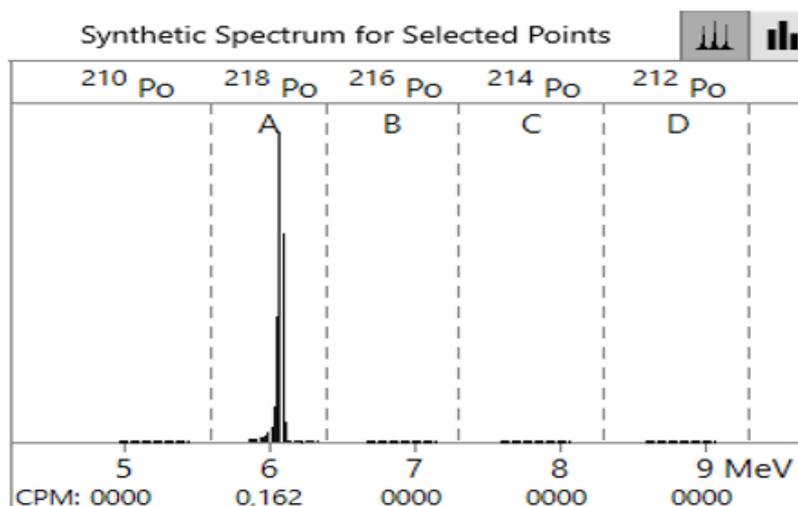


Figura 26. Espectro de detección del software Capture.

Tomado de Manual de RAD7, 2014.

### 3.10. Análisis de la concentración de radionúclidos a través de espectrometría gamma

#### 3.10.1. Espectrómetro gamma GCDX-40180

El detector de Germanio hiper puro (GeHP) de la marca BSI (Baltic Scientific) y modelo GCD-40180X posee un sistema de enfriado por nitrógeno líquido (Deware) y un blindaje de plomo en la parte superior. El semiconductor se basa en la detección y ampliación de las señales eléctricas que se generan a partir de la ionización y son dilucidadas por el analizador de multicanal (MCA), el cual está conectado a un ordenador para la interpretación de datos (Baltic Scientific Instruments, 2007). El detector de radiación gamma se encuentra en el Laboratorio de Vigilancia Ambiental del SCAN, y este a su vez pertenece al Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables en la ciudad de Quito.

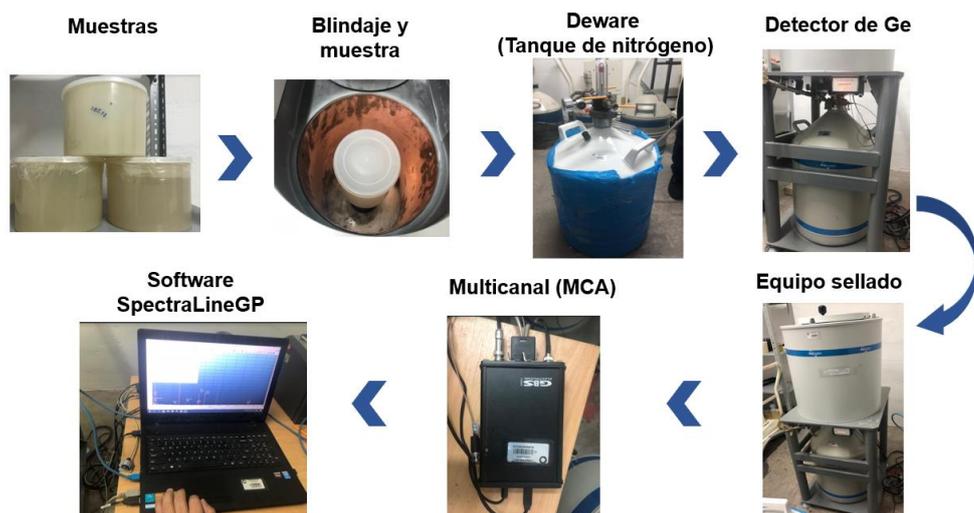


Figura 27. Esquema de proceso de espectrometría gama mediante el equipo de Germanio híper puro (HPGE).

Tabla 8.

Listado de parámetros fundamentales del Espectrómetro gamma GCD-40180X.

N°	Parámetro	Valor
1	Rango de energía de radiación en Kv	5-10000
2	Resolución energía para las energías, no más de:	<875
	122 kV	
	132 kV	<1800
3	Eficiencia relativa para energía 1.33 MeV a (NaI) TI, % (fuente de Co-60 montada a 25 cm por encima del detector)	41.2
	Proporción pico / Compton, no menos de	64:1
	Parámetros pico:	
	FW.1M / FWHM, no más de	1.87
	FW.02M / FWHM, no más de	2.5
4	Voltaje de funcionamiento óptimo de SCD (HV), positivo	1000-4000
5	Factor de conversión, no menos que mV/MV	220
6	Señal del tiempo ( $\mu$ s) al aumentar la tensión, no más de	0.15
7	Señal del tiempo ( $\mu$ s) al disminuir la tensión, no más de	50

Tomado de Baltic Scientific Instruments, s.f.

Tabla 9.

*Principales características técnicas del Espectrómetro gamma GCD-40180X.*

<b>N°</b>	<b>Características Técnicas</b>	<b>Valor</b>
<b>1</b>	Diámetro, (mm)	
	Profundidad, (mm)	61.4
	Espesor de contactos frontales, ( $\mu\text{m}$ )	61.4 - 0.3
<b>2</b>	Espesor de la tapa de fibra de carbón, (mm)	0.8
<b>3</b>	Espacio entre la cara del detector y la Ventana extremo de la tapa, (mm)	8
<b>4</b>	Tasa máxima de energía (MV/s) no menos de	2000 000
<b>5</b>	Función de conversión integral no lineal, % no más de	0.04
<b>6</b>	Fuente de alimentación PA	$\pm 12\text{V}$
<b>7</b>	Resistencia de salida del preamplificador, Ohm	50+/-1
<b>8</b>	Longitud de los cables de conexión, m	3
<b>9</b>	Tiempo de enfriamiento, horas, no más	8
<b>10</b>	Volumen del recipiente Dewar (L)	30
<b>11</b>	Periodo de recarga de nitrógeno líquido (d)	15
<b>12</b>	Dimensión total de la parte componente del espectrómetro (mm), no más de:	629x539x
	- Unidad de detección con blindaje de plomo y mesa de apoyo.	1344x164x 111x145
	MCA-527	

Tomado de Baltic Scientific Instruments, s.f.

### **Preparación de la Muestra**

Las muestras fueron recolectadas en un envase de 1L de color ámbar en cada uno de los puntos de muestreo en una piscina por balneario y cada una con su respectiva muestra de respaldo y fueron trasladadas al laboratorio de SCAN para su codificación y seguidamente se procedió al pesaje del contenedor de

tipo marinelli vacío, a continuación, se procedió con el traspaso del agua al contenedor y se realizó el pesaje correspondiente para conocer su peso neto.

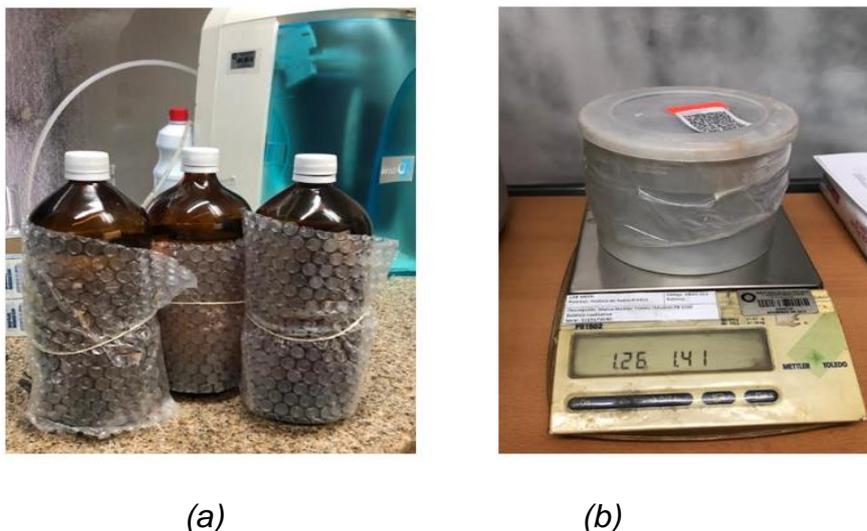


Figura 28. Preparación de muestras

(a) Botellas de color ámbar

(b) Pesaje de las muestras en las geometrías propuestas.

$$P_n = P_f - P_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

- $P_n$  = Peso neto de la muestra, (g)
- $P_f$  = Peso final del marinelli con la muestra, (g)
- $P_i$  = Peso inicial del marinelli vacío, (g)

Tabla 10.

Resumen de Pesos netos de las muestras para el análisis en el espectrómetro gamma.

TERMA	CODIGO SCAN	Peso Neto (g)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)
Santa Ana	ARAD 584 01	910.49	205.68	1.116,17
El Salado	ARAD 584 02	920.24	205.51	1.125,75
La Virgen	ARAD 584 03	920.25	20411	1.124,36

## Análisis de Muestras

El equipo debe presentar las condiciones respectivas con respecto al nivel de nitrógeno, el cual debe sobre pasar el 50% en el Dewar que se encuentra conectado al equipo detector, adicionalmente se debe evidenciar el correcto funcionamiento del multicanal (MCA). Se procedió a la colocación de los marinelli en el detector del espectrómetro y seguido se cerró la puerta del blindaje. Seguidamente se realizó el registro en el software con el código de la muestra a analizar juntamente con el peso neto que previamente fue determinado, después se ingresó el tiempo de análisis que para el estudio que fue de 4 horas y se procedió a ejecutar el análisis, finalmente se realizó la impresión del reporte.

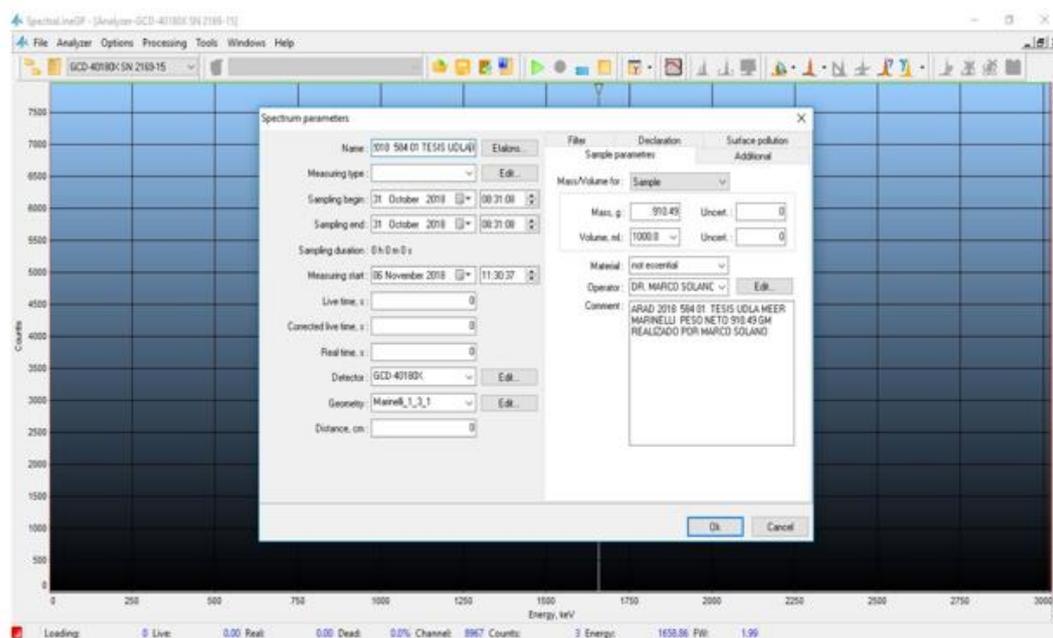


Figura 29. Ingreso de la codificación e información requerida al programa.

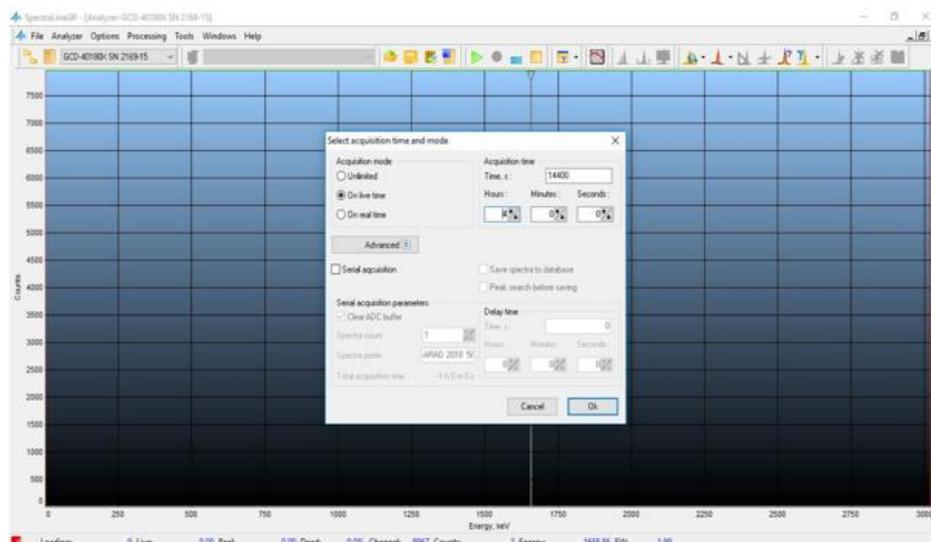


Figura 30. Configuración del tiempo de análisis de la muestra.

### Calibración de energía mediante estándar

El análisis de espectrometría gamma requiere una calibración previa mediante un patrón de estándar (marinelli) suministrado por el Instituto Checo de Metrología, el cual proporciona la información de la energía de los radionúclidos conocidos presentes en el medió (ver Figura 31), para su posterior comparación de energía de los radionúclidos presentes en la muestra analizada. El procedimiento de calibración dura un periodo de 35 minutos previo al análisis de las muestras (SCAN,2017).



Figura 31. Patrón de medición, Geometría defina marinelli.

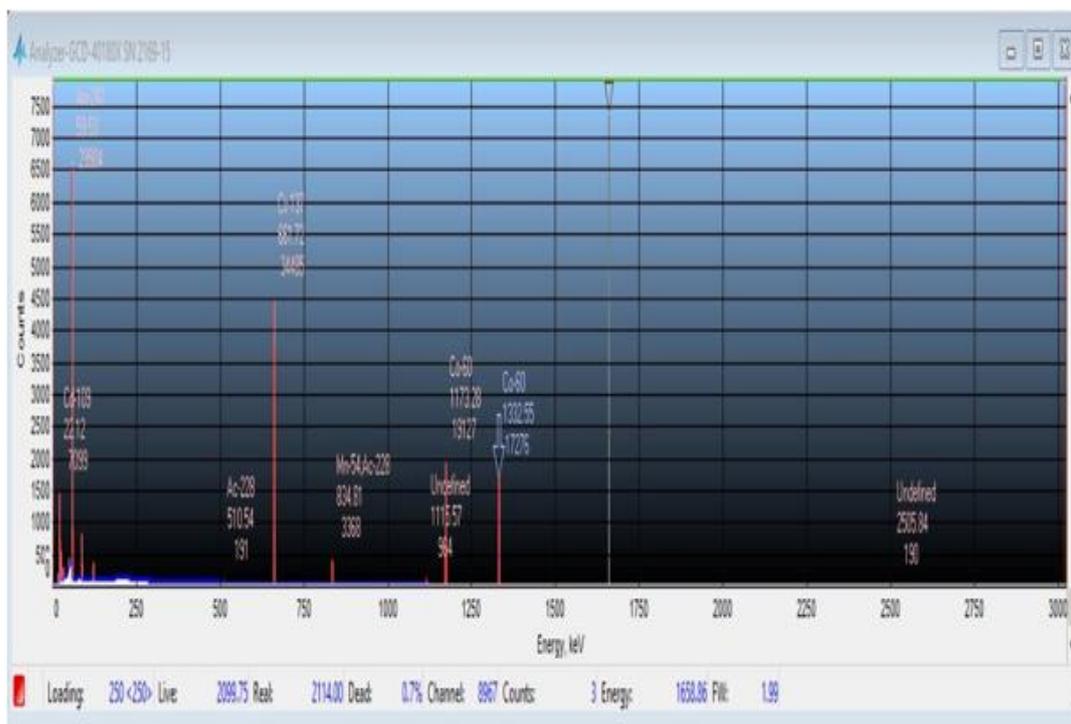


Figura 32. Espectro de radionúclidos y su energía del marinelli calibrador.

### Calibración de eficiencia

La comprensión de la eficiencia de un detector es fundamental a la hora de la determinación de la actividad radiactiva presente en una muestra. La eficiencia entre la muestra y el detector se establece como la relación entre la tasa de conteo y la tasa de emisiones de radiación de un patrón determinado. Se debe considerar para el análisis la geometría a utilizar y la cantidad de muestra disponible que se posea al momento de preparar la muestra en masa o volumen. La geometría puede ser de contenedores tipo Marinelli, filtros o cajas Petri, donde los contenedores tipo Marinelli poseen ventajas de uso, como la minimización de la atenuación de radiación al interior de la muestra y acorta la distancia normal entre la muestra y el detector, generando así aumentar la eficiencia al momento del análisis de espectrometría gamma (Barrera, Romero, & Valiño, 2008).

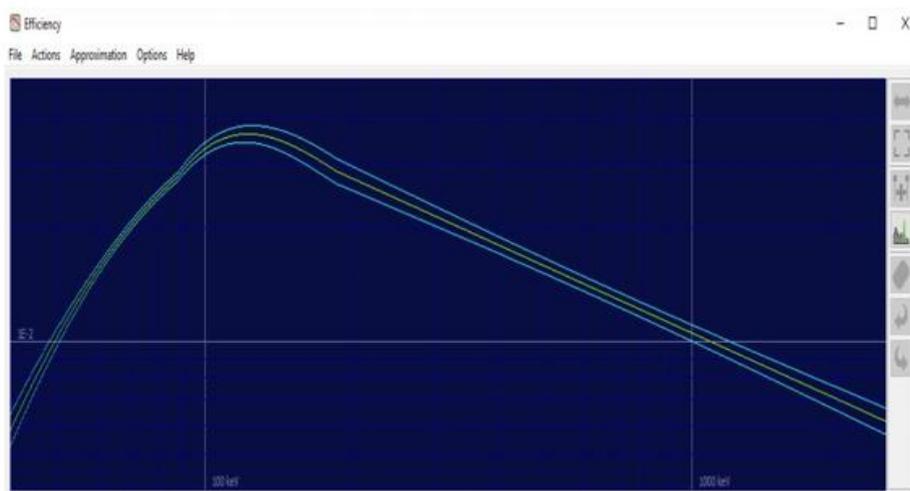


Figura 33. Curva de eficiencia de la energía respecto a la geometría Marinelli. Tomado de Software SpectralineGP, s.f.

### Software SpectraLine Gamma Precision (GP)

El software SpectraLine es la interfaz gráfica la cual requiere de una calibración de la energía y la eficiencia previamente mencionadas. Posteriormente se realiza la identificación de radionúclido y el cálculo de las energías existentes en las muestras. La comparación de los espectros de referencia con los identificados en el análisis permite una visualización completa de los picos detectados.

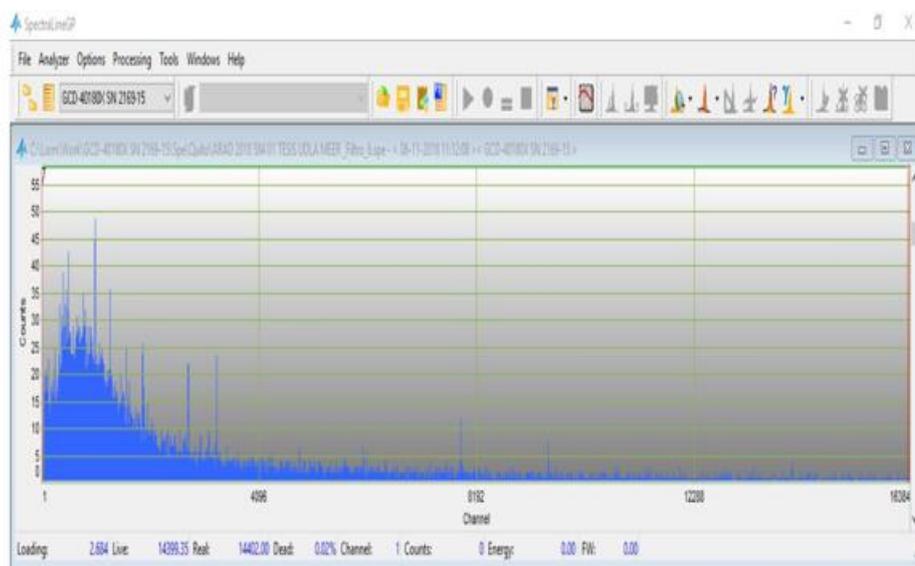


Figura 34. Espectro de análisis para muestras en geometría Marinelli.

Dentro del análisis se debe aplicar la curva de energía en función de la geometría a utilizarse. En este caso la geometría es Marinelli y se realizó la carga del archivo (GCD-40180X-marinelli-2017.efa) de la base de datos del software y se realizó la aplicación de la curva de referencia al espectro para realizar el análisis

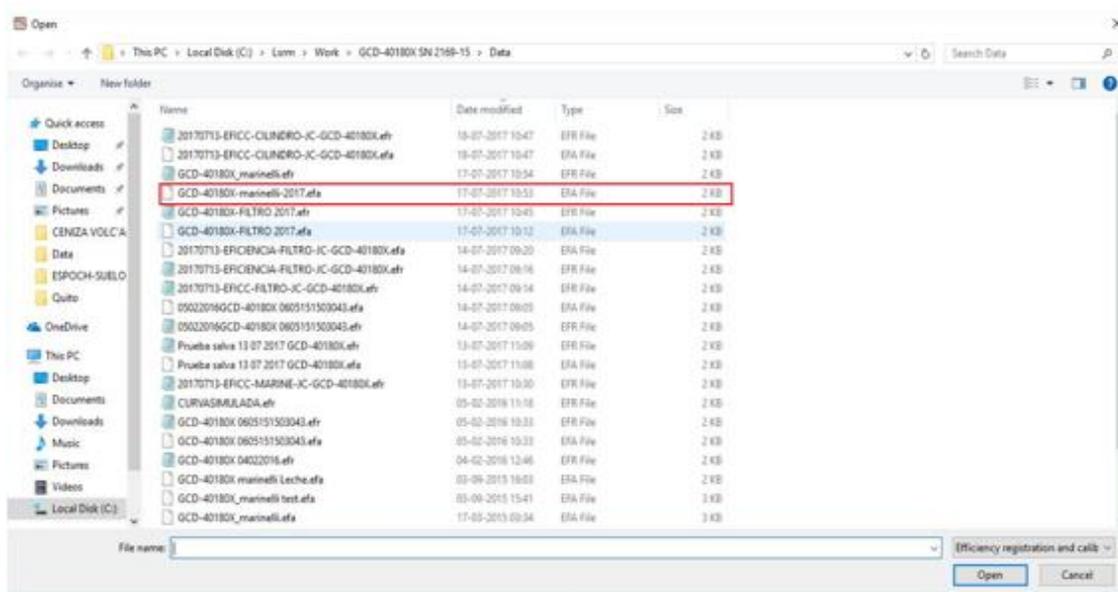


Figura 35. Aplicación de la curva de geometría al espectro de análisis.

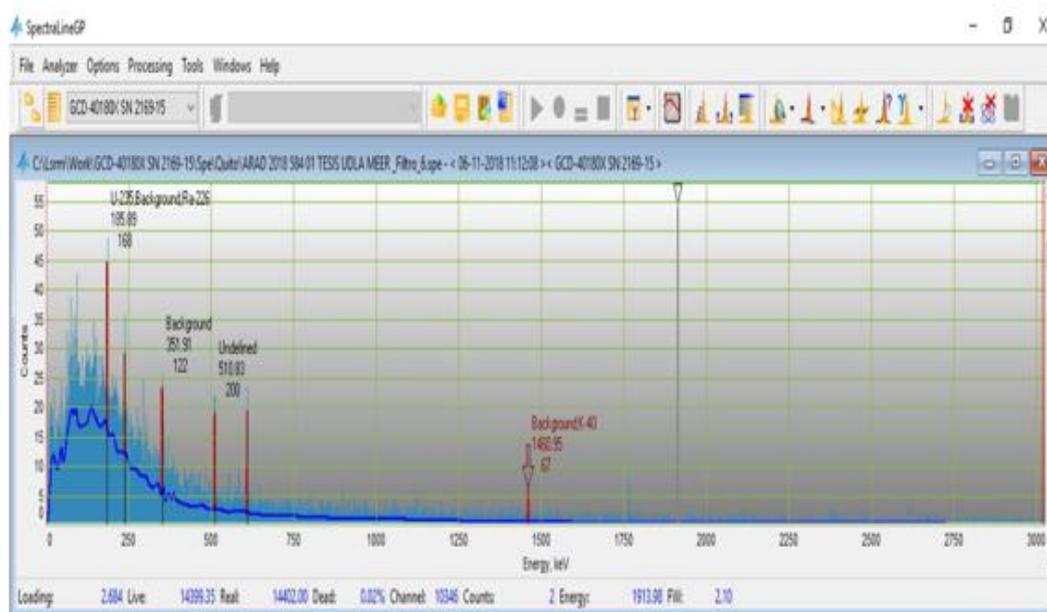
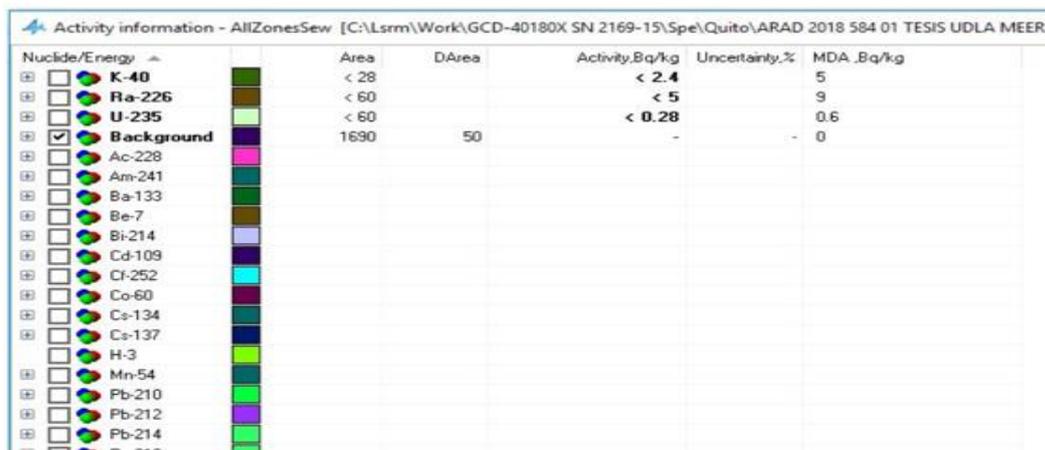


Figura 36. Identificación de espectros en base a los picos de referencia.

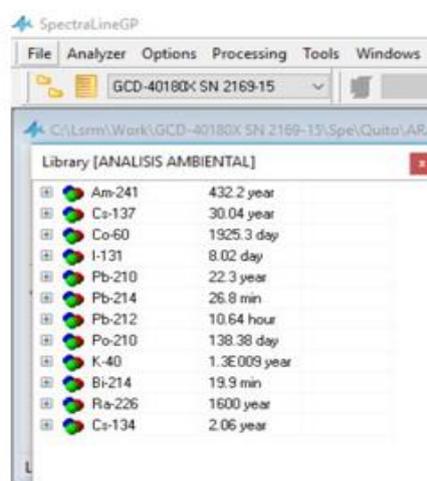
Mediante la identificación y análisis de los espectros se genera la información de la sensibilidad del equipo con respecto a los radionúclidos y su actividad en las unidades correspondientes. La sensibilidad depende del análisis donde en ocasiones se diferencian un radionúclido de otro por una cantidad menor en cuestión de sensibilidad para el reporte de la actividad en estos casos requiere mayor tiempo de análisis.



Nuclide/Energy	Area	DArea	Activity, Bq/kg	Uncertainty, %	MDA, Bq/kg
<input type="checkbox"/> K-40	< 28		< 2.4		5
<input type="checkbox"/> Ra-226	< 60		< 5		9
<input type="checkbox"/> U-235	< 60		< 0.28		0.6
<input checked="" type="checkbox"/> Background	1690	50	-	-	0
<input type="checkbox"/> Ac-228					
<input type="checkbox"/> Am-241					
<input type="checkbox"/> Ba-133					
<input type="checkbox"/> Be-7					
<input type="checkbox"/> Bi-214					
<input type="checkbox"/> Cd-109					
<input type="checkbox"/> Cf-252					
<input type="checkbox"/> Co-60					
<input type="checkbox"/> Cs-134					
<input type="checkbox"/> Cs-137					
<input type="checkbox"/> H-3					
<input type="checkbox"/> Mn-54					
<input type="checkbox"/> Pb-210					
<input type="checkbox"/> Pb-212					
<input type="checkbox"/> Pb-214					
<input type="checkbox"/> Po-210					

Figura 37. Información de las actividades procedentes de los radionúclidos.

El programa SpectraLine GP posee una librería específica que debe ser seleccionada y cargada para el análisis de Material Radiactivo de Origen Natural (NORM's) en el caso de este estudio en la matriz agua.



Nuclide	Half-life
Am-241	432.2 year
Cs-137	30.04 year
Co-60	1925.3 day
I-131	8.02 day
Pb-210	22.3 year
Pb-214	26.8 min
Pb-212	10.64 hour
Po-210	138.38 day
K-40	1.3E009 year
Bi-214	19.9 min
Ra-226	1600 year
Cs-134	2.06 year

Figura 38. Librería de NORM'S para análisis ambiental.

Con el análisis e identificación se realiza el reporte de los resultados en base a los canales y energía detectada mediante una generación de tablas y gráficos.

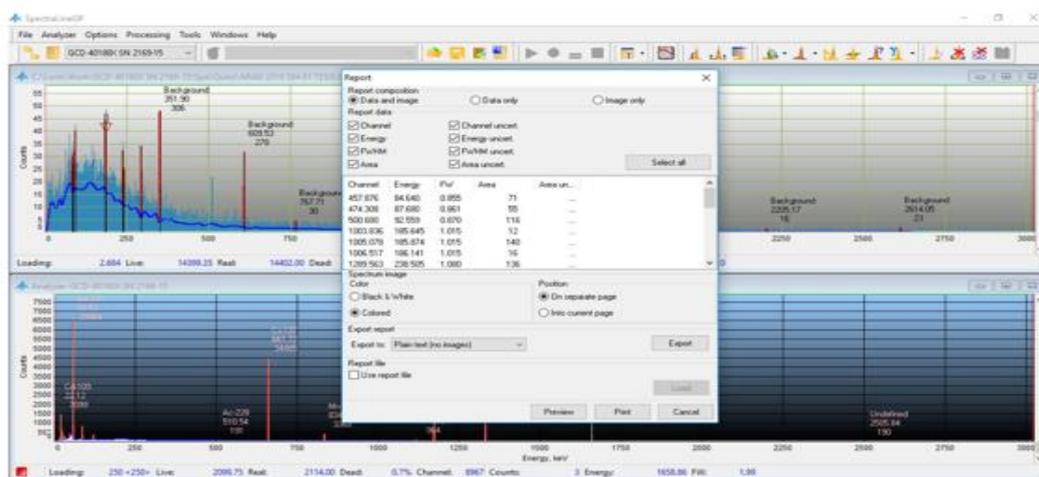


Figura 39. Generación de reporte de análisis del software SpectraLine GP.

### 3.11. Medición de Tasa de Dosis

Para la determinación de la tasa de dosis se utilizó el equipo de la marca LUDLUM en los modelos 3-97 y la sonda Geiger-Müller 44-38, los cuales miden las radiaciones Gamma y Beta en los puntos determinados de medición. El medidor cuenta con su respectivo manual de uso (ver Anexo 6).

#### 3.11.1. Medidor de radiación Gamma Modelo 3-97

El medidor gamma Modelo 3-97 es un equipo portátil que se basa en la medición de radiación mediante un centellador de Yoduro de Sodio (NaI) en el interior del equipo, el cual posee una sensibilidad alta y por ende se consigue determinar los niveles de exposición a radiación ambiental en un amplio rango. La corteza del medidor es de material de aluminio fundido de espesor de 0.23 cm y posee la facilidad de conectar la sonda de Modelo 44-38 para una medición adicional de radiaciones Beta. El equipo posee dos metodologías de medición que requieren ser seleccionadas previo a la medición las cuales son Rápida (F) y Lenta (S), donde para esta última opción la estabilización del equipo se produce a en tiempos de 22 segundos y para la medición Rápida es

de 4 segundos. Los cuatro rangos que posee dentro del umbral de detección son de x0.1, x1, x10, x100 (LUDLUM Measurements, 2016).

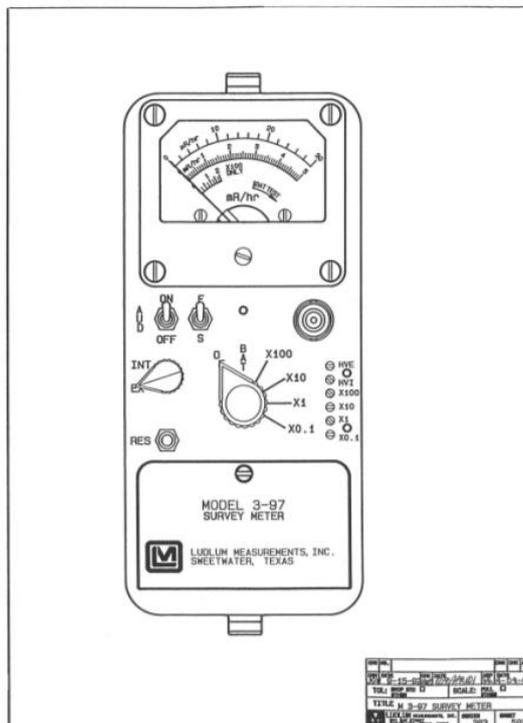


Figura 40. Medidor de Gamma Modelo 3-97.

Tomado de LUDLUM Measurements, 2016

### 3.11.2 . Medidor de radiaciones Beta y Gamma

Este Modelo 44-38 es un detector Geiger-Müller y realiza la función de sonda adaptable para el equipo descrito anteriormente con la finalidad de la detección de partículas Beta y Gamma. Dentro de la sonda existe una cámara de 30 mg/cm<sup>2</sup> de material acero inoxidable y adicionalmente un halógeno enfriador del G-M. Las funciones que presenta esta sonda es la medición con la ventanilla abierta y cerrada, para la detección radiaciones Beta y radiaciones Gamma respectivamente, en cuanto a valores de sensibilidad de la sonda es 1200 CPM (cuentas por minuto) para Beta y 200 keV para Gamma (LUDLUM Measurements, 2016).



*Figura 41.* Medidor de radiación Modelo 3-97 y sonda (Modelo 44-38) LUDLUM.

### 3.12. Cálculo de tasa de Dosis por inhalación

El cálculo de la tasa de dosis efectiva se lo realizó en función de la actividad en Bq/m<sup>3</sup> del radón y se comparó si es posible causa de afectación a la salud según organismos y límites establecidos, el UNSCEAR (Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica) en su anexo B “EXPOSURES FROM NATURAL RADIATION SOURCES” publicada en el 2000, indica que la fórmula para la estimación de la dosis efectiva a partir de una concentración de radón en agua es la siguiente (UNSCEAR, 2000).

$$D_w (\text{inhalation}) = C R_n W * AWR * OCF * EF * DCF$$

**Ecuación 2**

Dónde:

- $D_w$  (*inhalation*) = Dosis efectiva anual debida a inhalación de la liberación de radón al aire del agua (mSv/año)
- $CR_n W$  = Concentración de radón en el agua (Bq/L)
- $AWR$  = factor de la relación de concentración aire-agua ( $10^{-4}$ )
- $OCF$  = ocupación en horas en año (7000h/año)
- $EF$  = Factor de equilibrio radón-progenitores (0.4)
- $DCF$  = el factor de conversión de la dosis de inhalación para Rn-222 ( $9 \times 10^{-9}$  Sv Bq<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>).

### 3.13. Generación de mapa de actividad y exposición radiactiva

La georreferenciación de los balnearios dentro de la Ciudad de Baños de Agua Santa se la realizó en base a toma de coordenadas geográficas y mediante la aplicación de sistemas de información geográficos (ArcMap, Google Earth), se realizó la interfaz gráfica y dinámica de la actividad radiactiva de las fuentes termales y la tasa de dosis que se percibe en los distintos puntos seleccionados para el estudio originando así una línea de base de datos con respecto a la concentración del radón disuelto en aguas termales dentro del país y dentro del Cantón Baños de Agua Santa como es el caso de esta investigación. Los Shapefiles que se utilizaron pertenecen al Sistema Geográfico del Ecuador.

## 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Determinación de la concentración de radón disuelto en el agua mediante el equipo RAD7 y su accesorio H<sub>2</sub>O

#### 4.1.1. Balneario El Salado

#### 4.1.1.1. Análisis de datos equipo RAD7 y parámetros físicos y químicos

Dentro de este balneario se seleccionó dos piscinas: la piscina cubierta, y la piscina al aire libre o abierta, en las cuales se realizó los muestreos para la determinación de radón disuelto mediante el equipo RAD7. Los parámetros físicos y químicos se presentan recopilados en la Tabla 11, donde se observa que la concentración mínima se presentó en el primer punto de muestreo en la piscina abierta del balneario con un valor de 0.02 Bq/L y un valor de 0.5 Bq/L como valor máximo entre todas las mediciones dentro del balneario El Salado.

Tabla 11.

*Resumen de valores de radón en agua y parámetro físicos y químicos.*

Balneario El Salado						
	Punto	Radón (Bq/L)	Temperatura °C	pH	Cond. Elect (uS)	O <sub>2</sub> Disuelto (mg/l)
<b>Semana 1</b>	Piscina Abierta	0.02	33.2	7.27	3999	4.26
	Piscina Cubierta	0.10	42.6	6.56	3999	1.71
<b>Semana 2</b>	Piscina Abierta	0.30	32.1	7.52	3999	3.97
	Piscina Cubierta	0.43	42.3	6.77	3999	1.03
<b>Semana 3</b>	Piscina Abierta	0.30	32	7.52	3999	3.56
	Piscina Cubierta	0.43	42.5	6.71	3999	1.16
<b>Semana 4</b>	Piscina Abierta	0.25	33	7.5	3999	3.53
	Piscina Cubierta	0.53	42.6	6.73	3999	1.42

Nota: <sup>1</sup> Se puede observar que dentro de la primera semana los valores de concentración de radón en agua son menores debido a la técnica empleada de medición a corto tiempo de la recolección de muestra con respecto a la temperatura del agua, donde el nivel de concentración en el equipo RAD7 está en función de este parámetro al momento de realizar el análisis. Para las siguientes semanas las mediciones en los demás puntos se esperaron un tiempo de una hora para realizar la medición. <sup>2</sup> los valores de conductividad eléctrica muestran un valor de 3999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  debido a que ese es el valor máximo apreciable por el equipo Milwaukee EC59.

Las concentraciones menores a 1 Bq/L que se obtuvieron se asemejan a los valores obtenidos en los análisis realizados por Jalili-Majarehin, Behtash, & Rezaei-Ochbelagh (2012), en donde se obtuvo un valor promedio de 1.1 Bq/L en fuentes termales en las cercanías de un volcán en la provincia de Ardabil en Irán. En el caso del balneario El Salado el valor promedio para los dos puntos de medición durante las cuatro semanas de medición es de 0.31 Bq/L

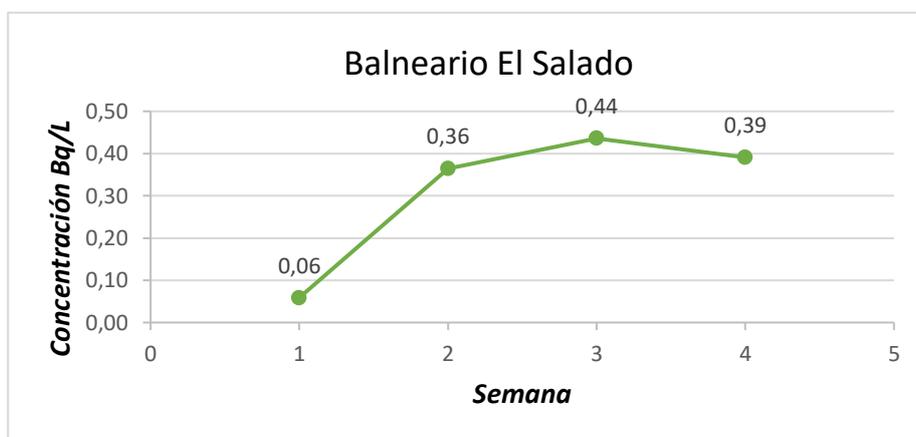


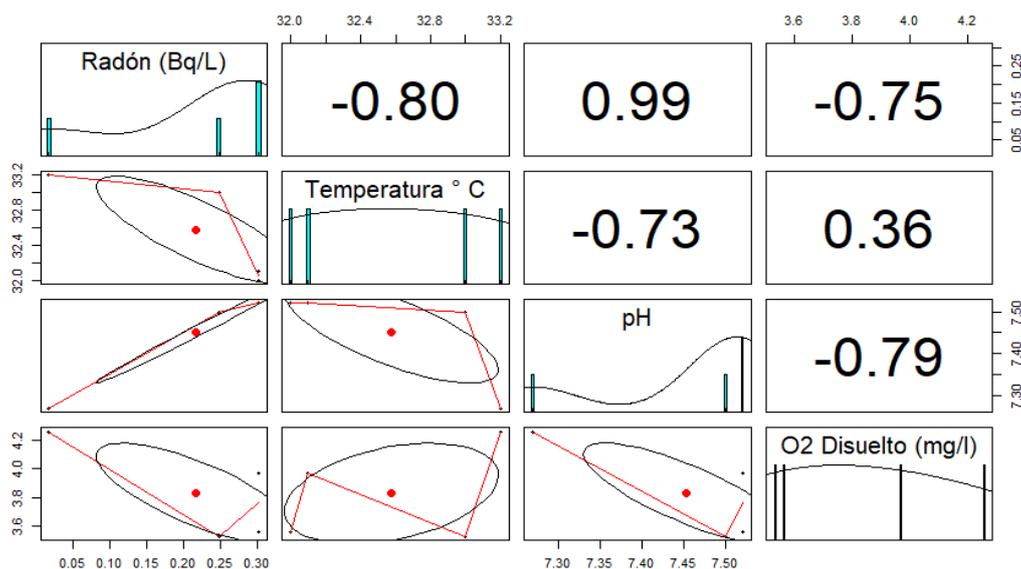
Figura 42. Promedio de concentración de radón disuelto semanal en El Salado.

Dentro del análisis de los parámetros se puede verificar que la caracterización de las piscinas (ver Figura 45 y 46), por su temperatura se define como: termales (mayor a 30°C) e hipertermales (superior a 40° C) según la clasificación del INAMHI (2013). La solubilidad del radón se encuentra en función de la temperatura por medio del coeficiente de Ostwald como lo menciona Rábago (2013) en su investigación. Para el estudio realizado en El Salado la temperatura registrada fue en la que se encontraba el agua en el momento del muestreo más no la del momento del análisis, con lo que la relación de concentración de radón disuelto y la temperatura tiene una significación menor con respecto a los demás parámetros.

La conductividad eléctrica registrada en este balneario sobrepasa el límite máximo detectable por el conductímetro estableciendo que las dos piscinas muestreadas poseen valores superiores a 4000  $\mu\text{s/cm}$ , como lo afirma Balarezo (2015) dentro de su investigación de aguas termales del Ecuador. Los valores de conductividad eléctrica en este balneario llegaron hasta 9000  $\mu\text{s/cm}$  entre sus valores pico.

Las correlaciones obtenidas mediante el análisis de datos en el software Rstudio muestran que el pH posee una correlación significativa del 0.99 con respecto a la concentración de radón disuelto (ver Figura 43) en la piscina Abierta y una correlación del 0.91 en el caso de la piscina Cubierta (ver Figura 44). En referencia Kasić A, et al (2016) establecen que la concentración de radón disuelto es mayor cuando los valores de pH disminuyen la neutralidad ( $\text{pH} < 7$ ), en el caso de las piscinas el pH de la piscina Cubierta es menor al de la piscina Abierta, por lo que la concentración de radón disuelto es mayor en la piscina Cubierta,

La baja concentración de radón disuelto en la denominada piscina Abierta se puede atribuir al fenómeno de lluvia, ocasionando una dilución dentro de la piscina y de esta forma reduciendo un cierto porcentaje la concentración del radón. Por otra parte, en la piscina con cubierta existe una alimentación directa desde el fondo de la piscina, lo que conlleva un constante ingreso de flujo de agua hipertermal a la piscina.



*Figura 43.* Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de Radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina abierta del balneario El Salado.

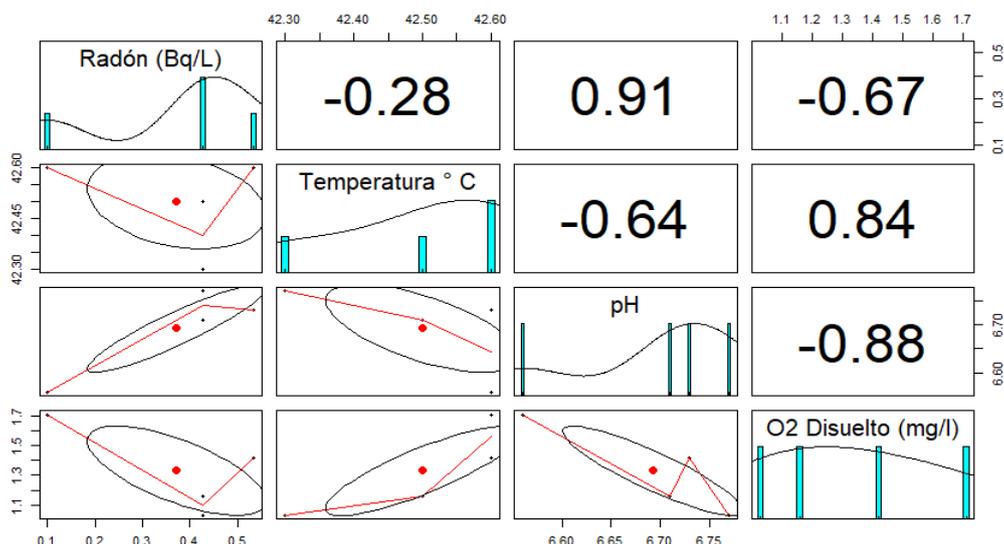


Figura 44. Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina abierta del balneario El Salado.

Las relaciones entre el pH y la concentración promedio semanal de las dos piscinas de este balneario como se puede observar en las Figuras 47 y 48, tuvieron mayor concordancia que los demás parámetros considerados.

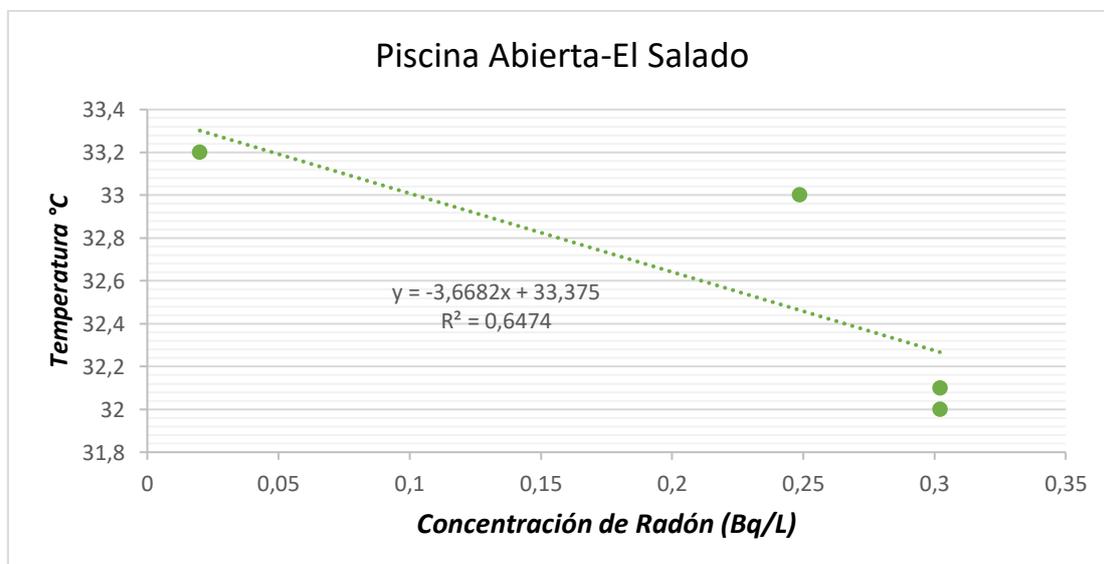


Figura 45. Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Abierta.

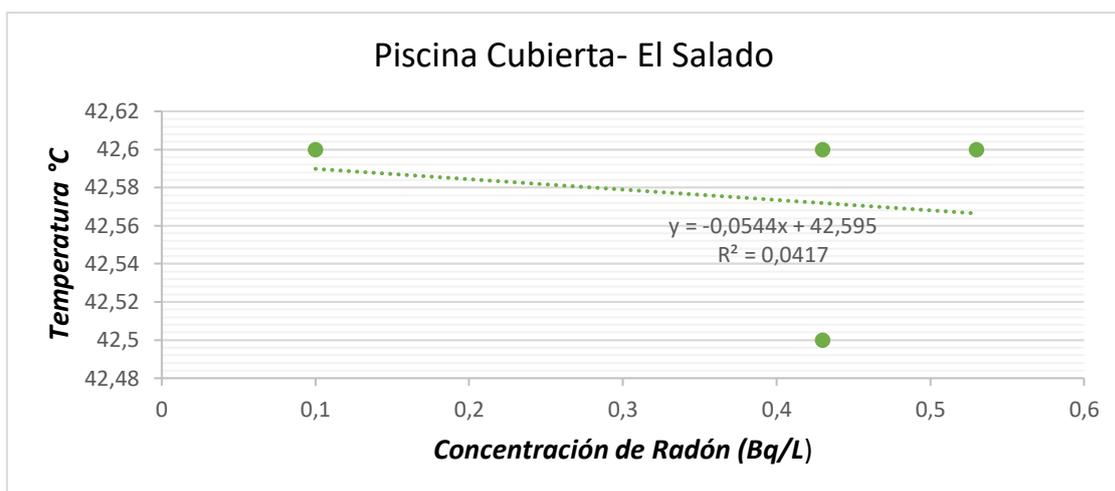


Figura 46. Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Cubierta.

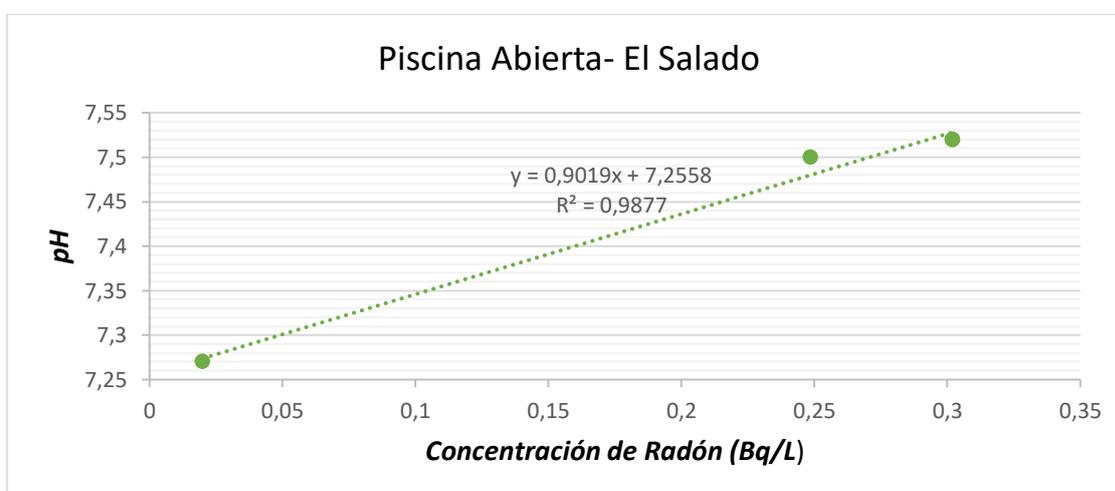


Figura 47. Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Abierta.

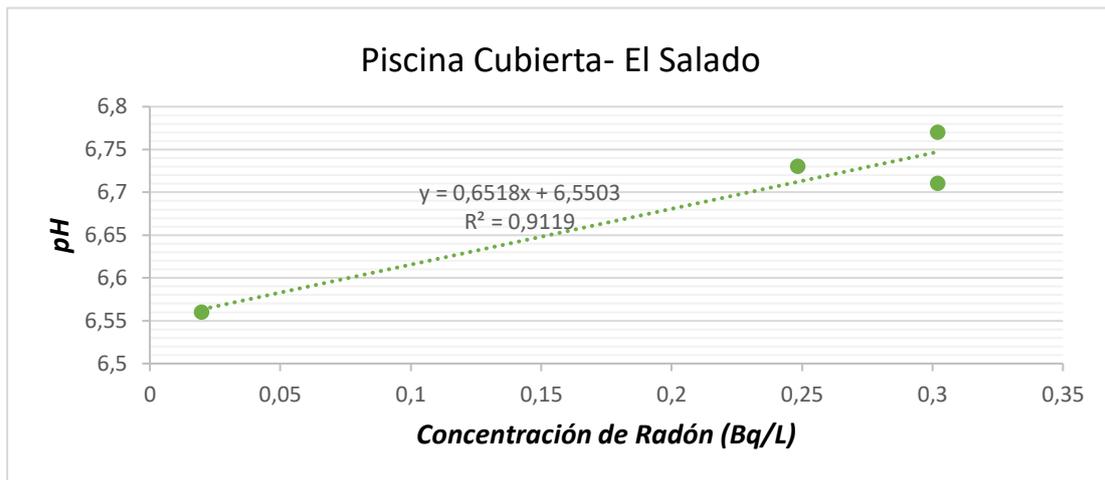


Figura 48. Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Cubierta.

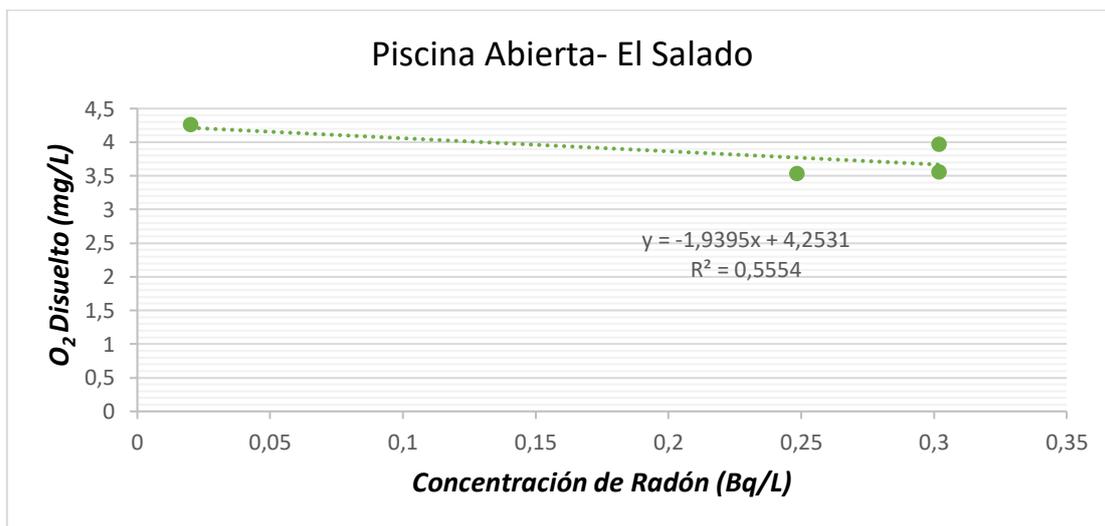


Figura 49. Relación entre O<sub>2</sub> disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Abierta.

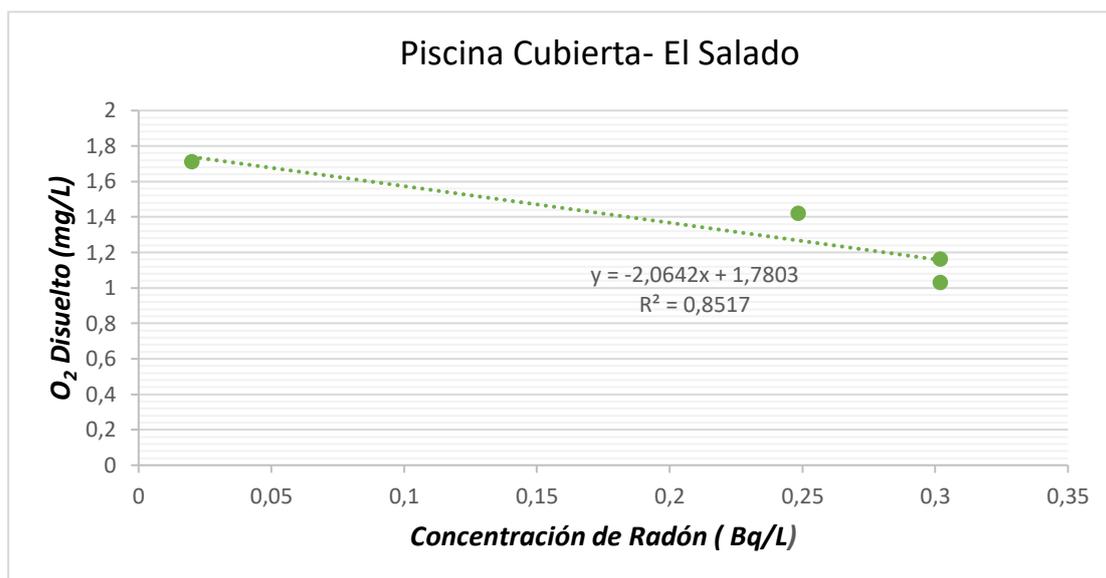


Figura 50. Relación entre O<sub>2</sub> disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina Cubierta.

#### 4.1.1.2 Resultados de Espectrometría Gamma

Dentro del proceso de espectrometría gamma se logró detectar los radionúclidos presentes en las muestras recolectadas, como es el caso del balneario El Salado la muestra fue recolectada de la piscina Cubierta para el respectivo análisis.

Tabla 12.

*Resumen de radionúclidos y su actividad de la muestra El Salado mediante espectrometría gamma en el laboratorio de la SCAN.*

<b>ARAD 2018- 584 02</b>			
<b>Configuración:</b> GCD-40180X SN 2169-15			
<b>Tiempo de medición:</b> 14402,00			
Radionúclido	Área del fotópico	Actividad (Bq/L)	Error relativo %
K-40	<30	< 0.0025	
Rn-222	230	149	16

Dentro de espectro gamma del programa SpectraLine se puede apreciar la detección del radionúclido Rn-222 en el rango de energía de 500 keV (ver Figura 51), así como el número de cuentas que el equipo realizó para la identificación de su energía. Dentro de la muestra analizada solo diferentes radionúclidos no sobrepasaron la actividad mínima detectable (MDA) y de esta manera se presentan varios espectros de background.



Figura 51. Espectro de radionúclidos detectados en la muestra.

#### 4.1.1.3 Tasa de dosis LUDLUM

Los datos recolectados mediante el detector LUDLUM se recopilan en la Tabla 13, Dentro del balneario se realizó la medición de radiación natural de fondo y de radiación gamma y beta en 3 locaciones alrededor de las dos piscinas. El equipo LUDLUM modelo M 3-97 con sus unidades de medición (Kilo Cuentas Por Minuto) KCPM mientras que las unidades para la sonda Geiger Müller modelo 44-38, se encuentra en ( $\mu\text{Sv/h}$ ). Con una medición máxima de tasa de dosis de 2.1 KCMP y 17 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) alrededor de la piscina Cubierta.

Tabla 13.

*Reporte de medición de tasa de dosis mediante el equipo LUMDUM en las piscinas del balneario El Salado.*

<b>Cuerpo de agua</b>	<b>Puntos de medición</b>	<b>Gamma (KCPM)</b>	<b>Gamma Beta (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
	<b><i>Radiación de Fondo</i></b>	1.7	0.2
Piscina Abierta	a	1.9	0.5
	b	2.1	1
	c	1.8	1
Piscina Cubierta	a	2.0	17
	b	2.1	16
	c	2.2	6

#### 4.1.2. Balneario La Virgen

##### 4.1.2.1. Análisis de datos equipo RAD7 y parámetros físicos y químicos

El balneario La Virgen es el más visitado por turistas por su cercana ubicación en el centro de la ciudad, la mezcla de agua proveniente de la vertiente natural por medio de una fisura en la geología de la zona (agua termal) y del agua natural de la cascada La Cabellera de la Virgen se las clasifican como aguas termales Sulfatadas, Magnésicas y Cálcidas según como hace referencia Carrera & Guevara (2016) en su investigación de caracterización hidro geoquímica de termas naturales dentro del Ecuador. Las dos piscinas no poseen ningún tipo de cubierta por lo que se las considera abiertas.

Los valores tanto de la concentración de radón y los parámetros físicos y químicos medidos en el estudio se encuentran en la Tabla 14, donde se observa que la concentración mínima se presentó en el primer punto de muestreo que fue la piscina 1 en la primera semana, obteniendo un valor de 0.04 Bq/L de radón disuelto en agua y un valor de 2.7 Bq/L en la vertiente natural en la semana 2.

Tabla 14.

*Resumen de valores de radón en agua y parámetro físicos y químicos en La Virgen.*

<b>Balneario La Virgen</b>					
	<b>Punto</b>	<b>Radón (Bq/L)</b>	<b>Temperatura ° C</b>	<b>pH</b>	<b>O2 Disuelto (mg/l)</b>
<b>Semana 1</b>	Piscina 1	0.04	38.6	6.7	2.34
	Piscina 2	0.11	41.3	7.2	3.16
	Vertiente (ojo de agua)	0.20	55.2	6.39	0.16
<b>Semana 2</b>	Piscina 1	0.77	38.2	6.5	2.85
	Piscina 2	0.59	40.8	6.92	3.11
	Vertiente (ojo de agua)	2.70	55.2	6.39	0.16
<b>Semana 3</b>	Piscina 1	0.55	37.8	6.8	2.76
	Piscina 2	0.34	42.5	7.6	3.02
	Vertiente (ojo de agua)	2.00	52.6	6.5	0.1
<b>Semana 4</b>	Piscina 1	0.41	39.7	6.9	2.03
	Piscina 2	0.75	42.9	7.25	2.3
	Vertiente (ojo de agua)	2.20	52.4	6.49	0.12

Los valores de concentración de  $Rn_{222}$  disuelto en la primera semana registrados fueron inferiores por la técnica de medición mencionada en los resultados del primer punto de muestro (Figura 42 y Figura 52), en las semanas siguiente tanto en este punto de medición como en demás la concentración se estabilizó en sus concentraciones, como es el caso de este balneario el cual registró una concentración de 0.89 Bq/L entre sus tres puntos de medición en las 4 semanas de medición.

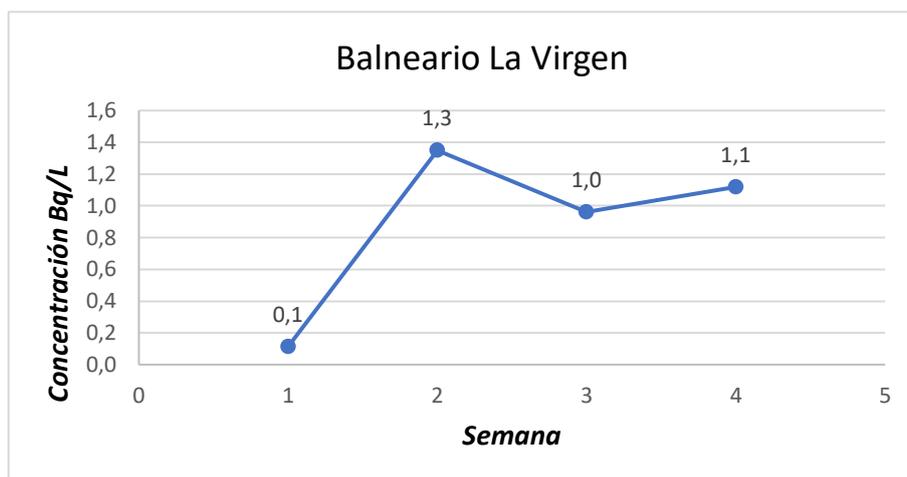


Figura 52. Promedio de concentración de radón disuelto semanal La Virgen.

El Oxígeno disuelto es menor cuando existen condiciones de altas temperaturas como es el caso de la vertiente del balneario La Virgen, lo contrario para las dos piscinas, donde existe la mezcla de agua fría proveniente de la cascada, la misma que contiene una mayor cantidad de oxígeno disuelto como afirma Meléndez & Nuño (2006), en el estudio de acuíferos y aguas termales en Asturias. Las correlaciones en Rstudio con respecto a los parámetros y la concentración se obtuvo una correlación positiva de 0.63 con respecto al Oxígeno disuelto en la primera piscina (ver Figura 53).

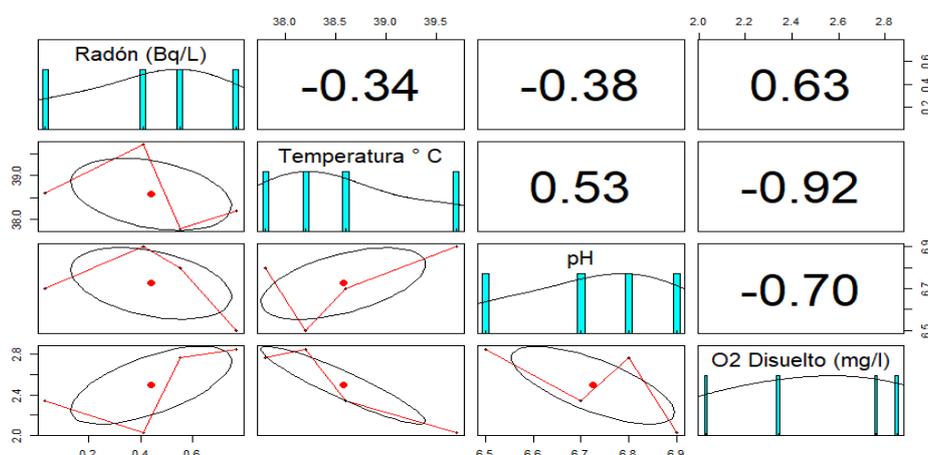
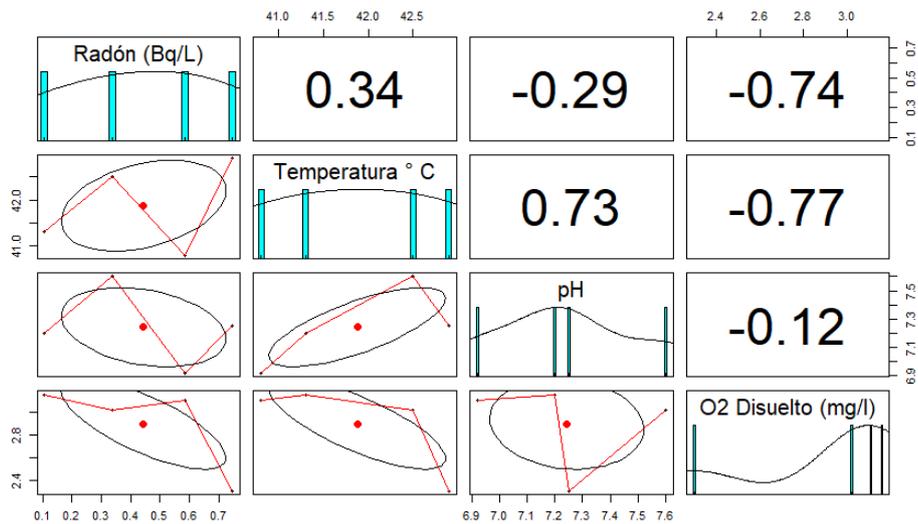
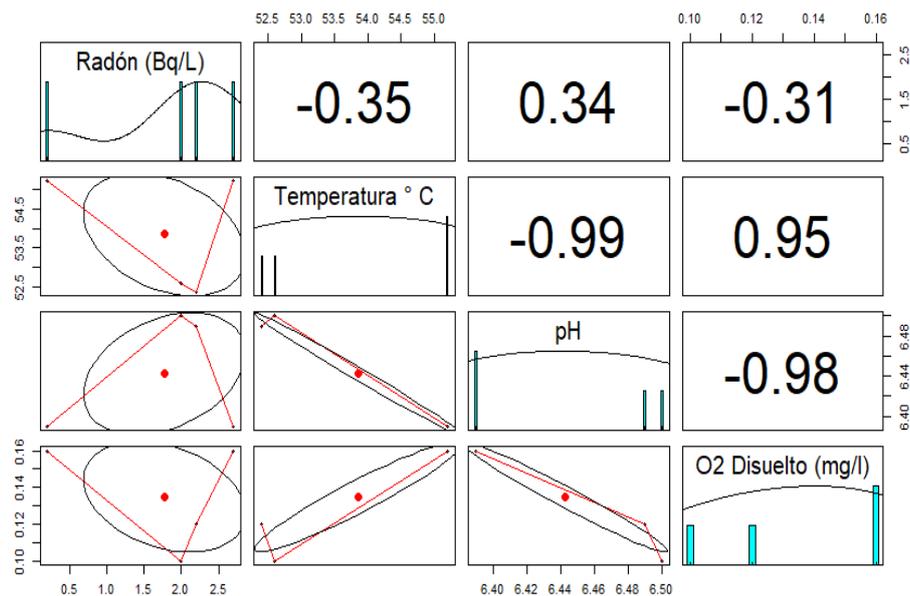


Figura 53. Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina 1 del Balneario La Virgen.



*Figura 54.* Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina 2 del Balneario La Virgen.



*Figura 55.* Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la vertiente del Balneario La Virgen.

Mediante el análisis de las relaciones por punto y cada uno de los parámetros se puede evidenciar una relación considerable en cuanto a las concentraciones de radón con el O<sub>2</sub> disuelto en los tres puntos de medición como se puede apreciar en las Figuras 62, 63 y 64.

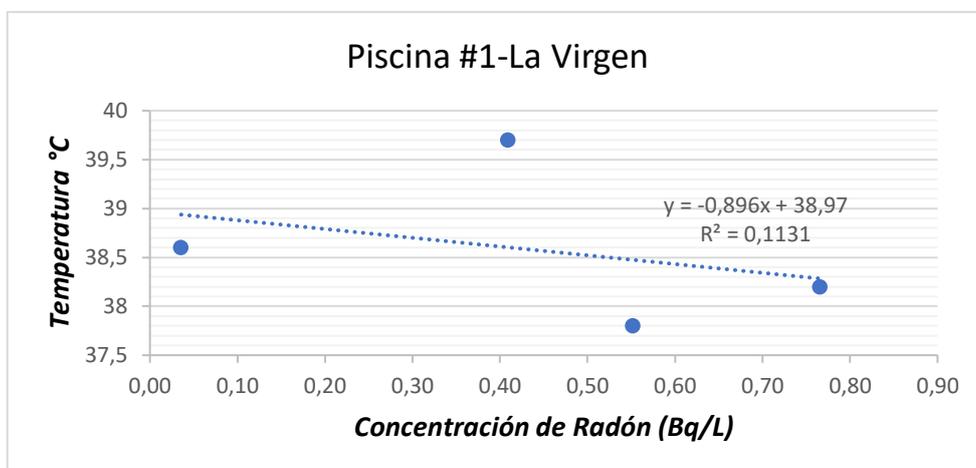


Figura 56. Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #1.

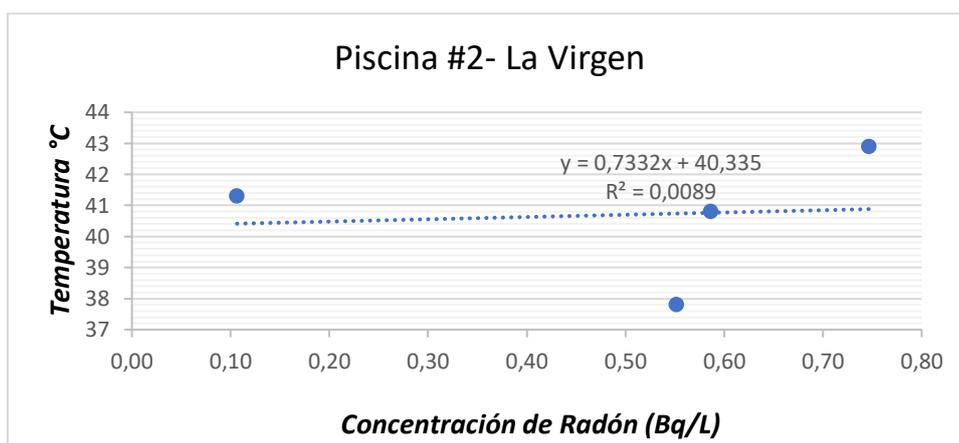
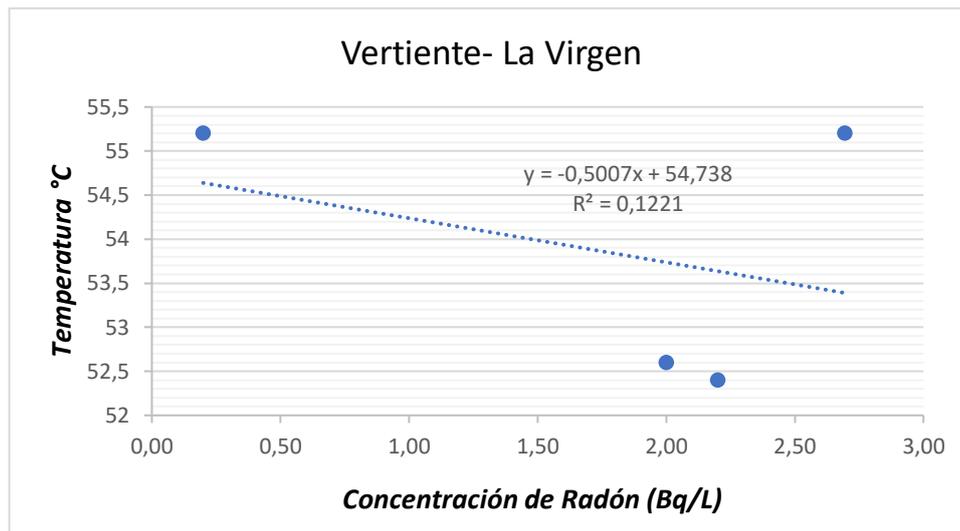
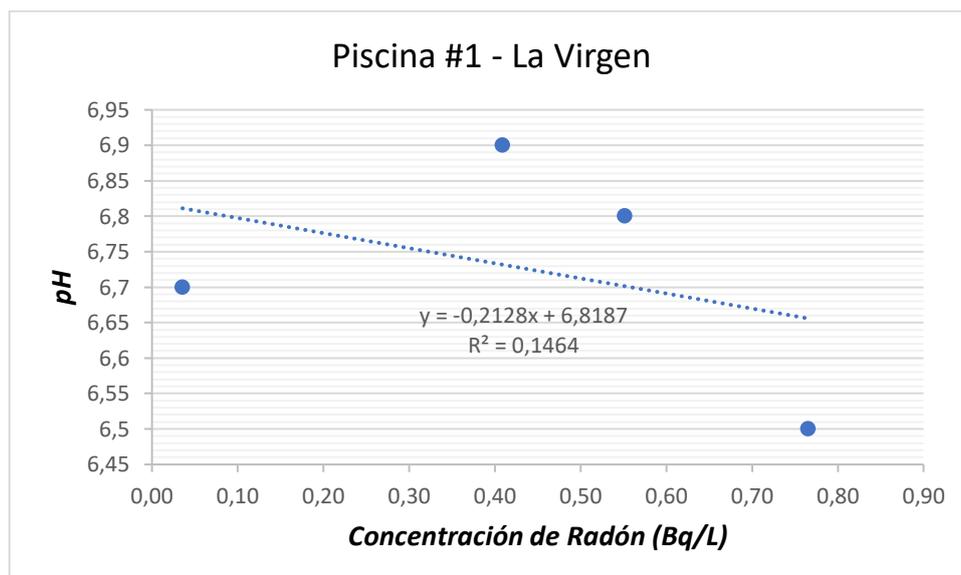


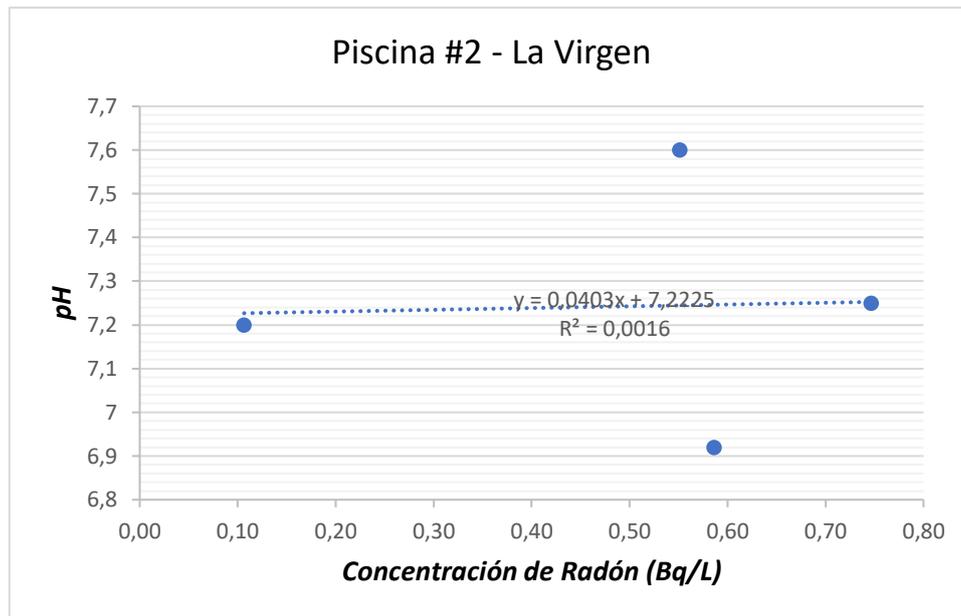
Figura 57. Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.



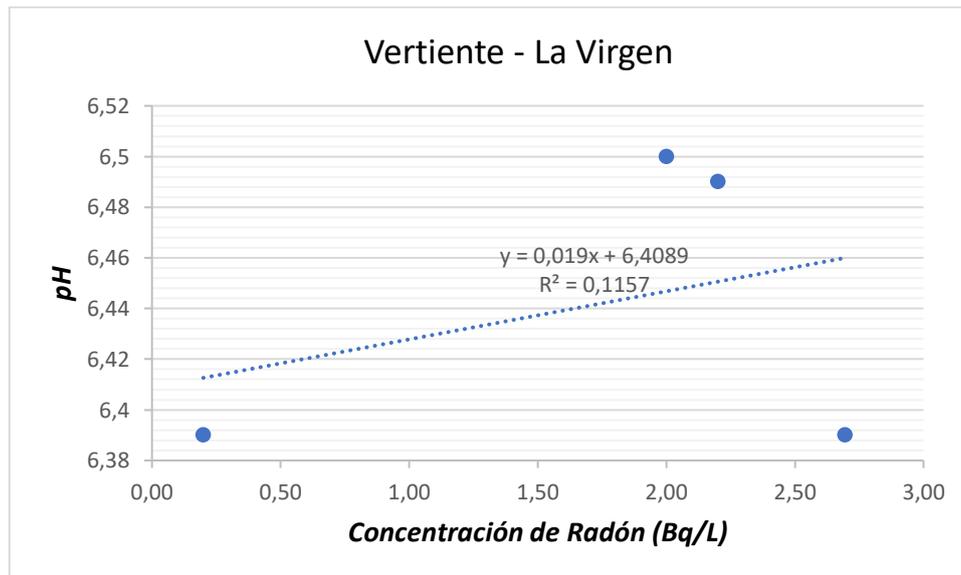
*Figura 58.* Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la vertiente.



*Figura 59.* Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la Piscina #1.



*Figura 60.* Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la Piscina #1.



*Figura 61.* Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la vertiente.

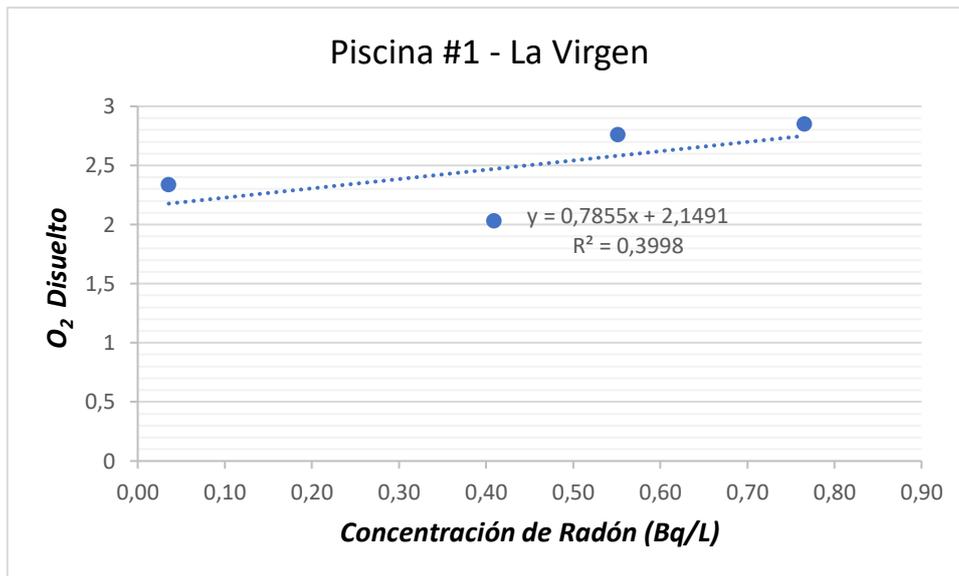


Figura 62. Relación entre O<sub>2</sub> disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la Piscina #1.

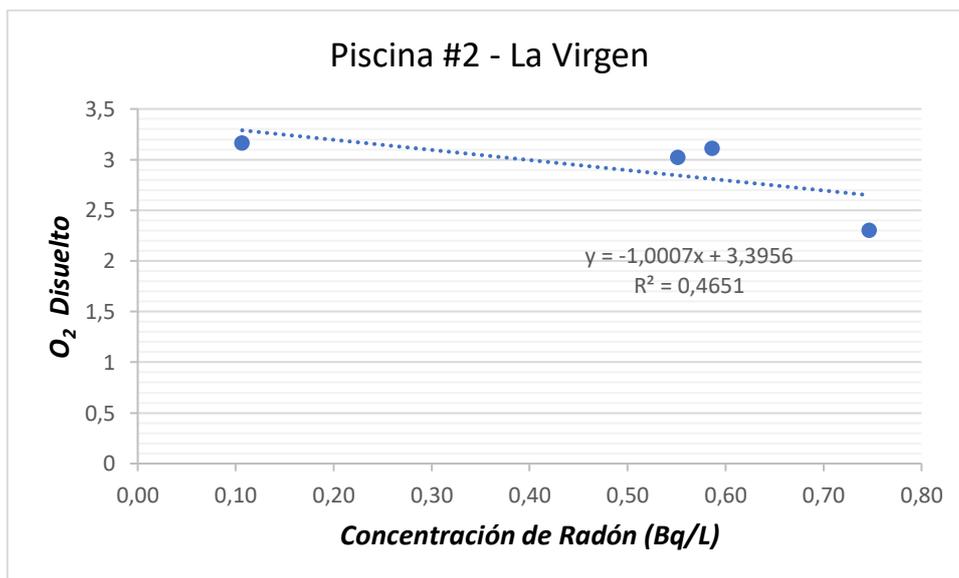


Figura 63. Relación entre O<sub>2</sub> disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la Piscina #2.

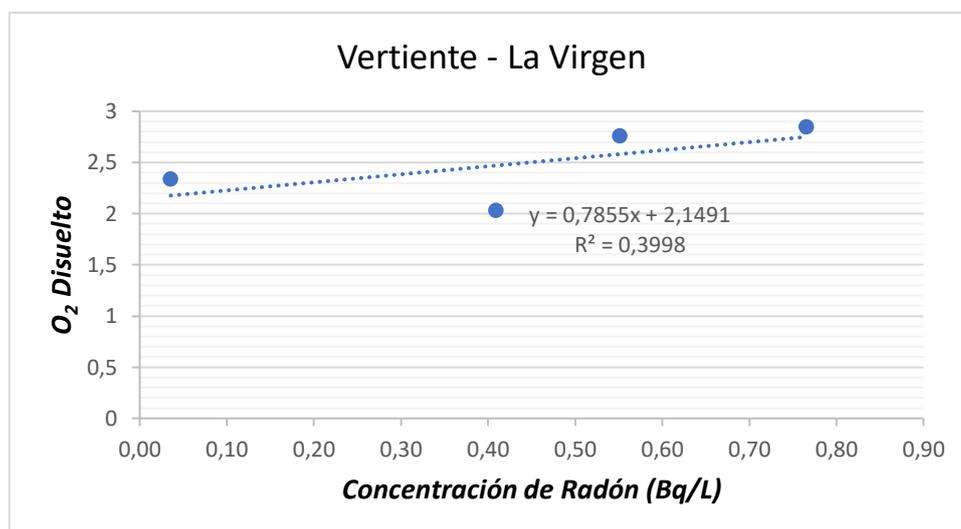


Figura 64. Relación entre O<sub>2</sub> disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la vertiente.

#### 4.1.2.2. Resultados de Espectrometría Gamma

Dentro del proceso de espectrometría gamma se logró detectar los radionúclidos presentes en las muestras recolectadas, como es el caso del balneario La Virgen la muestra fue recolectada en la piscina #1.

Tabla 15.

*Resumen de radionúclidos y su actividad de la muestra La Virgen mediante espectrometría gamma en el laboratorio de la SCAN.*

#### ARAD 2018- 584 03

**Configuración:** GCD-40180X SN 2169-15

**Tiempo de medición:** 14402,00

Radionúclido	Área del fotópico	Actividad (Bq/L)	Error relativo %
Ac-228	<49	<0.0049	
K-40	<30	< 0.0025	
Rn-222	200	1.27	18

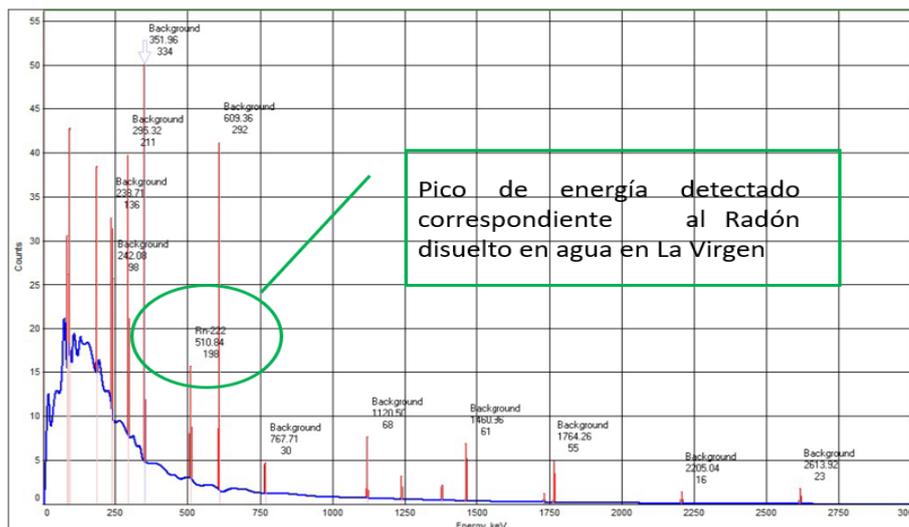


Figura 65. Espectro de radionúclidos detectados en la muestra.

#### 4.1.2.3 Tasa de dosis LUDLUM

Mediante el detector LUDMLUM se realizó la medición de fondo dentro del balneario para cuantificar la radiación natural de fondo, en la piscina #1 en la parte superior del balneario se registró un valor máximo 2.1 KCPM y un valor máximo de 0.4 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) en la piscina #2.

Tabla 16.

*Reporte de medición de tasa de dosis mediante el equipo LUMDUM en las piscinas del balneario La Virgen.*

Cuerpo de agua	Puntos de medición	Gamma (KCPM)	Gamma Beta ( $\mu\text{Sv/ hr}$ )
	<b>Radiación de Fondo</b>	1.3	0.1
Piscina #1	a	1.9	0.2
	b	2.1	0.3
	c	1.8	0.2
Piscina #2	a	1.7	0.1
	b	1.8	0.3
	c	2.0	0.4

### 4.1.3. Balneario Santa Ana

#### 4.1.3.1. Análisis de datos equipo RAD7 y parámetros físicos y químicos

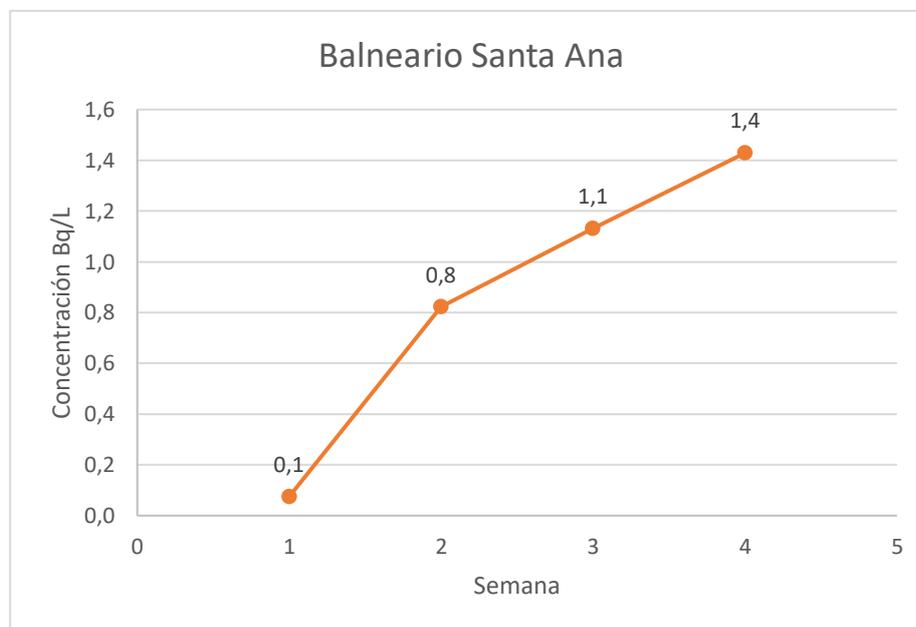
Los valores tanto de la concentración de radón y los parámetros físicos y químicos medidos en el estudio están recopilados en la Tabla 17, donde se observa que la concentración mínima se presentó en el primer punto en la semana 1 en la piscina 1 del balneario Santa Ana obteniendo un valor de 0.05 Bq/L y un valor máximo en la vertiente de agua de 3.1 Bq/L disuelto en agua.

Tabla 17.

*Resumen de valores de radón en agua y parámetros físicos y químicos en Santa Ana.*

Balneario Santa Ana						
	Punto	Radón (Bq/L)	Temperatura ° C	pH	Cond. Elect (uS/cm)	O <sub>2</sub> Disuelto (mg/l)
<b>Semana 1</b>	Piscina 1	0.05	39.8	7.32	3999	3.73
	Piscina 2	0.07	31.2	7.79	3999	4.46
	Vertiente (ojo de agua)	0.10	45.2	6.56	3960	1.59
<b>Semana 2</b>	Piscina 1	0.32	37.8	7.24	3912	3.13
	Piscina 2	0.25	33.2	7.38	3653	2.96
	Vertiente (ojo de agua)	1.90	45.2	6.56	396	1.59
<b>Semana 3</b>	Piscina 1	0.78	39.3	7.28	3938	2.26
	Piscina 2	0.21	33.3	7.54	3925	2.98
	Vertiente (ojo de agua)	2.40	45.3	6.69	3995	1.3
<b>Semana 4</b>	Piscina 1	0.60	37.9	7.34	3999	2.45
	Piscina 2	0.59	31	7.57	3999	3.01
	Vertiente (ojo de agua)	3.10	45.1	6.6	3995	1.6

Los valores de concentración de radón en la semana 1 en los tres puntos son similares con respecto a los balnearios El Salado y La Virgen. La concentración promedio dentro del balneario en las cuatro de medición es de 0.9 Bq/L similar a la concentración promedio del balneario La Virgen.



*Figura 66.* Promedio de concentración de radón disuelto semanal Balneario Santa Ana.

Los parámetros analizados en el software Rstudio para este balneario fueron Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y O<sub>2</sub> Disuelto, los valores de Conductividad eléctrica fueron consistentes por lo cual se pudo incluir dentro de este análisis donde se tiene una correlación negativa del  $-0.99$  con respecto al O<sub>2</sub> Disuelto en la piscina #1 ver Figura 67. Así mismo una correlación de 0.15 y 0.89 en la piscina #2 y en la vertiente respectivamente que se puede observar en las Figuras 68 y 69 seguidamente, todo esto en cuanto respecta a la conductiva eléctrica y la concentración de radón disuelto.

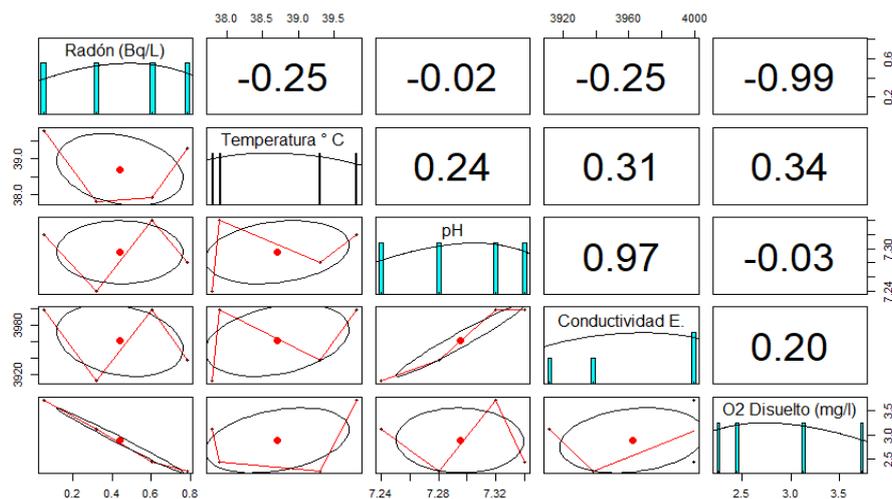


Figura 67. Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina #1 del balneario Santa Ana.

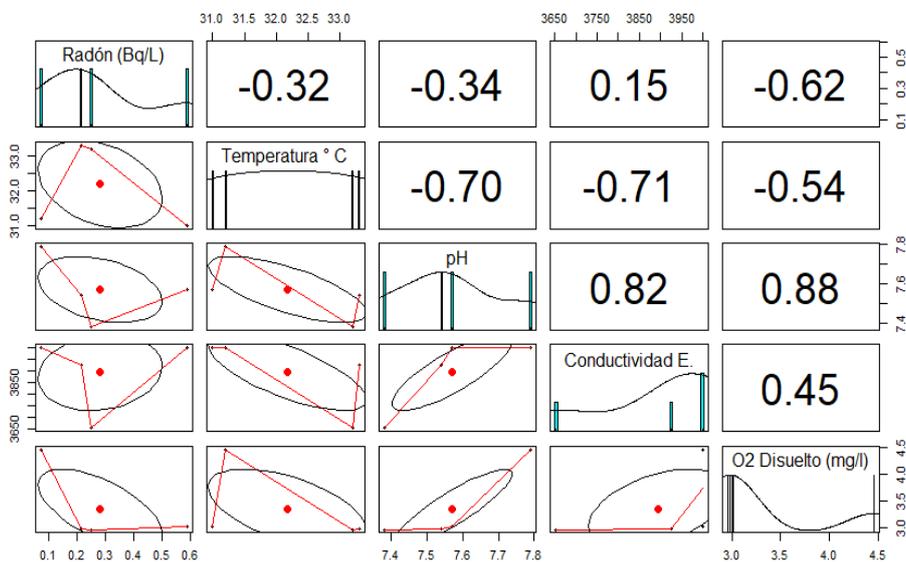


Figura 68. Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la piscina #2 del Balneario Santa Ana.

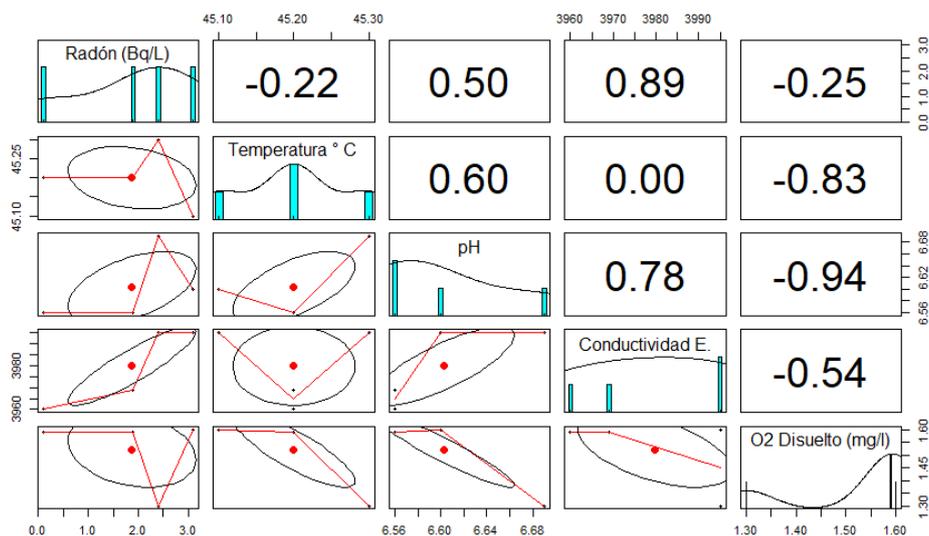


Figura 69. Histograma del Software Rstudio de la correlación entre la concentración de radón disuelto y los parámetros físicos y químicos en la vertiente del Balneario Santa.

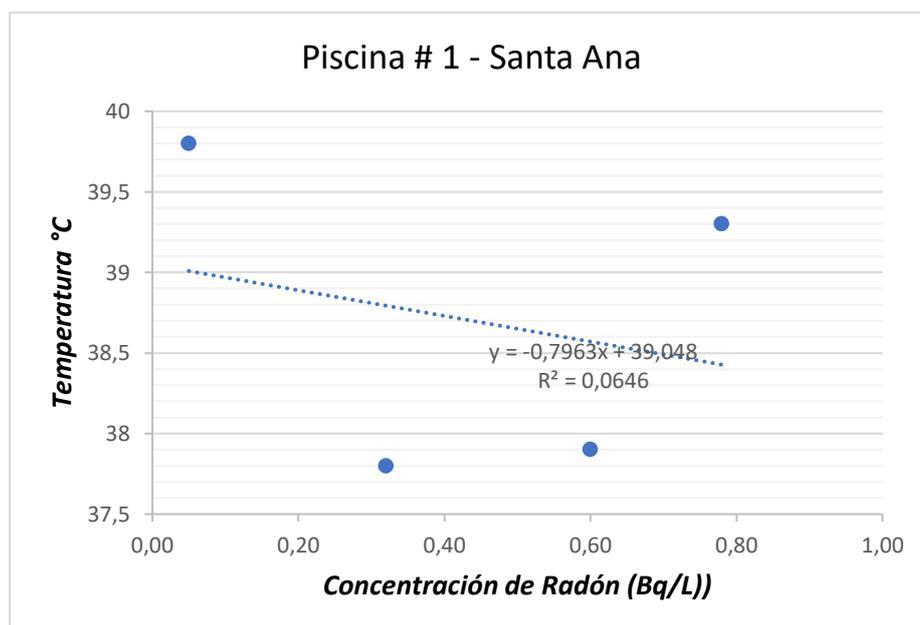
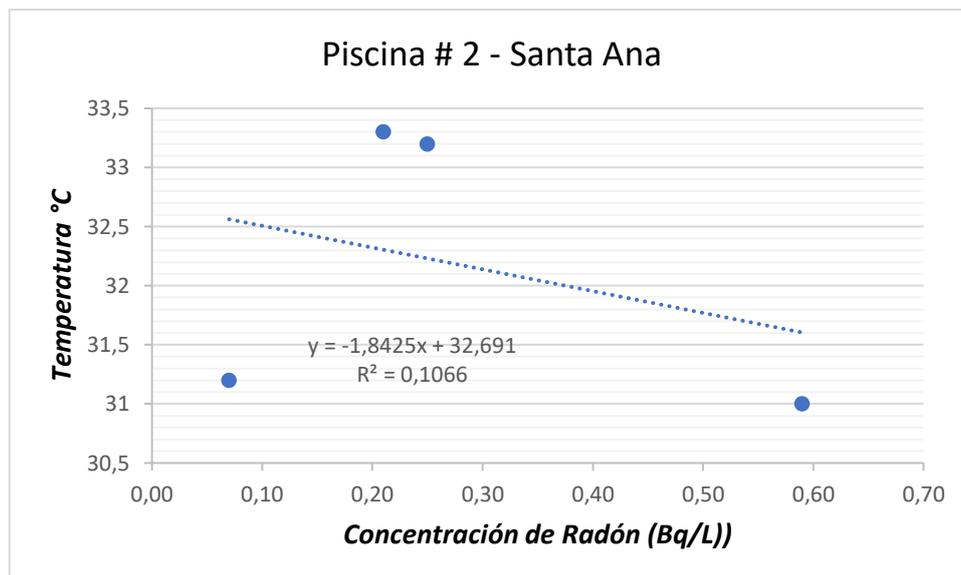
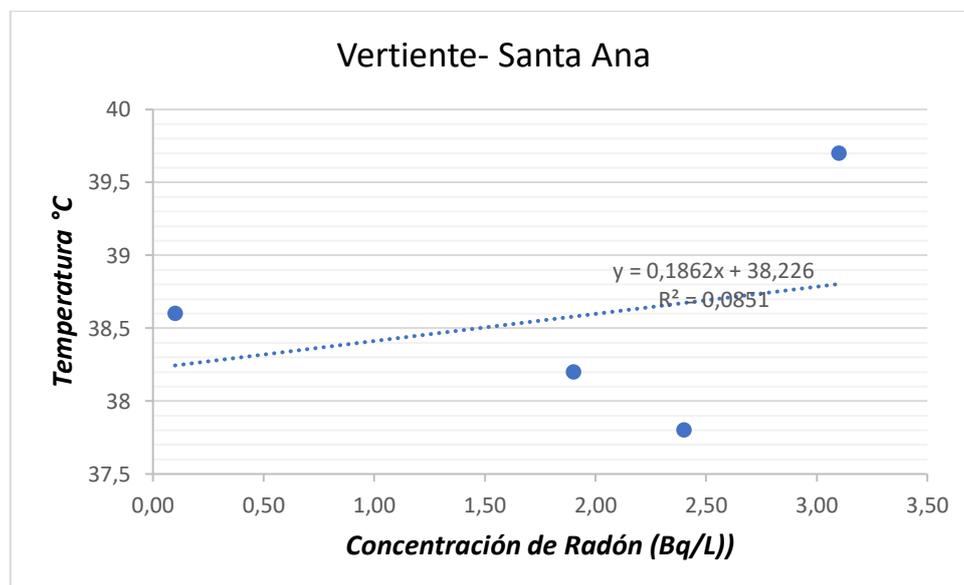


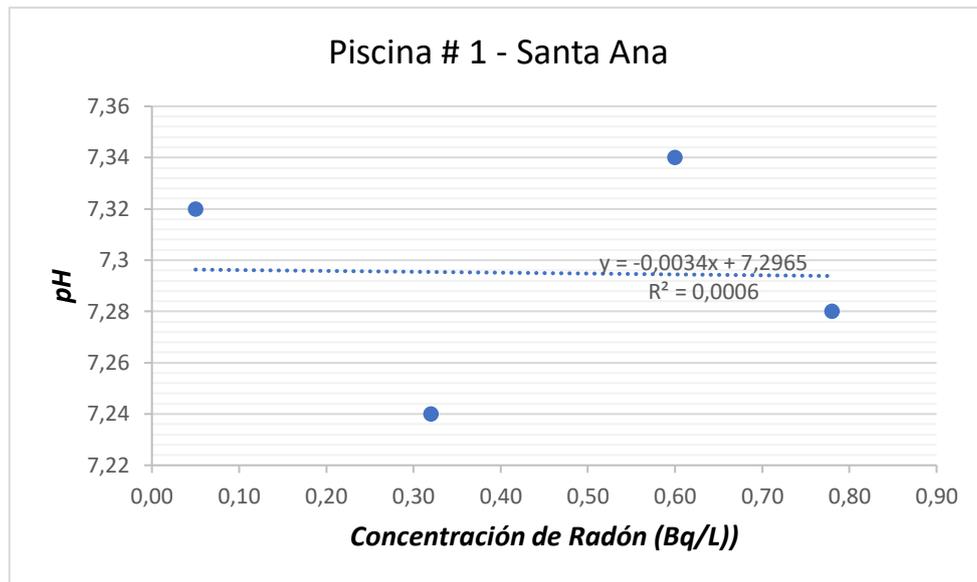
Figura 70. Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #1.



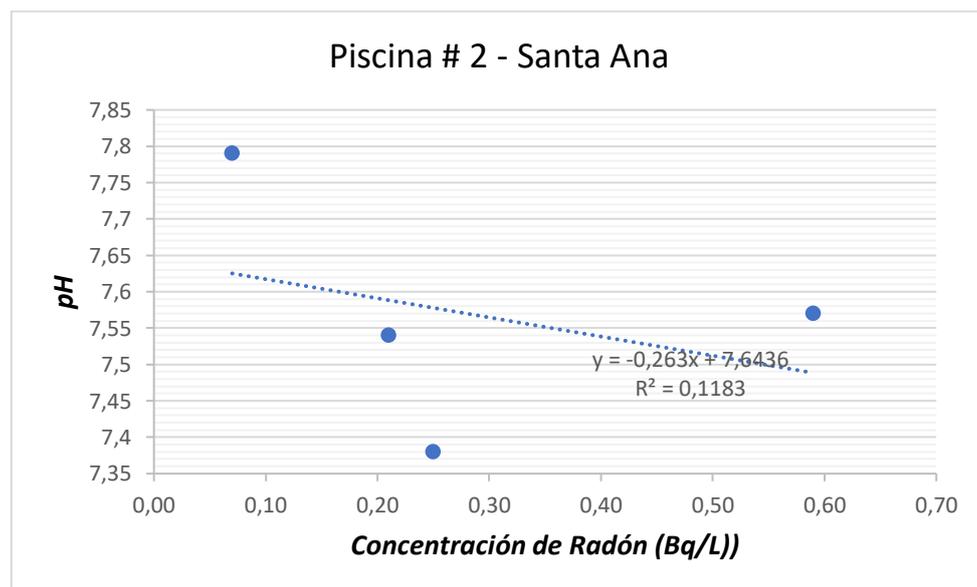
*Figura 71.* Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.



*Figura 72.* Relación entre la temperatura °C y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la vertiente.



*Figura 73.* Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #1.



*Figura 74.* Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.

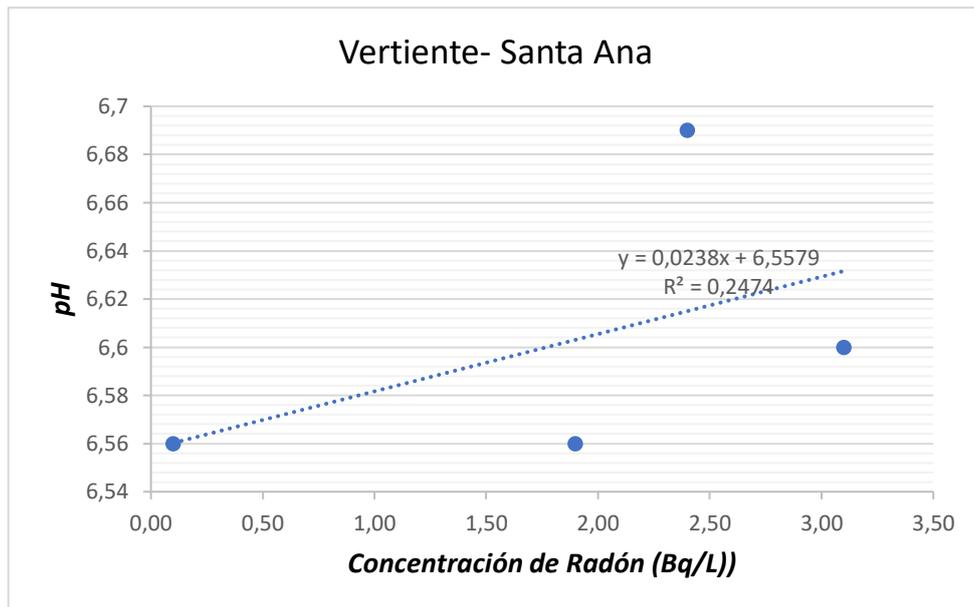


Figura 75. Relación entre pH y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la vertiente.

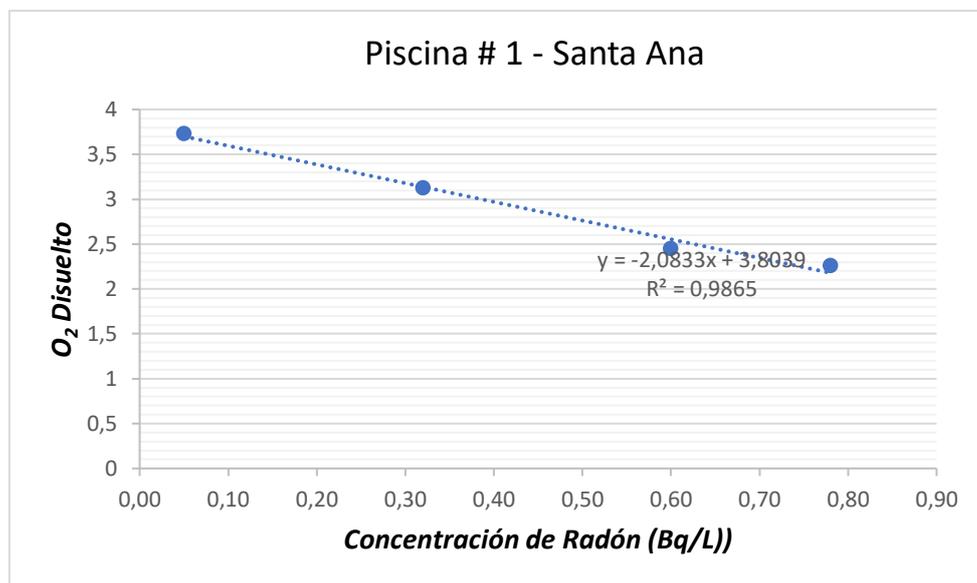


Figura 76. Relación entre O<sub>2</sub> Disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #1.

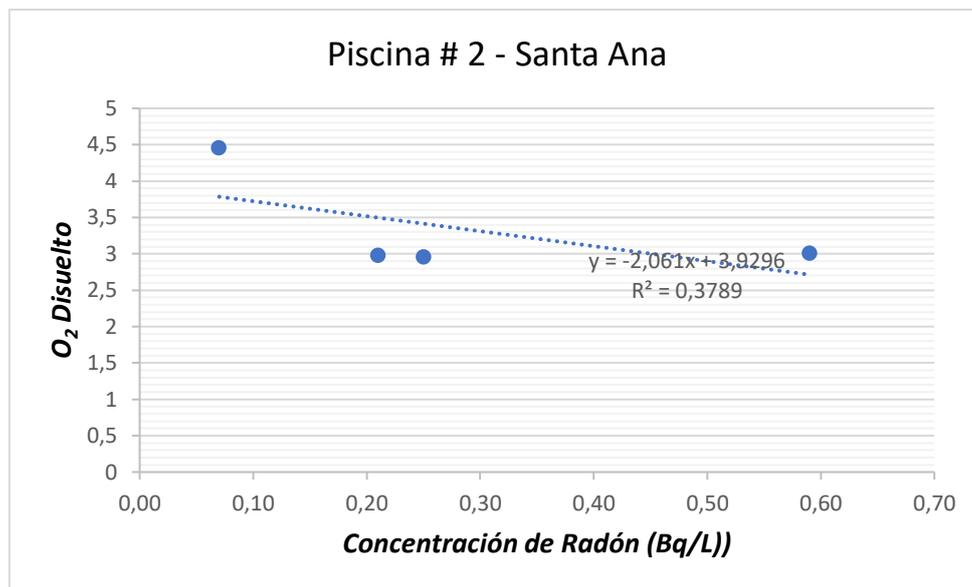


Figura 77. Relación entre O<sub>2</sub> Disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.

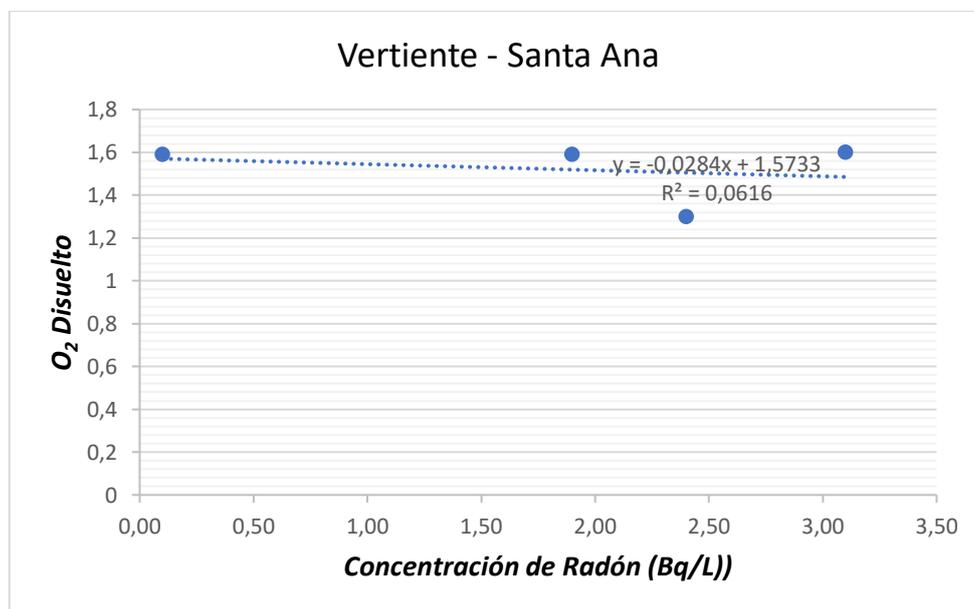
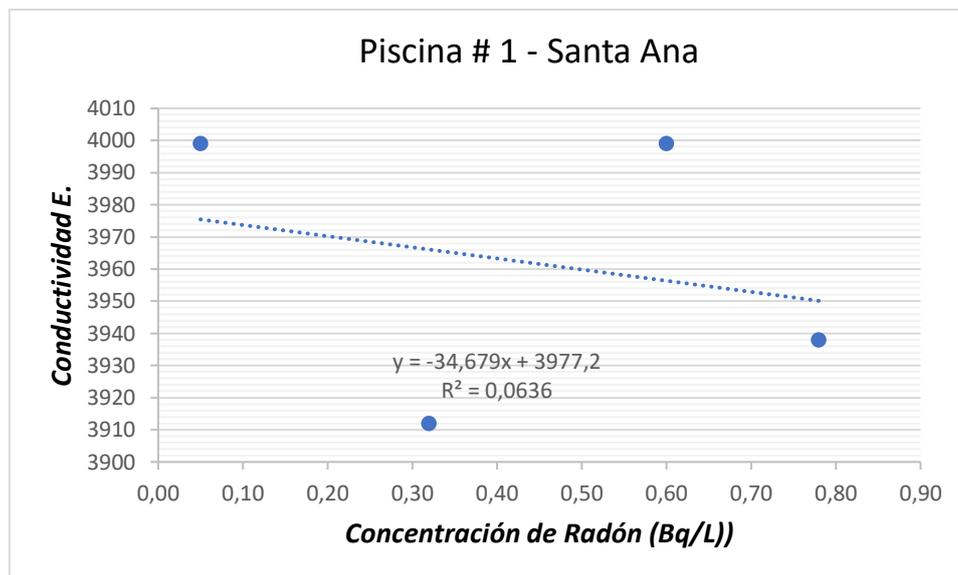
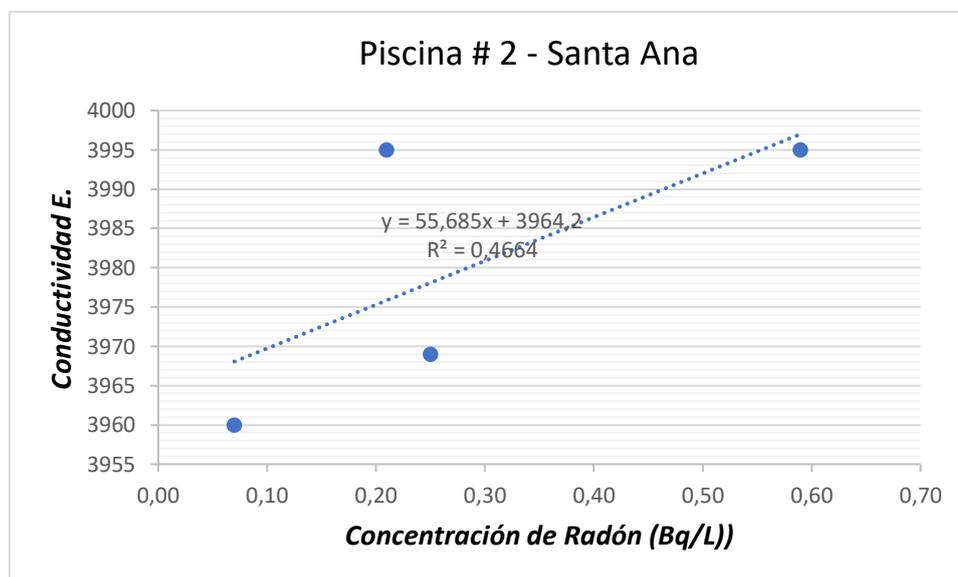


Figura 78. Relación entre O<sub>2</sub> Disuelto y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.



*Figura 79.* Relación entre Conductividad Eléctrica y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #1.



*Figura 80.* Relación entre Conductividad Eléctrica y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2.

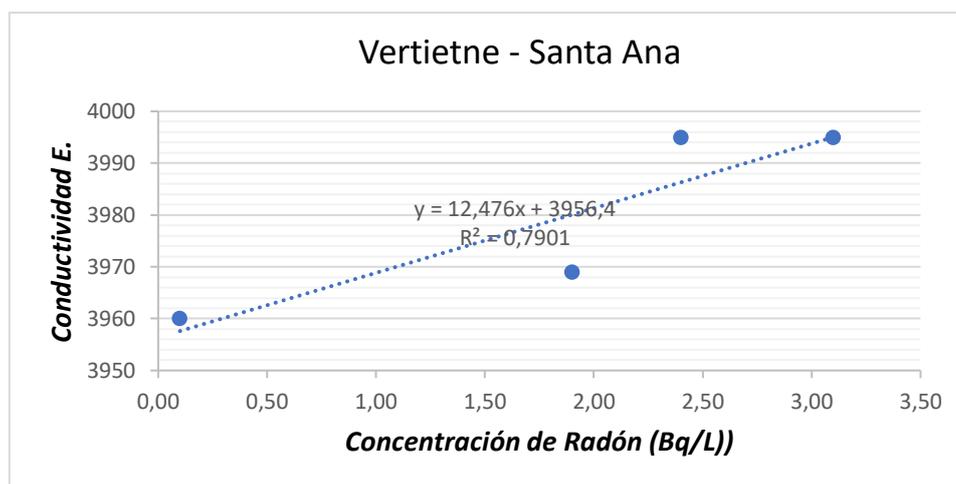


Figura 81. Relación entre Conductividad Eléctrica y la concentración de radón disuelto (Bq/L) en la piscina #2

#### 4.1.3.2. Resultados de Espectrometría Gamma

Dentro del proceso de espectrometría gamma se logró detectar los radionúclidos presentes en las muestras recolectadas, la muestra fue recolectada en la piscina #1 del balneario del balneario Santa Ana siguiendo los protocolos de muestreo, etiquetado y transporte establecido por el Laboratorio de análisis ambiental del SCAN.

Tabla 18.

Resumen de radionúclidos y su actividad de la muestra La Virgen mediante espectrometría gamma en el laboratorio de la SCAN

ARAD 2018- 584 01			
Configuración: GCD-40180X SN 2169-15			
Tiempo de medición: 14402.00			
Radionúclido	Área del fotópico	Actividad (Bq/L)	Error relativo %
K-40	<28	< 0.0024	
Ra-226	<60	<0,005	
Rn-222	230	1.28	17
U-235	<60	<0.00028	

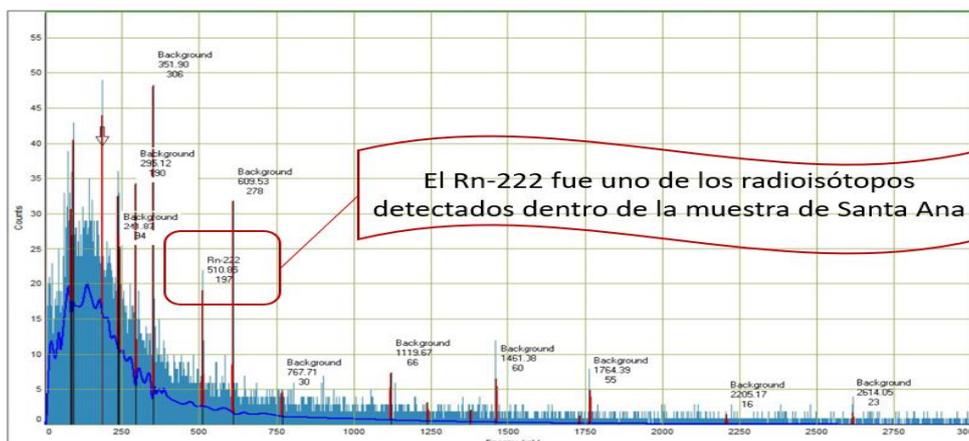


Figura 82. Espectro de radionúclidos detectados en la muestra.

#### 4.1.3.3. Tasa de dosis LUDLUM

Los datos recolectados mediante el detector LUDLUM se recopilan en la Tabla 19, como primer paso se realizó la medición de la radiación de fondo dentro del balneario de Santa Ana, seguido se realizó la medición en 3 puntos al redor de las piscinas con el equipo LUDLUM modelo M 3-97 registrando un valor máximo de 2.0 KPCM en las dos piscinas y una medición máxima de 0.4 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) en la piscina #1.

Tabla 19.

*Reporte de medición de tasa de dosis mediante el equipo LUMDUM en las piscinas del balneario El Salado.*

Cuerpo de agua	Puntos de medición	Gamma (KCPM)	Gamma Beta ( $\mu\text{Sv/h}$ )
	<b>Radiación de Fondo</b>	1.2	0.1
Piscina #1	a	1.8	0,4
	b	1.9	0.3
	c	2.0	0.2
Piscina #2	a	1.6	0.3
	b	1.9	0.2
	c	2.0	0.1

#### 4.2. Cálculo de la tasa de dosis anual por inhalación

Las concentraciones de cada uno de los puntos obtenidos se pueden observar en la Tabla 20, donde se observa que una de las mayores concentraciones se

registró en la vertiente de agua termal de Santa Ana, en la cual mediante el reporte digital del software Capture del RAD7 (ver Anexos 1,2,3) se pudo apreciar la presencia de los descendientes del radón como fue el Po-214 solo para este balneario. Además, en la Tabla 20 se representa la dosis efectiva por inhalación la cual se calculó mediante la Ecuación 2 (ver Capítulo 3.12, pg. 57) publicadas por la UNSCEAR en el año 2000.

Tabla 20.

*Resumen de tasa de dosis anual por inhalación mediante modelos de estimación de la UNSCEAR.*

Balneario	Piscina	Radón disuelto (Bq/L)	Órgano Regulador	Dosis efectiva por inhalación (mSv/año)	Dosis límite efectiva por inhalación UNSCEAR (mSv/año)
El Salado	Abierta	0.22	UNSCEAR 2000 Anexo B "EXPOSURES FROM NATURAL RADIATION SOURCES"	0.0006	1.1
	Cerrada	0.37		0.0009	
La Virgen	Número 1	0.44		0.0011	
	Número 2	0.44		0.0011	
	Vertiente	1.77		0.0045	
Santa Ana	Número 1	0.43		0.0011	
	Número 2	0.28	0.0007		
	Vertiente	1.87	0.0047		

Dentro de las seis piscinas analizadas la dosis efectiva anual no se sobrepasa el límite 1.1 (mSv/año) permisible por la UNSCEAR en cuanto a exposición por inhalación de radón disuelto en agua. Las vertientes donde emerge el agua termal y es distribuidas a las distintas piscinas por medio de tuberías se obtuvo un valor de mayor en cuanto a tasa de dosis anual con un valor de 0.0045 (mSv/año) y 0.0047 (mSv/año) respectivamente para las vertientes de La Virgen y de Santa Ana. Estas tasas de dosis no representan un riesgo significativo a la salud de las personas y para los trabajadores es mínima por el tiempo de permanencia en dichos abastecimientos.

#### 4.3. Mapa de exposición radiológica

# MAPA DE CONCENTRACIÓN DE RADÓN DISUELTO EN LA CIUDAD DE BAÑOS

Escala: 1:10.000

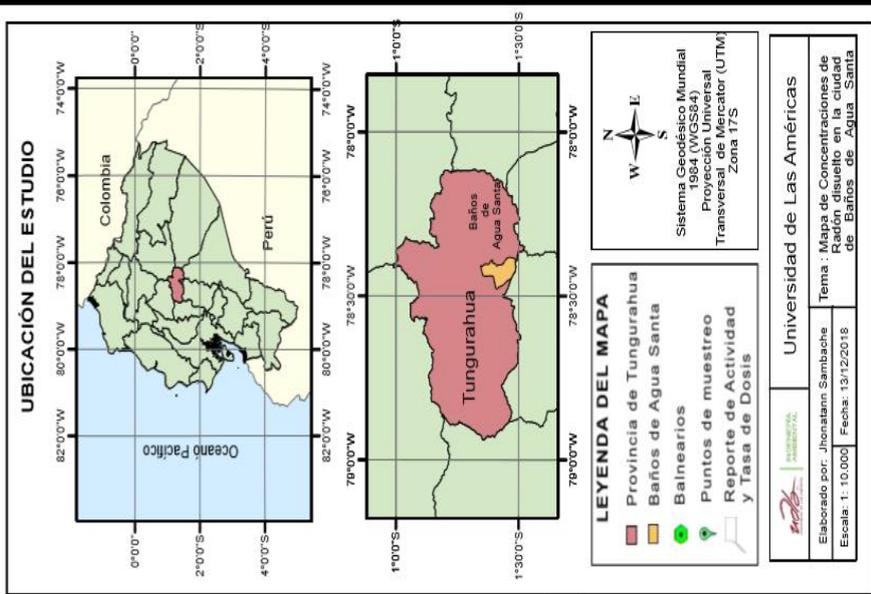
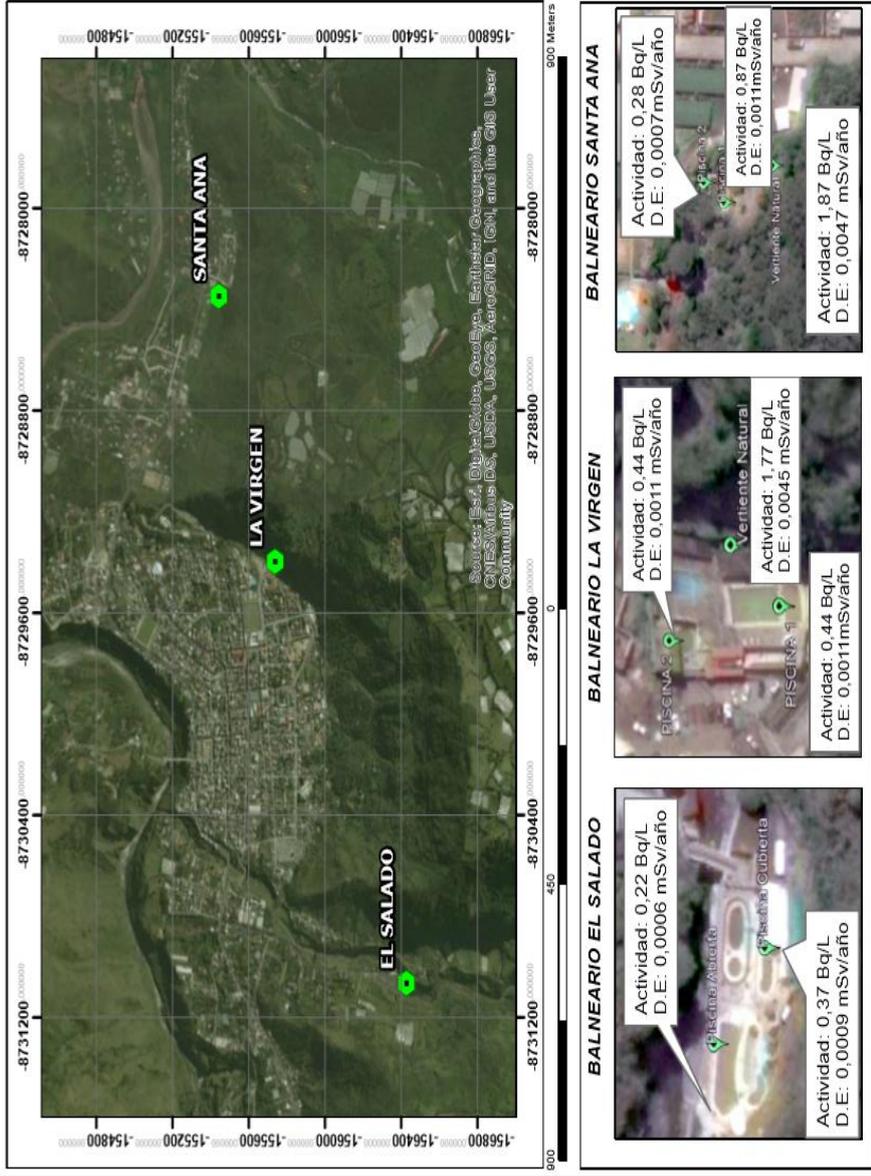


Figura 83. Mapa de Exposición radiológica

Adapto de Google Earth, 2018.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

La geología e hidrogeología de la ciudad de Baños se caracteriza por la localización de esta ciudad en las faldas del volcán Tungurahua, donde las vertientes existentes y analizadas en este estudio emergen directamente de la actividad tectónica presente en esta zona.

El ascenso de los flujos de agua subterráneas profundas hacia la superficie se producen cuando existen fallas en la litosfera en las cuales ocurre la interacción y contacto con las rocas propias de la zona. En el caso de los balnearios El Salado y La Virgen se encuentran en una unidad geomorfológica llamada Relieve montañoso y el balneario Santa Ana se encuentra localizada en un Relieve colinado alto.

La presencia del Ra-226 (progenitor del Rn-222) se presenta en bajas cantidades con relación a los valores obtenidos de radón disuelto en los balnearios, esto en cuanto al análisis de promedios por puntos de medición en las aguas termales de la ciudad de Baños.

Los valores máximos de radón disuelto en agua en El Salado fueron menores en comparación a los obtenidos en La Virgen y Santa Ana, los mismos que no superan los límites establecidos por la US-EPA que establece como valor límite de 11.1 Bq/L, así tampoco lo establecido por el Consejo Europeo 2013/51/EURATOM de la Unión Europea con un valor de 100 Bq/L para radón disuelto en agua.

Mediante los promedios de las 4 semanas de medición se obtuvo la estimación de tasa de dosis por medio de la ecuación por inhalación de radón disuelto en agua de la UNSCEAR, donde se evidenció que ninguno de los puntos de

medición presenta un grado considerable de riesgo radiológico para la población y los trabajadores de los balnearios por exposición al gas radón.

Los parámetros físicos y químicos del agua en cada uno de los balnearios poseen una relación en específico por puntos donde en las características de cada agua se relaciona la disminución y aumento de la concentración de radón disuelto en el agua.

El pH fue uno de los parámetros que obtuvo una relación significativa entre las concentraciones altas y el descenso de pH por la actividad, presencia y movilidad del Ra-226 en agua en estas condiciones.

La elevación de la temperatura se relaciona directamente con la disminución de la solubilidad del oxígeno y esta a su vez en ocasiones a la disminución de la actividad del radón en el agua.

El análisis de espectrometría gamma realizado con el detector de Germanio Hiperpuro muestran unas concentraciones de Rn-222 disuelto similares a las obtenidas mediante el equipo de medición directa RAD7, los valores mediante la espectrometría gamma no superaron los 2 Bq/L.

Se detectó la presencia de los descendientes del Rn-222, el Po-218 en los tres balnearios y en el caso del Po-214 fue detectado el balneario Santa Ana mediante los reportes digitales del software Capture del RAD7 (ver Anexos 1, 2,3).

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda el incremento de investigaciones en diversas fuentes termales del país por parte de los organismos estatales correspondiente, en cuanto al tema de la radiación de origen natural, así como de proyectos universitarios en este ámbito.

Establecer un cronograma de monitoreo periódico en cuanto a concentraciones de Rn-222 disuelto y demás radionúclidos en las aguas termales de la ciudad de Baños, así como de medición de tasas de dosis en los trabajadores de los balnearios.

Así también, el seguimiento correcto del protocolo de muestreo y análisis proporcionado por la empresa fabricante del equipo RAD7 con el fin de obtener valores verídicos y confiables.

## REFERENCIAS

- Aguilar, G., & Clavero, C. (2015). *Matemáticas III: ecuaciones diferenciales, series de Fourier y aplicaciones*. Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Andrade, D., & Contreras, C. (2014). *Medición y Análisis del nivel de exposición a radiaciones no ionizantes (RNI) en ambientes indoor en la Ciudad de Cuenca, dentro del espectro radioeléctrico en la banda de frecuencia de la telefonía celular*. Recuperado el 26 de noviembre del 2018 de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7092/1/UPS-CT003850.pdf>
- Appleton, J. (2013). *Radon in Air and Water*. Springer . Recuperado el 15 de noviembre de 2018 de <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/502215/1/Radon%20in%20air%20and%20water.pdf;%20Appleton%20J%20D.pdf;%20Chapter%2011%20in%20Medical%20Geology%202013.pdf>
- Aspden, J., & Litherland, M. (1992). *La Geología y La Historia de Colisión Mesozoico de La Cordillera Real Ecuador*. Elsevier Science, 187-204. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90426-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90426-7)
- Balarezo, M. (2015). *Levantamiento de la información de los balnearios que utilizan agua de origen geotérmico ubicados a lo largo del callejón interandino en el ecuador y caracterización de las aguas según su composición iónica*. Recuperado el 27 de noviembre de 2018 de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11447/1/T-ESPE-049156.pdf>
- Baltic Scientific Instruments. (2007). *Manual de Operación*. Recuperado el 10 de noviembre de 2018 de [http://bsi.lv/media/uploads/bsi-2017\\_30\\_mb.pdf](http://bsi.lv/media/uploads/bsi-2017_30_mb.pdf)
- Baraza, X., Castejón, E., & Guardino, X. (2015). *Higiene Industrial*. Barcelona, España: Editorial UOC.

- Barrera, M., Romero, M., & Valiño, F. (2008). Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles. Recuperado el 11 de noviembre de 2018 de [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/018/40018273.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/018/40018273.pdf?r=1&r=1)
- Barskaran, M. (2016). *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. Detroit: Springer Geochemistry. doi: 10.1007/978-3-319-21329-3\_8
- Caldas, M., Castellanos, A., & Hidalgo, M. (2016). Formación y orientación laboral . Madrid, España: Editex.
- Carrazana, J. (2017). Contribuciones a la mejora de la determinación de radionucleidos mediante espectrometría de Radiación Gamma. Recuperado el 13 de noviembre de 2018 de [http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/6560/TDUEX\\_2017\\_Carrazana\\_Gonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/6560/TDUEX_2017_Carrazana_Gonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Carrera, D., & Guevara, P. (2016). Fuentes termales del Ecuador. Recuperado el 14 de diciembre de 2018 de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11739>
- Consejo de la Unión Europea. (2013). Directiva 2013/51/EURATOM. Recuperado el 11 de octubre de 2018 de <https://www.boe.es/doue/2013/296/L00012-00021.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). (2012). Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Recuperado el 14 de octubre de 2018 de <http://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/CSN/GSG-11.04%20Evaluacion%20de%20exposicion%20al%20radon%20en%20trabajo.pdf>
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). (2014). VIII Jornadas sobre Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental. Recuperado el 06 de octubre de 2018 de

04.06+VII+Jornadas+sobre+Calidad+en+el+Control+de+la+Radiactividad+Ambiental

Durrige Company. (2014). Detector de radón RAD7- Manual de usuario. Recuperado el 06 de julio de 2018 de <https://durrige.com/documentation/RAD7%20Manual%20Spanish.pdf>

Durrige Company. (2018). *RAD H<sub>2</sub>O Manual*. Recuperado el 06 de julio de 2018 de <http://www.durrige.co.uk/documentation/RAD%20H2O%20Manual.pdf>

Espinosa, G. (2016). Gas radón en cuevas. México D.F, México: Instituto de Física UNAM.

Federación de Enseñanzas de Comisiones Obreras de Andalucía. (2009). Radiaciones. Andalucía: Revista Digital FeandaluciaCCOO. Recuperado el 07 de noviembre de 2018 de <https://www.feandalucia.ccoo.es/indconte.aspx?d=3390&s=5&ind=177>

Goldman, L., & Schafer, A. (2016). Goldman-Cecil. Tratado de medicina interna. Recuperado el 25 de octubre de 2018 de <https://www.scribd.com/document/382368794/Goldman-Cecil-Tratado-de-Medicina-Interna-25a-Edicion>

González, F. (2015). Información sobre radiaciones ionizantes. Recuperado el 05 de noviembre del 2018 de <https://www.sne.es/images/stories/recursos/publicaciones/notas/NT%200315%20-%20Informaci%C3%B3n%20sobre%20radiaciones%20Ionizantes.pdf>

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011). *Naturally Occurring Radioactive Material*. Recuperado el 08 de noviembre de 2018 de [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1497\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1497_web.pdf)

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011). Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad. Recuperado 09 de noviembre de 2018 de <https://www->

pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/SupM\_Pub1531\_Spanish.pdf

- Isinkaye, M., & Ajiboye, Y. (2017). *Assessment of annual effective dose due to radon concentrations in deep and shallow wells within Ekiti State, Nigeria*. *Radioprotection* 2017, 167-170. DOI: 10.1051/radiopro/2017014
- Jalili-Majrareshin, A., Behtash, A., & Rezaei-Ochbelagh, D. (2012). *Radon concentration in hot springs of the touristic city of Sarein and methods to reduce radon in water*. *Radiation Physics and Chemistry* 81, 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.03.015>
- Juarez. (2014). Metodología para la calibración en eficiencia de un detector gamma coaxial de germanio de rango extendido, empleando el método monte carlo. Recuperado el 22 de octubre de 2018 de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/146/1/Tesis%20Luis%20Carlos%20Ju%C3%A1rez%20Mart%C3%ADnez.pdf>
- Malik, M., Rabaiee, N., & Jaafar, M. (2015). *Determination of radon concentration in water using RAD7 with RAD H2O accessories*. Penang: American Institute of Physics. doi: 10.1063/1.4915231
- Marrero, Á. (2015). El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas. Recuperado el 08 de noviembre de 2018 de [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/18553/3/0727206\\_00000\\_000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/18553/3/0727206_00000_000.pdf)
- Mendoza, J. (2015). Examen tipo COMIPEMS 2016. Ciudad de México, México: The Science Corporation.
- Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER). (2016). Acuerdo Ministerial 283. Recuperado el 14 de noviembre de 2018 de <https://app.vlex.com/#account/login>
- Navarro, A. (2015). El secreto de Prometeo y otras historias sobre la Tabla Periódica de los elementos. Córdoba, España: Editorial Guadalmazán.

- NEA & IAEA. (2016). *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. Recuperado el 15 octubre de 2018 de <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Recuperado el 22 de octubre de 2018 de [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671\\_spa.pdf;jsessionid=7F08AAC74315788D6D3DD88B89ADF99E?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=7F08AAC74315788D6D3DD88B89ADF99E?sequence=1)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). Radiaciones ionizantes: Efectos en la salud y medidas de protección. Recuperado el 29 de noviembre de 2017 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>
- Pérez, C. (2010). Radiaciones ionizantes y no ionizantes en el medio ambiente. Recuperado el 30 de noviembre de 2018 de <https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Radiacion%20en%20el%20medio%20ambiente.pdf>
- Presidencia de la República del Ecuador. (1979). Registro Oficial No. 798. Recuperado el 23 de septiembre de 2018 de <http://sut.trabajo.gob.ec/publico/Normativa%20Legal/Acuerdos%20Ministeriales/REGLAMENTO%20DE%20SEGURIDAD%20RADIOLOGICA.pdf>
- Presidencia de la República del Ecuador. (2018). Decreto Ejecutivo N°399. Recuerado el 16 de noviembre de 2018 de [https://minka.presidencia.gob.ec/portal/usuarios\\_externos.jsf](https://minka.presidencia.gob.ec/portal/usuarios_externos.jsf)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2016). RADIACIÓN. EFECTOS y FUENTES. Recuperado el 15 de noviembre de 2018 de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation\\_Effects\\_and\\_sources-2016Radiation\\_-\\_Effects\\_and\\_Sources\\_SP.pdg.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.pdg.pdf.pdf?sequence=7&isAllowed=y)

- Rábago, D. (2013). Aplicación de un sistema de monitorización de la concentración de gas radón en el agua de una instalación termal. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Ramírez, V. (2016). QUIMICA 1. Serie Integral por competencias. Ciudad de México, México: Grupo Editorial Patria.
- Real, G. (2012). El radón. Tratamiento jurídico de un enemigo invisible. Recuperado el 15 de agosto de 2018 de <https://www.editorial-club-universitario.es/pdf/397.pdf>
- Robledo de Dios, T., De Isla, J., Garrido, M., Cazalla, A., Hidalgo, S., Ochoteco, J., & Ochoa, O. (2017). Auxiliar Sanitario. Personal Laboral Grupo IV. Comunidades de Castilla-La Mancha, España: Ediciones Rodio.
- Rodríguez, J. (2013). Cuantificación De La Actividad De Radón (Rn-222) Y Radio (Ra-226) Aplicando La Técnica De Centelleo Líquido En Aguas Termales Del Cerro Pacho, Lago De Coatepeque, Departamento De Santa Ana. Santa Ana. Recuperado el 24 de septiembre de 2018 de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/8308/1/Trabajo%20de%20graduaci%C3%B3n%20Rad%C3%B3n%20y%20Radio%202013%20UES.pdf>
- Roig, F. (2013). Radiaciones: Aplicaciones y riesgos para la salud. Recuperado el 14 de septiembre de 2018 de <https://www.uv.es/aprjuv/quaderns/3/Roig-RADIACIONES.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (s.f). *Technical Fact Sheet: Proposed Radon in Drinking Water Rule*. Recuperado el 26 de noviembre de 2018 de <https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/radon-proposed-technical-fact-sheet.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Información básica sobre la radiación. Recuperado el 29 de noviembre de 2017 de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion#ioniandnonioni>

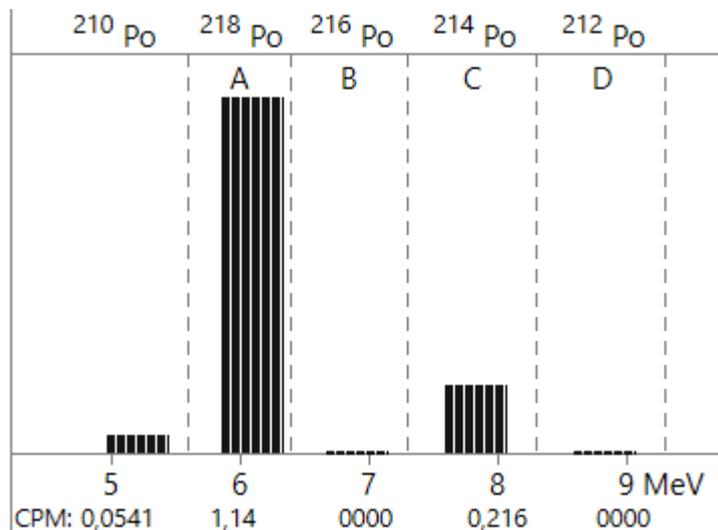
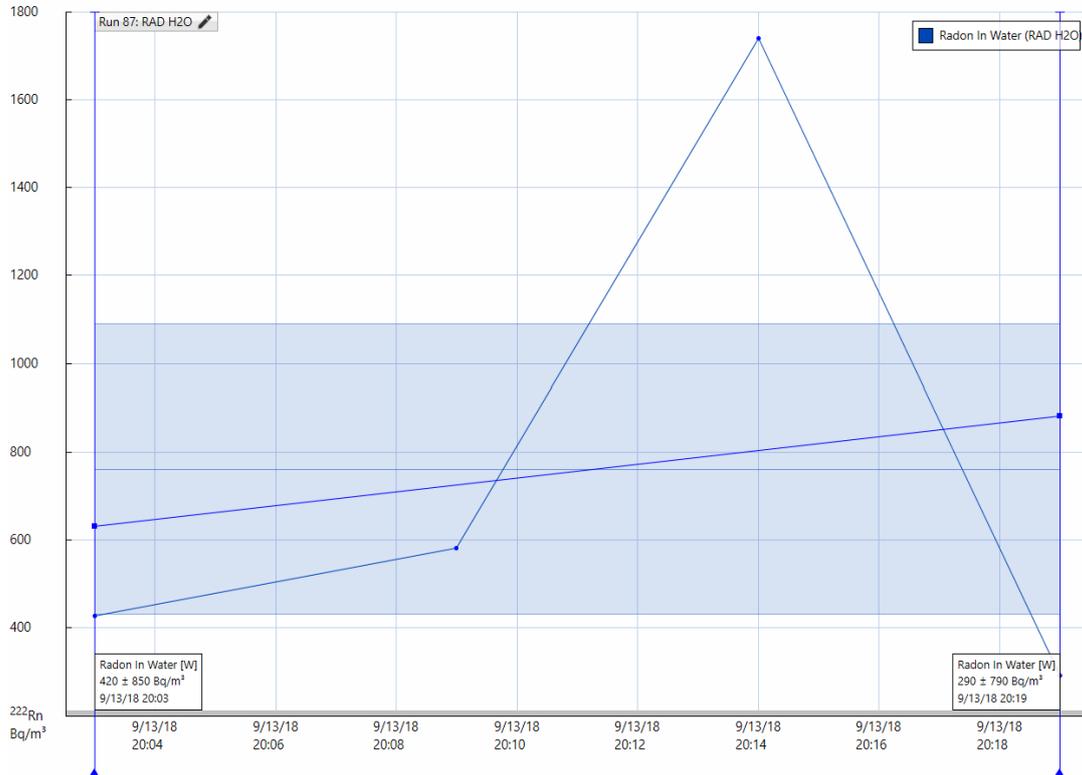
UNSCEAR. (2000). *Sources and effects of ionizing Radiation*. Recuperado el 18 de agosto de 2018 de [http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)

Ventoso, B. (2017). El radón un problema de salud pública: importancia del desarrollo de mapas geográficos que indiquen la concentración de gas radón en diferentes poblaciones. Recuperado el 06 de septiembre de [https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2017/06/4\\_MAUQUETA-RAD%C3%93Nv2.pdf](https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2017/06/4_MAUQUETA-RAD%C3%93Nv2.pdf)

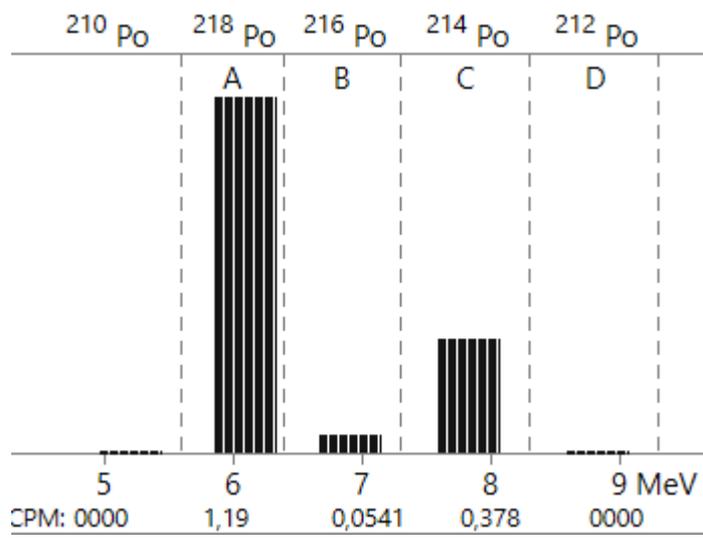
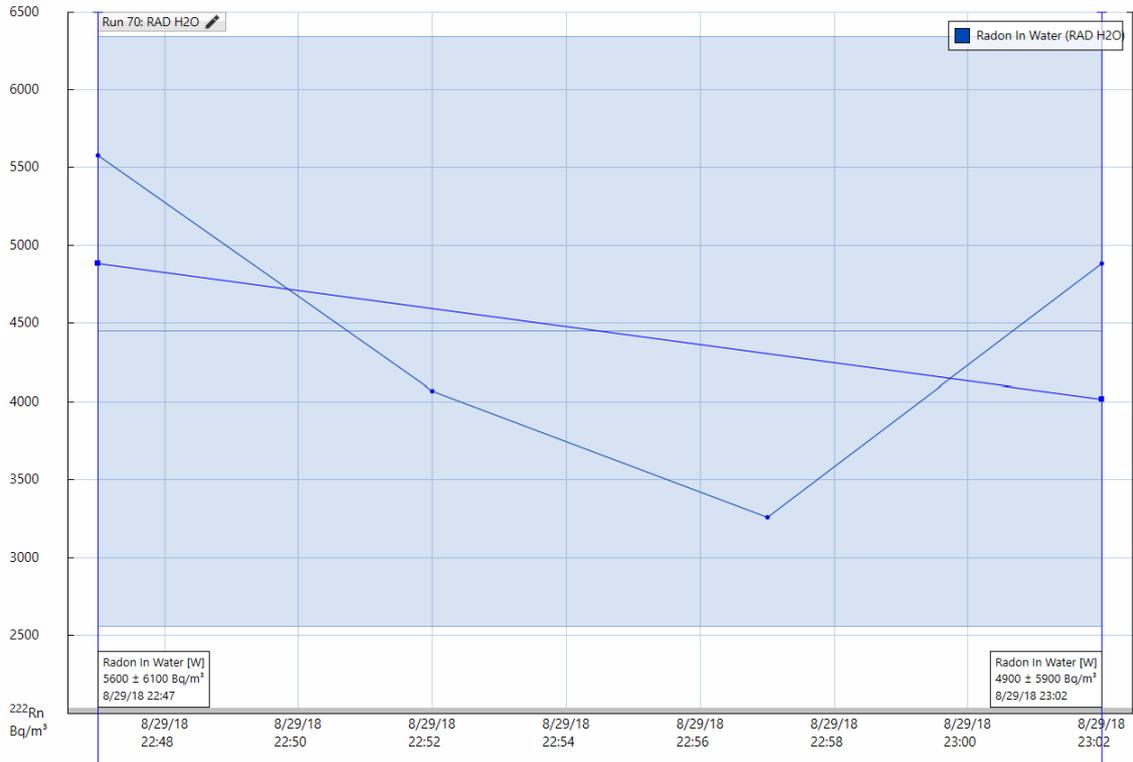
World Nuclear Association. (2016). *Naturally-Occurring Radioactive Materials (NORM)*. Recuperado el 29 de noviembre de 2017 de <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>

## **ANEXOS**

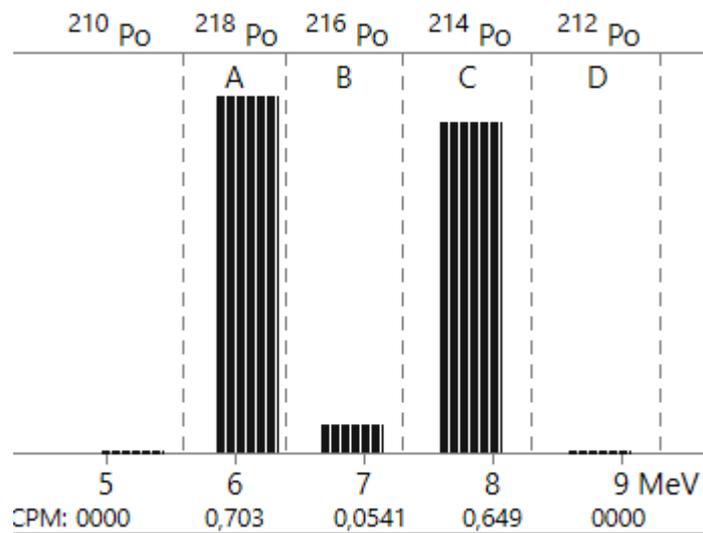
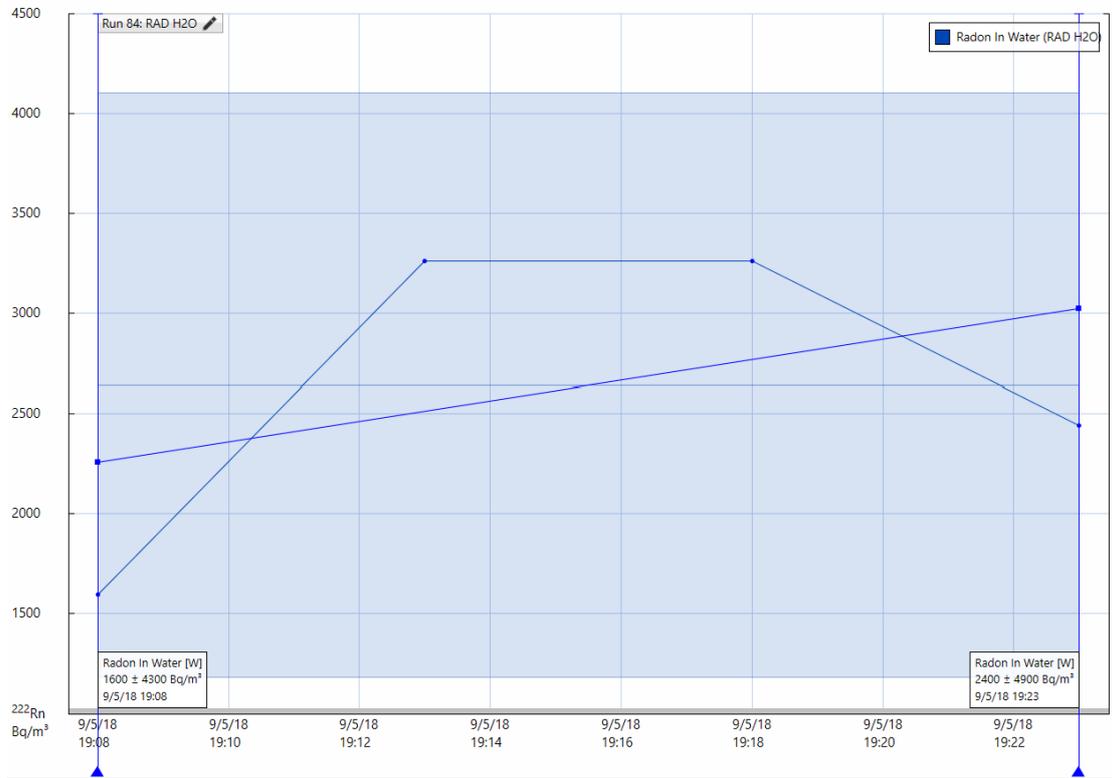
## Anexo 1. Análisis de Concentración del software Capture del equipo RAD7 del Balneario El Salado.



**Anexo 2. Análisis de Concentración del software Capture del equipo RAD7 del Balneario La Virgen.**



**Anexo 3.** Análisis de Concentración del software Capture del equipo RAD7 del Balneario Santa Ana.



Anexo 4. Manual de uso equipo RAD7



**DETECTOR DE RADÓN RAD7**  
**Manual del Usuario**

Propietario \_\_\_\_\_

Serie # \_\_\_\_\_



**REGISTRO DE PRESTACIONES**

Fecha	Prestación

Se recomienda enviar anualmente la unidad a DURRIDGE Company, para su recalibración.

DURRIDGE Company Inc.  
524 Boston Rd  
Billerica, MA 01821  
Tel: (978)-667-9556  
Fax: (978)-667-9557  
service@durrIDGE.com  
www.durrIDGE.com

Revisión 7.2.8. © 2014 DURRIDGE Company

## Anexo 5. Manual de uso Accesorio RAD H<sub>2</sub>O



# RAD H<sub>2</sub>O User Manual

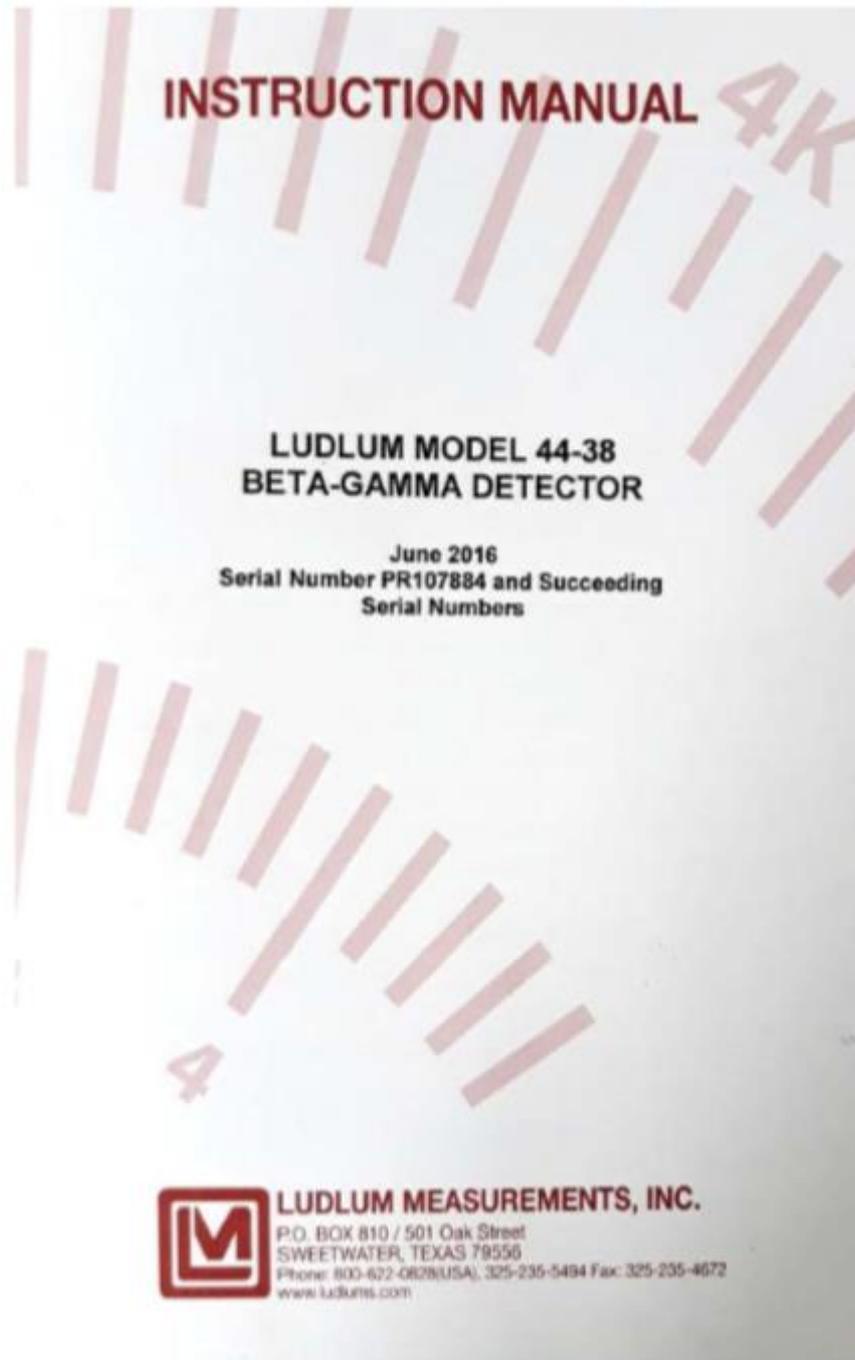
## Radon in Water Accessory



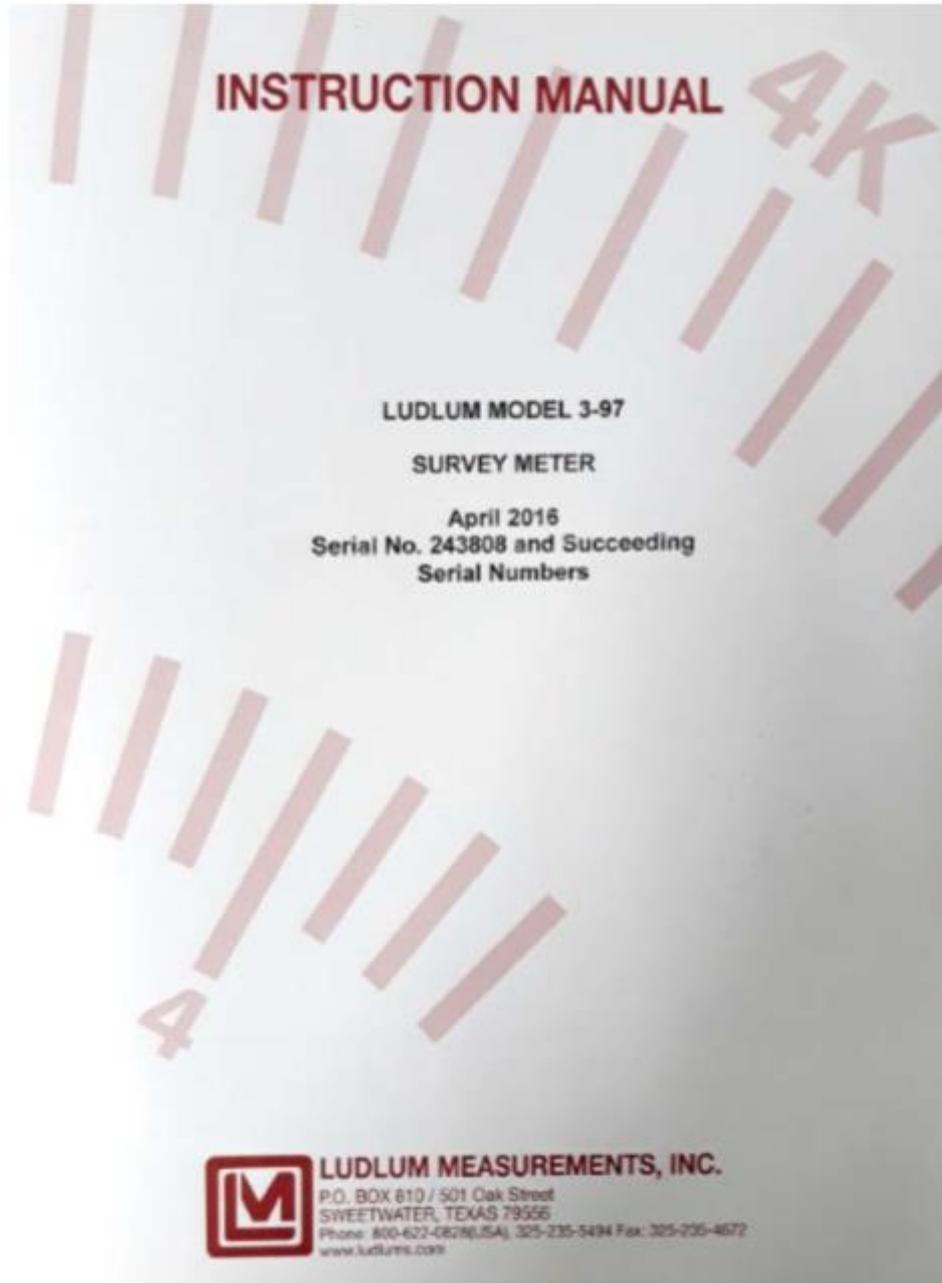
Revision 2016-08-03  
Copyright © 2016 DurrIDGE Company Inc.

**DURRIDGE Company Inc.**  
524 Boston Road  
Billerica, MA 01821  
Tel: (978) 667-9556  
Fax: (978) 667-9557  
service@durrIDGE.com  
www.durrIDGE.com

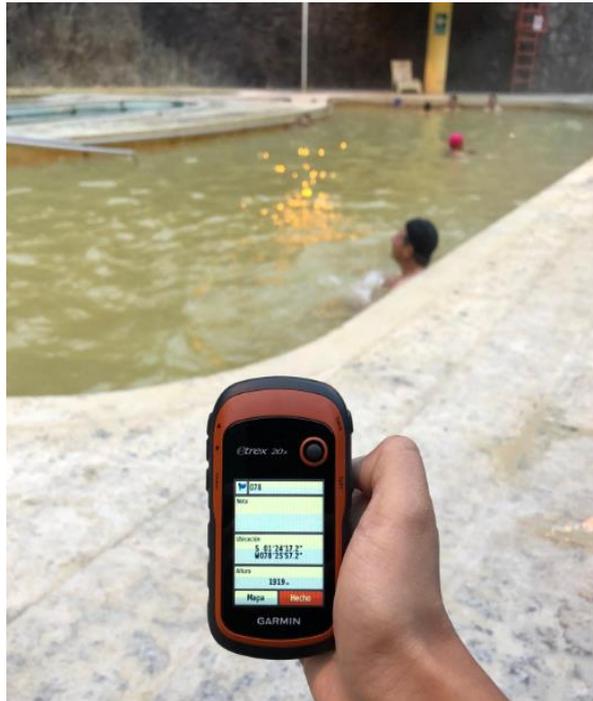
**Anexo 6. Manual de uso LUDLUM Modelo 44-38**



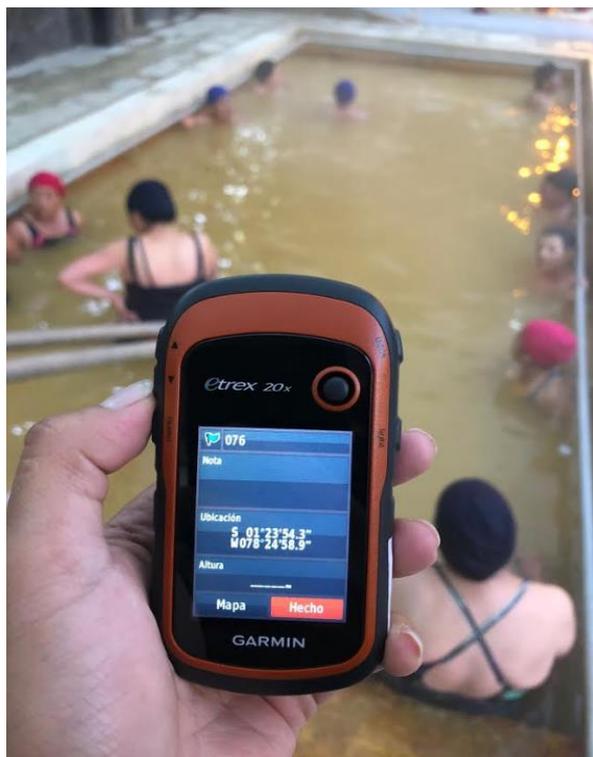
**Anexo 7. Manual de uso LUDLUM Modelo 3-97**



**Anexo 8.** Coordenadas de la piscina abierta en El Salado.



**Anexo 9.** Coordenadas de la piscina cubierta en El Salado.



**Anexo 10.** Coordenadas de la piscina número 1 de La Virgen



**Anexo 11.** Coordenadas de la piscina número 2 de la Virgen



**Anexo 12.** Coordenadas de la piscina número 1 en Santa Ana



**Anexo 13.** Coordenadas de la piscina número 2 en Santa Ana



