



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

**“CARACTERIZACIÓN DE RADIONUCLEIDOS PRESENTES EN
FUENTES TERMALES DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO Y
ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DOSIS EQUIVALENTE PARA LA
POBLACIÓN”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: BYRON GEOVANNY QUIROZ DAMIAN

TUTORA: BIOF. ROSA MARICELA ORMAZA HUGO MSC.

Riobamba – Ecuador

2018

© 2018, Byron Geovanny Quiroz Damian

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

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo experimental: **“Caracterización de radionucleidos presentes en fuentes termales de la provincia de Chimborazo y estimación de la tasa de dosis equivalente para la población”**, de responsabilidad del señor Byron Geovanny Quiroz Damian, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Biof. Vilma Yanchapanta Bastidas Msc.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Biof. Rosa Ormaza Hugo Msc.
**DIRECTORA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Dr. Celso Recalde Moreno
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

“Yo, Byron Geovanny Quiroz Damian, soy responsable de las ideas y doctrinas y resultados expuestos en el presente Trabajo de Titulación; y, el patrimonio intelectual del mismo, pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.”

Byron G. Quiroz D.

DEDICATORIA

A Dios por la oportunidad de cumplir mis metas.

A mis padres y hermanos con gran afecto y gratitud.

Byron G. Quiroz D.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y sus docentes por impartir su gran conocimiento.

Al personal de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares.

Al Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente y sus miembros.

A la Biof. Rosita Ormaza por su paciencia y apoyo en el desarrollo del trabajo de investigación.

Al Dr. Celso Recalde por su apoyo e impulso a realizar investigación.

A la Dra., Gina Alvares por su gran apoyo técnico.

Al gran esfuerzo y sacrificio de mis padres Delia y Aníbal por su gran apoyo en los buenos y malos momentos.

Byron G. Quiroz D.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xvii
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO REFERENCIAL	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento de Problema	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Radiactividad.....	7
2.2 Radiactividad Natural	7
2.2.1 <i>Radiación Cósmica</i>	8
2.2.2 <i>Radiación Terrestre</i>	8
2.3 Radionucleidos en serie.....	9
2.4 Radionucleidos no en serie	11
2.5 Tipos de radiaciones ionizantes.....	13
2.5.1 <i>Partículas alfa</i>	13
2.5.2 <i>Partículas beta</i>	14
2.5.3 <i>Radiación gamma</i>	15
2.6 Exposición externa	15
2.7 Exposición interna.....	15
2.8 Transferencia de radionucleidos al agua	16
2.9 Detección de contenidos radiológicos	17

2.10	Magnitudes que caracterizan la radiactividad	17
<i>2.10.1</i>	<i>Actividad</i>	17
<i>2.10.2</i>	<i>Actividad Especifica</i>	18
<i>2.10.3</i>	<i>Periodo de semidesintegración</i>	18
<i>2.10.4</i>	<i>Equilibrio radiactivo</i>	19
<i>2.10.5</i>	<i>Dosis Absorbida</i>	20
<i>2.10.6</i>	<i>Dosis Equivalente</i>	20
<i>2.10.7</i>	<i>Dosis efectiva</i>	21
2.11	Tipos de muestras y técnicas de muestreo	22
2.12	Espectrometría gamma	23
2.13	Contador alfa -beta total	24
2.14	Aguas termales en la provincia de Chimborazo	25
2.15	Coefficiente de dosis en piel por inmersión en agua	27
 CAPÍTULO III		
3.	METODOLOGÍA	
3.1	Tipo de investigación	28
3.2	Unidad de análisis	28
3.3	Características de equipos experimentales	28
<i>3.3.1</i>	<i>Contador de radiación alfa-beta total modelo LUDLUM 3030E</i>	28
<i>3.3.1.1</i>	<i>Especificaciones técnicas del contador</i>	29
<i>3.3.1.2</i>	<i>Especificaciones técnicas del escalador tradicional</i>	30
<i>3.3.2</i>	<i>Espectrómetro gamma modelo GCD-40180X</i>	31
<i>3.3.2.1</i>	<i>Especificaciones técnicas del espectrómetro gamma</i>	31
3.4	Hipótesis	33
3.5	Variable independiente y dependiente	33
3.6	Tipo y caracterización de pruebas experimentales aplicadas	33
<i>3.6.1</i>	<i>Análisis alfa-beta total</i>	33
<i>3.6.2</i>	<i>Análisis gamma</i>	34
3.7	Diseño Experimental	35

3.7.1	<i>Localización de las fuentes de agua termal muestreadas</i>	36
3.7.2	<i>Análisis de parámetros físico-químicos “in situ” de las fuentes de agua termal</i>	37
3.7.3	<i>Equipos y materiales para toma y preparación de muestras</i>	39
3.7.4	<i>Recolección de muestras</i>	40
3.7.5	<i>Ingreso y etiquetado de muestras</i>	41
3.7.6	<i>Calibración de equipos</i>	42
3.7.6.1	<i>Curvas de autoabsorción para el análisis alfa-beta totales</i>	42
3.7.6.2	<i>Curvas de calibración para espectrometría gamma</i>	43
3.8	Recolección, organización y procesamiento de datos	46
3.8.1	Análisis alfa-beta total	46
3.8.1.1	<i>Estimación del volumen requerido para el análisis</i>	46
3.8.1.2	<i>Calculo del espesor másico</i>	47
3.8.1.3	<i>Tasa de recuento alfa-beta</i>	48
3.8.2	Análisis por espectrometría gamma	50
3.8.2.1	<i>Datos obtenidos del espectrómetro gamma</i>	50
CAPÍTULO IV		
4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
4.1	Cálculo de la actividad específica alfa-beta total	54
4.2	Análisis estadístico descriptivo para las actividades específicas alfa-beta total	55
4.3	Cálculo de la actividad específica para emisiones gamma	56
4.4	Análisis estadístico descriptivo para las actividades específicas gamma	57
4.5	Cálculo de la tasa de dosis equivalente total en piel por inmersión en agua	58
4.6	Análisis estadístico descriptivo para la tasa de dosis equivalente total en piel	59
4.7	Modelos de correlación	60
4.8	Discusión de resultados	62
CONCLUSIONES		63
RECOMENDACIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2.	Dosis efectiva anual producida por los principales radionucleidos cosmogénicos...	8
Tabla 2-2.	Isótopos de la serie del ^{238}U	10
Tabla 3-2.	Isótopos de la serie del ^{235}U	10
Tabla 4-2.	Isótopos de la serie del ^{232}Th	11
Tabla 5-2.	Radionucleidos no en serie	12
Tabla 6-2.	Factores ponderales de radiación	21
Tabla 7-2.	Factores ponderales de tejido/ órgano.....	22
Tabla 8-2.	Técnicas para la conservación de muestras en análisis radiológicos	22
Tabla 9-2.	Coordenadas geográficas de las fuentes de la provincia de Chimborazo	26
Tabla 1-3.	Especificaciones técnicas del contador alfa-beta total.....	29
Tabla 2-3.	Especificaciones técnicas del escalador alfa-beta total.....	30
Tabla 3-3.	Especificaciones técnicas del espectrómetro gamma GCD-40180X.....	31
Tabla 4-3.	Variable Independiente y dependiente.....	33
Tabla 5-3.	Parámetros físico-químicos tomados “in situ” en las fuentes de agua termal	38
Tabla 6-3.	Descripción de equipos y materiales.....	39
Tabla 7-3.	Volumen de muestra requerido para el análisis	47
Tabla 8-3.	Espesores máxicos para cada muestra.....	48
Tabla 9-3.	Tasa de recuento alfa y beta para cada muestra con su factor de autoabsorción	49
Tabla 10-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Guayllabamba	50
Tabla 11-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Pantus	50
Tabla 12-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Conugpogyo	51
Tabla 13-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Los Elenes	51
Tabla 14-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma El Carmen	51
Tabla 15-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 1	52
Tabla 16-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 2	52
Tabla 17-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 3	52
Tabla 18-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 4	53
Tabla 19-3.	Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 5	53
Tabla 1-4.	Medidas de actividad alfa-beta total de las fuentes termales	55
Tabla 2-4.	Estadística descriptiva para los datos de actividad específicas alfa-beta total.....	55
Tabla 3-4.	Medidas de actividad gamma de las fuentes termales	57
Tabla 4-4.	Estadística descriptiva para los datos de actividad específicas gamma.	57
Tabla 5-4.	Tasa de dosis equivalente total por inmersión en las fuentes termales	58

Tabla 6-4. Estadística descriptiva para la tasa de dosis equivalente total en piel.....	59
Tabla 7-4. Coeficientes de correlación.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Esquema de decaimiento del ^{40}K	12
Figura 2-2. Esquema de decaimiento α del ^{226}Ra al ^{222}Rn	13
Figura 3-2. Esquema de los posibles decaimientos β del ^{137}Cs	14
Figura 4-2. Esquema del sistema de espectrometría gamma.	24
Figura 1-3. Etiqueta y código de la muestra número 10	41
Figura 2-3. Geometría tipo marinelli utilizada en la calibración en eficiencia	45

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2. Ubicación de la provincia de Chimborazo según el Ecuador continental.....	26
Gráfico 1-3. Mapa de ubicación de las fuentes de agua termal de la provincia de Chimborazo	36
Gráfico 2-3. Mapa de ubicación de las fuentes de agua termal de Palictahua	37
Gráfico 3-3. Proceso de muestreo aplicado en análisis de las fuentes termales	40
Gráfico 4-3. Curva de eficiencia con un ajuste lineal para el ^{241}Am	42
Gráfico 5-3. Curva de eficiencia con un ajuste lineal para el ^{90}Sr	43
Gráfico 6-3. Calibración en energía según el estándar multinúclidos	44
Gráfico 7-3. Curva en eficiencia para el sistema de espectrometría gamma.....	45
Gráfico 1-4. Actividad específica alfa-beta total de las fuentes termales	56
Gráfico 2-4. Actividad específica de los radionucleidos emisores gamma	58
Gráfico 3-4. Tasa de dosis equivalente en piel por inmersión en las fuentes termales	59
Gráfico 4-4. Tasa de dosis equivalente total en piel por inmersión en las fuentes termales	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A Ficha técnica para la recolección de los datos de campo.

Anexo B Toma de muestras.

Anexo C Preparación de las muestras en el laboratorio.

Anexo D Sistema de espectrometría gamma.

Anexo E Centellador de sulfuro de zinc dopado con plata.

Anexo F Reporte alfa-beta total.

Anexo G Reportes gamma.

Anexo H Coeficientes para la estimación de dosis equivalente por inmersión en agua.

LISTA DE ABREVIATURAS

MEER:	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
SCAN:	Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares
CEEA:	Centro de Energías Alternativas y Ambiente
HpGe:	Germanio Híper puro
MCA:	Analizador multicanal
Bq/L:	Bequerelios/Litro
ZnS (Ag):	Sulfuro de zinc dopado con plata
Pb:	Plomo
Bi:	Bismuto
Th:	Torio
U:	Uranio
K:	Potasio
Rn	Radón
UNSCEAR:	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
ICRU:	International Commission on Radiation Units and Measurements
g:	Gramos
mg:	Miligramo
KeV:	Kilo electronvoltio
μSv:	Micro sievert
OMS:	Organización Mundial de la Salud
H:	Dosis equivalente
OIEA:	Organización Internacional de energía atómica
CPS:	Cuentas por Segundo
DPS:	Desintegración por segundo

ε:	Eficiencia
α:	Alfa
β:	Beta
γ:	Gamma
λ:	Constante de decaimiento
A_{esp}:	Actividad específica
ARAD:	Análisis radiológico

RESUMEN

En la provincia de Chimborazo se localizan diez manantiales de agua con temperaturas entre 21-38 °C, las mismas pueden considerarse como fuentes termales. Se investigaron los aspectos radiológicos del agua termal en los cantones Chambo, Guano, Riobamba, Penipe, Colta y Alausí. Las actividades específicas de los radionucleidos naturales del ^{235}U , ^{212}Pb , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{40}K se determinaron mediante espectrometría gamma y por el método de evaporación directa con el uso de un centellador de sulfuro de zinc dopado con plata se estimó los índices de actividad específica alfa-beta total. Los radionucleidos emisores gamma identificados pertenecen a las series radiactivas naturales del ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U ; para la serie del ^{238}U se identificó ^{234}Th , ^{214}Pb y ^{214}Bi , con 6,1 Bq/L, 1,15 Bq/L y 1,06 Bq/L; para la serie del ^{232}Th se identificó el ^{212}Pb con 0,72 Bq/L y ^{235}U con un valor de 0,55 Bq/L; además, se identificó ^{40}K con 4 Bq/L, todos estos valores correspondientes a las concentraciones promedio de cada radionucleido. El valor promedio de las actividades alfa y beta total estimados presentan valores de 0,66 Bq/L y 0,22 Bq/L, respectivamente. Por otro lado, al estimar la tasa de dosis equivalente total por inmersión en agua, se determina que la contribución a la tasa dosis anual para la población es relativamente baja, del orden de los μSv , por lo cual las fuentes termales de la provincia de Chimborazo pueden ser consideradas no radiactivas.

Palabras claves: <CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES>, <BIOFÍSICA>, <ASPECTOS RADIOLÓGICOS>, <FUENTES TERMALES>, <ESPECTROMETRÍA GAMMA>, <CENTELLADOR DE SULFURO DE ZINC>, <RADIONUCLEIDOS>, <ALFA-BETA TOTAL>

SUMMARY

In Chimborazo province there are ten water springs with temperatures between 21-38 °C, which can be considered as thermal sources. The radiological aspects of thermal water were investigated in Chambo, Guano, Riobamba, Penipe, Colta and Alausi cantons. The specific activities of the natural radionuclides of ^{235}U , ^{212}Pb , ^{234}Th , ^{214}Pb ^{214}Bi and ^{40}K , were determined by gamma spectrometry and by the direct evaporation method the total alpha-beta specific activity indices were estimated with a zinc sulphide scintillator doped with silver. The identified gamma-emitting radionuclides belong to the natural radioactive series of ^{238}U , ^{232}Th and ^{235}U . For the ^{238}U series, ^{234}Th , ^{214}Pb and ^{214}Bi were identified, with 6.1 Bq/L, 1.15 Bq/L and 1.06 Bq/L; for the ^{232}Th series the ^{212}Pb was identified with 0.72 Bq/L and in the ^{235}U with a value of 0.55 Bq / L; in addition, ^{40}K was identified with 4 Bq/L, all these values corresponding to the average concentrations of each radionuclide. The average value of the total alpha and beta activities estimated have values of 0.66 Bq/L and 0.22 Bq/L, respectively. On the other hand, when estimating the total equivalent dose rate for water immersion, it is determined that the contribution to the annual dose rate for the population is relatively low in the order of μSv , therefore, the thermal sources of Chimborazo province are considered non-radioactive.

Keywords: <EXACT AND NATURAL SCIENCES>, <BIOPHYSICS>, <RADIOLOGICAL ASPECTS>, <TERMAL SOURCES>, <GAMMA SPECTROMETRY>, <ZINC SULPHIDE SCINTILLATOR>, < RADIONUCLIDES>, <TOTAL ALPHA-BETA>

INTRODUCCIÓN

La provincia de Chimborazo debido a la presencia de estructuras volcánica y a su relieve montañoso irregular, presenta fuentes termales distribuidas en los cantones Chambo, Guano, Riobamba, Penipe, Colta y Alausí; estos recursos naturales principalmente son usados como atractivos turísticos y terapéuticos. En la mayoría de las fuentes termales se han realizado análisis físico-químicos para determinar la calidad del agua, ignorando el contenido de elementos radiológicos.

En las fuentes termales, durante su trayectoria a la superficie se generan diversos procesos hidrogeológicos con diferentes tipos de rocas y suelos, lo cual propicia la posibilidad de encontrar radionúclidos disueltos. Por esta razón, mediante este trabajo de investigación se busca caracterizar el contenido radiológico en las fuentes termales de la provincia de Chimborazo.

El contenido radiológico para las fuentes termales puede ser estimado a partir de los índices de actividad, que informan de la presencia de radionucleidos en las muestras de agua (Consejo de Seguridad Nuclear, 2006, p. 8). Los índices de actividad se determinaron a través de un espectrómetro gamma y un centellador de sulfuro de zinc dopado con plata, los cuales se encuentran en el laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva de la Subsecretaria de Control y Aplicaciones Nucleares que a su vez forma parte del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

Es de gran importancia realizar estos estudios ambientales, con la finalidad de establecer estándares de protección radiológica, ya que la exposición a dosis bajas de radiación ionizante puede producir efectos biológicos para la población a largo plazo. Además, en la actualidad no existe una normativa técnica que regule el uso de aguas termales desde el punto de vista radiológico.

En el presente trabajo de investigación se describe la problematización a ser investigada en base a estudios realizados, conjuntamente se exponen bases teóricas y la metodología utilizada. Además se realizó la evaluación radiológica de las fuentes termales de la provincia de Chimborazo a través de los índices de actividad, para las emisiones alfa-beta total y gamma estimados experimentalmente. Simultáneamente se realizarán las recomendaciones pertinentes para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

A partir del descubrimiento de los rayos X por Roentgen (1895) y la radiactividad por Becquerel (1896), inician una serie de investigaciones referente a radiación y protección radiológica, con la finalidad de prevenir y evitar accidentes o incidentes que afecten la salud de la población. En el año 1906, el Dr. Gregorio Fernández catedrático de la Universidad Literaria de Granada reportó que, en agosto de 1903, S. Allen descubrió por primera vez la presencia de elementos radiactivos en aguas termales, atribuyéndoles a dichos elementos propiedades curativas (Fernández, 1906, pp. 14-15).

Integrantes del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones de Cuba, en el año 2006 realizaron un “Análisis de la Radiactividad en el Balneario Elguea”, estimando tasas de dosis ambiental gamma entre 0,13 y 2,3 mSv, conjuntamente realizaron un levantamiento de espectrometría gamma in situ mediante el sistema SILENA, concluyeron que todos los radionucleidos identificados durante el estudio pertenecen a las series radiactivas naturales del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . El ^{226}Ra fue el radionucleido con mayor concentración de $6,3 \pm 0,4$ Bq/Kg en las aguas termales (Rodríguez, et al., 2006, pp. 2-5).

En Argentina en el año 2007 en la provincia Entre Ríos realizaron “ Dosaje de radionucleidos en los complejos termales”, reportando concentraciones de ^{222}Rn de 0,097 mBq/L y ^{238}U con 1,9 mg/L, por debajo del límite de detección internacional, a excepción del valor del ^{210}Pb con un valor de concentración de 170 mBq/L, valor que oscila entre los límites de detección, con los valores expuestos concluyeron que las aguas no son radiactivas (Canoba, et al., 2008, pp. 51-54).

En Serbia durante el período 2007-2008, investigadores aplicaron un “Análisis estadístico multivariado de los datos hidroquímicos y radiológicos de las aguas termales”, basándose en que la radiactividad natural de las aguas subterráneas, está relacionada directamente con el tipo de capas geológicas atravesadas por estas y sus condiciones físico-químicas, obtuvieron datos preliminares radiactivos de actividades alfa y beta totales, mediante espectrometría gamma determinaron concentraciones de ^{238}U , ^{228}Ra , ^{226}Ra y ^{40}K y concentraciones de cationes y aniones de 30 muestras de agua, además midieron datos físico-químicos “in situ”, mostrando temperaturas

de 14,4-95°C, una amplia variación del pH de 6,5-9, la conductividad eléctrica de 110-5100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el contenido total de sólidos disueltos de 110-6200 mg/L. Para obtener una distribución normal estándar de los datos realizaron una transformación Box-Cox, como resultado del análisis estadístico multivariante obtuvieron fuertes asociaciones de correlación entre los elementos alcalinos y alcalinotérreos con los isótopos de Radio y las actividades alfa y beta totales del 70% de las muestras (Tanaskovic, et al., 2011, pp. 229-233).

En el artículo “Aspectos radiológicos de algunos manantiales termo-minerales egipcios”, mediante espectrometría gamma, fluorometría láser y espectrometría alfa hallaron las actividades del ^{226}Ra , ^{40}K , Uranio total y ^{210}Pb , reportan que las concentraciones de actividad de los radionucleidos naturales en aguas termales varía según: el origen del agua, es decir, agua meteórica mezclada con agua de mar (golfos) y agua meteórica (pozos), la interacción agua-roca y su comportamiento químico. Concluyen que las concentraciones más altas de ^{226}Ra , Uranio total y ^{210}Pb se asocian con las temperaturas más altas del agua (Ashraf & Khater, 2003).

En la investigación “Radiactividad Natural en Aguas Minerales Embotelladas y Aguas Termales de Turquía”, utilizaron un contador proporcional de diez canales de bajo fondo con flujo de gas Berthold LB770-PC, para analizar las concentraciones de actividad alfa y beta gruesos de 40 muestras de agua mineral embotellada y 24 muestras de aguas termales, y se reportó para las aguas embotelladas la concentración media de actividad alfa grueso de 164 mBq/L, mientras que la concentración media de actividad beta de 555 mBq/L. Para las aguas termales las concentraciones medias de actividad alfa y beta gruesos fueron de 663 mBq/L y 3314 mBq/L respectivamente (Taskin, et al., 2013, pp. 415-418).

En Jordania identificaron los radionucleidos en aguas minerales calientes mediante un espectrómetro de rayos gamma con un detector de germanio de alta pureza, en los resultados muestran que la actividad ^{232}Th fue dominante en todos los sitios donde se detectó dicho elemento. Las actividades del ^{235}U y ^{40}K varían de 0,14 a 34,8 Bq/L, concluyen que las concentraciones de los radionucleidos naturales difieren ampliamente en cada sitio estudiado, la variación puede deberse a orígenes geológicos, profundidades y vías por donde fluye el agua (Saqan, et al., 2001, pp. 101-105).

En Cuba realizaron la “Evaluación de la carga radiacional sobre pacientes y trabajadores en el balneario Elguea”, a partir de la caracterización radiológica del balneario y su entorno. Los valores reportados de dosis se encuentran en un intervalo de 1,01 a 180 $\mu\text{Sv}/\text{año}$ para los trabajadores, además se presenta estimaciones de dosis para los pacientes en los siguientes escenarios de exposición: permanencia en los locales de la instalación, inhalación de radón,

tratamiento con lodos termales, inmersión en aguas termales generando una dosis total de 4 μSv por tratamiento (Zerquera, et al., 2011, pp. 9-13).

En el Ecuador se han realizado diferentes investigaciones referentes a la identificación de radionucleidos naturales en agua termales, en el año 2001 midieron radón en las fuentes termales de la provincia de Imbabura y Pichincha mediante un centellador inorgánico Pylon RM-1003, reportaron que, de 13 balnearios estudiados, los de la provincia de Pichincha presentan una mayor concentración de ^{222}Rn . Además, establecen para cada uno de los balnearios una mayor concentración de radón en el origen de la fuente termal que en las piscinas de recreación (Aragón, 2001, p. 1).

En el estudio “Caracterización radiológica y cálculo de la exposición externa de las aguas termales de la provincia de Tungurahua utilizando espectrometría gamma”, del año 2016 reportan resultados de 19 fuentes termales analizadas, con valores de actividad alfa totales de 2,45 Bq/L y actividad beta totales de 0,44 Bq/L como valores máximos, conjuntamente cuantificaron radionucleidos emisores gamma como: ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Po , ^{40}K y ^{228}Ac con concentraciones de 0,72 Bq/L hasta 5700 Bq/L. Concluyendo que no existe riesgo radiológico para la población (Reino, 2016, pp. 6;67-74).

En Chimborazo en el año 2012 realizó “Caracterización y elaboración de un inventario de fuentes geotérmicas de baja entalpia y propuesta de creación de un centro de investigación en la ESPOCH”, según los estudios físico-químicos realizados clasifican a las fuentes como mesotermiales e hipotermiales, conjuntamente elaboraron un inventario de las fuentes con cartografía geo referencial, que servirá como apoyo para futuras investigaciones (Carrasco & Naula, 2012, pp. 1-2;11-112).

1.2 Planteamiento de Problema

La radiactividad de las aguas termales se puede considerar como un peligro para los organismos vivos. A partir de los antecedentes planteados se advierte sobre la presencia de agentes radiactivos en estos acuíferos, ya que, la exposición a dosis bajas de radiación ionizante puede aumentar el riesgo de efectos para la salud a largo plazo (IPR, 2016).

Debido a la baja o alta concentración de radionucleidos, organismos internacionales advierten que no existe un umbral de seguridad para la exposición a la radiactividad (Navarro & Martín, 2010, p. 119), conjuntamente la UNSCEAR advierte sobre los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes incluso a dosis bajas (UNSCEAR, 1994).

Según las investigaciones realizadas a nivel nacional y mundial, se conoce que la concentración de radionucleidos en aguas termales pertenece en su gran mayoría a las series radiactivas del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th , además del ^{40}K , con lo cual se puede establecer que existe una problemática muy poco investigada en nuestro medio referente a este tema.

El Ecuador se encuentra atravesado por la cordillera de los Andes, dando origen a una serie de elevaciones y volcanes, estableciendo a la provincia de Chimborazo como una zona volcánica (Carrasco & Naula , 2012, p. 98), en la que se originan una serie de fuentes termales destinadas a diferentes usos para la población, por lo cual se considera relevante conocer la concentración radiológica de estas, para evitar posibles afectos para la salud.

Mediante este trabajo de investigación se identificará y determinará concentraciones de radionucleidos naturales presentes en las aguas termales de la provincia de Chimborazo, con el uso de un espectrómetro gamma GCD-40180X y un contador alfa-beta total modelo LUDLUM 3030E.

1.3 Justificación

La población está expuesta constantemente a radiaciones ionizantes de origen natural y artificial, generando posibles efectos adversos para la salud. La radiactividad natural es la responsable de la mayor tasa de dosis a la que se expone las personas, debido a que existen distintos radionucleidos naturales presentes en rocas y minerales de la corteza terrestre desde la formación de la tierra, dichos elementos pueden encontrarse en el agua, disueltos o suspendidos debido a los diferentes ciclos hidrogeológicos generados durante su trayectoria hacia la superficie.

La provincia de Chimborazo presenta una gran diversidad montañosa en las que se destaca suelos de naturaleza volcánica, suelos pantanosos propios de la región interandina. En la parte occidental de la provincia existen suelos francos con una gran variedad de suelos rocosos (Chávez, 2016, p. 7), todo esto incrementa la posibilidad de encontrar elementos radiactivos en las aguas termales de la provincia.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se cuenta con un inventario, ubicación y descripción geográfica de las aguas termales de la provincia de Chimborazo realizado en año 2012. Para el trabajo de campo se contó con el apoyo técnico del Laboratorio de Aguas de la ESPOCH, de igual manera con el respaldo del Centro de Energías Alternativas y Ambiente de la ESPOCH (CEAA), del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) mediante la

Subsecretaria de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) y el Departamento de Vigilancia Ambiental Radiactiva para el análisis de radiactividad de las muestras estudiadas.

Esta investigación genera un aporte social, vinculado fundamentalmente a la estimación de dosis para la población, lo cual permitirá a las instituciones de regulación nacional tomar medidas preventivas en el caso que sea necesario respecto a la seguridad radiológica de los entornos, donde yacen las fuentes termales. De igual manera los resultados obtenidos permitirán realizar una valoración radiológica de las fuentes termales de la provincia de Chimborazo.

Los resultados obtenidos conjuntamente con otros estudios similares pueden servir como base de datos para establecer límites permisibles para el uso de aguas termales, lo cual, actualmente no existe y con ello lograr establecer normas de seguridad para su uso de las aguas termales desde el punto vista radiológico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar los radionucleidos presentes en fuentes termales de la provincia de Chimborazo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la actividad específica debido a la concentración de los radionucleidos presentes en las fuentes termales de la provincia de Chimborazo.
- Estimar la tasa de dosis equivalente anual por inmersión en agua producida por los radionucleidos presentes en las fuentes termales de la provincia de Chimborazo.
- Establecer posibles correlaciones entre los parámetros físico-químicos y la concentración de radionucleidos presentes en las fuentes termales de la provincia de Chimborazo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 *Radiactividad*

La radiactividad es un fenómeno físico, que se caracteriza por la desintegración, debido a que un átomo inestable emite o radia su exceso de energía en forma de partículas u ondas, este proceso es conocido como radiación ionizante (Zutta, 2014, p. 10).

Los átomos inestables que contienen un exceso de protones o de neutrones dan origen a las desintegraciones radiactivas, que se basan en las leyes físicas de conservación de la energía, conservación del momento lineal, conservación del momento angular, conservación de la carga eléctrica y conservación de la masa (Zutta, 2014, pp. 10-11), generando 3 tipos de radiaciones ionizante alfa, beta y gamma, hasta alcanzar la estabilidad del átomo.

2.2 *Radiactividad Natural*

La radiación ionizante natural está presente en todo el entorno, los rayos cósmicos llegan a la tierra desde el espacio exterior, trazas de radionúclidos incorporados en la corteza terrestre, exposición interna debido a radionucleidos llevados al cuerpo a través de ingestión y exposiciones por inhalación en interiores debido al radón, por lo cual, estamos expuestos a la radiación natural en menor o mayor medida. La radiactividad natural está presente en los alimentos, aire, organismo, suelo y agua, que es la principal fuente de exposición a la radiación para la mayoría de las personas de forma constante (International Atomic Energy Agency , 2004, p. 29).

La exposición debido a fuentes naturales es variable y depende de diversos factores como:

- La altura sobre el nivel del mar, debido a la radiación cósmica que es atenuada en parte por la atmósfera, es decir las personas que viven a grandes alturas reciben dosis mucho más elevadas de radiación externa, pudiendo superar el valor medio de dosis mundial de 2,4 mSv estimada por la UNSCEAR.
- Contenido de radionucleidos en el suelo, materiales de construcción y agua contribuye a una mayor dosis para la población (Colegio Oficial de Físicos, s.f.).

2.2.1 Radiación Cósmica

Los rayos cósmicos son principalmente protones procedentes del espacio que alcanzan la atmósfera en cantidades relativamente constantes, durante su trayectoria en la atmósfera inician una serie de reacciones nucleares complejas produciendo una serie de radionucleidos cosmogénicos. Los más conocidos son ^3H , ^{14}C y ^{22}Na . Según la UNSCEAR estima que la dosis efectiva anual cósmica a nivel del suelo aproximadamente de 0.4 mSv (International Atomic Energy Agency, 2004, p. 29).

La producción de radionucleidos cosmogénicos no solo depende de la altitud sino también de la latitud, debido a la disminución del efecto blindaje que ejerce la atmósfera. Los radionucleidos cosmogénicos contribuyen poco a la dosis de radiación y son principalmente de relevancia como trazadores en la atmósfera y en los sistemas hidrogeológicos después de su deposición, mientras que los radionucleidos ^3H , ^{14}C y ^{22}Na son elementos con funciones metabólicas en el cuerpo humano, generando una exposición interna en la población (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, pp. 84-85;89).

Tabla 1-2. Dosis efectiva anual producida por los principales radionucleidos cosmogénicos

Isótopo	Vida Media	Dosis efectiva (μSv)
^{14}C	5730 a	12
^{22}Na	2.602 a	0.15
^3H	12.33 a	0.01
^7Be	53.29 d	0.03

Fuente: (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000).

2.2.2 Radiación Terrestre

Los radionucleidos primordiales de origen terrestre y sus productos de desintegración están presentes en diversas concentraciones en todos los medios del entorno, incluido el cuerpo humano. La principal fuente de irradiación externa se debe a la radiación gamma producida por los radionucleidos de las series ^{238}U y ^{232}Th y por el ^{40}K . Otros radionucleidos terrestres como: ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm y la serie del ^{235}U existen en la naturaleza, pero en bajas concentraciones representan una baja contribución a la dosis para la población (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, pp. 89-91).

La energía proveniente de la desintegración del ^{238}U y ^{232}Th , ^{40}K , contribuyen al mantenimiento de la temperatura interna de la Tierra. Los diferentes ciclos geológicos permiten que el ^{238}U se disperse a través de rocas, suelo y agua en bajas concentraciones hacia la corteza terrestre, siendo

el padre de una larga serie de radionucleidos, entre ellos el gas ^{222}Rn , que puede alcanzar la atmósfera, donde continúa deteriorándose, es el responsable de la mayor dosis para la población. El ^{232}Th se dispersa de manera similar en el suelo y agua. El ^{40}K es mucho más común que el ^{238}U y ^{232}Th , representando el 2,4% del peso de la corteza terrestre (International Atomic Energy Agency , 2004, p. 30).

Los radionucleidos presentes en el suelo, materiales de construcción, aire y agua emiten rayos gamma generando una irradiación externa e interna, por lo cual se estima que la dosis promedio debido a emisiones gamma es aproximadamente 0,5 mSv por año. Este valor ha variado en algunos lugares donde la concentración de radionucleidos gamma es relativamente alta como en la India, Francia y Brasil que superan el valor promedio hasta 20 veces más (International Atomic Energy Agency , 2004, p. 31).

2.3 Radionucleidos en serie

Los elementos radiactivos se clasifican en grupos o series radiactivas de tal manera que cualquier elemento del grupo está formado por la desintegración del elemento anterior a él (Cánovas, 2007, p. 11), considerado como el decaimiento del núcleo padre en sus hijos o productos. En cada modo de desintegración viene dado según la constante parcial de decaimiento λ_i , considerando la suma de las mismas como la constante de decaimiento total del nucleído (Errico, s.f., pp. 17-18).

$$\lambda = \sum_i^k \lambda_i \quad (1-2)$$

Donde k es el número de modos de decaimiento.

Las tres series radiactivas naturales, que tienen un periodo de semidesintegración con una magnitud de la edad de la tierra son:

- La serie del uranio-radio, empezando con el ^{238}U y acabando en el ^{206}Pb .
- La serie del actinio, empezando con el ^{235}U y acabando en el ^{207}Pb .
- La serie del torio, empezando con el ^{232}Th y acabando en el ^{208}Pb (Cánovas, 2007, pp. 11-12).

Tabla 2-2. Isótopos de la serie del ^{238}U

Elemento	Símbolo	Vida media	Energía (MeV)			Porcentaje de ocurrencia γ
			α	β	γ	
$^{92}\text{Uranio}$	U^{238}	$4,5 \times 10^9$ a	4,2	---	0,048	23
$^{90}\text{Torio}$	Th^{234}	24,1 d	---	0,19	0,09	4
$^{91}\text{Protactinio}$	Pa^{234}	1,17 m	---	2,29	1	0,6
$^{92}\text{Uranio}$	U^{234}	$2,5 \times 10^5$ a	4,8	---	0,05	28
$^{90}\text{Torio}$	Th^{230}	$7,5 \times 10^4$ a	4,8	---	0,068	24
$^{88}\text{Radio}$	Ra^{226}	1600 a	4,8	---	0,186	4
$^{86}\text{Radón}$	Rn^{222}	3,82 d	5,49	---	0,5	0,07
$^{84}\text{Polonio}$	Po^{218}	3,05 m	6,00	---	---	---
$^{82}\text{Plomo}$	Pb^{214}	26,8 m	---	0,65	0,24	4
$^{83}\text{Bismuto}$	Bi^{214}	19,9 m	5,5	1,5	0,61	47
$^{84}\text{Polonio}$	Po^{214}	164 μs	7,7	---	0,8	0,014
$^{82}\text{Plomo}$	Pb^{210}	22,3 a	---	0,016	0,046	81
$^{83}\text{Bismuto}$	Bi^{210}	5,0 d	---	1,16	---	---
$^{84}\text{Polonio}$	Po^{210}	138 d	5,3	---	0,8	0,001
$^{82}\text{Plomo}$	Pb^{206}		Estable			

Fuente: (Scoccola, 2004).

Tabla 3-1. Isótopos de la serie del ^{235}U

Elemento	Símbolo	Vida media	Energía (MeV)			Porcentaje de ocurrencia γ
			α	β	γ	
$^{92}\text{Uranio}$	U^{235}	7×10^8 a	4,38	---	0,185	12
$^{90}\text{Torio}$	Th^{231}	25,5 h	---	0,3	0,25	90
$^{91}\text{Protactinio}$	Pa^{231}	$3,3 \times 10^4$ a	5,06	---	muchas	
$^{89}\text{Actinio}$	Ac^{227}	21,8 a	4,95	0,046	muchas	
$^{90}\text{Torio}$	Th^{227}	18,7 d	6,04	---	muchas	
$^{88}\text{Radio}$	Ra^{223}	11,4 d	5,86	---	muchas	
$^{86}\text{Radón}$	Rn^{219}	4 s	6,82	---	0,27	11
$^{84}\text{Polonio}$	Po^{215}	1,78 ms	7,38	---	---	---
$^{82}\text{Plomo}$	Pb^{211}	36,1 m	---	1,36	0,83	20
$^{83}\text{Bismuto}$	Bi^{211}	2,15 m	6,62	0,59	0,35	

⁸¹ Talio	Tl ²⁰⁷	4,79 m	---	1,44	0,90	0,16
⁸² Plomo	Pb ²⁰⁷		Estable			

Fuente: (Scoccola, 2004).

Tabla 4-2. Isótopos de la serie del ²³²Th

Elemento	Símbolo	Vida media	Energía (MeV)			Porcentaje de ocurrencia γ
			α	β	γ	
⁹⁰ Torio	Th ²³²	1,4 × 10 ¹⁰ a	4	---	0,06	23
⁹¹ Radio	Ra ²²⁸	5,8 a	---	0,054	---	---
⁸⁹ Actinio	Ac ²²⁸	6,13 h	---	1,11	0,09	30
⁹⁰ Torio	Th ²²⁸	1,91 a	5,43	---	0,08	28
⁸⁸ Radio	Ra ²²⁴	3,7 d	5,68	---	0,24	5
⁸⁶ Radón	Rn ²²⁰	55,6 s	6,29	---	---	---
⁸⁴ Polonio	Po ²¹⁶	145 ms	6,78	---	---	---
⁸² Plomo	Pb ²¹²	10,6 h	---	0,36	0,238	81
⁸³ Bismuto	Bi ²¹²	60,6 m	6,05	2,2	0,04	17
⁸⁴ Polonio	Po ²¹²	300 ns	8,78	---	---	---
⁸¹ Talio	Tl ²⁰⁸	3,1 m	---	1,79	2,62	100
⁸² Plomo	Pb ²⁰⁸		Estable			

Fuente: (Scoccola, 2004).

2.4 Radionucleidos no en serie

Los elementos radiactivos inestables decaen a un estado más estable, con un único decaimiento radiactivo, en el que involucran distintos tipos de desintegración. El ⁴⁰K tiene un 83,3% de probabilidad de emitir una partícula β^- de 1312 MeV de energía máxima para decaer en ⁴⁰Ca, un 10% de decaer en ⁴⁰Ar emitiendo un positrón y un fotón de 1460 MeV y, un 0,001% de desintegrarse por captura electrónica (Errico, s.f., p. 17).

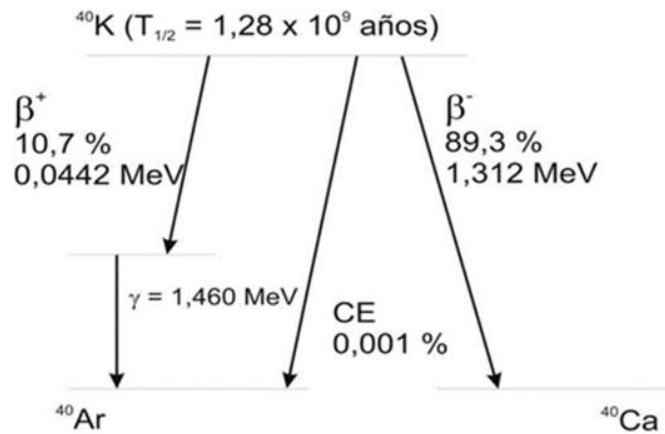


Figura 1-2. Esquema de decaimiento del ^{40}K

Fuente: (Errico, s.f.).

A continuación, se describen algunos ejemplos de radionúclidos que decaen directamente en un isótopo estable.

Tabla 5-2. Radionucleidos no en serie

Nucleído	Abundancia relativa (%)	Nucleído estable	Vida media (años)
^{14}C	-----	^{14}N	5730
^{40}K	0,018	^{40}Ar , ^{40}Ca	$1,28 \times 10^9$
^{50}V	0,24	^{40}Ti , ^{50}Cr	6×10^{15}
^{87}Rb	27,85	^{87}Sr	$4,7 \times 10^{10}$
^{115}In	96,67	^{115}Sn	5×10^{14}
^{123}Te	0,87	^{123}Sb	$1,2 \times 10^{13}$
^{138}La	0,089	^{138}Ba , ^{138}Ce	$1,1 \times 10^{11}$
^{142}Ce	11,7	^{138}Ba	5×10^{15}
^{144}Nd	23,8	^{140}Ce	$2,4 \times 10^{15}$
^{147}Sm	15,1	^{143}Nd	$1,06 \times 10^{11}$
^{148}Sm	11,35	^{144}Nd	$1,2 \times 10^{13}$
^{149}Sm	14	^{145}Nd	4×10^{14}
^{152}Gd	0,205	^{148}Sm	$1,1 \times 10^{14}$
^{156}Dy	0,057	^{152}Gd	2×10^{14}
^{174}Hf	0,163	^{170}Yb	$4,3 \times 10^{15}$
^{176}Lu	2,588	^{176}Hf	$2,2 \times 10^{10}$
^{187}Re	62,93	^{187}Os	4×10^{10}
^{190}Pt	0,0127	^{186}Os	7×10^{11}

^{204}Pb	1,4	^{200}Hg	$1,4 \times 10^{17}$
-------------------	-----	-------------------	----------------------

Fuente: (Froehlich, 2010).

2.5 Tipos de radiaciones ionizantes

La desintegración radiactiva de un átomo inestable, denominado padre tiene la probabilidad de caer en varios productos hijos hasta alcanzar la estabilidad, durante los procesos de desintegración los átomos emiten energía o partículas. Este proceso de transformación se da a través de 3 tipos de radiaciones ionizantes: partículas alfa, partículas beta y radiación gamma.

2.5.1 Partículas alfa

Los núcleos radiactivos con un número atómico muy alto (mayor que 82) se desintegran con mayor frecuencia mediante la emisión de una partícula α , compuesta por dos protones y dos neutrones. Esta partícula α es un núcleo de helio. Como resultado el número atómico del núcleo se reduce en dos y el número másico se reduce en cuatro (Khan, 2003, p. 20). El proceso es el siguiente:



Donde Q representa la energía de desintegración liberada durante el proceso, como consecuencia de la diferencia de masas se emiten rayos gamma. Como ejemplo, se da en el decaimiento del ^{226}Ra al ^{222}Rn .

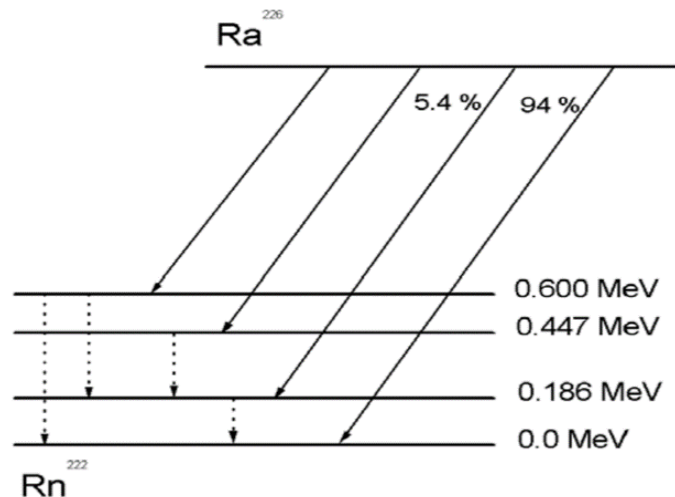


Figura 2-2. Esquema de decaimiento α del ^{226}Ra al ^{222}Rn

Fuente: (Scoccola, 2004).

En la figura 2-2, se observa el decaimiento del ^{226}Ra al ^{222}Rn acompañado de emisiones gamma. Las líneas oblicuas continuas indican los posibles decaimientos α , mientras que las líneas entrecortadas indican posteriores decaimientos γ .

2.5.2 Partículas beta

El proceso de desintegración radiactivo, en el cual se emite un electrón positivo o negativo desde el núcleo se denomina decaimiento β , debido a la interacción de un protón con un neutrón o viceversa. La emisión de un electrón acompañado de un antineutrino se denota por β^- y la emisión de un positrón acompañado por un neutrino se denota por β^+ , además se da la emisión de rayos gamma (Khan, 2003, p. 20). Descritos como:

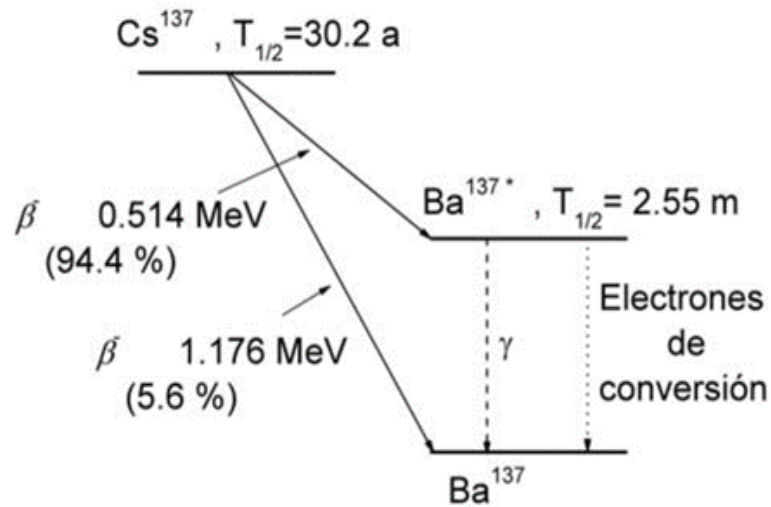


Figura 3-2. Esquema de los posibles decaimientos β^- del ^{137}Cs

Fuente: (Scoccola, 2004).

2.5.3 Radiación gamma

La radiación gamma es una forma de radiación electromagnética emitida por los núcleos inestables que a menudo emite una partícula α o β al mismo tiempo. La radiación gamma causa la ionización en los átomos cuando pasa a través de la materia, debido a las interacciones con los electrones generando un efecto cascada de ionizaciones (International Atomic Energy Agency, 2004, p. 8).

2.6 Exposición externa

La exposición externa se debe principalmente a la radiación gamma producida por los radionucleidos terrestres presentes en trazas en todos los suelos, que pueden ser transferidos a distintos sistemas, incluyendo los acuáticos. Los niveles de concentración están relacionados específicamente con los tipos de roca de donde provienen los suelos, los niveles más altos de radiación están asociados con rocas ígneas, como el granito y en niveles más bajos en rocas sedimentarias. Los radionucleidos de las series ^{238}U y ^{232}Th y el ^{40}K contribuyen en mayor proporción a la dosis externa incidente para la población (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, pp. 89-91).

Los procesos de desintegración permiten ciertas disociaciones de elementos radiactivos del material fuente, facilitando la transferencia al medio ambiente. Por lo tanto, el ^{226}Ra puede tener concentraciones ligeramente diferentes al ^{238}U , ya que la separación de su matriz ^{230}Th y Uranio, permite que el ^{226}Ra tenga una mayor movilidad en el ambiente. El ^{222}Rn producto de la descomposición del ^{226}Ra , se difunde con mayor facilidad fuera del suelo, facilitando la probabilidad de movilidad hacia el agua. El ^{222}Rn genera dos productos de decaimiento el ^{210}Pb y ^{210}Po que son importantes en las evaluaciones de dosis (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, pp. 89-91).

La UNSCEAR reporta en las áreas de Rammsar y Mahallat en Irán concentraciones considerables de ^{226}Ra en aguas termales (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, p. 92), incrementando la dosis de radiación externa para la población que dan uso a este recurso.

2.7 Exposición interna

Los radionucleidos de la serie del ^{238}U y ^{232}Th , específicamente el ^{210}Pb y el ^{210}Po , están presentes en el aire, los alimentos y el agua, por lo tanto, irradian internamente el organismo. De igual manera el ^{40}K se incorpora al organismo en la dieta normal, ésta es la principal fuente de

irradiación interna. Además, la interacción de los rayos cósmicos con los elementos de la atmósfera origina diversos radionucleidos, entre ellos el ^3H , ^{22}Na y el ^{14}C , también contribuyen a esta irradiación. La dosis efectiva de estas fuentes de irradiación interna se estima en 0,3 mSv/año. El 50% es generada por el ^{40}K (International Atomic Energy Agency , 2004, pp. 32-33).

La exposición interna debido a la inhalación o digestión del gas radón y sus hijos, puede causar daños a la salud cuando está presente en construcciones elevadas, debido a la alta difusividad que tiene en la naturaleza, particularmente se origina en terrenos graníticos o zonas volcánicas. Por lo que el radón puede aparecer disuelto en agua o mezclado en aire. Además, hay q considerar la radiactividad de las aguas mineromedicinales debido al radón y sus decaimientos (Navarro & Martín , 2010, pp. 110-111).

2.8 Transferencia de radionucleidos al agua

Los radionúclidos presentes en el agua, provienen principalmente de fuentes naturales creadas en la atmosfera superior y presentes en la corteza terrestre, que contienen concentraciones de radionucleidos de las series del ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U .

Las rocas de origen volcánico, terrenos graníticos, arcillas entre otros materiales, pueden transmitir radionucleidos al agua, por lo que, es común encontrar niveles más altos de radionucleidos en el agua subterránea (aguas termales) que en el agua superficial. En el agua son de particular interés los descendientes del ^{238}U y ^{226}Ra , que tienen una vida media corta, pero presentan mayor radiactividad, estos pueden concentrarse en niveles altos, incrementando la posibilidad de riesgo para la salud (Lesikar, 2006, pp. 1-2).

Los procesos hidrogeológicos que facilitan el transporte de sustancias al agua, y los procesos geoquímicos permiten la interacción de los radionúclidos disueltos con el material suspendido en el agua, representando una fuente radiactiva a largo plazo (Zutta, 2014, pp. 11-12).

Los procesos físicos que permiten la trasferencia de radionucleidos al agua son:

- Difusión y dispersión, causada por los gradientes de concentración y turbulencia en el agua.
- Transporte, causado por el flujo de agua.
- Intercambio de contaminantes durante las fases disueltas y sólidas.
- Deposición y removilización de radionucleidos, generado por la interacción del material suspendido en el agua y los sedimentos (Zutta, 2014, p. 12).

2.9 Detección de contenidos radiológicos

La radiación no puede ser medida directamente, por lo cual, la detección se realiza mediante la interacción de la radiación con la materia, según este fundamento existen múltiples dispositivos de detección. Los principales detectores utilizados son:

- Detectores de ionización gaseosos, que consiste en un gas encerrado dentro de una cámara con un electrodo aislado a un alto voltaje. La detección se da mediante la ionización de las partículas del gas, generando pares de iones. La energía depositada es proporcional al número de iones formados. Mediante estos detectores es posible medir las partículas alfa y beta.
- Detectores de centelleo, basados en la capacidad de determinadas sustancias de emitir destellos luminosos al interactuar con la radiación ionizante. Constan de dos elementos fundamentales el material centellador y el tubo fotomultiplicador. Detectan emisiones alfa, beta y rayos gamma.
- Detectores semiconductores, su principio de funcionamiento se basa en generar pares electrón-hueco, al ser cuantificados permiten detectar la radiación ionizante que ha interactuado. Mediante estos detectores se realizan espectrometría de partículas alfa y rayos gamma, debido a que ambos poseen un espectro de energía discreta (Suárez, 2009, p. 9).

2.10 Magnitudes que caracterizan la radiactividad

Las magnitudes tienen la finalidad de proporcionar una medida física que se correlacione con los efectos reales o potenciales de la radiación.

2.10.1 Actividad

Es el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas de una cantidad de radionucleidos que parten desde un estado particular de energía en un intervalo de tiempo (Fernández, et al., 2011, p. 134).

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = |-\lambda N| = \lambda N \quad (5-2)$$

La actividad es proporcional al número de radionucleidos presentes y la constante de desintegración λ que disminuye en un intervalo de tiempo en forma exponencial.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (6-2)$$

La unidad de medida para la actividad en el Sistema Internacional es el Becquerel que se define como el número de desintegraciones de un radionucleido por segundo (Attix, 1986, pp. 102-103).

2.10.2 Actividad Especifica

La actividad específica se define como la actividad por unidad de masa (Nakwacki & Agüero, 2002, p. 5). Las unidades de medida son Bq/Kg y Bq/L, se expresa como:

$$A_{esp} = \frac{A(t)}{m} \quad (7-2)$$

2.10.3 Periodo de semidesintegración

Es el intervalo de tiempo que le toma a una cantidad de radionucleidos de un determinado material reducirse a la mitad, es característico de cada material (Bauer & Westfall, 2011, pp. 1334-1335). También se denomina vida media.

$$N(t_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 \quad (8-2)$$

Relacionado la constante de decaimiento λ con la vida media resulta:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} N_0 &= N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \rightarrow \\ \frac{1}{2} &= e^{-\lambda t_{1/2}} \rightarrow \\ \ln \frac{1}{2} &= -\lambda t_{1/2} \rightarrow \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned} \quad (9-2)$$

Además, se define el tiempo de vida media τ , como el tiempo medio que le toma a un núcleo decaer si cumple con la ley de decaimiento exponencial (Bauer & Westfall, 2011, p. 1334). Se define como:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (10-2)$$

2.10.4 Equilibrio radiactivo

Las transformaciones sucesivas en las cuales un radionucleido padre da lugar un producto radiactivo denominado radionucleido hijo, alcanzarán un equilibrio radiactivo si la relación de la actividad del hijo y la actividad del padre se volviera constante. Además, la tasa aparente de desintegración del radionucleido hijo se registrará por la tasa de desintegración del padre (Khan, 2003, pp. 17-18). A continuación, se describe matemáticamente la ecuación general que relaciona las actividades del padre e hijo:

$$A_2 = A_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) \quad (11-2)$$

Donde A_1 y A_2 son las actividades del padre y del hijo respectivamente. λ_1 y λ_2 son las constantes de decaimiento correspondientes.

Existen dos tipos de equilibrios radiactivos que dependen de las vidas medias del padre e hijo.

- Si la vida media de padre no es más larga que la del hijo entonces se establece un tipo de equilibrio transitorio.
- Si la vida media del padre es mucho más larga que la del hijo entonces existe la probabilidad de alcanzar el equilibrio secular (Khan, 2003, pp. 18-19).

Teniendo en cuenta el equilibrio transitorio, las actividades relativas de los radionucleidos hijo y padre viene dado por:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (12-2)$$

Para el caso del equilibrio secular, dado que la vida media del padre es muy larga comparada con la del hijo, entonces λ_2 es mucho mayor que λ_1 , Por lo tanto λ_1 se puede despreciar, en la ecuación (11-2).

$$A_2 = A_1(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (13-2)$$

Asumiendo el equilibrio secular la expresión $e^{-\lambda_2 t}$, toma un valor grande por lo cual el término exponencial de la ecuación (13-2) se aproxima a cero (Khan, 2003, pp. 19-10). Se expresa el equilibrio secular entre los productos hijo y padre mediante:

$$A_2 = A_1 \quad (14-2)$$

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \quad (15-2)$$

2.10.5 Dosis Absorbida

La dosis absorbida se define como la energía media impartida por la radiación ionizante por unidad de masa de un volumen en un punto de interés.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (16-2)$$

$\bar{\epsilon}$ representa la energía neta que se queda en el volumen de material considerado. Las unidades del Sistema Internacional de dosis absorbida son le joule por kilogramo (J/Kg), denominado gray (Gy) (Griffith, 2003, p. 48).

2.10.6 Dosis Equivalente

La dosis equivalente tiene en cuenta los posibles efectos biológicos que varían dependiendo del tipo de radiación ionizante, por lo cual existen factores ponderales de radiación w_r . De esta manera la dosis equivalente en un órgano o tejido T debido a la radiación R (Griffith, 2003, p. 51), se define como:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (17-2)$$

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media debido a la radiación R para un órgano o tejido T. En el caso de que existan radiaciones y energías con distintos valores w_R (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2009, pp. 13-14), se obtiene:

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (18-2)$$

La unidad para la dosis equivalente es el Sievert (Sv)

Tabla 6-2. Factores ponderales de radiación

Tipos de radiación	Energía	w_R
Fotones	todas	1
Electrones, muones	todas	1
Neutrones	< 10 keV	5
	10 keV – 1000 keV	10
	1000 keV – 2 MeV	20
	2 MeV – 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
	>2MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados		10

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2009).

2.10.7 Dosis efectiva

La probabilidad para los efectos estocásticos no solo depende del tipo de radiación, también involucra la radiosensibilidad del órgano considerado. Po lo tanto, la dosis efectiva considera la combinación de diferentes dosis en diferentes órganos debido a la irradiación del cuerpo entero (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2009, pp. 11-12), se define como:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T w_R D_{T,R} \quad (19-2)$$

Donde H_T es la dosis equivalente en el órgano o tejido T y w_T es el factor de ponderación para el órgano involucrado (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2009), que cumple con la condición:

$$\sum_T w_T = 1 \quad (20-2)$$

La unidad para la dosis efectiva es el sievert (Sv).

Tabla 7-2. Factores ponderales de tejido/ órgano

Tejido/órgano	w_T	Σw_T
Gónadas	0,08	0,08
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama y resto del organismo	0,12	0,72
Vejiga, esófago, hígado y tiroides	0,04	0,16
Superficie ósea, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2009).

2.11 Tipos de muestras y técnicas de muestreo

Un muestreo es el procedimiento por el cual se toma una muestra representativa de las características totales del cuerpo de agua en estudio. Para la realización del muestreo en esta investigación se tomó una muestra simple en un único tiempo determinado.

Muestra simple: son muestras recolectadas en un tiempo y lugar particular. Este tipo de muestras representan condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue recolectada (Ministerio del Ambiente, 2014, p. 4).

Para garantizar la homogeneidad y estabilidad del contenido radiológico, las muestras se deben conservar al momento de su recolección, según la Norma Técnica Ecuatoriana 2169. Detallada en la siguiente tabla.

Tabla 8-2. Técnicas para la conservación de muestras en análisis radiológicos

Parámetro a ser analizado	Técnica de conservación	Tiempo de conservación	Recomendaciones
Actividad Alfa Actividad Beta	<ol style="list-style-type: none"> Si se va a determinar la actividad en la materia soluble y en suspensión separadamente filtrar de inmediato. Adicionar 20 cm³ de ácido nítrico al 50% por cada litro de muestra. El valor del pH, debe ser menor que 1. Guardar en un lugar oscuro a una temperatura entre 2-5 °C. 	Lo más pronto posible.	<p>Las precauciones de seguridad dependen de la actividad de la muestra.</p> <p>Precaución: El polvo radiactivo no debe caer en la piel o en la ropa o ser inhalado.</p>

Actividad Gamma	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si está presente materia en suspensión y se necesita las mediciones de la actividad por separado o los sólidos no están totalmente disueltos, filtrar la muestra y tratar como dos muestras separadas 2. Adicionar cuantitativamente a la muestra una cantidad conocida de una solución que contenga el isótopo no radiactivo de interés. Para muestras que contengan metales, la solución se acidifica a $\text{pH} < 2$; el ácido que se emplee no debe precipitar o volatizar los elementos. Se necesita especial cuidado para los isótopos del radón. 3. Guardar en botellas herméticas y en la oscuridad entre 2-5 °C 	<p>Depende de la vida media de los elementos radiactivos de interés.</p> <p>Determinar la vida media tan pronto la muestra necesite ser analizada.</p>	
--------------------	---	--	--

Fuente: (Norma Técnica Ecuatorina, 2013).

2.12 *Espectrometría gamma*

La espectrometría gamma es una de las técnicas de medida más idónea para determinar concentraciones de radionucleidos emisores gamma en muestras ambientales de baja actividad. El elemento básico es el detector semiconductor, por lo general es de cristal de germanio híper puro (HP-Ge). El elemento semiconductor se encuentra alojado en el interior de un criostato a la temperatura del nitrógeno líquido, asociado a un sistema de adquisición de datos. El sistema muestra-detector se encuentra aislado mediante un blindaje (Suárez, 2009, pp. 30-32).

En síntesis, el mecanismo de la espectrometría gamma es el siguiente: la interacción de un fotón gamma con el detector de germanio genera una señal de unos pocos milivoltios proporcional a la energía del fotón, el preamplificador convierte la señal de la carga colecta en un pulso de tensión. El preamplificador está situado en la parte inferior del detector para evitar pérdidas de la señal de la carga colecta que sale del detector.

El pulso de tensión pasa al amplificador donde se amplifica y conforma el pulso de entrada, además se eliminan las variaciones de fondo y se rechazan los pulsos apilados. La señal que sale del amplificador es analógica y debe ser convertida a una señal digital mediante un conversor análogo-digital.

Posteriormente la señal digital pasa al equipo multicanal que realiza un análisis de las alturas del pulso y la convierte en un número (canal) generándose un histograma del número de cuentas en función del canal. De este modo el número de canales es proporcional a la energía de los rayos gamma (Gil, 2016, pp. 620-621).

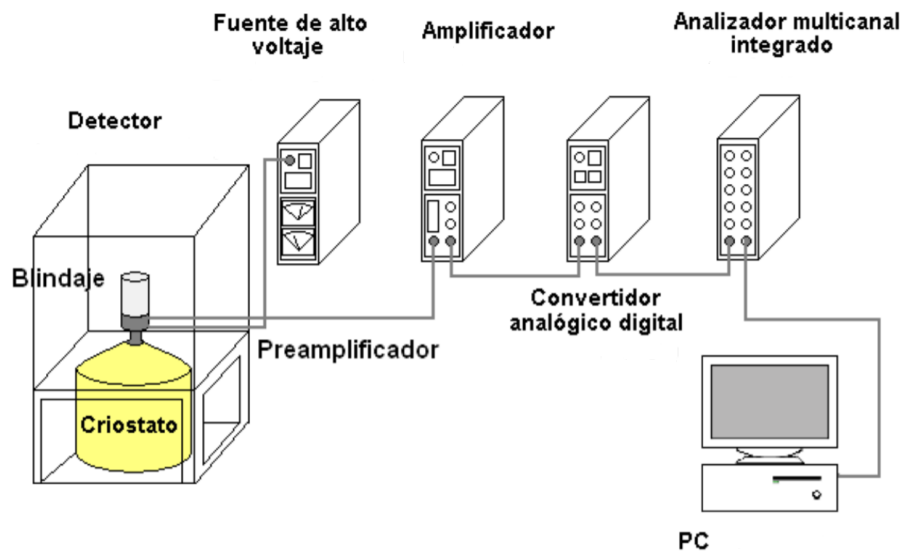


Figura 4-2. Esquema del sistema de espectrometría gamma.

Fuente: (Suárez, 2009).

2.13 Contador alfa -beta total

Existen varios métodos para determinar índices de actividad alfa- beta totales, el más utilizado es el método de evaporación directa. Este método tiene las ventajas la facilidad de su realización y el bajo costo de la preparación de la muestra a medir (Corbacho , et al., 2014). Mediante un detector de centelleo sólido de sulfuro de cinc, ZnS (Ag), el cual permite cuantificar las emisiones alfa-beta de una muestra líquida.

Este sistema de detección cuenta con un cambiador de muestras, un tubo fotomultiplicador y un preamplificador, que tiene por función multiplicar la señal producida por el detector de unos pocos milivoltios por un factor de 100 o más. Los discriminadores permiten reducir el ruido electrónico de la línea base de tal forma solo se registren los impulsos producidos por las partículas detectadas. Las cuentas por minuto se visualizarán en el escalador alfa-beta (Suárez, 2009, p. 20).

2.14 Aguas termales en la provincia de Chimborazo

Se consideran fuentes de agua termal o termo medicinales, aquellas aguas subterráneas que en su punto de emergencia poseen una temperatura mayor que la temperatura media anual del ambiente, la diferencia debe ser superior a 5°C. Los procesos físico-químicos y termodinámicos condicionan la disolución de los minerales al entrar en contacto con una gran variedad de rocas. Los diferentes elementos definen su composición química, concentración iónica, su salinidad, el carácter radiológico, etc. (Burbano, et al., 2015, p. 111).

Hidrogeológicamente la zona de Chimborazo está constituida por materiales de porosidad intergranular, con permeabilidad media que ha dado lugar a acuíferos heterogéneos profundos, infiltraciones de aguas meteóricas y algunos sistemas de agua se presume que se forman en las estribaciones de las cordilleras Oriental y Occidental. Esta zona está ubicada en la denominada depresión Interandina como producto del hundimiento tectónico, que posteriormente ha sido afectados por diferentes episodios volcánicos (Burbano, et al., 2015, pp. 107-109).

La provincia de Chimborazo tiene una extensión jurisdiccional de 6500.66 Km², políticamente se subdivide en 10 cantones y 45 parroquias rurales. El rango altitudinal de la provincia va desde los 135 metros sobre el nivel del mar a los 6310 metros sobre el nivel del mar (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo, 2015, p. 1).

Para una mayor visualización de la zona de estudio se ubica geográficamente la provincia de Chimborazo.

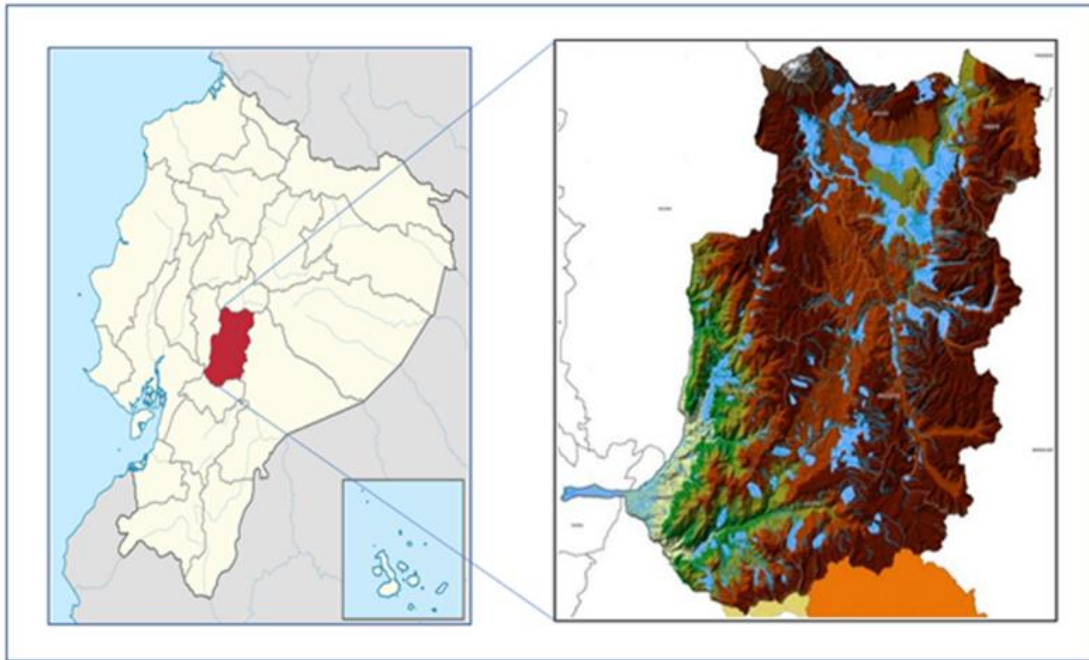


Gráfico 1-2. Ubicación de la provincia de Chimborazo según el Ecuador continental

Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo, 2015).

La ubicación, nombre y código de laboratorio de las fuentes termales se detallan a continuación:

Tabla 9-2. Coordenadas geográficas de las fuentes de la provincia de Chimborazo

N°	Código SCAN	Fuente termal	Latitud	Longitud
1	ARAD-2017-460 01	Guayllabamba	-1,791141	-78,546169
2	ARAD-2017-460 02	Pantus	-1,716226	-78,622457
3	ARAD-2017-460 04	Conugpogyo	-1,708036	-78,771379
4	ARAD-2017-460 05	Los Elenes	-1,617967	-78,609789
5	ARAD-2017-460 06	El Carmen	-2,157722	-78,938263
6	ARAD-2017-460 03	Palictahua 1	-1,502667	-78,455298
7	ARAD-2017-460 07	Palictahua 2	-1,502325	-78,455843
8	ARAD-2017-460 08	Palictahua 3	-1,502954	-78,453281

9	ARAD-2017-460 09	Palictahua 4	-1,502021	-78,455206
10	ARAD-2017-460 10	Palictahua 5	-1,498067	-78,453332

Fuente:(CEAA-ESPOCH & SCAN).

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

2.15 Coeficiente de dosis en piel por inmersión en agua

El coeficiente de dosis en piel a una profundidad de 70 μm , para una concentración unitaria de un radionúclido monoenergético en un medio acuático contaminado uniformemente, se puede expresar como (Eckerman & Ryman, 1993, p. 49).

$$h_{piel}(E) = \frac{E}{\rho_w} R^w(E) q(E) G_{piel}(E) \quad (21-2)$$

Donde ρ_w es la densidad del agua, R^w es la relación entre la absorción de energía en el tejido y la absorción de energía en el agua en la energía E , q es el factor de corrección de fuga y G_{piel} es el factor de reducción geométrico definido como la relación de la dosis absorbida en la profundidad de interés en un medio tisular y la dosis absorbida en el agua contaminada para la energía E (Eckerman & Ryman, 1993, p. 49).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, la misma permitió establecer una relación causa-efecto entre la variable independiente y la variable dependiente, mediante el análisis realizado en un determinado tiempo. La Unidad de análisis para la investigación fue de tipo no equivalente debido a diferentes factores medioambientales en los que se encuentran las fuentes termales. La geología, hidrogeología y geoquímica son los factores más relevantes que rigen la concentración del contenido radiológico en las fuentes termales. Para un mejor desarrollo del trabajo de campo se establecieron previamente los puntos de monitoreo para la unidad de análisis.

3.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis en el trabajo de investigación son las fuentes de agua termal presentes en la provincia Chimborazo. La ubicación y accesibilidad permiten el desarrollo del trabajo investigativo. El área de estudio se encuentra específicamente en los cantones Chambo, Guano, Riobamba, Colta, Alausí y Penipe. En cada uno de los cantones se encuentra una fuente termal a excepción de Penipe, particularmente en la parroquia Palictahua donde se encuentran 5 fuentes termales que son parte del estudio debido su particularidad, el agua emerge a la superficie proveniente desde el subsuelo y de las faldas del volcán Tungurahua. Obteniendo 10 puntos de muestreo en la población bajo estudio.

3.3 Características de equipos experimentales

En la presente investigación para identificar el contenido radiológico en las fuentes de agua termal, se realizó mediante dos equipos un contador alfa-beta total y un espectrómetro gamma, ubicados en el laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares.

3.3.1 *Contador de radiación alfa-beta total modelo LUDLUM 3030E*

El modelo LUDLUM 3030E, cuenta con un contador externo montado de doble canal diseñado para medir simultáneamente emisiones alfa-beta total, fuente de alimentación de alto voltaje.

Mediante un analizador de altura de pulso proporciona información a los dos detectores independientes. El instrumento funciona con un escalador tradicional con un alto voltaje ajustable manualmente, con periodos de tiempo de conteo ajustable en modo de cuentas por minuto (CPM) o desintegraciones por minuto (CPM), con pantallas LCD que permiten visualizar el conteo diferenciado alfa-beta de la muestra analizada.

El contador consta de una gaveta para muestras, un tubo fotomultiplicador, un detector incorporado de sulfuro de zinc ZnS (Ag) adherido a un material de plástico de centelleo, para la detección de radiación alfa se utiliza el ZnS (Ag) y la radiación beta se detecta mediante el material plástico de centelleo (Guevara, 2015, p. 26).

La gaveta de muestras se cierra por medio de la platina ubicada al costado del contador y puede contener planchetas de 2,55 cm de diámetro. Cuando la gaveta está completamente cerrada golpea un micro interruptor que aplica alta tensión al tubo fotomultiplicador, para iniciar el conteo de la muestra.

3.3.1.1 Especificaciones técnicas del contador

Tabla 1-3. Especificaciones técnicas del contador alfa-beta total

N°	Parámetro	Característica
1	Material escintilador:	Disco de ZnS (Ag): plástico de 0.025 cm de espesor
2	Tensión operativa del detector:	500-1200V CC
3	Ventana:	0,4 mg/cm ²
4	Fondo:	≤ 80 CPM beta-gamma
		≤ 3 CPM alfa
6	Interacción entre canales:	Canal alfa en beta ≤ 10%
		Canal beta en gama ≤ 1%
7	Interruptor de alta tensión:	La apertura de la platina para muestras deshabilita la alta tensión del tubo fotomultiplicador
8	Tamaño máximo de muestra:	5,1 cm de diámetro × 1,08 cm de profundidad
9	Eficiencia (4π):	37% con ²³⁹ Pu, 5% con ¹⁴ C, 27% con ⁹⁹ Tc, 32% con ²³⁰ Th, 39% con ²³⁸ U, 29% con ¹³⁷ Cs, 26% con ⁹⁹ Sr/ ⁹⁰ Y

10	Tubo fotomultiplicador:	5,1 cm de diámetro, estructura de dinodo de 10 clavijas
11	Gaveta de muestra:	Bandeja de aluminio anodizado con anillo de muestreo.
12	Tamaño del contador:	23,6 × 11,4 × 23,6 cm (H×A×L)
13	Peso:	1,9 kg
14	Fabricación:	Bastidor de aluminio con revestimiento en polvo color beige

Fuente: (LUDLUM MEASUREMENTS, INC, 2018).

3.3.1.2 Especificaciones técnicas del escalador tradicional

Tabla 2-3. Especificaciones técnicas del escalador alfa-beta total

N°	Parámetro	Característica		
1	Tamaño:	24,1 × 13,5 × 25,4 cm (H × A × L)		
2	Peso:	2,7 kg		
3	Fabricación:	Recubrimiento en polvo beige con panel frontal		
4	Sensibilidad de entrada:	Beta-gamma	Umbral inferior ajustable: 2-10 mV.	Umbral superior ajustable: 25-100 mV.
			Configurado para pulsos de entrada de 4-50 mV.	
		Alfa	Umbral ajustable de 150-500 mV.	
			Configurado para pulsos de entrada superiores a 120 mV.	
5	Umbrales:	Umbral alfa: -120 mV.		
		Umbral beta: -4 mV.	Ventana beta: 50 mV.	
6	Alto voltaje:	Ajustable manualmente o digitalmente de 200-2500 Vcc, con la capacidad de soportar cargas de centelleo de 1500 voltios.		
7	Tono:	Uno para cada canal, con control de volumen		
8	Salida e datos:	Puerto RS-232 de 9 pines.		

9	Tiempo de conteo:	0,1; 0,5; 1; 2; 5; 10 y 60 m.
10	Escaladores:	Dos pantallas LCD de 6 dígitos cada una con retroalimentación proporcionando un rango de 0-999999 cuentas.
11	Linealidad de los escaladores:	Lectura dentro del 2% del valor verdadero
12	Temporizador de conteo:	Ajustable de 0,1 a 30 minutos
13	Potencia:	250 vatios a 95-250 Vca, 50-60 Hz monofásica

Fuente: (LUDLUM MODEL 3030 & 3030E, 2012).

3.3.2 Espectrómetro gamma modelo GCD-40180X

El espectrómetro gamma GCD-4018X de la marca Baltic Scientific Instruments, se usa principalmente para medir radiación gamma de los radionucleidos medio ambientales como: rocas, minerales, lodo, suelo, plantas, sedientos y partículas en el aire y agua. La unidad de detección está basada en un detector coaxial de germanio híper puro con una eficiencia absoluta del 40%, consta con un blindaje de plomo, una mesa de apoyo, criostato vertical para enfriar el detector, monitor de nivel de nitrógeno líquido, analizador multicanal, software de emulación y análisis SpectraLine-GP, un paquete de software NuclideMasterPluss y una impresora. Además, posee un bajo nivel de fondo instrumental. En la sección (2.12) se especifica el principio de funcionamiento del espectrómetro.

3.3.2.1 Especificaciones técnicas del espectrómetro gamma

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas del espectrómetro gamma GCD-40180X

Nº	Parámetro	Valor estándar
1	Rango de energía de radiación gamma:	5-10000 KeV
2	Sensibilidad absoluta al flujo gamma:	$4,5 \times 10^{-3}$
3	Resolución de energías, no más de:	122 kV
		1332 kV
4	Intensidad de fondo instrumental para el rango de energía de 40 KeV A 3MeV:	5×10^{-4} pulsos/KeV por segundo

5	Espesor del blindaje:	Pared de plomo:	100 mm
		Pared de cobre:	10 mm
6	Fuente de alimentación de corriente alterna	Voltaje:	230 V
		Frecuencia:	50 Hz
7	Dimensiones	Blindaje de plomo con detector:	1300 × 580 × 480 mm (H × A × L)
		Dispositivo espectro métrico:	300 × 180 × 80 (H × A × L)
8	Peso	Blindaje de plomo con detector:	465 kg
		Dispositivo espectro métrico:	2,8 kg
9	Espesor de la tapa de fibra de carbón:		0,8 mm
10	Espacio entre la cara del detector y la ventana exterior de la tapa:		8 mm
11	Tasa máxima de energía no menos de:		2000000 MV/s
12	Tiempo de enfriamiento no más de:		8 h
13	Periodo de recarga de nitrógeno:		15 d
14	Volumen del recipiente Dewar:		30 l
15	Señal del tiempo al aumentar la tensión:		0,15 μs
16	Señal del tiempo al disminuir la tensión:		50 μs

Fuente: (BSI INSTRUMENTS, s.f.).

3.4 Hipótesis

La variación en la concentración de radionucleidos en las fuentes de agua termal de la provincia de Chimborazo genera una variación en la tasa de dosis equivalente anual.

3.5 Variable independiente y dependiente

Tabla 4-3. Variable Independiente y dependiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	ÍNDICE
Concentración de radionucleidos en las fuentes de agua termal.	Número de radionucleidos presentes por unidad de masa.	Espectrometría γ Contador alfa-beta total	Energía Actividad Actividad Especifica	keV Desintegraciones por segundo Bq/l
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	ÍNDICE
Radiación Natural	Radiación ionizante proveniente del espacio exterior y presente en la corteza terrestre.	Efectos estocásticos	Dosis equivalente anual	$\mu\text{Sv/a}$

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.6 Tipo y caracterización de pruebas experimentales aplicadas

3.6.1 Análisis alfa-beta total

Para el análisis radiactivo alfa-beta total se aplicó el método de evaporación directa, es uno de los métodos más comunes utilizados para determinar la concentración de actividad alfa-beta total, que consiste en seleccionar un volumen de muestra para obtener una masa de residuo seco aproximada de 100 mg, mediante la reducción de volumen de agua acidificada por evaporación suave hasta unos 8 ml.

Posteriormente la muestra se traslada a la plancheta de acero inoxidable para la desecación total utilizando una estufa de desecación. El residuo seco permite determinar la concentración de actividad específica alfa-beta total, a partir de las curvas de autoabsorción. El método aplicado permite el análisis y medida en detectores de sulfuro de zinc o en contadores proporcionales.

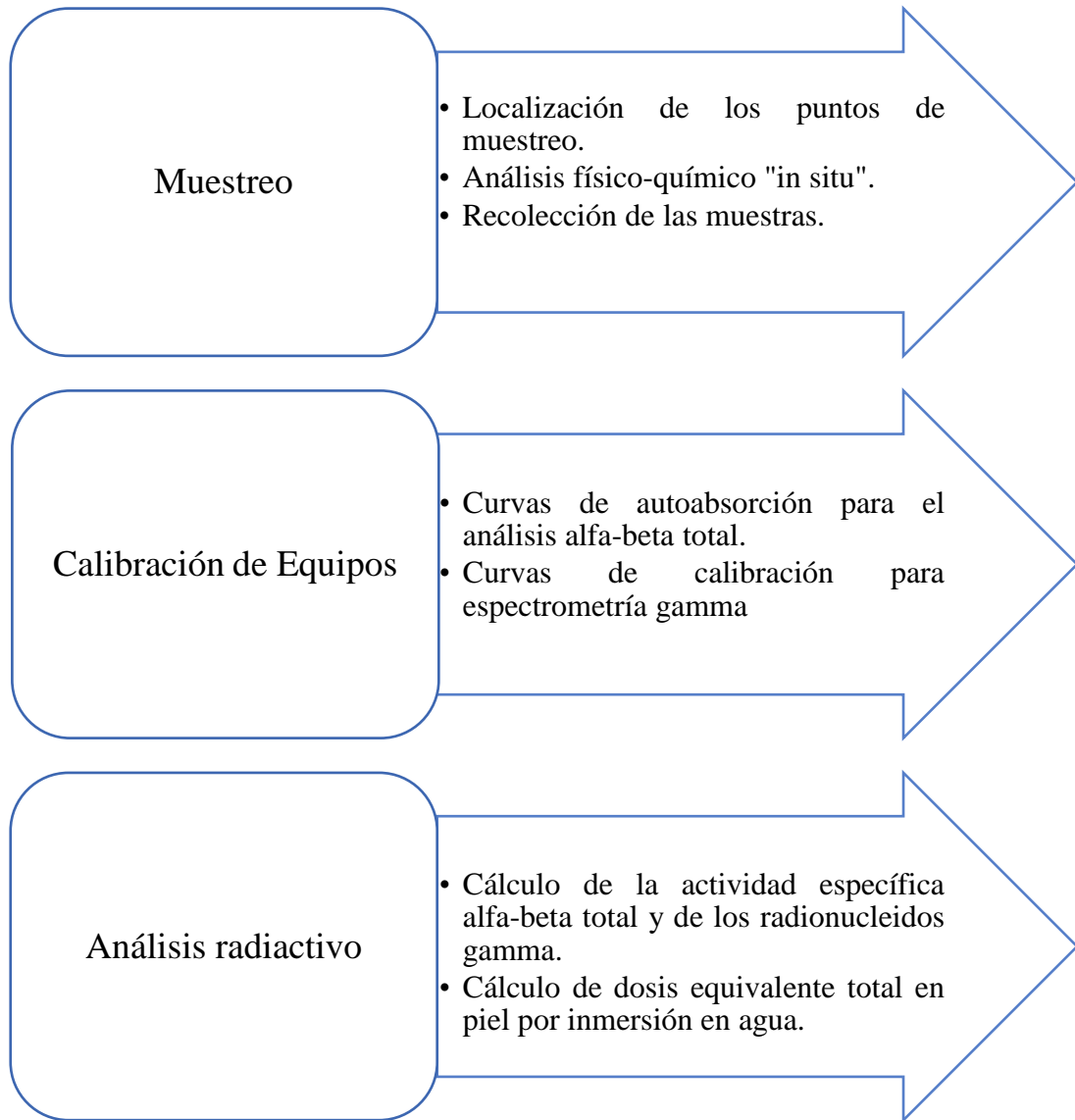
3.6.2 *Análisis gamma*

Por medio de la espectrometría gamma, se determinó las concentraciones de actividad específica para los radionucleidos emisores gamma en las muestras de las fuentes de agua termal de baja actividad. Para el análisis se utilizó un litro de agua termal en un contenedor de geometría tipo marinelli. Las muestras fueron selladas y se dejaron a reposar por cuatro semanas antes del análisis correspondiente.

Antes de iniciar el análisis se debe verificar el volumen de nitrógeno líquido sea el correcto para mantener la temperatura de $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ del sistema semiconductor, comprobar el correcto funcionamiento del analizador multicanal, además el equipo debe estar debidamente calibrado para obtener datos reales.

El marinelli se coloca sobre el detector de germanio hiper puro, que está cubierto por un blindaje de plomo asegurándose que la puerta del blindaje este correctamente cerrada. Mediante el software SpectraLineGP se inicia el análisis, con un tiempo de conteo de 6 horas. Finalizado el análisis el programa emite un reporte con las actividades específicas de los radionucleidos y otro reporte más detallado con las energías, áreas e incertidumbres de cada muestra con su respectivo espectro en formato pdf, jpg o Excel.

3.7 Diseño Experimental



3.7.1 Localización de las fuentes de agua termal muestreadas

La ubicación de los puntos de muestreo se realizó mediante el software geográfico ArcGIS versión 10.1. Por medio del inventario de las fuentes termales realizado en el año 2012 por estudiantes de la ESPOCH, se generó un reconocimiento previo de los puntos de muestreo y una actualización de información geografía mediante un GPS. Con esta información se estructuró un mapa para ubicar los puntos en una capa ráster de la provincia de Chimborazo, obtenida del Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente. Mediante el Software se ubicó los puntos por medio de un archivo (.csv) en forma de una capa de texto. Para finalizar en la capa ráster se carga la capa texto para obtener una capa .shp, donde se visualiza la ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

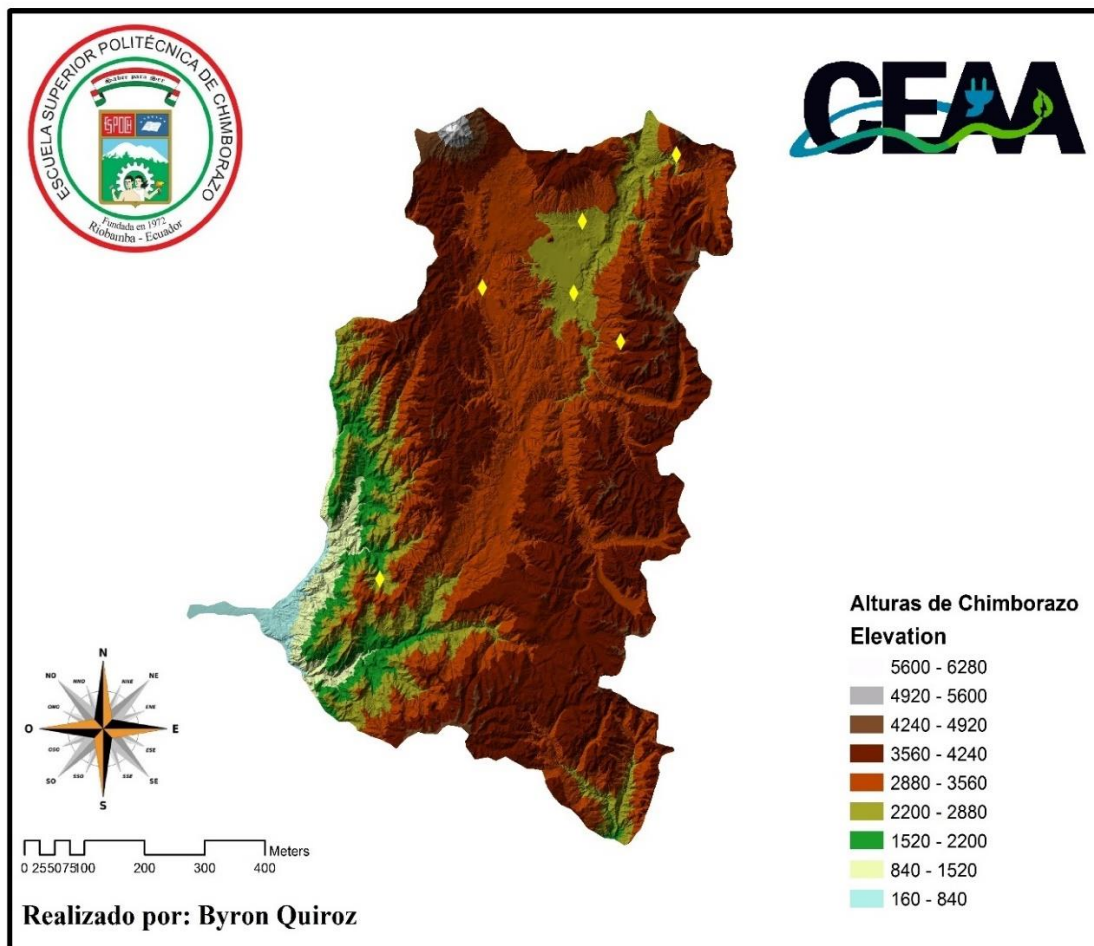


Gráfico 1-3. Mapa de ubicación de las fuentes de agua termal de la provincia de Chimborazo

Fuente: Byron Quiroz, 2018.

Para una mejor ubicación de las fuentes de agua termal de Palictahua del cantón Penipe se realizó un acercamiento del mapa de ubicación de las fuentes termales de la provincia.

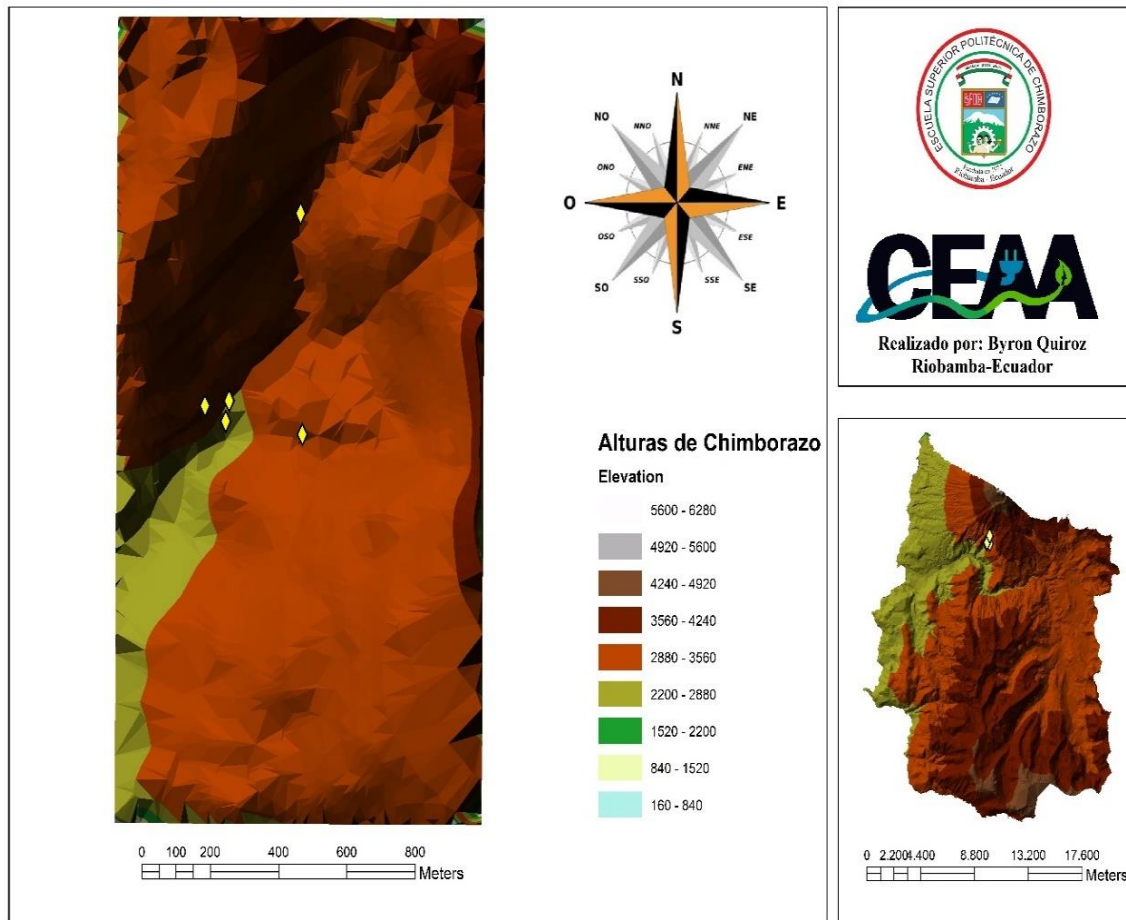


Gráfico 2-3. Mapa de ubicación de las fuentes de agua termal de Palictahua

Fuente: Byron Quiroz, 2018.

3.7.2 *Análisis de parámetros físico-químicos “in situ” de las fuentes de agua termal*

Durante el muestreo se tomaron datos físico-químicos “in situ” de las fuentes termales, mediante un equipo multiparámetro portátil marca Consort, modelo C562, con el apoyo técnico de la Dr. Gina Alvares docente de la ESPOCH. Con los datos recolectados fueron un indicador de las características del agua y de la posible presencia de contaminantes.

Tabla 5-3. Parámetros físico-químicos tomados “in situ” en las fuentes de agua termal

		Parámetros físico-químicos							
N°	Fuente termal	T° de la fuente (°C)	Conductividad (µS/cm)	Potencial Electrico (milivoltios)	pH	Salinidad (%)	TDS (mg/l)	T° Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)
1	Guayllabamba	38,1	1170	-9	6,38	0,06	630	12	30
2	Pantus	18,9	690	-69	7,52	0,3	370	15	-
3	Conugpogyo	21	640	-31	6,81	0,3	340	17	23
4	Los Elenes	22	1330	-64	7,39	0,6	700	18	25
5	El Carmen	29,6	463	-128	8,36	0,2	246	23	25
6	Palictahua 1	36,7	2350	-48	7,02	1,2	1240	18	44
7	Palictahua 2	36,9	2330	-47	7,05	1,2	1240	20	42
8	Palictahua 3	34,7	1250	-73	6,4	0,7	720	18	43
9	Palictahua 4	27,6	1980	-33	6,83	1	1500	18	41
10	Palictahua 5	37,3	2300	-8	6,40	1,1	1220	17	40

Fuente:(Laboratorio de Aguas, ESPOCH, 2017)

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.7.3 Equipos y materiales para toma y preparación de muestras

En el desarrollo de la investigación se requirió una serie de materiales de laboratorio y equipos necesarios para cada etapa de la metodología propuesta, los cuales se detallan a continuación:

Tabla 6-3. Descripción de equipos y materiales

Etapa	Materiales		Características
Muestreo	Equipos	GPS	Portátil
		Multiparámetros	Portátil, calibrado
	Materiales	Guantes	Látex
		Frascos	Vidrio de 1 litro
		Ficha técnica	Impresa
		Papel absorbente	Comercial
		Gotero	1 ml
		Agua destilada	Comercial
Reactivos	Ácido nítrico	Uso bajo vigilancia	
Análisis	Equipos	Balanza analítica	Sensibilidad de 0,01 mg
		Balanza cualitativa	Sensibilidad de 0,01 g
		Estufa eléctrica	Temperatura 40-80°C
	Materiales	Vasos de precipitación de 50-100 ml	Vidrio
		Probeta 50 ml	Vidrio
		Guantes	Látex
		Micropipeta de 500 µl	Portátil
		Planchetas	Acero inoxidable
		Marinelli	Polietileno
		Parafilm	Hermetizado
		Agua destilada	Comercial
	Reactivo	Ácido nítrico	Uso bajo vigilancia
		Alcohol	Comercial
	Software	QRgen	Generador de códigos

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.7.4 *Recolección de muestras*

Se realizó un muestreo simple, las muestras de agua a analizar fueron tomadas directamente en los puntos de derivación de las fuentes termales, para reducir los radionucleidos en estado gaseoso que no pertenezcan a la composición química del agua, es necesario dejar correr el agua por un determinado tiempo. Se utilizó envases de vidrio de un litro, que cumplen con las consideraciones adecuadas para; la toma, el almacenamiento y transporte de las muestras.

Las muestras fueron conservadas según la Norma Técnica Ecuatoriana descrita en la Tabla 8-2. Para el análisis se recolectaron un total de diez muestras y contramuestras en los puntos estudiados.



Gráfico 3-1. Proceso de muestreo aplicado en análisis de las fuentes termales

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.7.5 Ingreso y etiquetado de muestras

Las muestras fueron ingresadas al Departamento de Vigilancia Ambiental ubicado en la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares en la ciudad de Quito, previo al análisis se generó un código y etiqueta para cada una de las muestras mediante el software QRgen, donde consta la siguiente información.

- Las siglas ARAD (Análisis Radiológico).
- El año en que se realizó el análisis., número de lote seguido del número de muestra correspondiente.
- Nombre del cliente (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Código del cliente (Lugar de procedencia de la muestra).
- Los análisis solicitados (Identificación de contaminantes radiactivos y su actividad- Análisis alfa-beta totales).
- Técnicos responsables.
- Observaciones (Tipo de material).

A continuación, se muestra un ejemplo de etiqueta utilizado en el análisis de las muestras realizadas.



Figura 1-3. Etiqueta y código de la muestra número 10

Fuente: (SCAN, 2017).

3.7.6 Calibración de equipos

Durante el periodo de análisis se requirió calibrar los equipos según las instrucciones dadas por los técnicos del departamento de vigilancia ambiental de la SCAN. En la realización de las curvas de autoabsorción se utilizó fuentes certificadas de ^{241}Am y ^{90}Sr para el análisis alfa-beta. Mediante un material de referencia certificado (estándar multinúclidos) se obtuvieron las curvas de calibración para el análisis por espectrometría gamma.

3.7.6.1 Curvas de autoabsorción para el análisis alfa-beta totales

Las curvas de autoabsorción se realizaron a partir de patrones preparados con distintos espesores máscicos, que contenían cantidades conocidas de ^{241}Am y ^{90}Sr con una variación constante de volumen para cada solvente inactivo. Obteniendo la eficiencia de detección del ^{241}Am (0,150) para el análisis alfa y la eficiencia de detección del ^{90}Sr (0,822) para el análisis beta que depende del espesor máscico.

Mediante un ajuste lineal de puntos a la curva de eficiencia se obtiene la ecuación de eficiencia, que permite interpolar un factor de autoabsorción para el rango frecuente de pesos de los precipitados en los análisis habituales de muestras de agua.

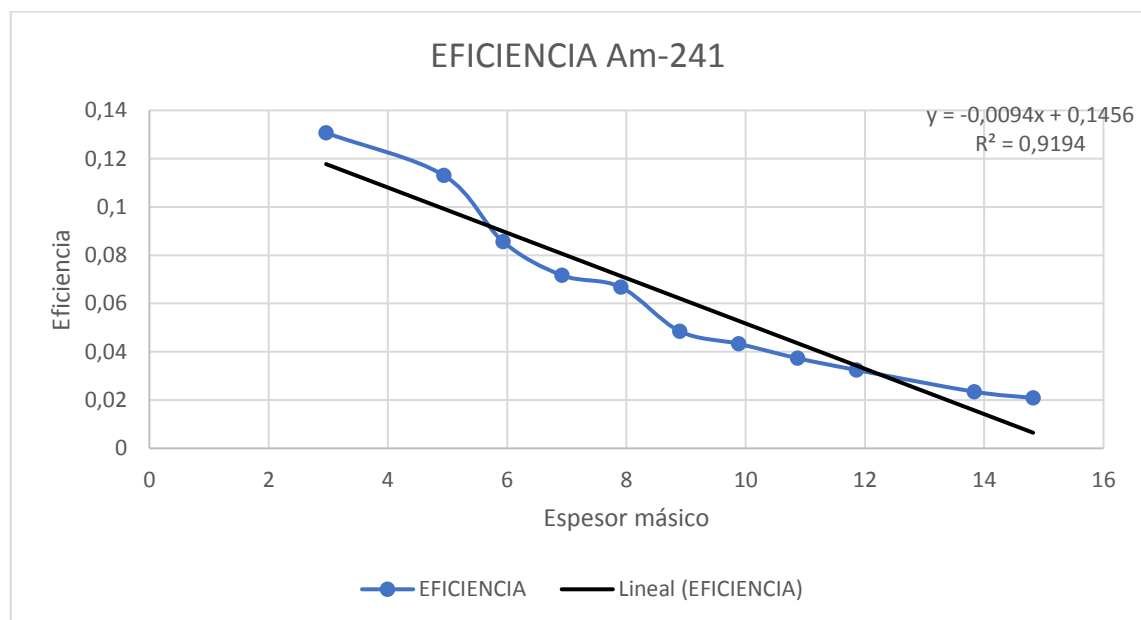


Gráfico 4-3. Curva de eficiencia con un ajuste lineal para el ^{241}Am

Fuente: (SCAN, 2017).

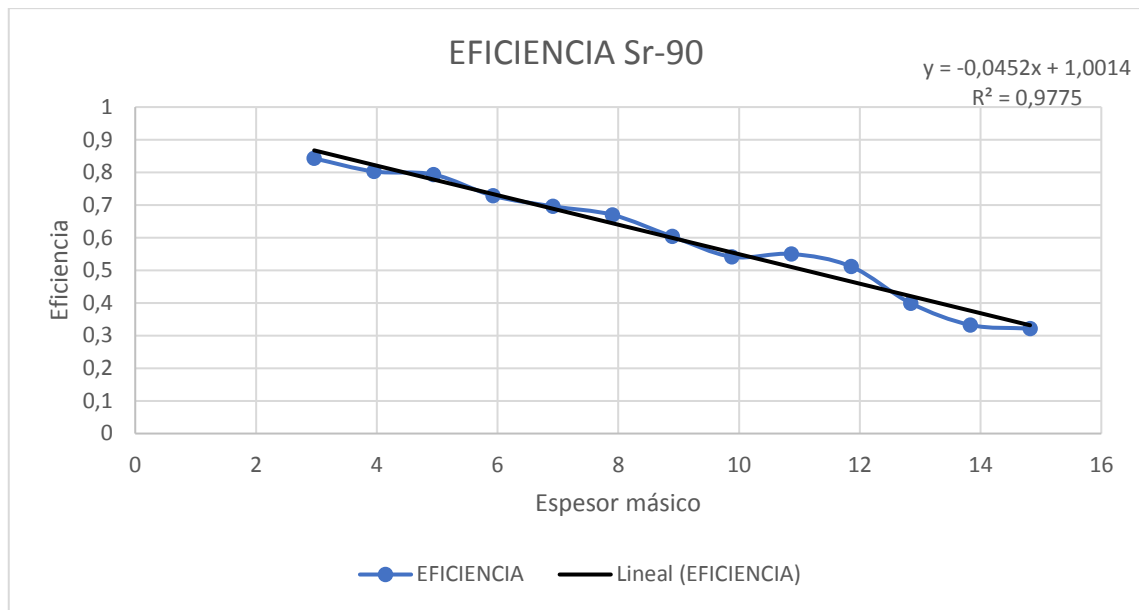


Gráfico 5-3. Curva de eficiencia con un ajuste lineal para el ^{90}Sr

Fuente: (SCAN, 2017).

3.7.6.2 Curvas de calibración para espectrometría gamma

- Calibración en energía

La calibración en energía del sistema de espectrometría gamma permite determinar la relación entre la energía depositada por la radiación y los canales del espectrómetro, con el fin de identificar los radionucleidos según la energía establecida a cada fotópico de absorción de un espectro.

Para la calibración se realizó una serie de medidas utilizando un estándar multinúclidos (certificado) de energías definidas y conocidas, distribuidas en todo el espectro energético. Donde se puede determinar los centroides de los fotópicos del espectro, ajustando la ganancia del sistema a 0,5 KeV/canal según recomendaciones protocolarias. Determinando la calibración a través del ajuste lineal de energías respecto a los canales.

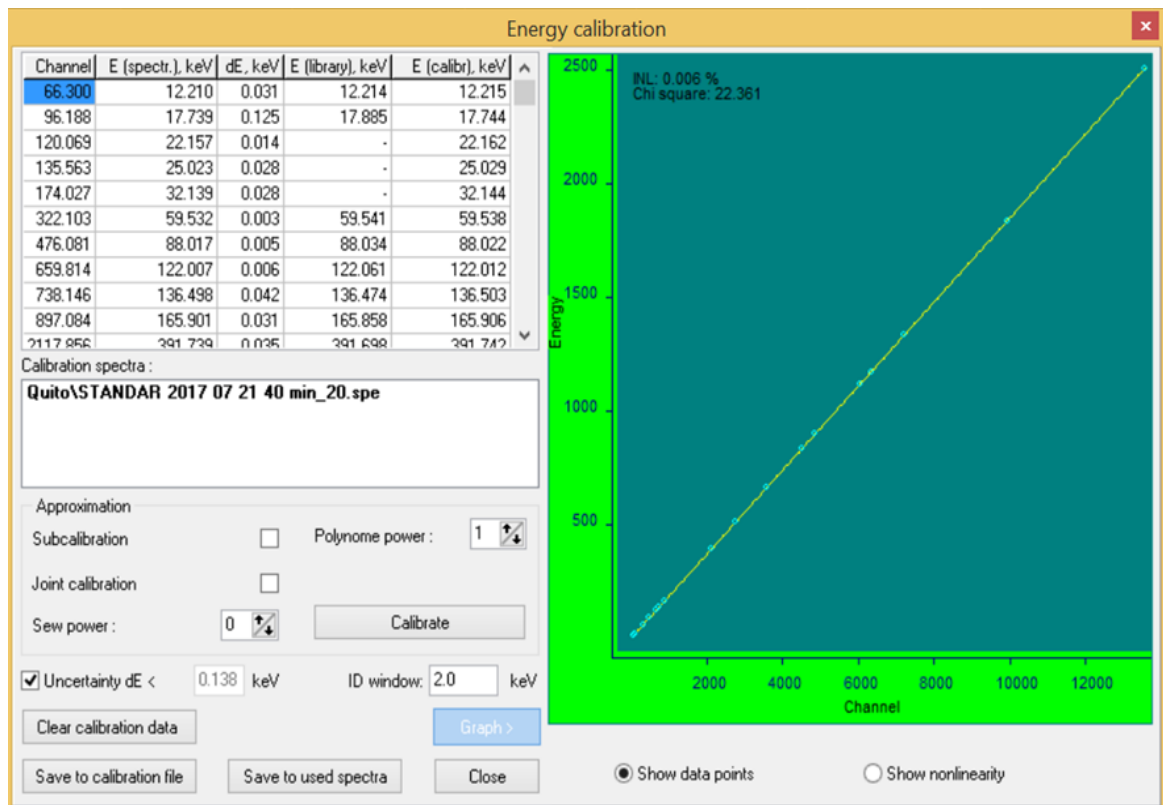


Gráfico 6-3. Calibración en energía según el estándar multinúclidos

Fuente: (SCAN, 2018).

- Calibración en eficiencia

La calibración se realizó mediante la simulación Monte Carlo con el código DETEFF, que permite obtener la eficiencia de detección a partir de medidas experimentales de una fuente patrón (estándar multinúclidos). En el código se especifica la geometría de análisis ingresando las dimensiones de altura, espesor y grosor. De igual manera se requiere las características del detector semiconductor otorgadas por el fabricante.

Para la curva de eficiencia se obtuvieron los coeficientes de atenuación másicos para doce energías del estándar multinúclidos, posteriormente se calculó el factor de atenuación lineal para dichas energías, estos valores, se ingresan al código DETEFF obteniendo la eficiencia para cada energía. Y en base a la curva de eficiencia se pueda cuantificar los radionucleidos para cualquier energía.

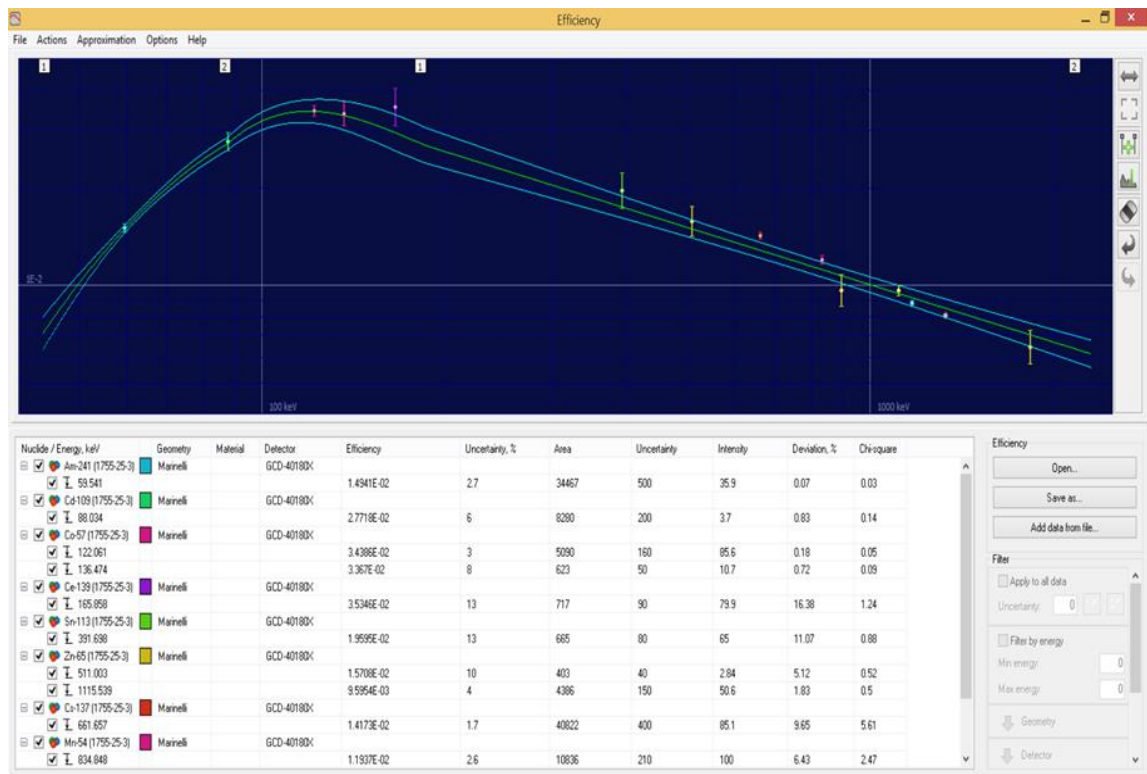


Gráfico 7-3. Curva de eficiencia para el sistema de espectrometría gamma

Fuente: (SCAN, 2018).

- Geometría en calibración

En el análisis de muestras ambientales es necesario minimizar tanto como sea posible la distancia muestra-detector. Por lo que, la geometría tipo marinelli cumple con esta condición debido a su forma hueca que permite envolver el detector, además minimiza la atenuación de la radiación en el interior de la muestra aumentando la eficiencia de detección (Barrera, et al., 2008, p. 19).

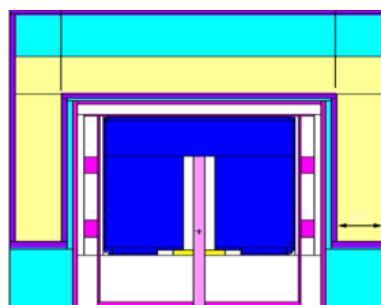


Figura 2-3. Geometría tipo marinelli utilizada en la calibración en eficiencia

Fuente: (Cornejo, 2009).

3.8 Recolección, organización y procesamiento de datos

3.8.1 *Análisis alfa-beta total*

El análisis se realizó a partir de la evaporación de una muestra de agua acidificada en una estufa eléctrica, hasta reducir su volumen de 10 a 15 ml, posteriormente transferimos el precipitado uniformemente a una plancheta de acero inoxidable que es llevada a secado hasta obtener un peso constante. Se realiza el conteo de los residuos secos para determinar la actividad específica alfa-beta total. Este análisis aporta información de radionucleidos naturales no volátiles.

3.8.1.1 *Estimación del volumen requerido para el análisis*

Para cada muestra se pesó un vaso de precipitación de 100 ml en una balanza analítica, posteriormente se añadió 50 ml de agua y se acidificó la muestra con 1 ml de ácido nítrico. Se secó la muestra hasta obtener un peso constante, el secado se debe realizar a una temperatura entre 70-80 °C evitando que la muestra llegue a ebullición. Se calcula el volumen de muestra requerido según la siguiente expresión:

$$V_R = \frac{V_I \times RD}{P_I} \quad (1-3)$$

Donde:

V_R es el volumen de muestra requerido para el análisis, en ml, V_I es el volumen de muestra tomado, en ml, RD es el peso de residuo deseado, en mg (100), P_I es el peso de residuo de la muestra correspondiente al V_I .

A continuación, se muestran los volúmenes requeridos para el análisis con la cantidad de ácido nítrico necesario según la concentración de 6 ml por cada litro de muestra.

Tabla 7-3. Volumen de muestra requerido para el análisis

N°	Fuente termal	Vaso vacío (g)	Vaso+residuo (g)	P _I (mg)	V _R (ml)	HNO ₃ (ml)
1	Guayllabamba	115,2600	115,3500	90	60	0,4
2	Pantus	116,0700	116,10900	39	130	0,8
3	Conugpogyo	65,3900	65,4400	50	100	0,6
4	Los Elenes	114,9400	115,0200	80	65	0,4
5	El Carmen	69,7300	69,7500	20	250	1,5
6	Palictahua 1	65,40434	65,63642	232,08	25	0,2
7	Palictahua 2	69,5758	69,78436	208,56	25	0,2
8	Palictahua 3	109,1670	109,29528	128,28	40	0,3
9	Palictahua 4	69,7320	69,91406	182,06	30	0,2
10	Palictahua 5	109,2000	109,42254	222,54	25	0,2

Fuente: (SCAN, 2017).

3.8.1.2 *Calculo del espesor másico*

Se pesó para cada muestra una plancheta previamente lavada y se midió el fondo radiactivo por 60 minutos en el contador, conjuntamente se coloca el volumen requerido para cada muestra en un vaso de precipitación con la concentración de ácido nítrico necesario. Se prepararon las muestras según el apartado 3.8.1, en las planchetas previamente rotulas, conociendo su fondo radiactivo. Se calculó el espesor másico según la siguiente expresión:

$$EM = \frac{P_2 - P_1}{A} \quad (2-3)$$

Donde:

EM es el espesor másico, en mg/cm², P₁ es el peso de la plancheta vacía, en mg, P₂ es el peso de plancheta más el residuo seco de la muestra, en mg, A es el área interior de la plancheta, en cm² (19,634 cm²).

Tabla 8-3. Espesores másicos para cada muestra

N°	Fuente termal	P ₁ (mg)	P ₂ (mg)	EM (mg/cm ²)
1	Guayllabamba	7877,36	7988,12	5,641
2	Pantus	7873,46	7984,25	5,642
3	Conugpogyo	7857,61	7953,82	4,900
4	Los Elenes	7670,38	7789,23	6,053
5	El Carmen	7860,74	7967,24	5,424
6	Palictahua 1	7883,94	8013,68	6,607
7	Palictahua 2	7877,84	7999,97	6,220
8	Palictahua 3	7856,46	7966,43	5,601
9	Palictahua 4	7878,67	7999,89	6,174
10	Palictahua 5	7870,35	7998,04	6,503

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.8.1.3 Tasa de recuento alfa-beta

A partir de las medidas realizadas a cada muestra, se obtuvo la tasa de recuento alfa y beta (CPS) de la plancheta blanco y la tasa de recuento alfa y beta del residuo obtenido dividiendo para el tiempo recuento. Conjuntamente se calculó los factores de autoabsorción (FA) de cada una de las muestras a partir de las curvas de autoabsorción, posteriormente se calculó la actividad específica alfa-beta total en base a estos valores.

Tabla 9-3. Tasa de recuento alfa y beta para cada muestra con su factor de autoabsorción

N°	Fuente termal	Recuento alfa				Recuento beta				FA	
		Fondo (f)	α	CPS		Fondo (f)	β	CPS		α	β
				F	α			f	β		
1	Guayllabamba	1	3	0,0002778	0,0008	722	761	0,2006	0,2114	0,0926	0,7464
2	Pantus	2	6	0,0005556	0,0017	736	777	0,2044	0,2158	0,0926	0,7463
3	Conugpogyo	2	6	0,0005556	0,0017	759	749	0,2108	0,2081	0,0995	0,7799
4	Los Elenes	2	3	0,0005556	0,0008	718	770	0,1994	0,2139	0,0887	0,7278
5	El Carmen	2	8	0,0005556	0,0022	791	797	0,2197	0,2214	0,0946	0,7562
6	Palictahua 1	3	4	0,0008333	0,0011	748	756	0,2078	0,21	0,0835	0,6979
7	Palictahua 2	1	2	0,0002778	0,0006	769	697	0,2136	0,1936	0,0871	0,7202
8	Palictahua 3	2	3	0,0005556	0,0008	730	762	0,2028	0,2117	0,0930	0,7482
9	Palictahua 4	2	3	0,0005556	0,0008	782	794	0,2172	0,2206	0,0876	0,7223
10	Palictahua 5	2	3	0,0005556	0,0008	808	649	0,2244	0,1803	0,0845	0,7074

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

3.8.2 Análisis por espectrometría gamma

Mediante el espectrómetro gamma con un 40% de eficiencia absoluta del detector (HpGe), se obtuvieron los espectros emitidos por los radionucleidos presentes en las muestras de agua. El tiempo de recolección del espectro fue de 21604 segundos (6 horas) para cada muestra, además se cuantificó la actividad específica (Bq/L) de los radionucleidos presentes.

3.8.2.1 Datos obtenidos del espectrómetro gamma

Las muestras de agua fueron envasadas y selladas en un frasco tipo marinelli de un litro durante 30 días antes del análisis, para alcanzar el equilibrio secular donde los productos hijos logran el equilibrio con sus respectivos radionucleidos progenitores. A continuación, se muestran los datos obtenidos de cada una de las muestras.

Tabla 10-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Guayllabamba

Fuente termal "Guayllabamba"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³² Th series	²¹² Pb	238.657	43.6	156	0.0245
	²¹⁴ Pb	295.302	19.2	111	0.0216
²³⁸ U series	²¹⁴ Pb	351.894	37.1	192	0.0195
	²¹⁴ Bi	609.366	46.1	163	0.0141
	²¹⁴ Bi	1120.292	15	37	0.00985
Primordial	⁴⁰ K	1460.989	10.7	81	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 11-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Pantus

Fuente termal "Pantus"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³² Th series	²¹² Pb	238.667	43.6	192	0.0245
²³⁸ U series	²¹⁴ Pb	352.024	37.1	171	0.0195
	²¹⁴ Bi	609.352	46.1	112	0.0141
Primordial	⁴⁰ K	1461.057	10.7	64	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 12-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Conugpogyo

Fuente termal "Conugpogyo"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³⁵ U series	²³⁵ U	185.780	53	209	0.0285
²³² Th series	²¹² Pb	238.671	43.6	148	0.0245
	²³⁴ Th	63.158	3.8	85	0.0169
²³⁸ U series	²¹⁴ Pb	295.341	19.2	145	0.0216
	²¹⁴ Pb	351.964	37.1	252	0.0195
	²¹⁴ Bi	609.364	46.1	186	0.0141
Primordial	⁴⁰ K	1460.870	10.7	84	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 13-3-2. Caracterización radiológica para la fuente terma Los Elenes

Fuente termal "Los Elenes"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³⁵ U series	²³⁵ U	185.796	53	196	0.0285
²³² Th series	²¹² Pb	238.544	43.6	203	0.0246
²³⁸ U series	²¹⁴ Pb	351.944	37.1	185	0.0195
	²¹⁴ Bi	609.327	46.1	151	0.0141
Primordial	⁴⁰ K	1460.824	10.7	49	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 14-3. Caracterización radiológica para la fuente terma El Carmen

Fuente termal "El Carmen"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³⁵ U series	²³⁵ U	185.834	53	190	0.0285
²³² Th series	²¹² Pb	238.712	43.6	158	0.0245
²³⁸ U series	²¹⁴ Pb	351.848	37.1	128	0.0195
	²¹⁴ Bi	609.363	46.1	112	0.0141
Primordial	⁴⁰ K	1460.823	10.7	81	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 15-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 1

Fuente termal "Palictahua 1"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
^{235}U series	^{235}U	185.780	53	196	0.0285
^{232}Th series	^{212}Pb	238.646	43.6	160	0.0245
	^{214}Pb	295.290	19.2	88	0.0216
^{238}U series	^{214}Pb	351.964	37.1	153	0.0195
	^{214}Bi	609.393	46.1	142	0.0141
Primordial	^{40}K	1460.823	10.7	84	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 16-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 2

Fuente termal "Palictahua 2"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
^{235}U series	^{235}U	185.889	53	176	0.0284
^{232}Th series	^{212}Pb	238.706	43.6	161	0.0245
	^{214}Pb	295.267	19.2	105	0.0216
^{238}U series	^{214}Pb	352.015	37.1	184	0.0195
	^{214}Bi	609.359	46.1	140	0.0141
	^{214}Bi	1120.580	15	32	0.00985
Primordial	^{40}K	1461.043	10.7	81	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 17-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 3

Fuente termal "Palictahua 3"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
^{235}U series	^{235}U	185.820	53	153	0.0285
^{232}Th series	^{212}Pb	238.679	43.6	156	0.0245
	^{214}Pb	351.950	37.1	169	0.0195
^{238}U series	^{214}Bi	609.469	46.1	131	0.0141
	Primordial	^{40}K	1460.923	10.7	88

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 18-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 4

Fuente termal "Palictahua 4"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³⁵ U series	²³⁵ U	185.803	53	174	0.0285
²³² Th series	²¹² Pb	238.755	43.6	150	0.0245
	²¹⁴ Pb	351.863	37.1	216	0.0195
²³⁸ U series	²¹⁴ Bi	609.322	46.1	189	0.0141
	²¹⁴ Bi	1120.634	15	43	0.345
	²¹⁴ Bi	1764.833	15.9	34	0.00753
Primordial	⁴⁰ K	1461.014	10.7	79	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

Tabla 19-3. Caracterización radiológica para la fuente terma Palictahua 5

Fuente termal "Palictahua 5"					
Origin	Nuclide	Energy (KeV)	P (%)	Area	ϵ_{γ}
²³⁵ U series	²³⁵ U	185.670	53	154	0.0285
²³² Th series	²¹² Pb	238.744	43.6	146	0.0245
	²¹⁴ Pb	351.941	37.1	150	0.0195
²³⁸ U series	²¹⁴ Bi	609.311	46.1	158	0.0141
	²¹⁴ Bi	1120.389	15	36	0.00985
Primordial	⁴⁰ K	1460.807	10.7	86	0.00842

Fuente: (SCAN, 2017) (Environmental Measurements Laboratory, 1997)

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Cálculo de la actividad específica alfa-beta total

La actividad específica se calculó mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{CPS - CPS_f}{FA \times \varepsilon \times V_R} \quad (1-4)$$

Donde:

A es la actividad específica de la muestra en Bq/L, CPS es la tasa de recuento del residuo para alfa y beta, CPS_f es la tasa de recuento de fondo para alfa y beta, FA es el factor de autoabsorción, ε es la eficiencia de detección para alfa y beta, V_R es el volumen requerido para el análisis, en litros.

La incertidumbre de recuento de la muestra para determinar la actividad específica para un nivel de confianza del 95% ($k=2$), se calculó mediante la siguiente expresión (Consejo de Seguridad Nuclear, 2006, p. 29).

$$u(A) = \frac{2}{60 * FA \times \varepsilon \times V_R} \times \sqrt{\frac{CPS}{t(m)} + \frac{CPS_f}{t(b)}} \quad (2-4)$$

Donde:

$u(A)$ es la incertidumbre de recuento en la determinación de la actividad específica, $t(m)$ es el tiempo de medida de la muestra, en minutos, $t(b)$ es el tiempo de medida del blanco, en minutos (Consejo de Seguridad Nuclear, 2006, p. 29).

Tabla 1-4. Medidas de actividad alfa-beta total de las fuentes termales

N°	Fuente termal	Actividad Alfa (Bq/L)	Actividad Beta (Bq/L)
1	Guayllabamba	0,67 ± 0,17	0,29 ± 0,08
2	Pantus	0,62 ± 0,11	0,14 ± 0,04
3	Conugpogyo	0,74 ± 0,14	ND
4	Los Elenes	0,32 ± 0,19	0,37 ± 0,07
5	El Carmen	0,47 ± 0,06	0,01 ± 0,02
6	Palictahua 1	0,89 ± 0,61	0,15 ± 0,19
7	Palictahua 2	0,85 ± 0,38	ND
8	Palictahua 3	0,50 ± 0,29	0,36 ± 0,11
9	Palictahua 4	0,70 ± 0,41	0,19 ± 0,16
10	Palictahua 5	0,88 ± 0,51	ND

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.2 Análisis estadístico descriptivo para las actividades específicas alfa-beta total

Mediante el análisis estadístico descriptivo se determinó la estructura y características de los datos obtenidos, resumiéndolos de una forma concisa tratando de evitar en lo posible la distorsión o pérdida de información.

Tabla 2-4. Estadística descriptiva para los datos de actividad específicas alfa-beta total

	N	Mínimo	Máximo	Media	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar
Actividad Alfa	10	0,32	0,89	0,66	0,06002
Actividad Beta	7	0,01	0,37	0,22	0,04725
N válido (por lista)	10				

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

En la tabla 2-4, se presentan los valores mínimos y máximos de los datos de actividad específica alfa-beta total, además se analizó la homogeneidad de los datos según la media estadística. A continuación, se resumen los datos de actividad específica mediante un gráfico de barras agrupado y se compara con datos en función del límite permisible para agua de consumo humano con una actividad alfa total de 0.5 Bq/L y beta total de 1 Bq/L (Organización Mundial de la Salud, 2006).

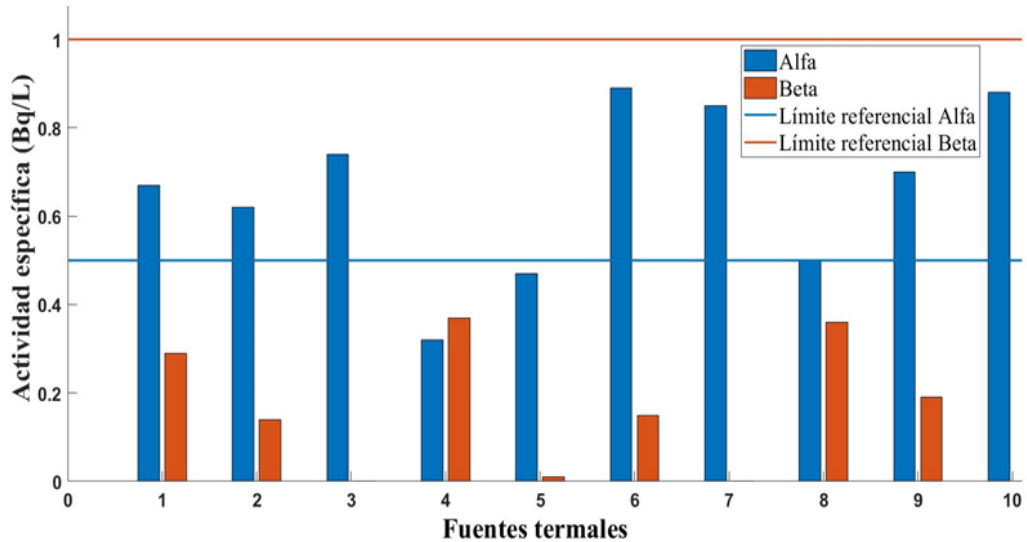


Gráfico 1-4. Actividad específica alfa-beta total de las fuentes termales

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.3 Cálculo de la actividad específica para emisiones gamma

Los espectros gamma se procesaron utilizando el software “SpectraLineGp” para identificar los radionucleidos presentes en las muestras. Después de restar el fondo radiactivo del laboratorio, se determinó la actividad específica mediante la siguiente expresión (Kebir & Boucenna, 2017):

$$A_{\gamma} = \frac{N}{P \times \epsilon_{\gamma} \times t \times V} \quad (3-4)$$

Donde:

A_{γ} es la actividad específica de la muestra en Bq/L, N es el recuento restado el fondo de la muestra (Área), P es la probabilidad de emisión de rayos gamma (rendimiento gamma), ϵ_{γ} es la eficiencia de conteo del sistema detector, t es el tiempo de conteo de la muestra, en segundos, V es el volumen de la muestra (un litro).

Tabla 3-4. Medidas de actividad gamma de las fuentes termales

N°	Fuente termal	²³⁵ U serie	²³² Th serie	²³⁸ U serie			⁴⁰ K Bq/L
		²³⁵ U Bq/L	²¹² Pb Bq/L	²³⁴ Th Bq/L	²¹⁴ Pb Bq/L	²¹⁴ Bi Bq/L	
1	Guayllabamba	ND	0,68 ± 0,1	ND	1,23 ± 0,2	1,16 ± 0,2	4,2 ± 0,84
2	Pantus	ND	0,83 ± 0,2	ND	1,09 ± 0,2	0,80 ± 0,1	3,3 ± 0,95
3	Conugpogyo	0,64 ± 0,1	0,64 ± 0,1	6,1 ± 1,7	1,62 ± 0,2	1,32 ± 0,2	4,3 ± 0,86
4	Los Elenes	0,60 ± 0,1	0,88 ± 0,1	ND	1,18 ± 0,2	1,08 ± 0,2	2,5 ± 0,71
5	El Carmen	0,58 ± 0,1	0,68 ± 0,2	ND	0,82 ± 0,2	0,80 ± 0,1	4,2 ± 0,87
6	Palictahua 1	0,60 ± 0,1	0,69 ± 0,1	ND	0,98 ± 0,2	1,01 ± 0,2	4,3 ± 0,83
7	Palictahua 2	0,54 ± 0,1	0,70 ± 0,2	ND	1,17 ± 0,2	1,01 ± 0,2	4,2 ± 0,84
8	Palictahua 3	0,47 ± 0,1	0,68 ± 0,1	ND	1,08 ± 0,2	0,93 ± 0,2	4,5 ± 0,87
9	Palictahua 4	0,53 ± 0,1	0,75 ± 0,2	ND	1,38 ± 0,2	1,33 ± 0,2	4,1 ± 0,84
10	Palictahua 5	0,47 ± 0,1	0,67 ± 0,2	ND	0,96 ± 0,2	1,13 ± 0,2	4,4 ± 0,88

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.4 Análisis estadístico descriptivo para las actividades específicas gamma

A continuación, se describe el análisis estadístico descriptivo de los datos obtenidos, resumiéndolos de una forma concisa.

Tabla 4-1. Estadística descriptiva para los datos de actividad específicas gamma.

	N	Mínimo	Máximo	Media	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar
²³⁵ U	8	0,47	0,64	0,55	0,07776
²¹² Pb	10	0,64	0,88	0,72	0,02440
²¹⁴ Pb	10	0,82	1,62	1,15	0,07179
²¹⁴ Bi	10	0,80	1,33	1,06	0,05895
⁴⁰ K	10	2,50	4,50	4	0,19607
N válido (por lista)	10				

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

En la tabla 4-4, se presentan los valores mínimos y máximos de actividad específica para los radionucleidos emisores gamma, además se determina la homogeneidad de los datos según la media estadística, para este análisis se descartó el valor del ²³⁴Th ya que no se puede analizar un único valor. A continuación, se resumen los datos de actividad específica mediante un gráfico de barras agrupado.

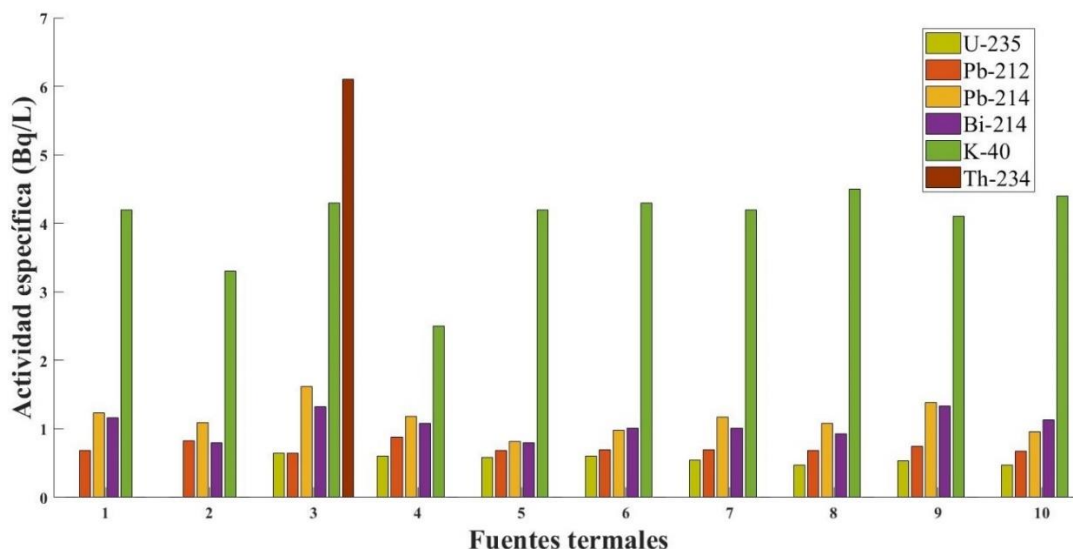


Gráfico 2-4. Actividad específica de los radionucleidos emisores gamma

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.5 Cálculo de la tasa de dosis equivalente total en piel por inmersión en agua

A partir las actividades específicas calculadas para emisiones gamma, se estimó la tasa de dosis equivalente en piel considerando “inmersión en aguas termales”. El cálculo se realizó considerando los coeficientes de dosis en piel por inmersión en agua ($\text{Sv Bq}^{-1} \text{s}^{-1} \text{m}^3$), cuyos valores se tomaron de las tablas del Anexo H.

Tabla 5-4. Tasa de dosis equivalente en piel por inmersión en las fuentes termales

N°	Fuente termal	Tasa de dosis equivalente en piel ($\mu\text{Sv/año}$)						Total
		^{235}U	^{212}Pb	^{234}Th	^{214}Pb	^{214}Bi	^{40}K	
1	Guayllabamba	---	$0,5 \pm 0,08$	---	$1,7 \pm 0,3$	$8,5 \pm 1,5$	$7,2 \pm 1,4$	$18 \pm 3,3$
2	Pantus	---	$0,6 \pm 0,2$	---	$1,5 \pm 0,3$	$5,9 \pm 0,7$	$5,7 \pm 1,6$	$13,7 \pm 2,8$
3	Conuggogyo	$0,4 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,3$	$9,7 \pm 1,5$	$7,4 \pm 1,5$	$20,5 \pm 3,4$
4	Los Elenes	$0,4 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	---	$1,7 \pm 0,3$	$7,9 \pm 1,5$	$4,3 \pm 1,2$	$14,9 \pm 3,1$
5	El Carmen	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,2$	---	$1,2 \pm 0,3$	$5,9 \pm 0,7$	$7,2 \pm 1,5$	$15,1 \pm 2,7$
6	Palictahua 1	$0,4 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$	---	$1,4 \pm 0,3$	$7,4 \pm 1,5$	$7,4 \pm 1,4$	$17 \pm 3,3$
7	Palictahua 2	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,2$	---	$1,7 \pm 0,3$	$7,4 \pm 1,5$	$7,2 \pm 1,4$	$17,1 \pm 3,4$
8	Palictahua 3	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$	---	$1,5 \pm 0,3$	$6,8 \pm 1,5$	$7,7 \pm 1,5$	$16,9 \pm 3,4$
9	Palictahua 4	$0,3 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,2$	---	$1,9 \pm 0,3$	$9,7 \pm 1,4$	$7,1 \pm 0,1,4$	$19,6 \pm 3,4$
10	Palictahua 5	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,2$	---	$1,3 \pm 0,3$	$8,3 \pm 1,5$	$7,6 \pm 1,5$	$18 \pm 3,5$

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.6 Análisis estadístico descriptivo para la tasa de dosis equivalente total en piel

En la tabla 6-4, se determinó la estructura y características de los datos obtenidos mediante el análisis descriptivo.

Tabla 6-4. Estadística descriptiva para la tasa de dosis equivalente total en piel

	N	Mínimo	Máximo	Media	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar
²³⁵ U	8	0,3	0,4	0,338	0,0183
²¹² Pb	10	0,5	0,7	0,540	0,0221
²¹⁴ Pb	10	1,2	2,3	1,620	0,1009
²¹⁴ Bi	10	5,9	9,7	7,750	0,4280
⁴⁰ K	10	4,3	7,7	6,880	0,3356
Dosis total	10	13,7	20,5	17,080	0,6656

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

En la tabla 6-4, se presentan los datos de la tasa de dosis equivalente mínima y máxima en piel, además se analizó la homogeneidad de los datos según la media estadística. A continuación, se resumen los datos obtenidos para la tasa de dosis equivalente en piel debido a los radionucleidos emisores gamma mediante un gráfico de barras agrupado.

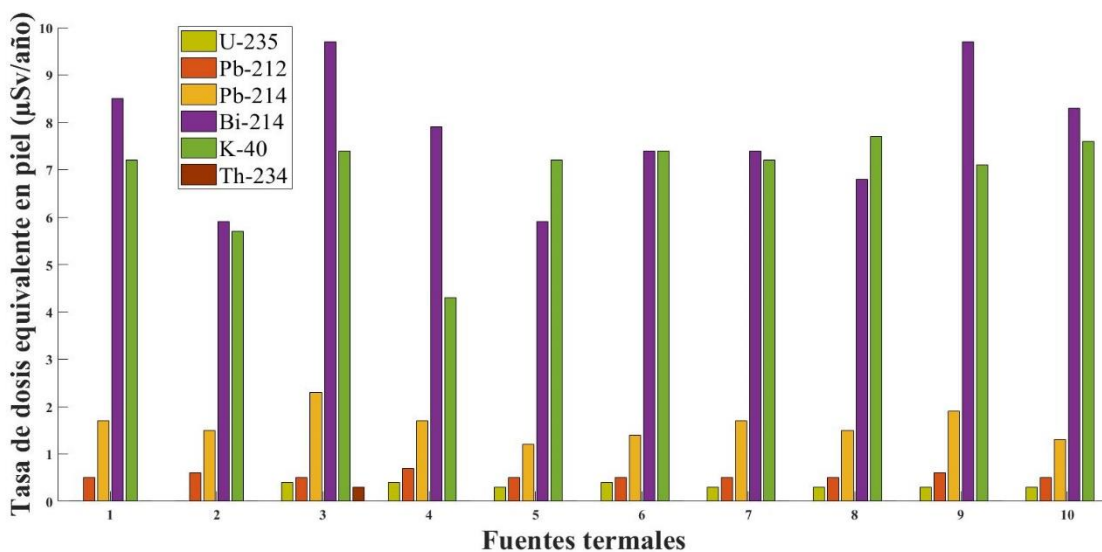


Gráfico 3-4. Tasa de dosis equivalente en piel por inmersión en las fuentes termales

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

En el gráfico 4-4, se resume la tasa de dosis equivalente total en piel mediante un gráfico de barras agrupado.

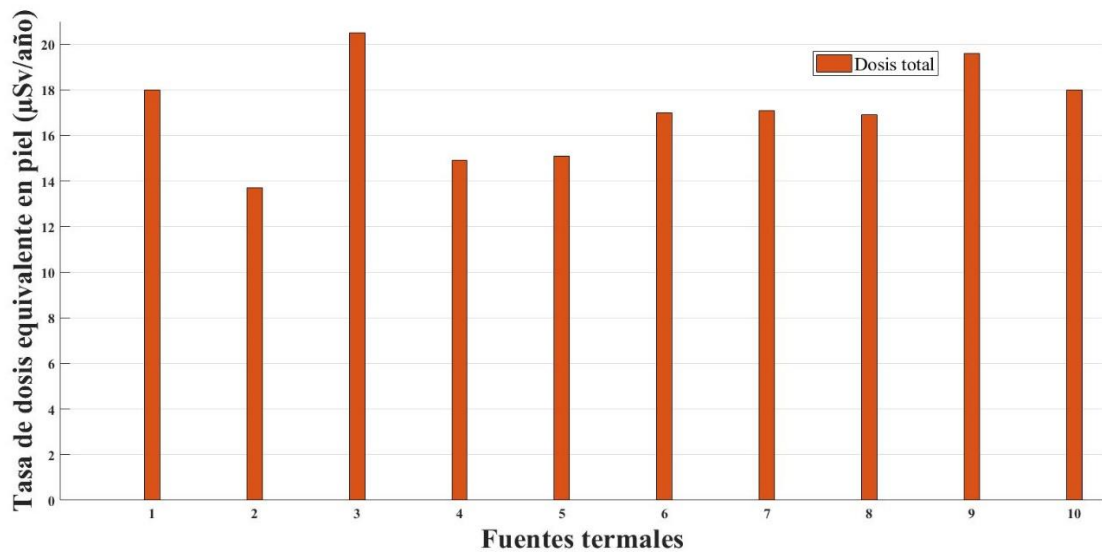


Gráfico 4-1. Tasa de dosis equivalente total en piel por inmersión en las fuentes termales.

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.7 Modelos de correlación

La relación entre la concentración de radionucleidos y los parámetros físico-químicos de las fuentes termales se determinó a través de los coeficientes de correlación descritos en la tabla 7-4. Estos coeficientes pueden tomar valores entre menos uno y uno, si los coeficientes toman valores cercanos a la unidad positiva o negativa existirá una muy buena correlación, caso contrario si los valores se aproximan a cero existirá una ínfima correlación.

Tabla 7-4. Coeficientes de correlación

Correlaciones						
		²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	⁴⁰ K	Alfa
Correlación de Pearson						
	Temperatura de la fuente	-0,586	-0,411	-0,009	0,645	0,484
	Conductividad	-0,098	-0,130	0,284	0,231	0,637
Coeficientes de correlación	Potencial eléctrico	-0,210	0,497	0,745	0,207	0,611
	pH	0,355	-0,390	-0,583	-0,405	-0,438
	Salinidad	-0,076	-0,240	0,144	0,226	0,558
	TDS	-0,053	-0,004	0,404	0,235	0,570
Nivel de significancia						
p<0.05 Rechazamos la H ₀ Aceptamos la H ₁	Temperatura de la fuente	0,04	0,1	0,5	0,02	0,01
	Conductividad	0,4	0,4	0,2	0,3	0,02
	Potencial eléctrico	0,3	0,07	0,01	0,3	0,03
	pH	0,2	0,1	0,04	0,1	0,1
	Salinidad	0,4	0,3	0,3	0,3	0,05
	TDS	0,4	0,5	0,1	0,3	0,04
R cuadrado (%)						
Coeficientes de determinación	Temperatura de la fuente	34	17	0	41	23
	Conductividad	1	2	8	5	41
	Potencial eléctrico	4	25	55	4	27
	pH	13	15	34	16	19
	Salinidad	1	6	2	5	31
	TDS	0	0	16	6	33

Realizado por: Byron Quiroz, 2018.

4.8 Discusión de resultados

El análisis radiactivo realizado para las fuentes termales de la provincia de Chimborazo, reportó como valor mínimo de actividad específica alfa 0,32 Bq/L y como valor máximo 0,89 Bq/L, con una media de 0,66 Bq/L; mientras que para el análisis de actividad específica beta, se obtuvo un valor mínimo de 0,01 Bq/L y un valor máximo de 0,37 Bq/L con una media de 0,22 Bq/L, para este análisis se obtuvieron muestras con valores no detectables.

Los radionucleidos emisores gamma identificados para la serie radiactiva natural del ^{238}U fueron el $^{234\text{m}}\text{Th}$, reportado en una sola muestra con una actividad específica de 6,1 Bq/L, el ^{214}Pb con un valor mínimo de actividad específica de 0,82 Bq/L, un valor máximo de 1,62 Bq/L y una media de 1,15 Bq/L; y el ^{214}Bi reportó como valor mínimo de actividad específica 0,8 Bq/L y como valor máximo 1,33 Bq/L con una media de 1,06 Bq/L.

El radionucleido emisor gamma identificado para la serie natural del ^{235}U , fue ^{235}U con un valor mínimo de actividad específica de 0,47 Bq/L y un valor máximo de 0,64 Bq/L, generando un valor medio de 0,55 Bq/L, en este caso también se obtuvieron muestras con valores no detectables.

El ^{212}Pb que pertenece a la serie natural del ^{232}Th reportó un valor mínimo de actividad específica de 0,82 Bq/L y como valor máximo 0,88 Bq/L con una media de 0,72 Bq/L. Además, se identificó al radionucleido primordial ^{40}K con un valor mínimo de actividad específica de 2,5 Bq/L y un valor máximo de 4,5 Bq/L con una media de 4 Bq/L.

La estimación de la tasa de dosis equivalente total en piel reporta como valor mínimo 13,7 $\mu\text{Sv/a}$ y un valor máximo de 20,5 $\mu\text{Sv/a}$, pudiendo determinarse una media de 17,08 $\mu\text{Sv/a}$. Los radionucleidos emisores gamma que mayor tasa de dosis equivalente generan son el ^{214}Bi y el ^{40}K .

El análisis de correlación entre la concentración de radionucleidos y los parámetros físico-químicos estableció una escasa relación entre el ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{40}K y los parámetros físico-químicos. Además, se determinó una moderada relación en la actividad específica alfa total y los parámetros físico-químicos.

CONCLUSIONES

Al realizar la caracterización radiológica y evaluar la tasa de dosis anual para las fuentes termales de la provincia de Chimborazo, se derivan las siguientes conclusiones:

- Mediante el uso de la espectrometría gamma y la técnica de evaporación directa con el uso de un centellador de sulfuro de zinc dopado con plata, se realizó la caracterización de los radionucleidos presentes en las fuentes de aguas termales de la provincia de Chimborazo; determinando que los más representativos son emisores alfa-beta total, ^{235}U , ^{212}Pb , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{40}K .
- Se determinó los índices de actividad específica alfa-beta total en las fuentes termales de la provincia de Chimborazo, reportando como valor promedio de actividad específica alfa total de 0,66 Bq/L y como valor promedio de actividad específica beta total de 0,22 Bq/L, para este análisis se obtuvieron valores no detectables en tres fuentes termales.
- A partir de los cálculos teóricos se determinó los índices de actividad específica para los siguientes radionucleidos emisores gamma ^{235}U , ^{212}Pb , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{40}K , con 0,55 Bq/L, 0,72 Bq/L, 6,1 Bq/L, 1,15 Bq/L, 1,06 Bq/L y 4 Bq/L respectivamente; además, el radionucleido con mayor concentración de actividad en todas las fuentes termales resultó ser el ^{40}K .
- Para los radionúclidos emisores gamma se estimó la tasa de dosis equivalente total en piel con un valor promedio de 17,08 $\mu\text{Sv/a}$ sumiendo inmersión en las fuentes termales; los radionucleidos ^{214}Bi y ^{40}K generan la mayor tasa de dosis equivalente en piel.
- Los modelos de correlación entre el ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{40}K y los parámetros físico-químicos predicen una escasa relación, debido a que los datos no siguen una distribución normal; mientras que para el modelo de correlación entre la actividad alfa y los parámetros físico-químicos predice una moderada relación, con un valor promedio del coeficiente de determinación de $r^2=0,31$, por lo cual, los parámetros físico-químicos influyen en un 31% en concentración de actividad alfa.
- En base en los resultados obtenidos se determina que el aporte a la tasa dosis anual para la población es relativa bajo del orden de los μSv por lo cual, las fuentes de agua termal de la provincia de Chimborazo no son radiactivas.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de la influencia de las aguas descargadas después de su uso recreativo en la agricultura y ganadería.
- Realizar un análisis específico para identificar los radionucleidos emisores alfa en las fuentes termales de Guayllabamba, Pantus, Conugpogyo, Palictahua 1, Palictahua 3 y Palictahua 5 debido a sus valores de concentración alfa.
- Continuar con análisis similares que permitan establecer estándares de calidad para el uso del agua en centros recreativos.

BIBLIOGRAFÍA

Aragón, Mayra. *Medición de radón en fuentes termales de la provincia de Imbabura y Pichincha* [En línea] 2001. [Consulta: 15 octubre 2017] http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&n_extAction=lnk&exprSearch=39670&indexSearch=ID.

Ashraf, E y Khater, M. *Radiological aspects of some Egyptian thermo-mineral springs.* The Journal of Experimental Medicine, mayo del 2003, pp. 415-418.

Attix, Frank. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry.* 1986, pp. 102-103.

Barrera, M, Romero, M y Valiño, F. *Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles.* Informes Técnicos Ciemat. Madrid, España. 07 de 2008, p. 19.

Bauer, Wolfgang y Westfall, Gary. *Física para ingenieros y ciencias con física moderna.* Mexico : Mc Graw Hill, 2011, pp. 1334-1335.

BSI INSTRUMENTS. *HPGe Spectrometer with Lead Shield.* 2015, p. 1.

Burbano, Napoleón, Becerra, Simón y Pasquel, Efrén. *Introducción a la hidrología del Ecuador . Quito, Ecuador.* Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 08 de 2015, pp. 107-109.

Cánovas, Francisco. *Datación Radiactiva.* Física Nuclear y Particular. 2007, pp. 11-12.

Carrasco, Javier y Naula , Wilson. *Caracterización y elaboración de un inventario de fuentes geotérmicas de baja entalpia en la provincia de Chimborazo y propuesta de creación de un centro de investigación de energía geotérmica en la ESPOCH .* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2012. pp. 1-2, 98.

Chávez, Estefania. *Caracterización de Radionucleidos presentes en materiales de construcción de minas y canteras de la provincia de Chimborazo y estimación de los niveles de riesgo asociados para la población* . Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. p. 7

Colegio Oficial de Físicos. *Radiaciones Ionizantes*. Física y Sociedad, p. 8.

Consejo de Seguridad Nuclear España. *Magnitudes y Unidades Radiológicas*. Madrid, 2009, pp. 11-12.

Consejo de Seguridad Nuclear. *Procedimiento para la determinación del índice de actividad alfa total en muestras de agua* . Madrid, España , 2006, p. 22.

Corbacho , José, y otros. *Procedimiento para la determinación del índice actividad alfa total en aguas potables mediante metodología de desencación y medida en detectores de ZnS(Ag) o en contador proporcional*. Colección Informes Técnicos. Madrid, 2014. pp. 4-5.

Cornejo, Néstor. *Desarrollo de un código de simulación por Monte Carlo para la calibración de sistemas de detección en espectrometría de radiación gamma*. Badajoz. Universidad de Extremadura , 2009, p. 142.

Canoba, y otros. *Dosaje de radionucleidos en los complejos termales de la provincia de Entre Ríos, Argentina*. Revista Científica Complutenses, 04 de 2008, pp. 51-54.

Environmental Measurements Laboratory. *Radionuclide Data*. New York : U.S. Department of Energy, 02 de 1997.

Errico, Leonardo. *El núcleo y sus radiaciones* . Universidad Nacional de La Plata, Argentina. p. 17.

Fernández, José, y otros. *Fundamentos de Física Médica*. Madrid, 2011. pp. 14-15, 134.

Fernández, Gregorio. *Radiactividad.* Granada, 1906, pp. 10-15, 34.

Froehlich, Klaus. *Environmental Radionuclides.* Vienna : Elsevier, 2010.

Gil, Salvador. *Experimentos de física.* Universidad Nacional de San Martín, Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 620.621 }

Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial .* Riobamba : Coordinación de Planificación, 2015. p. 1.

Griffith, R. *Quantities and Units for External Dose Assessment.* Viena : International Atomic Energy Agency , 2003. pp. 48-51.

Instituto de Protección Radiológica Ingeniería en prevención de riesgos. *Radiaciones Ionizantes .* Julio del 2016.

International Atomic Energy Agency. *Radiation, People and the Environment.* Austria, 02 de 2004, pp. 8, 29-33.

Kebir, Hadda y Boucenna, Ahmed. *Natural radionuclide concentrations in thermal springs of east Algeria.* Argel, Algeria : s.n., 02 de enero del 2017, pp. 3-4.

Khan, Faiz. *The Physics of Radiation Therapy .* New York : Lippincott Williams & Wilkins, 2003, pp. 17-20.

Lesikar, Bruce. *Los radionucleidos.* AgrilLIFE EXTENSION Texas , 2006, pp. 1-2.

LUDLUM MEASUREMENTS, INC. *Contador de muestras alfa-beta M43-10-1.* Febrero del 2018, pp. 2-4.

LUDLUM MODEL 3030 & 3030E. *Alpha-beta sample counter.* Agosto del 2012, pp. 7-9.

Ministerio del Ambiente. *Guía para muestreo de suelos.* 2014. p. 4.

Tanaskovic, Irena , Golobocanin, Dusan y Miljevic, Nada. *Multivariate statistical analysis of hydrochemical and radiological data of Serbian spa waters.* ELSEVIER, 10 de septiembre del 2011, pp. 229-233.

Nakwacki, María y Agüero, Mónica. *Vida media del K-40.* Universidad de Buenos Aires, 2002, p. 5.

Taskin, Halim, y otros. *Natural Radioactivity in Bottled Mineral and Thermal Spring Water of Turkey.* Radiation Protection Dosimetry, julio del 2013, pp. 575-578.

Navarro, Marta y Martín , Ana. *Agüas Radiactivas.* España, 2010. p. 119.

Norma Técnica Ecuatorina. *Calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras.* Quito, Ecuador, 2013. p. 35.

OMS. *Guías para la calidad del agua potable.* Berna, 2006. Vol. 1, pp. 1179-180.

Sagan, A, Kullab, K y Ismail, M. *Radionuclides in hot mineral spring waters in Jordan.* ELSEVIER, mayo de 2003, pp. 101-105.

Reino, Wilson. *Caracterización radiológica y cálculo de la exposición externa de las aguas termales de la provincia de Tungurahua utilizando espectrometría gamma.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016. pp.67-74.

Rodríguez, G, y otros. *Análisis de la Radiactividad en el Balneario Elguea.* Villa Clara, Cuba. Acapulco, Mexico, agosto del 2006. pp. 2-5.

Scoccola, Norberto. *Decaimientos Nucleares.* Laboratorio TANDAR Buenos Aires , Argentina , 16 de junio del 2004. pp. 10-15

Suárez, José. *Investigación de precedimientos radioquímicos para la determinación de los principales emisores alfa en agua para su implementación en una red de vigilancia radológica ambiental.* Univesidad Autónoma de Madrid, España, 2009. pp. 20-32.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* New York, 2000. pp. 89-91.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* 1994.

Zutta, Julián. *Medida de la concentración de actividad alfa/beta grueso, en agua potable .* Universidad Nacional de Colombia, Colombia , 2014. pp. 10-12

ANEXOS

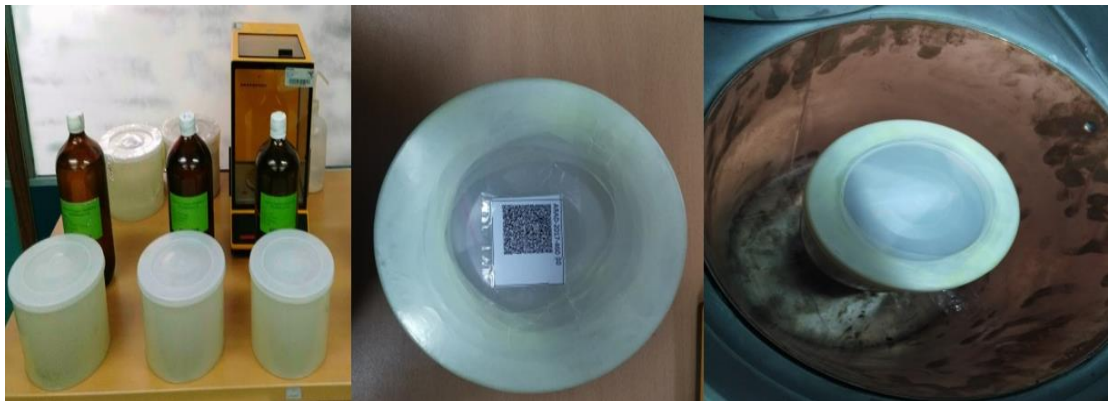
Anexo A: Ficha técnica para la recolección de los datos de campo.

							
FICHA TÉCNICA							
Nombre del Responsable:						Ficha N°:	
Fecha:		Nombre Fuente Termal:					
Hora:		Código de Muestra:					
Tipo de Muestra:				Conservante:			
LOCALIZACIÓN PUNTO DE MUESTRO							
Sector:				Cantón:			
Georreferencia Posición Global				Clima:			
Latitud:				Observaciones:			
Longitud:							
Altitud:							
Tipo de Terreno: <input type="checkbox"/> Rocoso <input type="checkbox"/> Arenoso <input type="checkbox"/> Origen Volcánicos <input type="checkbox"/> Montañoso <input type="checkbox"/> Arcilloso							
DATOS RADIOLOGICOS DE FONDO							
Número de Cuentas	0.05 metros	0.5 metros	1 metro	Medida: (µSv/h)	0.05 metros	0.5 metros	1 metro
DATOS FISICO - QUIMICOS							
Temperatura Fuente:				Temperatura Ambiente:			
Conductividad:				pH:			
Potencial:				Salinidad:			
Humedad Relativa:							

Anexo B: Toma de muestras



Anexo C: Preparación de las muestras en el laboratorio



Anexo D: Sistema de espectrometría gamma



Anexo E: Centellador de sulfuro de zinc dopado con plata



Anexo F: Reporte alfa-beta total

Municipio de Electrificación y Energía Renovable		REGISTRO DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ALFA Y BETA TOTAL					Tipo de Documento:		CÓDIGO:				
							REGISTRO		LMEER-ARAD-DAB-008				
									Revisión: 0				
Fecha procesamiento	Responsable	Código ARAD	Peso, g		Volumen a evaporar, ml	Fecha evaporación	Plancheta inicial			Plancheta final			
			Vaso vacío	Vaso con muestra evaporada			α_1	β_1	Peso, g	Fecha de conteo	α_2	β_2	Peso, g
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 01	115,26	115,35	60	5/7/17	1	722	7,97736	7/7/17	3	761	7,98812
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 02	116,03	116,109	30	5/7/17	2	736	7,87346	7/7/17	6	777	7,98425
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 03	112,48	112,71	30	5/7/17	2	772	7,87627	7/7/17	5	732	8,01243
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 04	65,39	65,44	100	5/7/17	2	759	7,85761	10/7/17	6	749	7,95382
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 05	114,94	115,02	65	5/7/17	2	718	7,67038	10/7/17	3	770	7,78923
4/7/17	BQ	ARAD-2017-160 06	69,73	69,75	250	5/7/17	2	792	7,86074	10/7/17	8	797	7,96724
6/7/17	BQ	ARAD-2017-160 07	69,494	69,7065	25	10/7/17	1	780	7,87193	11/7/17	4	724	7,97460
6/7/17	BQ	ARAD-2017-160 08	109,167	109,29528	40	10/7/17	2	730	7,85646	11/7/17	3	762	7,96643
6/7/17	BQ	ARAD-2017-160 09	69,732	69,91406	30	10/7/17	2	782	7,87867	12/7/17	3	794	7,99929
6/7/17	BQ	ARA-2017-160 10	104,200	109,42254	30	10/7/17	2	808	7,37035	13/7/17	3	649	7,99804
		Repelir.											
28/08/17	BQ	ARAD-2017-160 03	65,10434	65,63642	25	28/8/17	1	748	7,80602	31/8/17	0	756	7,93787
28/08/17	BQ	ARAD-2017-160 04	69,19322	69,68872	25,58	28/8/17	1	769	7,87784	4/9/17	6	732	7,99997
29/08/17	BQ	ADA-2017-160 07	69,5758	69,78436	23,17	29/8/17	1	769	7,87784	4/9/17	2	697	7,99997
30/8/17	BQ	ARA-2017-160 08	65,10134	65,63642	25	31/8/17	3	760	7,88394	11/9/17	4	667	8,01368

Consecutivo

Anexo G: Reportes gamma



LSRM SpectraLine

Gamma-spectrum processing report from 31/07/2017

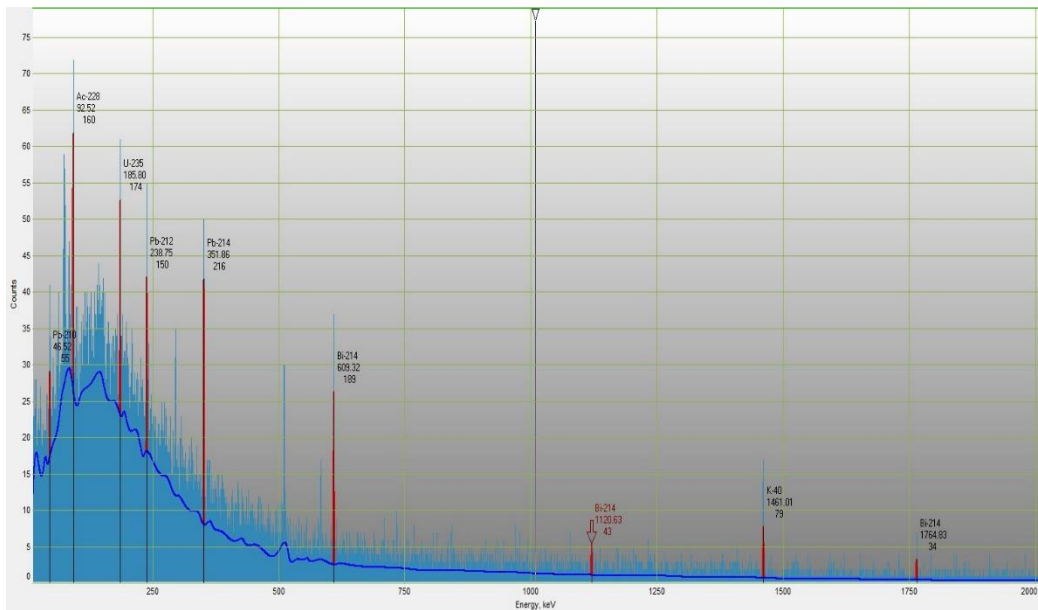
Spectrum: C:\Lsrml\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-1 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 28-07-2017 16:30:14
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 28/07/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	81	20	4,2	25
1460.82	81	20	4,2	25
Pb-214	300	50	1,23	16
295.22	111	18	1,23	20
351.93	192	29	1,22	16
Bi-214	200	30	1,16	17
609.31	163	26	1,17	17
1120.29	37	6	1,2	30
Pb-212	160	40	0,68	26
238.63	160	40	0,68	26

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 31/07/2017

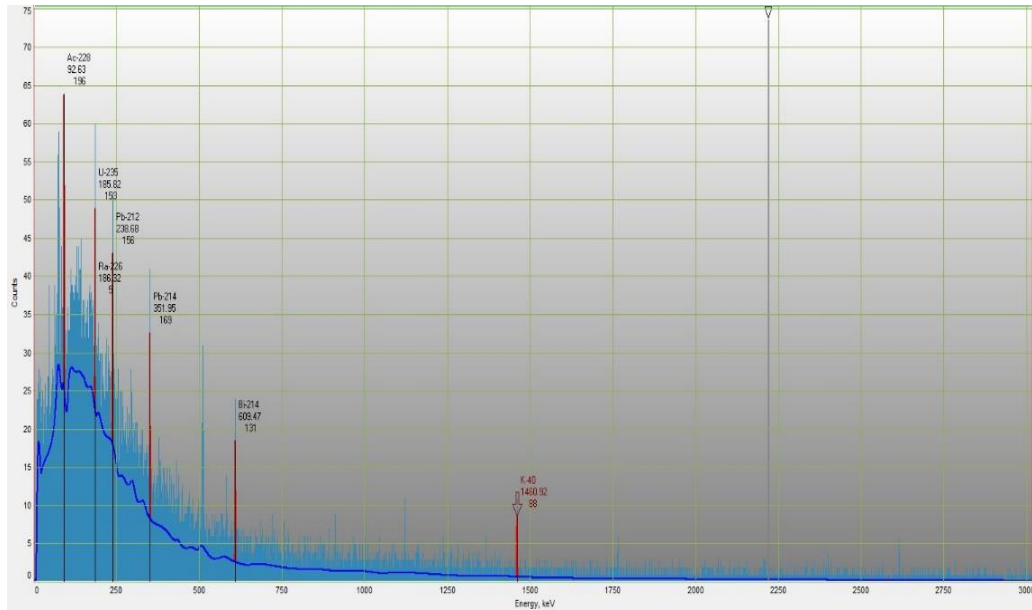
Spectrum: C:\Lsm\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-2 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 31-07-2017 9:42:50
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 31/07/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	64	18	3,3	28
1460.82	64	18	3,3	28
Pb-214	170	30	1,08	20
351.93	170	30	1,08	20
Pb-212	190	40	0,84	23
238.63	190	40	0,84	23
Bi-214	112	26	0,80	23
609.31	112	26	0,80	23

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 02/08/2017

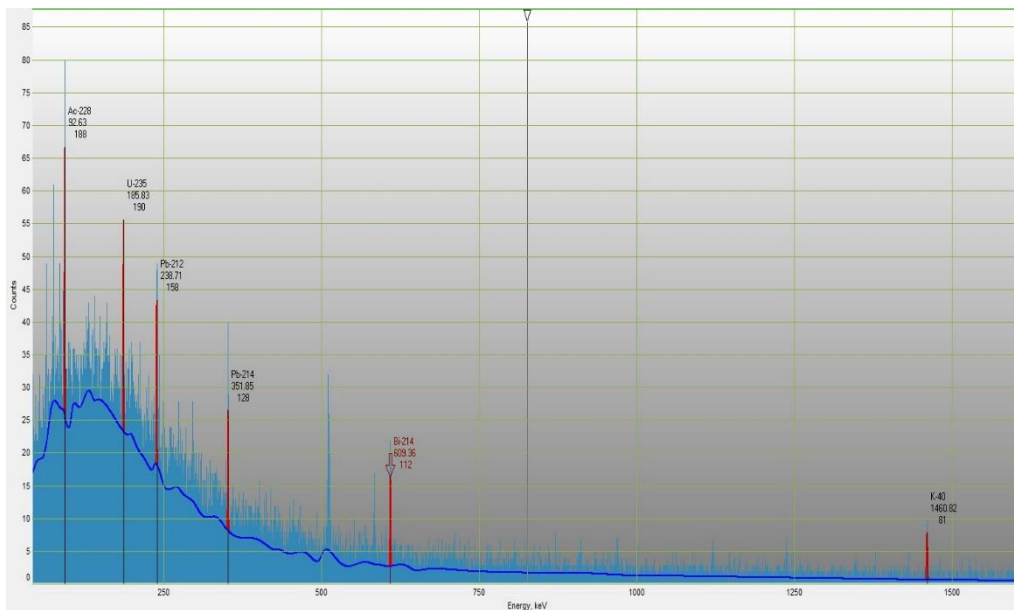
Spectrum: C:\LsrmlWork\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-4 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 01-08-2017 16:53:50
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 01/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
Th-232	80	30	90	40
63.81	80	30	90	40
K-40	84	20	4,3	25
1460.82	84	20	4,3	25
Pb-214	400	60	1,61	15
295.22	145	20	1,62	18
351.93	250	40	1,60	16
Bi-214	186	30	1,33	17
609.31	186	30	1,33	17
Pb-212	150	50	0,64	30
238.63	150	50	0,64	30
U-235	230	50	0,59	22

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 02/08/2017

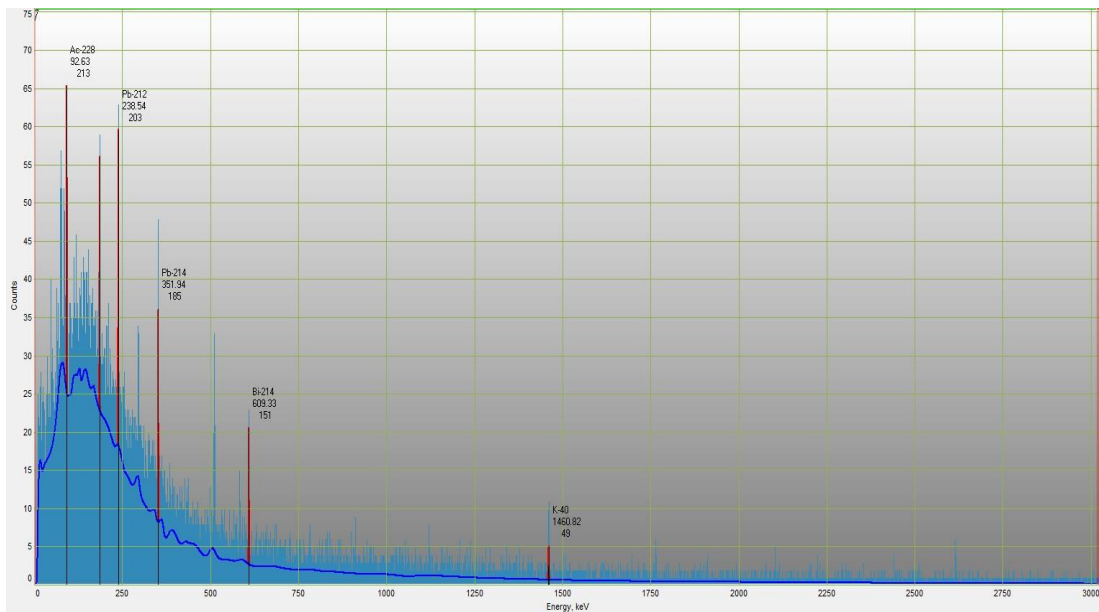
Spectrum: C:\Lsr\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-5 ESPOCH _Marinelli_1_3_2.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 02-08-2017 10:57:26
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 02/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	49	17	2,5	40
1460.82	49	17	2,5	40
Pb-214	190	40	1,18	21
351.93	190	40	1,18	21
Bi-214	151	28	1,08	19
609.31	151	28	1,08	19
Pb-212	200	40	0,88	20
238.63	200	40	0,88	20
U-235	220	50	0,56	22

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 03/08/2017

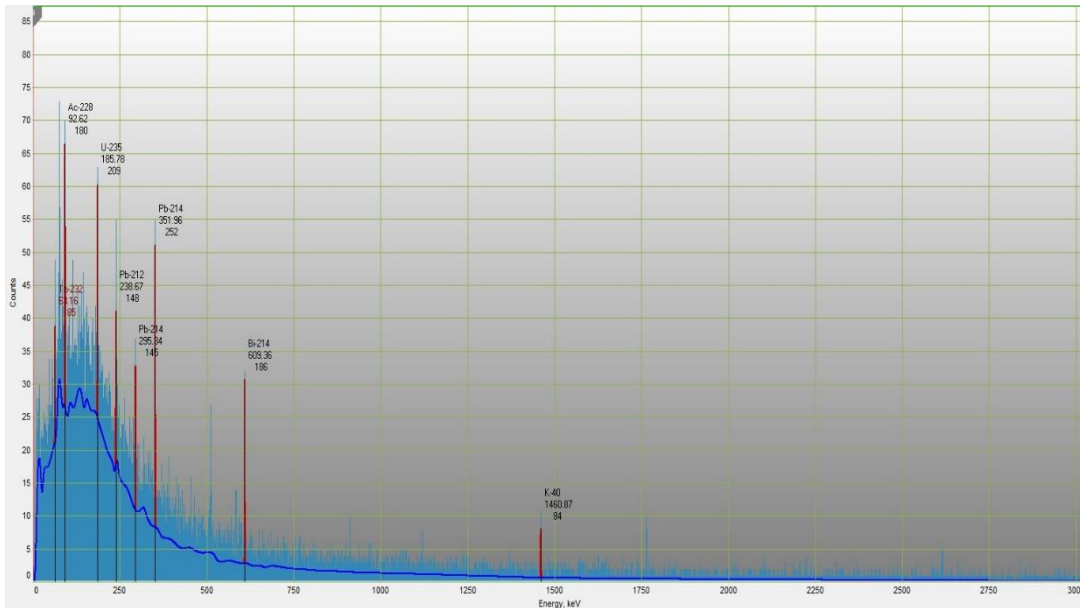
Spectrum: C:\Lsrml\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-6 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 03-08-2017 10:24:40
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 03/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	81	20	4,2	26
1460.82	81	20	4,2	26
Pb-214	130	30	0,81	25
351.93	130	30	0,81	25
Bi-214	112	25	0,80	23
609.31	112	25	0,80	23
Pb-212	160	50	0,69	30
238.63	160	50	0,69	30
U-235	210	50	0,54	23

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 03/08/2017

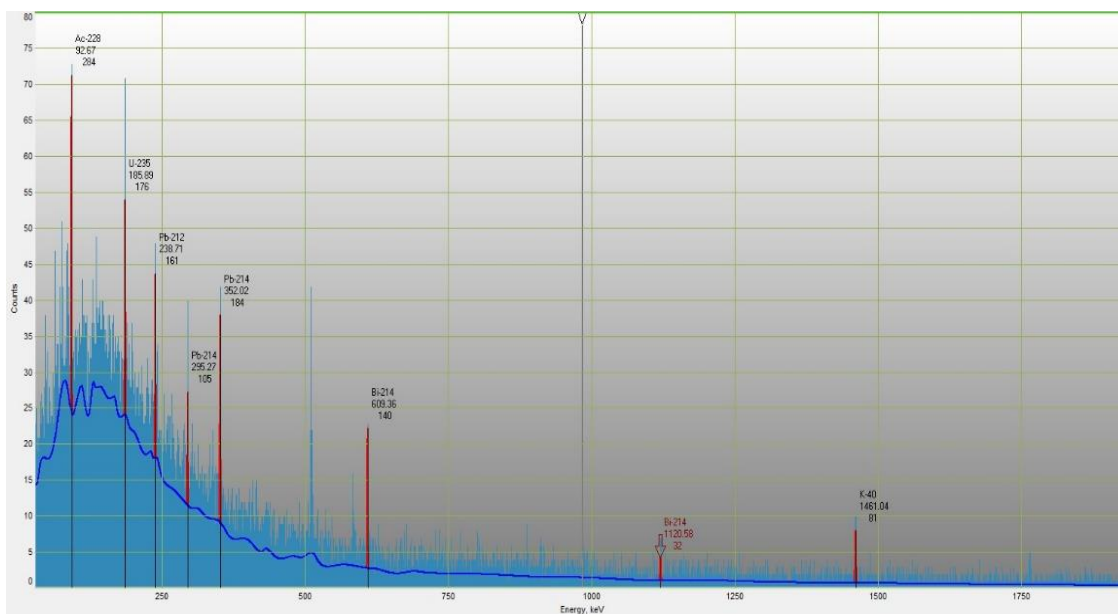
Spectrum: C:\Lsrml\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-3 ESPOCH_Marinelli_1_3_2.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 02-08-2017 17:03:38
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 02/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	84	20	4,3	24
1460.82	84	20	4,3	24
Bi-214	142	27	1,01	20
609.31	142	27	1,01	20
Pb-214	240	40	0,98	19
295.22	88	17	0,99	22
351.93	153	28	0,97	19
Pb-212	160	40	0,70	25
238.63	160	40	0,70	25
U-235	220	50	0,56	25
185.72	200	50	0,56	25

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 04/08/2017

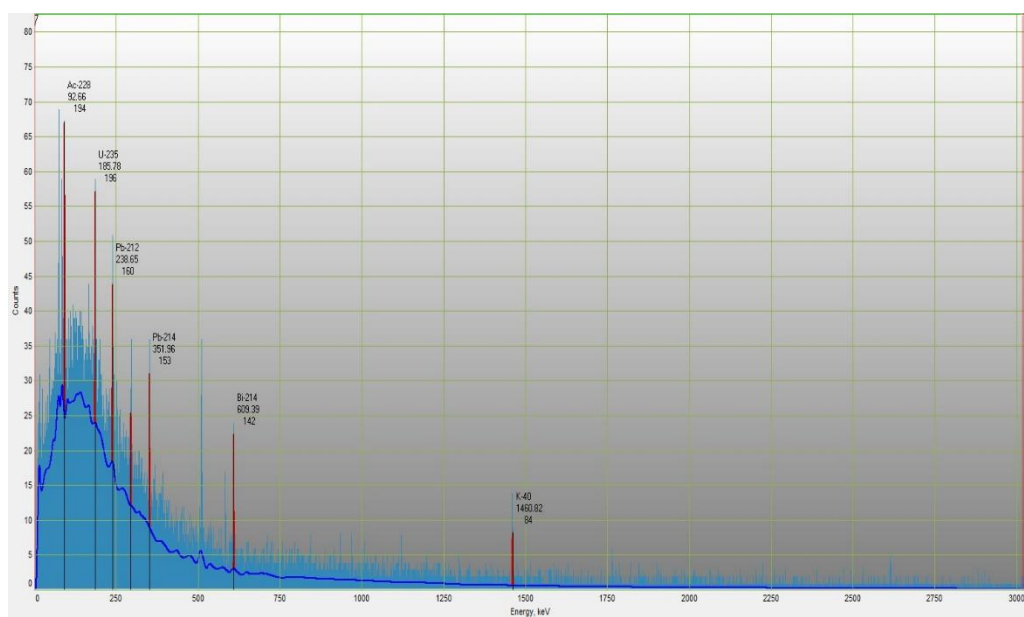
Spectrum: C:\Lsrm\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-7 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 03-08-2017 16:51:38
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 03/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	81	20	4,1	25
1460.82	81	20	4,1	25
Pb-214	290	50	1,17	17
295.22	105	19	1,17	21
351.93	184	29	1,17	17
Bi-214	170	30	1,01	18
609.31	140	25	1,01	18
1120.29	32	6	1,0	40
Pb-212	160	40	0,70	28
238.63	160	40	0,70	28
U-235	180	40	0,50	25
185.72	180	40	0,50	25

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 04/08/2017

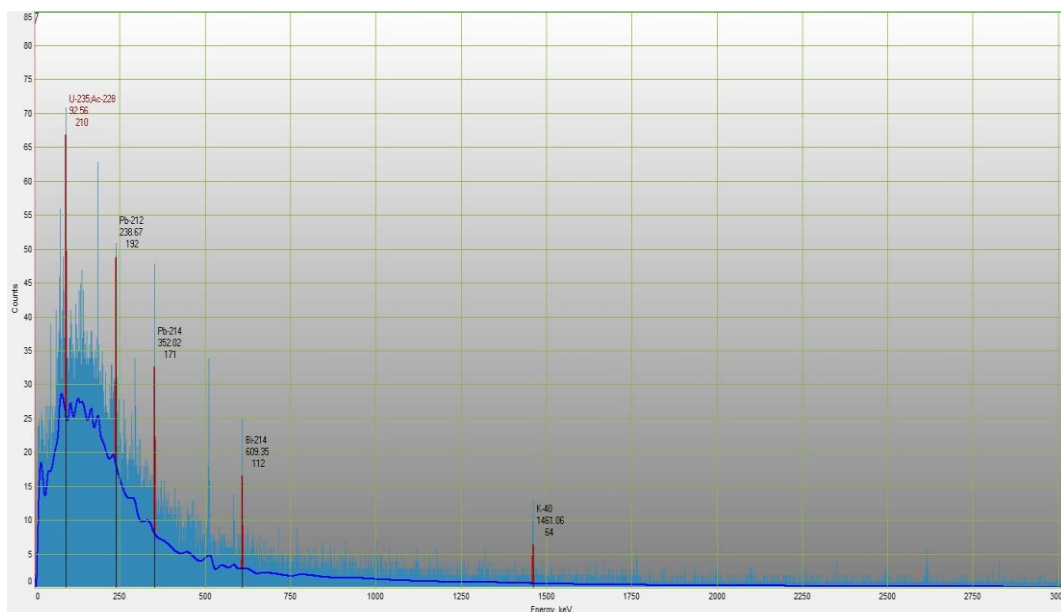
Spectrum: C:\Lsrn\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-8 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 04-08-2017 9:26:02
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 04/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	88	21	4,5	24
1460.82	88	21	4,5	24
Pb-214	170	30	1,07	21
351.93	170	30	1,07	21
Bi-214	131	26	0,94	21
609.31	131	26	0,94	21
Pb-212	160	40	0,68	26
238.63	160	40	0,68	26
U-235	150	50	0,44	40
185.72	150	50	0,44	40

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 07/08/2017

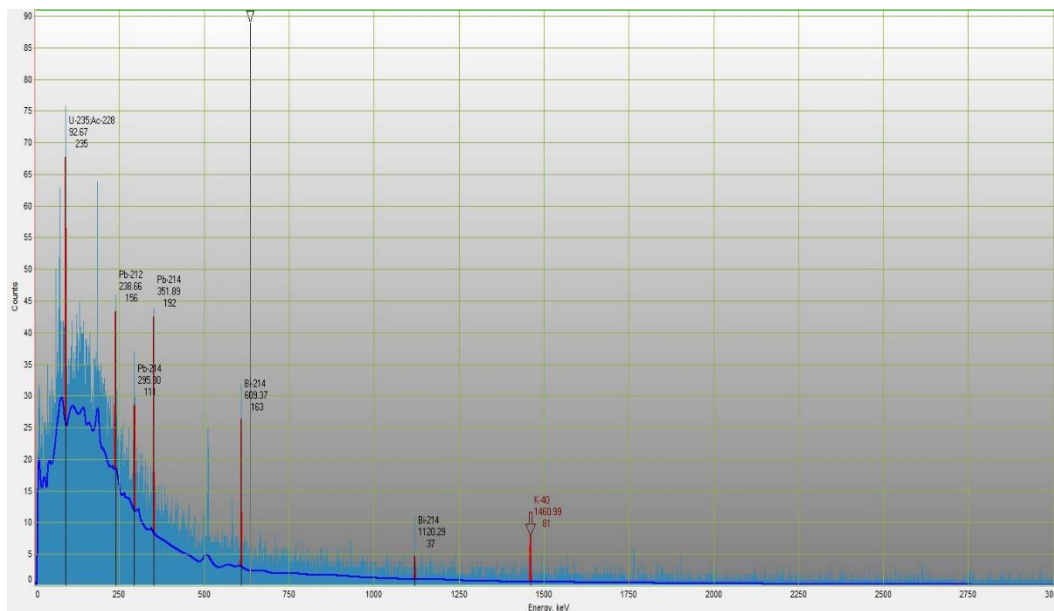
Spectrum: C:\Lsrm\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 0-9 ESPOCH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 04-08-2017 16:43:49
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 04/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	79	20	4,0	26
1460.82	79	20	4,0	26
Pb-214	220	40	1,37	18
351.93	220	40	1,37	18
Bi-214	270	40	1,36	15
609.31	189	26	1,36	15
1120.29	43	7	1,4	30
1764.49	34	5	1,4	30
Pb-212	150	40	0,65	27
238.63	150	40	0,65	27
U-235	190	50	0,49	25

Operator:

BYRON QUIROZ



Gamma-spectrum processing report from 07/08/2017

Spectrum: C:\Lsrml\Work\Spe\Espectros\ARAD 2017 460 10 ESPECH_Marinelli_1_3_1.spe
Configuration: GCD-40180X SN 2169-15
Measurement date: 07-08-2017 8:59:34
Live time: 21.60 s.
Real time: 21.60 s.
Comment:

Processing result on 07/08/2017:

Nuclides	Area, [impulse]	Absolute error, [impulse]	Activity, Bq/l	Relative error, %
K-40	86	21	4,4	25
1460.82	86	21	4,4	25
Bi-214	190	30	1,13	17
609.31	158	26	1,13	17
1120.29	36	6	1,1	30
Pb-214	150	30	0,95	23
351.93	150	30	0,95	23
Pb-212	150	50	0,64	30
238.63	150	50	0,64	30
U-235	150	40	0,44	28
185.72	150	40	0,44	28

Operator:

BYRON QUIROZ

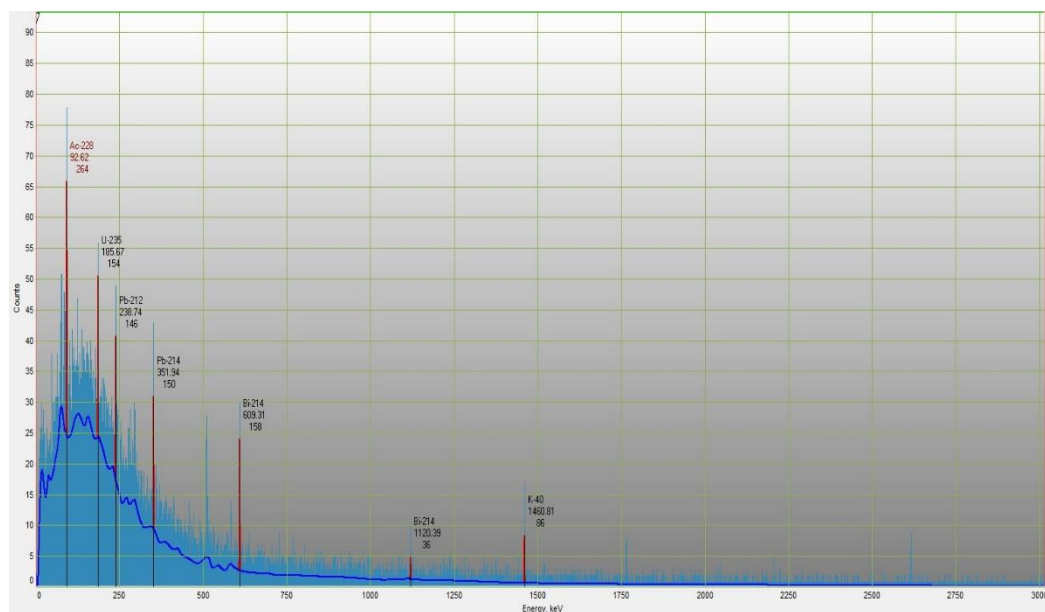


Table III.2. Dose Coefficients for Water Immersion

Nuclide	Dose Coefficient h_T (Sv per Bq s m ⁻³)								
	Gonad	Breast	Lung	R Marrow	BSurface	Thyroid	Remainder	Effective	Skin
Astatine									
At-207	1.38E-16	1.57E-16	1.38E-16	1.34E-16	2.28E-16	1.42E-16	1.32E-16	1.42E-16	1.65E-16
At-211	3.58E-18	4.23E-18	3.22E-18	2.66E-18	1.18E-17	3.45E-18	3.00E-18	3.59E-18	4.45E-18
At-215	1.97E-20	2.25E-20	1.94E-20	1.85E-20	3.78E-20	2.00E-20	1.85E-20	2.01E-20	2.39E-20
At-216	1.40E-19	1.66E-19	1.26E-19	1.04E-19	4.66E-19	1.35E-19	1.17E-19	1.41E-19	1.78E-19
At-217	3.15E-20	3.61E-20	3.11E-20	2.98E-20	5.87E-20	3.20E-20	2.96E-20	3.22E-20	3.89E-20
At-218	2.92E-19	3.71E-19	2.21E-19	1.66E-19	9.71E-19	2.64E-19	2.09E-19	2.75E-19	4.94E-19
Radon									
Rn-218	7.77E-20	8.87E-20	7.71E-20	7.47E-20	1.31E-19	7.92E-20	7.37E-20	7.94E-20	9.26E-20
Rn-219	5.73E-18	6.57E-18	5.60E-18	5.29E-18	1.20E-17	5.79E-18	5.32E-18	5.85E-18	7.10E-18
Rn-220	3.94E-20	4.51E-20	3.91E-20	3.78E-20	6.86E-20	4.02E-20	3.74E-20	4.03E-20	4.73E-20
Rn-222	4.07E-20	4.66E-20	4.03E-20	3.88E-20	7.25E-20	4.14E-20	3.85E-20	4.16E-20	4.90E-20
Francium									
Fr-219	3.55E-19	4.07E-19	3.48E-19	3.31E-19	7.06E-19	3.60E-19	3.32E-19	3.63E-19	4.34E-19
Fr-220	1.07E-18	1.25E-18	1.01E-18	8.97E-19	3.04E-18	1.06E-18	9.49E-19	1.09E-18	1.61E-18
Fr-221	3.16E-18	3.62E-18	3.03E-18	2.79E-18	7.73E-18	3.16E-18	2.86E-18	3.22E-18	4.09E-18
Fr-222	2.24E-19	2.63E-19	2.06E-19	1.86E-19	5.52E-19	2.20E-19	1.95E-19	2.24E-19	5.08E-19
Fr-223	5.16E-18	6.12E-18	4.59E-18	3.98E-18	1.41E-17	4.99E-18	4.33E-18	5.11E-18	2.78E-17
Radium									
Ra-222	9.40E-19	1.08E-18	9.19E-19	8.69E-19	1.96E-18	9.50E-19	8.74E-19	9.60E-19	1.16E-18
Ra-223	1.32E-17	1.53E-17	1.26E-17	1.13E-17	3.43E-17	1.32E-17	1.18E-17	1.35E-17	1.77E-17
Ra-224	1.01E-18	1.16E-18	9.79E-19	9.11E-19	2.36E-18	1.02E-18	9.28E-19	1.03E-18	1.30E-18
Ra-225	7.57E-19	9.94E-19	4.54E-19	3.28E-19	2.13E-18	6.46E-19	4.46E-19	6.49E-19	3.83E-18
Ra-226	6.82E-19	7.86E-19	6.50E-19	5.92E-19	1.77E-18	6.81E-19	6.13E-19	6.95E-19	9.31E-19
Ra-227	1.59E-17	1.84E-17	1.54E-17	1.46E-17	3.29E-17	1.60E-17	1.47E-17	1.62E-17	4.39E-17
Ra-228	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Actinium									
Ac-223	4.49E-19	5.25E-19	4.27E-19	3.92E-19	1.08E-18	4.47E-19	4.04E-19	4.57E-19	6.40E-19
Ac-224	1.96E-17	2.28E-17	1.85E-17	1.65E-17	5.45E-17	1.95E-17	1.74E-17	2.00E-17	2.39E-17
Ac-225	1.58E-18	1.86E-18	1.47E-18	1.29E-18	4.63E-18	1.56E-18	1.38E-18	1.61E-18	2.05E-18
Ac-226	1.30E-17	1.50E-17	1.25E-17	1.14E-17	3.30E-17	1.30E-17	1.18E-17	1.33E-17	3.10E-17
Ac-227	1.30E-20	1.57E-20	1.16E-20	1.02E-20	3.77E-20	1.25E-20	1.09E-20	1.30E-20	2.23E-20
Ac-228	1.01E-16	1.15E-16	1.01E-16	9.89E-17	1.61E-16	1.04E-16	9.71E-17	1.04E-16	1.44E-16
Thorium									
Th-226	7.84E-19	9.16E-19	7.38E-19	6.54E-19	2.23E-18	7.77E-19	6.93E-19	7.99E-19	1.19E-18
Th-227	1.06E-17	1.22E-17	1.01E-17	9.34E-18	2.49E-17	1.06E-17	9.57E-18	1.07E-17	1.36E-17
Th-228	2.04E-19	2.45E-19	1.85E-19	1.62E-19	5.92E-19	1.98E-19	1.74E-19	2.05E-19	3.18E-19
Th-229	8.46E-18	9.95E-18	7.78E-18	6.71E-18	2.58E-17	8.28E-18	7.29E-18	8.56E-18	1.14E-17
Th-230	4.09E-20	5.43E-20	3.20E-20	2.73E-20	1.20E-19	3.68E-20	3.08E-20	3.94E-20	1.01E-19
Th-231	1.22E-18	1.55E-18	9.75E-19	8.28E-19	3.69E-18	1.13E-18	9.32E-19	1.18E-18	3.79E-18
Th-232	2.14E-20	3.13E-20	1.44E-20	1.24E-20	5.90E-20	1.80E-20	1.43E-20	1.99E-20	7.65E-20
Th-234	7.65E-19	9.16E-19	6.76E-19	5.58E-19	2.53E-18	7.34E-19	6.31E-19	7.64E-19	1.33E-18
Protactinium									
Pa-227	1.91E-18	2.27E-18	1.72E-18	1.44E-18	6.26E-18	1.85E-18	1.60E-18	1.92E-18	2.45E-18
Pa-228	1.18E-16	1.34E-16	1.17E-16	1.13E-16	2.00E-16	1.20E-16	1.12E-16	1.20E-16	1.41E-16
Pa-230	6.69E-17	7.63E-17	6.60E-17	6.38E-17	1.16E-16	6.82E-17	6.31E-17	6.82E-17	7.99E-17
Pa-231	3.75E-18	4.39E-18	3.54E-18	3.33E-18	8.06E-18	3.73E-18	3.37E-18	3.78E-18	5.18E-18
Pa-232	9.71E-17	1.10E-16	9.64E-17	9.40E-17	1.57E-16	9.93E-17	9.23E-17	9.91E-17	1.17E-16
Pa-233	2.01E-17	2.32E-17	1.95E-17	1.81E-17	4.61E-17	2.02E-17	1.84E-17	2.05E-17	3.01E-17
Pa-234m	1.49E-18	1.71E-18	1.47E-18	1.42E-18	2.61E-18	1.52E-18	1.41E-18	1.52E-18	5.92E-18
Pa-234	1.99E-16	2.26E-16	1.97E-16	1.92E-16	3.29E-16	2.03E-16	1.89E-16	2.03E-16	2.51E-16
Uranium									
U-230	1.19E-19	1.50E-19	1.00E-19	8.92E-20	3.26E-19	1.12E-19	9.61E-20	1.17E-19	2.33E-19
U-231	6.57E-18	7.83E-18	5.92E-18	5.04E-18	2.08E-17	6.38E-18	5.55E-18	6.61E-18	8.67E-18
U-232	3.55E-20	5.33E-20	2.20E-20	2.02E-20	8.77E-20	2.93E-20	2.26E-20	3.22E-20	1.31E-19
U-233	3.79E-20	5.02E-20	2.98E-20	2.73E-20	9.26E-20	3.46E-20	2.91E-20	3.64E-20	9.56E-20
U-234	2.03E-20	3.35E-20	9.87E-21	9.50E-21	4.54E-20	1.53E-20	1.09E-20	1.75E-20	9.55E-20
U-235	1.56E-17	1.80E-17	1.49E-17	1.35E-17	4.08E-17	1.56E-17	1.40E-17	1.59E-17	1.89E-17
U-236	1.42E-20	2.56E-20	4.94E-21	5.30E-21	2.72E-20	9.67E-21	6.16E-21	1.16E-20	8.19E-20
U-237	1.32E-17	1.55E-17	1.22E-17	1.07E-17	3.78E-17	1.29E-17	1.14E-17	1.33E-17	1.92E-17