



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE MATERIAL RADIOACTIVO DE ORIGEN NATURAL (NORM)
EN LA INDUSTRIA PETROLERA

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

Profesor Guía
Yasser Alejandro González

Autora
Soraya Maane Benalcázar Jalkh

Año
2015

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el (los) estudiante(s), orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Yasser Alejandro González Romero
Msc. en Ingeniería Ambiental
070373762-7

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Soraya Maane Benalcázar Jalkh
172043008-9

AGRADECIMIENTOS

A mis amados padres por su apoyo incondicional.

A mi estimado profesor guía, Ing. Alejandro González, a usted mi admiración y respeto.

Al Laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva y a la empresa SERTECPET. S.A. en especial al departamento de SSA por abrirme sus puertas y hacer posible el presente proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres Renata y
Byron, a mis hermanos
Andrea y Ernesto

RESUMEN

El presente proyecto se realizó con el fin de evaluar la presencia de radionúclidos de origen natural en el proceso de extracción de petróleo en los campos Auca, Sacha y Shushufindi, mediante detectores de radiación de germanio hiperpuro (HPGe) y centelleo líquido; las muestras fueron tomadas de residuos tales como: lodos, incrustaciones y aguas de formación. Se evaluó la tasa de dosis en las plataformas petroleras mediante un contador GeigerMuller. En los resultados obtenidos se encuentra la cadena de decaimiento del U^{238} y del Th^{232} , siendo el radionúclido con mayor actividad el Pb^{210} , el mismo que se encuentra sobre el límite permisible de 1000Bq/Kg establecido por el Organismo Internacional de Energía Atómica; la tasa de dosis evaluada en las plataformas es menor a 1mSv/año límite recomendado para el público.

ABSTRACT

The aim of this project was to evaluate the presence of natural occurring radionuclides in oil extraction process at the Auca, Sacha and Shushufindi oil fields. The reading was achieved by using high-purity Germanium (HPGe) Detectors and liquid scintillation counting; the samples came from residuals such as sludge, scales and formation waters. Using the counter Geiger Muller we evaluated the dose rate in the oil platforms; the results showed the radioactive decay of U^{238} and Th^{232} . Pb^{210} was the radionuclide with most activity with levels above 1000 Bq/Kg that is the limit established by the International Atomic Energy Agency. The dose rate evaluated in the platforms is below 1mSv/year, which is the recommended limit for the public

ÍNDICE

Introducción	1
1. Capítulo I. Marco Teórico	3
1.1 Radiación Ionizante	3
1.1.1 Tipos de radiación ionizante	3
1.1.2 Radiación natural.....	5
1.2 NORM	5
1.2.1 Industrias que generan NORM	7
1.2.2 NORM en la Industria Petrolera.....	7
1.3 Industria petrolera en el Mundo y en Ecuador.....	9
1.4 Efectos producidos por la radiación.....	10
1.4.1 Efectos estocásticos.....	10
1.4.2 Efectos determinísticos.....	11
1.4.3 Efectos en el medio ambiente	11
1.5 Detectores de radiación	11
2. Capítulo II. Metodología	13
2.1 Toma de muestras en campo.....	13
2.2. Preparación de muestras en laboratorio.....	15
2.3 Detector de Germanio Hiperpuro.....	17
2.3.1 Calibración.....	17
2.3.2 Funcionamiento	20
2.3.3 Gammavision.....	21
2.4 Centelleo Líquido.....	24
2.4.1 Preparación de muestras para centelleo líquido.....	24
2.4.2 Funcionamiento	25
2.4.3 Calibración centelleo líquido	29
2.5 Determinación de la tasa de dosis	30
3. Capítulo III. Análisis de resultados y discusión.....	33

3.1	Resultados espectrometría gamma Germanio Hiperpuro	33
3.1.1	Radioactividad en lodos.....	33
3.1.2	Radiactividad en agua de formación.....	37
3.1.3	Radiactividad en incrustaciones	42
3.2	Resultados por centelleo líquido.....	48
3.3	Resultados tasa de dosis.....	57
4.	Conclusiones	69
5.	Recomendaciones	70
	REFERENCIAS	72
	ANEXOS	78

Introducción

Al hablar de contaminación generalmente nos enfocamos en fenómenos tangibles como la del agua, del aire, del suelo e incluso de la auditiva; sin embargo los seres vivos nos encontramos expuestos diariamente a la contaminación radiactiva, la cual pese a no poder ser visualizada, está presente en varias actividades.

Desde el origen de la Tierra existen radionúclidos que se encuentran liberando energía de manera natural en las formaciones geológicas y se los ha denominado NORMs por su siglas en inglés (*Naturally Occurring Radioactive Materials*); existen procesos industriales que alteran el comportamiento natural de estos radionúclidos, llevándolos a la superficie terrestre y produciendo contaminación radiactiva, como es el caso de la industria petrolera (Roy, Harrison, Ronald, & Hester, 2011, p.112; World Nuclear Association, 2014, párr.1).

Los NORMs han sido investigados a nivel internacional, en Estados Unidos un estudio determinó que anualmente se generan 400 toneladas de NORM en cada pozo petrolero y se estima que cada año más de 140 000 tanques es decir aproximadamente 28 000 m³ contienen NORM que poseen una actividad mayor a 3 300 Bq/kg. El agua producto del tanque de separación también fue analizada y se encontró la presencia de Radio (Ra²²⁶) con una actividad superior a 111 Bq/L en comparación con el límite de descargas de 2.2 Bq/L para industrias estadounidenses (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2008, p. 12).

En Brasil, el estudio de NORM en la industria petrolera también se ha ejecutado desde 1988, empresas como PETROBRAS han identificado la presencia de material natural radiactivo en las plataformas petroleras en incrustaciones de los tubos y en equipos utilizados para la extracción; la empresa se caracteriza por realizar el manejo adecuado de los tubos

contaminados con radiación, cuentan con un depósito donde en el año 2004 se localizaban 20 000 tubos y 180 000 tanques de separación contaminados con NORM (Fundación Estatal de Ingeniería en Medio Ambiente, 2004, p.8).

En el Ecuador en el año 2007 se realizó un inventario de las actividades generadoras de NORM; el estudio indica que la extracción de petróleo crudo en una media de 2 981 pozos operados por Petroecuador generó 61 112 toneladas de material natural radiactivo (Suárez & González, 2010, p. 5).

La presencia de radionúclidos de origen natural en la industria petrolera ya ha sido estudiada a nivel mundial obteniendo como resultado cantidades de radiación que superan los límites establecidos en las normativas de los países mencionados. Al ser el Ecuador un país petrolero y por los resultados encontrados en el inventario previo, el presente proyecto de titulación tiene como objetivo principal evaluar la presencia de radionúclidos de origen natural en los procesos de extracción de petróleo en los campos Auca, Sacha y Shushufindi; mediante la caracterización de NORMs en los procesos de extracción de petróleo utilizando espectrometría gamma y centelleo líquido; también determinar la tasa de dosis mediante detectores activos de radiación y con los resultados obtenidos elaborar un mapa radiológico del área de estudio utilizando herramientas SIG.

El presente proyecto de titulación contó con el apoyo de La Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) ya que desde el año 2008 se encuentra trabajando en el proyecto “Fortalecimiento de la Infraestructura Nacional y el Marco Regulador para el Control de las Exposiciones del Público poniendo énfasis en la Seguridad de la Gestión de los Desechos Radiactivos”. El proyecto pretende evaluar los niveles de radiactividad en el medio ambiente, para garantizar la seguridad del ser humano y el ecosistema de los riesgos que presentan las radiaciones ionizantes. En Ecuador no existe una legislación que regule los límites de NORMs por lo cual se tomarán como referencia los parámetros establecidos por el OIEA.

1. Capítulo I. Marco Teórico

1.1 Radiación Ionizante

Se entiende por radiación a la emisión de energía de una sustancia radiactiva que se moviliza en el espacio con cierto poder de penetración, según la energía que posee. La radiactividad consiste en la emisión energética de un isótopo hasta lograr su estabilidad atómica. (Cássica & Lima, 2010, p. 10; Cherry, 2012, p. 48). La radiación ionizante es aquella que puede ionizar a otros átomos, esta reacción se produce por la interacción atómica que separa electrones de átomos y moléculas. Cuando la radiación ionizante atraviesa la materia y pasa cerca de un electrón orbital, la energía transmitida separa al electrón (ion negativo), del átomo (ion positivo) produciendo la ionización (Ahmed, 2012, p. 650; Robledo, 2007, p. 108).

1.1.1 Tipos de radiación ionizante

La radiación ionizante se caracteriza por poseer una longitud de onda baja y una frecuencia elevada, existe una relación entre la longitud de onda y la energía que posee, como se puede observar en el espectro electromagnético (Anexo 1), mientras menor es la longitud de onda es más energético (Bracciaforte, 2014, p. 134). En el espectro electromagnético podemos diferenciar como radiación ionizante a los rayos X, a la radiación gamma y la cósmica. Sin embargo, las partículas alfa y beta también producen ionización debido a su elevada velocidad y por tanto se las clasifica dentro de radiación ionizante (Cabrerizo, Bozal, & Perez, 2008, p. 168; Siegbahn, 2012, p. 25).

A los tipos de radiación ionizante se los puede clasificar en ondulatorias: rayos X y gamma; y corpusculares: partículas alfa, beta y neutrones. Las ondulatorias se caracterizan por su longitud de onda corta y por lo tanto su capacidad de penetración en la materia, que tan solo puede ser interceptada por blindajes muy pesados como plomo y hormigón. Por lo general se producen en

reacciones de núcleos inestables. Las corpusculares: partículas alfa, beta y neutrones; poseen menor energía que las ondulatorias (Díaz, 2007, p. 315; Martin y James, 2013, p. 21).

- **Partículas alfa**

Poseen un poder de penetración escaso, pueden ser interceptadas por una hoja de papel, por la piel o únicamente con distancia, debido a su masa no pueden recorrer más de dos centímetros. Tienen una carga eléctrica positiva; son considerados núcleos de helio con cuatro unidades atómicas, ya que poseen dos protones y dos neutrones. La emisión de partículas alfa procede del núcleo del material radiactivo debido a que la carga positiva y la mayor parte de la masa atómica se encuentran en él. Cuando se produce la desintegración por partículas alfa, se emite un núcleo de Helio, transmutando al elemento (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2008, p. 12; Díaz, 2007, p. 315; Kiren, Gudennavar, & Bubbly, 2013, p. 1339).

- **Partículas beta**

Las partículas beta poseen baja penetración, sin embargo es superior a las partículas alfa y pueden ser interceptadas por finas capas de agua, metal o vidrio. Son electrones de átomos excitados desprendidos a velocidades altas, poseen carga negativa y su masa es prácticamente nula (Holden, 2008, p. 3; Stewart & Bushong, 2013, p. 405).

- **Neutrones**

Los neutrones tienen la capacidad de penetración superior a la de rayos gamma, rayos X, partículas alfa y beta; ya que no poseen carga y únicamente puede ser detenida por parafina, hormigón o agua. La ionización la realizan de forma indirecta al interactuar con otros núcleos, los activan y producen emisiones con potencial de ionizar (CSN, 2008, p. 2; Menéndez, 2008, p. 367).

Los tipos de radiación se diferencian por su capacidad de penetración y los efectos que causan a la salud, si bien la radiación gamma y los rayos X poseen

mayor potencial de penetración; las partículas alfa son las más dañinas a la salud en caso de ingresar al organismo por inhalación o vía oral (El-Missiry, Othman, & Alabdan, 2012, p. 444).

1.1.2 Radiación natural

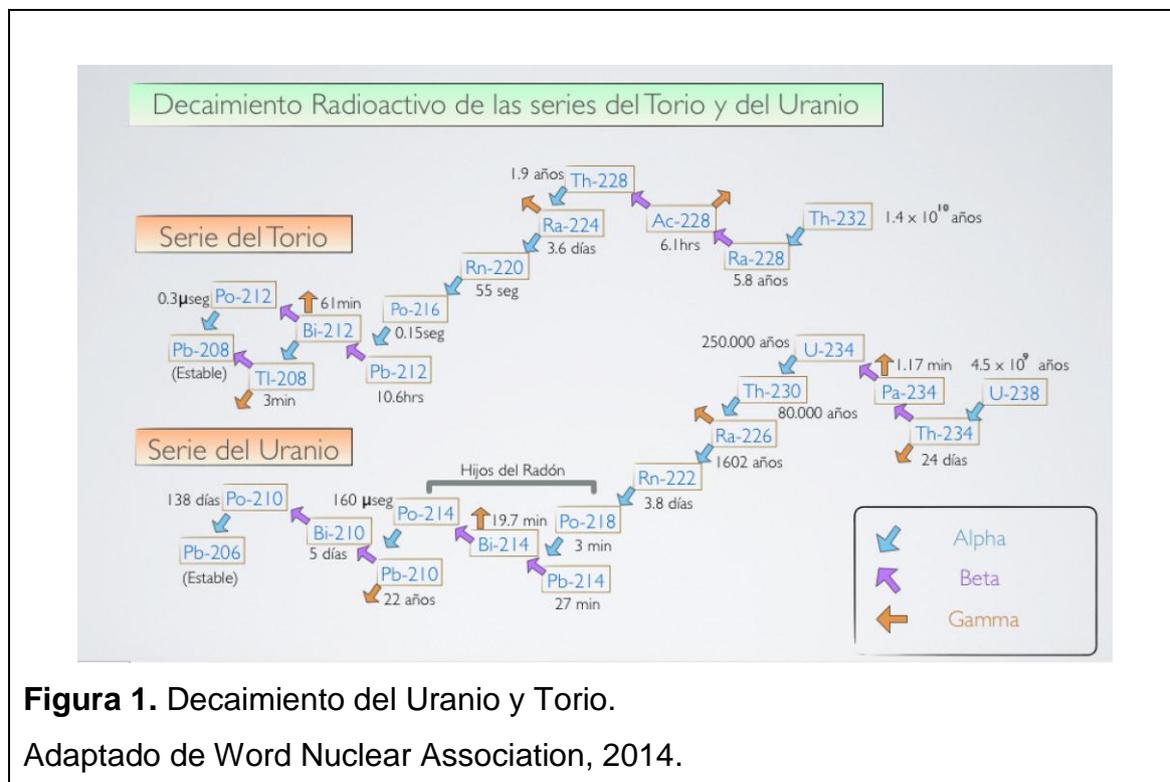
La radiación natural o también denominada radiación de fondo, proviene de dos fuentes principales: la radiación cósmica y la terrestre; de tal manera que los seres vivos nos encontramos expuestos normalmente a radiación ionizante, la radiación de fondo es la base sobre la que se añaden las exposiciones, por lo tanto, sirve de referencia para la comparación con otras exposiciones (Otto, 2012, p. 301; United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2010). La radiación cósmica llega del espacio exterior, atraviesa la atmósfera y penetra a la Tierra, los radionúclidos cosmogénicos se caracterizan por ser radionúclidos de número atómico bajo, producto de la interacción de nucleones cósmicos con átomos atmosféricos o de la Tierra, entre ellos tenemos: Carbono 14, Tritio, Berilio 7 y Sodio 22. La radiación cósmica varía según la latitud, en la zona ecuatorial la intensidad de la radiación es mínima, e incrementa conforme aumenta la latitud y altitud (Mertens, Kress, & Wiltberger, 2012, p. 685; Yehuwdah, 2012, p. 408).

La radiación terrestre existe en la corteza de la Tierra desde el origen del Planeta, también se los denomina radionúclidos primordiales, su concentración varía según las formaciones geológicas adheridos al basalto y granito. Los radionúclidos primordiales corresponden a Uranio 238, Uranio 235 y Torio 232 (Desidery, 2006, p. 601; Gómez, 2009, p. 16; Plasencia et al., 2008, p. 36).

1.2 NORM

Los elementos primordiales se encuentran en la naturaleza de forma natural, poseen una estructura inestable, ya que los neutrones no se encuentran en equilibrio con la cantidad de protones que posee el núcleo; para llegar a ser

estables liberan energía y este fenómeno es denominado radiactividad de origen natural (Otto, 2012, p. 301). Entre estos elementos tenemos al Uranio 238 (U^{238}) y Torio 232 (Th^{232}); que poseen una vida media de 4.5×10^9 y 1.4×10^{10} años respectivamente y que generalmente decaen en Potasio 40 (K^{40}) con una vida media de 1.3×10^9 años. Un elemento importante debido a su larga vida media es el Radio 226 (Ra^{226}) producto del decaimiento de la actividad del Uranio y del Torio (Abojassim, 2014, p. 257; Amidi, Hafezi, & Attarilar, 2005, p. 85; IAEA, 2008; Shahbazi, 2013, p. 1). En el siguiente gráfico se pueden observar las series del Uranio y Torio.



Los NORM se encuentran distribuidos según la geología y geomorfología de la Tierra, en yacimientos de uranio la cantidad incrementa representativamente (Ahmed, 2012, p. 649). El material radiactivo producto del decaimiento de energía del Uranio o Torio que se encuentra adherido a los minerales tiene la misma actividad que los progenitores ya que posee el tiempo de vida más larga; siendo un equilibrio radiactivo. Cuando un depósito es alterado por lixiviación o procesamiento, la cadena de desintegración puede verse afectada,

ya que los elementos de la serie pueden comportarse de manera diferente durante la perturbación (Martin y James, 2013, p. 197; Spitz, Lovinz, & Becker, 2008, p. 37).

Existen actividades que incrementan la exposición al material natural radiactivo por intervención del ser humano en estos casos se denominan TENORM (Material Radiactivo de Origen Natural Tecnológicamente Mejorado), sin embargo, es importante destacar que a pesar de la diferencia conceptual entre NORM y TENORM, muchas veces se utiliza el término NORM para referirse a TENORM, considerándose la clasificación como superflua (Roy, Harrison, Ronald, & Hester, 2011, p. 112; Word Nuclear Association, 2014, párr. 1).

1.2.1 Industrias que generan NORM

La composición, concentración, disponibilidad y proximidad de las personas a los NORMs ha sido alterada por las actividades humanas; de tal manera que algunas actividades se han convertido en focos potenciales de contaminación radiactiva por NORM y requieren regularización en las descargas y residuos que ellas producen (Australian Radiation Protection & and Nuclear Safety Agency, 2008, p. 2; Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2008, p. 14; López, 2012, p. 123; Word Nuclear Association, 2014, párr. 5).

Entre las industrias que generan NORMs tenemos: Centrales eléctricas de combustibles fósiles, extracción de petróleo y gas, combustión de carbón, procesamiento de metales, industria de fosfato, producción de pigmentos de óxido de titanio, industria del cemento, tratamiento de aguas (Canoba, 2013, p. 2; IAEA, 2008, p. 7; UNSCEAR, 2010, p.19).

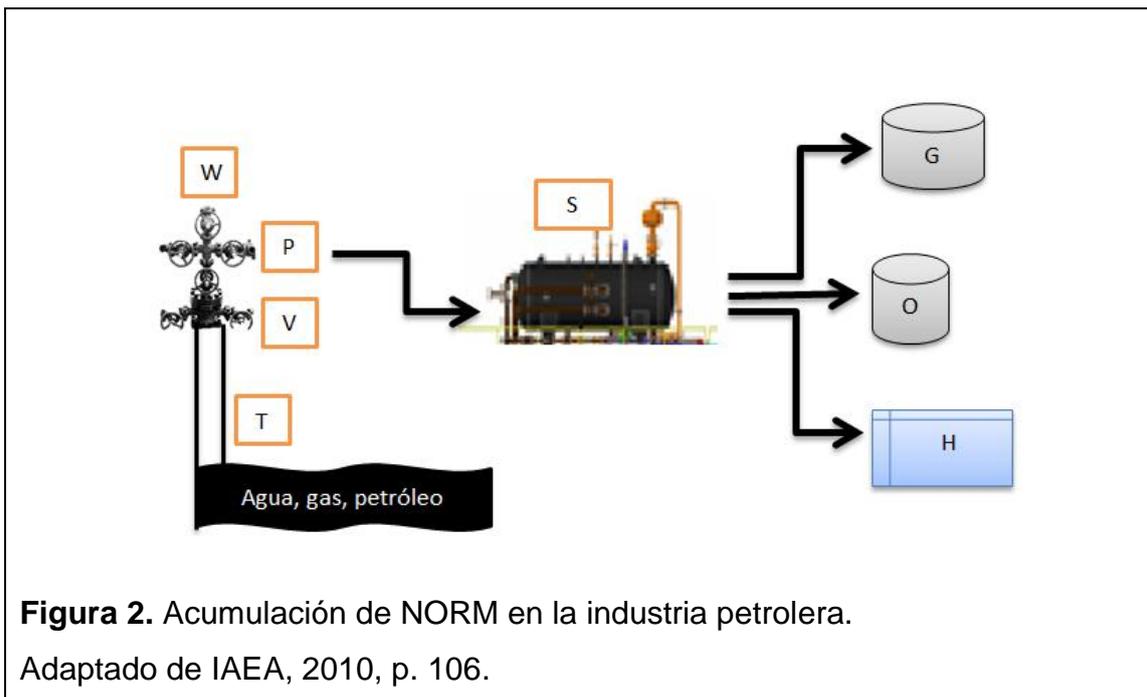
1.2.2 NORM en la Industria Petrolera

Los NORMs en la industria petrolera se encuentran principalmente en lodos, arenas e incrustaciones, asociadas con la presencia de crudo, aguas de

formación y gas natural (Fisher, 2008, p. 140; Yehuwdah, 2012, p. 410). Las incrustaciones o escalas son minerales sólidos que precipitan por la producción de agua de formación la cual contiene una alta concentración de sulfatos y carbonatos. Las principales incrustaciones se forman a partir de la precipitación de sulfatos de estroncio (SrSO_4), sulfato de bario (BaSO_4) y carbonato de calcio (CaCO_3) en arenas y lodos, las cuales contienen radionúclidos que fueron diluidos por el agua de formación y los minerales (Canoba, Gnoni, & Truppa, 2008, p. 275; IAEA, 2010, p. 12).

El agua de formación junto con los minerales solubiliza al Ra^{226} de las formaciones geológicas y debido a cambios de temperatura, presión, acidez, mezcla de aguas incompatibles, presencia de impurezas, aditivos, variación en el caudal, expansión del fluido y evaporación; se produce la precipitación de los minerales y el material radiactivo, formando de esta manera incrustaciones en la parte interna de los equipos (Cicek Volkan, 2014, p. 32; IAEA, 2010, p. 106).

Las incrustaciones en la industria petrolera se forman principalmente en tuberías (T), cabezales (W), válvulas (V), bombas (P), separadores (S), piscina de tratamiento de agua (H), tratamiento de gas (G), tanque de almacenamiento de petróleo (O). (IAEA, 2010, p. 106).



1.3 Industria petrolera en el Mundo y en Ecuador

El petróleo o también denominado “oro negro”, constituye la base de la economía a nivel mundial y nacional; desde su descubrimiento se ha convertido en uno de los bienes más preciados por la humanidad. En el mundo los principales productores de petróleo son: Arabia Saudita, produciendo 11 730 000 barriles por día; seguido por Estados Unidos, Rusia y China. En América Latina la lista se encuentra liderada por: México con 2 936 000 barriles, seguido por Brasil y Venezuela (CIA World Factbook, 2013 , párr. 1.; International Energy Agency, 2014, p. 5).

El Ecuador explota petróleo tanto en la región Costa como Amazónica, siendo esta última la principal reserva de hidrocarburo del país. Ecuador es un país petrolero desde el año 1967 cuando el consorcio Texaco-Gulf descubrió el pozo Lago Agrio 1 con una producción de 2 600 barriles diarios. En el año 2013 Ecuador se encontraba en el puesto 31 de los productores de petróleo a nivel mundial con 526 000 barriles por día (CIA World Factbook, 2013, párr. 3; Fontaine, 2005, p. 150; Poveda, 2013, p. 16).

En la lista de los países con mayores reservas del preciado “oro negro” Venezuela encabeza la lista con 297 600 millones de barriles; y Ecuador se encuentra en el puesto 19 con 8 240 millones de barriles (CIA World Factbook, 2013, párr. 5).

1.4 Efectos producidos por la radiación

La exposición a la radiación puede ser externa o interna; la exposición interna se da principalmente por material radiactivo que posee una desintegración gamma; con la capacidad de atravesar los tejidos y producir alteraciones al organismo. La exposición interna se debe a la inhalación de partículas que contienen adheridos radioisótopos o a la ingesta de alimentos que hayan bioacumulado material radiactivo en su estructura. Los efectos al ser humano causados por la exposición a material radiactivo se los puede clasificar en determinísticos y en estocásticos (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2012, párr. 8; UNSCEAR, 2010, párr. 7). Los efectos producidos por los NORMs se asocian principalmente a la inhalación de torio 232 y radón actualmente se están realizando estudios de los efectos producidos específicamente por la radiación natural (Botezatu & Lacob, 2015, p.15).

1.4.1 Efectos estocásticos

También se los denomina probabilísticos debido a que no dependen de la dosis efectiva para producir una alteración en el ADN, teniendo como consecuencia efectos estocásticos somáticos que se caracterizan por poseer un tiempo de latencia no menor a 2 años para aparecer. Los efectos estocásticos también pueden ser genéticos debido a una alteración en las células germinales haploides, por lo que el efecto no se ve en el individuo que ha sido irradiado pero si en su descendencia. Tanto los efectos somáticos como hereditarios no poseen una dosis umbral para causar el efecto (Del Cura, Pedraza, & Gayete, 2010, p. 396; Núñez, 2010, p. 8; Otto, 2012, p. 315).

1.4.2 Efectos determinísticos

La dosis es directamente proporcional al efecto que causan, poseen un umbral dosis-efecto bajo el cual el daño no es perceptible. A pequeñas dosis sobre el umbral los síntomas son dolores de cabeza y náuseas; conforme incrementa la dosis puede producir lesiones en la piel, cataratas, daños en el sistema hematopoyético, digestivo y nervioso, produciendo la muerte (Campos, 2005, p. 302; Del Cura et al., 2010, p. 35; Núñez, 2010, p. 10).

1.4.3 Efectos en el medio ambiente

El incremento de radiación no afecta únicamente a los seres humanos, el medio ambiente también tiene consecuencias por la presencia excesiva de radionúclidos. En las matrices ambientales se produce un desequilibrio radiactivo por la presencia excesiva de radionúclidos lo que produce la afectación en plantas y animales, los mismos que tienen la capacidad de bioacumular la radiación e insertarla en la cadena trófica, produciendo desequilibrio en todo el ecosistema. Las plantas por la exposición excesiva a radiación poseen una disminución en su capacidad fotosintética e inhibición del crecimiento (UNSCEAR, 2010, p. 221).

1.5 Detectores de radiación

Los métodos para detectar la radiación se los puede clasificar en inmediatos y retardados según el tiempo de respuesta. En ambos casos, se subdividen en detectores de radiación por ionización y por excitación. Los detectores por ionización a su vez se dividen en gaseosos, semiconductores, y de película fotográfica y los detectores por excitación en centelleo o termoluminiscencia (CSN, 2008; Ramírez, 2010, p. 361; Simonescu, 2013, p. 50).

Los detectores poseen el mismo principio operacional que consiste en la medición de la radiactividad en forma de energía mediante la interacción

atómica entre el radionúclido y un material conductor, o semiconductor que libera gran cantidad de electrones que pueden ser analizados mediante un circuito electrónico según la energía que poseen permitiendo la lectura espectrométrica (Finestres, 2012, p. 48; Riola, 2009, p. 66).

En el presente proyecto se utilizarán tres tecnologías, dos detectores por ionización y uno por excitación. El contador Geiger Muller, que es un detector por ionización gaseoso en el cual se forma un medio de polarización por la interacción de las partículas ionizantes y el gas; los iones generados se aceleran y se dirigen a los electrodos con carga opuesta, en los contadores Geiger Muller se incrementa la distancia que deben recorrer las partículas para llegar a los electrodos y de esta manera la carga espacial es dominante frente a la diferencia de potencial exterior y se genera la señal eléctrica (Ferrer, 2011, p. 165; Moliner, 2010, p. 15).

El detector de germanio hiperpuro, que es un detector por ionización semiconductor, que opera con Germanio como medio ionizante; el mismo que es más eficiente que los detectores de ionización gaseosos, ya que el medio posee los átomos menos dispersos y permite la conducción de energía eficientemente. El detector de germanio hiperpuro posee el principio de polarización en una cámara de ionización, en la cual los electrodos se ven atraídos según su carga en el campo eléctrico generado por el medio ionizante, produciendo corrientes eléctricas que pueden ser cuantificadas (Ferrer, 2011, p. 165; Ramírez, 2010, p. 367; Veloza, 2005, p. 1).

El contador de centelleo líquido es un detector por excitación que utiliza la propiedad física de luminiscencia que posee el material radiactivo en contacto con sustancias centelladoras. La energía del decaimiento de la radiación es transformada en fotos de luz que mediante multiplicadores transforman la energía lumínica en electricidad (McConkey & Ramachers, 2012, p. 460; Mosqueda, 2009, p. 29; Riola, 2009, p. 89).

2. Capítulo II. Metodología

2.1 Toma de muestras en campo

Las muestras de agua de formación, lodos e incrustaciones fueron extraídas principalmente de los campos petroleros Auca, Sacha y Shushufindi en los cuales la empresa SERTECPET.S.A se encontraba operando.

Los pozos, de los que se obtuvo el agua de formación, fueron georeferenciados mediante un GPS. A las muestras que contenían un *Basic Sediment and Water* (BSW) superior a 90% se les añadió ácido nítrico hasta que presenten un pH 2 para evitar que los radionúclidos se adhieran a la botella. Mientras que, las muestras con un BSW inferior a 90% fueron llevadas al laboratorio y mediante filtración se procedió a la separación crudo-agua para poder analizarlas.



Las muestras de lodos de formación fueron obtenidas de las perforaciones petroleras. Los puntos fueron geo-referenciados.



Figura 4. Toma de muestras de lodos

Para las incrustaciones se procedió con una espátula a tomar muestras de los equipos que se encuentran fuera de uso, como: tuberías de la perforación de los taladros, válvulas, bombas, tanques de almacenamiento, separadores y cabezales antiguos; los puntos fueron determinados conforme lo establecido en la publicación No 40 de la Asociación Internacional de Energía Atómica “*Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the oil and Gas Industry.*”



Figura 5. Toma de muestra de incrustaciones

Todas las muestras fueron georreferenciadas e identificadas como se indica en el Anexo 2.

2.2. Preparación de muestras en laboratorio

Conforme al procedimiento interno del Laboratorio de Vigilancia Ambiental Radioactiva (VAR), MEER-SCAN-ARAD-001 (Espectrometría gamma) y las metodologías ISO 10703:2007 (Determinación de la concentración de la actividad de radionúclidos por espectrometría gamma de alta resolución) y 18589-3:2007 (Medición de radiación en el medio ambiente), se procedió a la preparación de las muestras.

Las muestras de agua de formación, con BWS menor a 90%, fueron filtradas hasta obtener como resultado únicamente, el agua de formación, se realizó las geometrías para su respectivo análisis en un litro de agua de formación en los Marinellis. Las muestras que fueron filtradas y que en cantidad no completaban el litro, fueron complementadas con agua destilada, se les codificó y se registró su ingreso en el Laboratorio de VAR.

En las muestras de lodo se eliminó la humedad, mediante secado al ambiente, aproximadamente por una semana. Se verificó que el diámetro de partícula sea menor a un centímetro y que su peso sea de 1 kilogramo, para cumplir con las geometrías.



Figura 6. Preparación muestras de lodo

Las incrustaciones fueron pesadas, identificadas y registradas en el libro de ingresos del Laboratorio de VAR.

2.3 Detector de Germanio Hiperpuro

2.3.1 Calibración

La calibración se realizó en base a la metodología interna del Laboratorio VAR, MEER-SCAN-ARAD-015 (Calibración en energía y eficiencia del espectrómetro gamma) y al libro “*Handbook of radioactivity analysis*” de Annunziata. M, 2003. Para iniciar con el funcionamiento del equipo es necesaria la calibración en energía y en eficiencia en el software Maestro, la calibración en energía establece la relación entre la energía del fotón de cada radionúclido y el número de canal donde aparece el centro del fotopico correspondiente a cada radionúclido. Para lo cual se miden las posiciones de los fotopicos de los que se conoce con exactitud su energía y existe relación altura del pico-fondo. De esta manera el software puede identificar cualitativamente el radionúclido gamma y esta información es usada para la determinación cuantitativa de la concentración de radionúclidos.

Para iniciar la calibración en energía se colocaron fuentes de Co^{60} , Cs^{137} y Am^{241} en el equipo y se colectaron los tres espectros, se oprimió la función *calíbrate –energy* para fijar sobre el centroide de los picos sus energías; en el centroide del pico izquierdo se colocó la energía correspondiente a 59.6 KeV y en el mayor pico derecho correspondiente a la fuente de Co^{60} se ingresó la energía 1332.5 KeV. Para comprobar la calibración al colocar el cursor en Cs^{137} la energía debía corresponder a $661.7 \text{ KeV} \pm 3 \text{ KeV}$.

Una vez calibrado en energía se procede a la calibración en eficiencia que consiste en la relación entre el fotopico y su energía y se lo denomina “curva”; para esta calibración se utilizan patrones correspondientes a las geometrías de medición empleadas y los intervalos energéticos de interés, preparados por una fuente estándar de calibración. La “curva” se encuentra directamente relacionada con la posición de la muestra y el detector; de tal manera que la

densidad de los estándares debe ser similar a las muestras que se van a analizar.

Para la calibración en eficiencia se procedió a colocar una geometría con contenido de radionúclidos de origen natural para contener el rango de energías característico de los NORM. Se obtuvo el espectro correspondiente y se lo trasladó al computador que posee el software *Gammavision*.

Es importante verificar que la calibración en energía no haya sido modificada. En caso de que el número de canales sea diferente entre el espectro y el software *Gammavision* se observará una distorsión que debe ser corregida con los mismos pasos de la calibración en energía; seleccionando picos conocidos para asignarles el valor de energía. En caso de que no existan picos de radionúclidos de referencia se deberá obtener un factor de calibración.

El factor de calibración (FC), se define de la siguiente manera: Si el espectro del software Maestro esta calibrado en el rango de 0 a 2 000 KeV con 1 024 canales y el software *Gammavision* tiene 8 192 canales, la relación a ingresar en la ventana de calibración de energía sería:

$$FC = \frac{8\ 192}{1\ 024} = 8$$

(Ecuación 1)

Es decir, que si en un punto determinado del espectro tenemos 1 000 KeV al evaluarlo en el software *Gammavision*, corresponderá realmente a un valor de 125 KeV ya que hay más canales, este valor deberá ser introducido en la ventana y se deben seleccionar al menos dos puntos, uno en la región baja, preferentemente cerca de 200 KeV y otro en la región alta a aproximadamente 1500 KeV.

Una vez corregidas las distorsiones en energía se utilizó la función *calibrate – efficiency*.

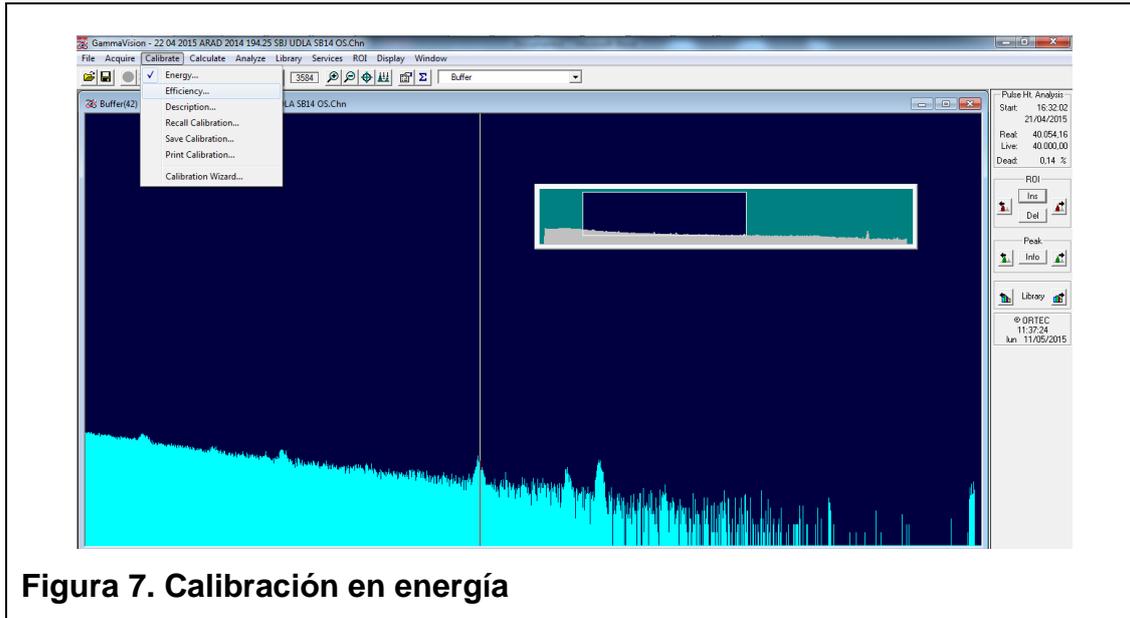


Figura 7. Calibración en energía

Desplegada la función de calibración por eficiencia, en el *software Gammavision* se identificaron los puntos con mayor número de cuentas y con la tabla de energías se identificó qué radionúclido emite esa línea de energía. Una vez seleccionada la línea se utilizaron los comandos control flecha para situarse en el centroide del pico, que permite continuar con el proceso en la ventana *efficiency calibration*.

Figura 8. Calibración en eficiencia

En la ventana se llenaron los datos del radionúclido al que correspondían la líneas más representativas y se seleccionó la función *from library* para que automáticamente se llenen los datos por la configuración que posee el programa y de esta manera se generan las curvas de calibración de eficiencia.

2.3.2 Funcionamiento



Figura 9. Funcionamiento del detector de Germanio Hiperpuro

El detector de Germanio Hiperpuro (HPGe) debe estar enfriado con nitrógeno líquido durante 24 horas antes de su funcionamiento, ya que la eficiencia del detector incrementa a bajas temperaturas; una vez que el equipo se encontraba frío, se colocó la muestra con la mayor precisión sobre el detector y se cubrió con el blindaje de plomo para evitar el ingreso de la radiación de fondo. El detector HPGe también se encuentra alimentado con un alto voltaje.

Una vez encendido el equipo; los fotones gamma emitidos por la fuente inciden sobre el detector y generan pulsos eléctricos producidos por la ionización del medio, los mismos que son amplificados, analizados por el analizador multicanal y registrados en el software.

La altura del pulso eléctrico generado depende de la energía del fotón gamma incidente. Estos pulsos son identificados, clasificados y cuantificados por el software Maestro, obteniendo como resultado el espectro en forma de histograma del número de pulsos o desintegraciones detectadas durante el tiempo de medición, es decir la actividad específica de los radionúclidos.

La identificación de radionúclidos se realiza con la conexión que posee el software a las bibliotecas de radionúclidos de programas de cómputo o publicaciones, conteniendo energías de los fotones gamma correspondientes a cada transición, y sus respectivas probabilidades de emisión por desintegración.

2.3.3 Gammavision

Una vez que los espectros se obtuvieron en el software Maestro, se utilizó el programa de análisis denominado *Gammavision* en el cual se despliega el espectro que se quiere analizar con la función *file-recall* en formato .chn. Adquiriendo el espectro que se indica en la siguiente figura.

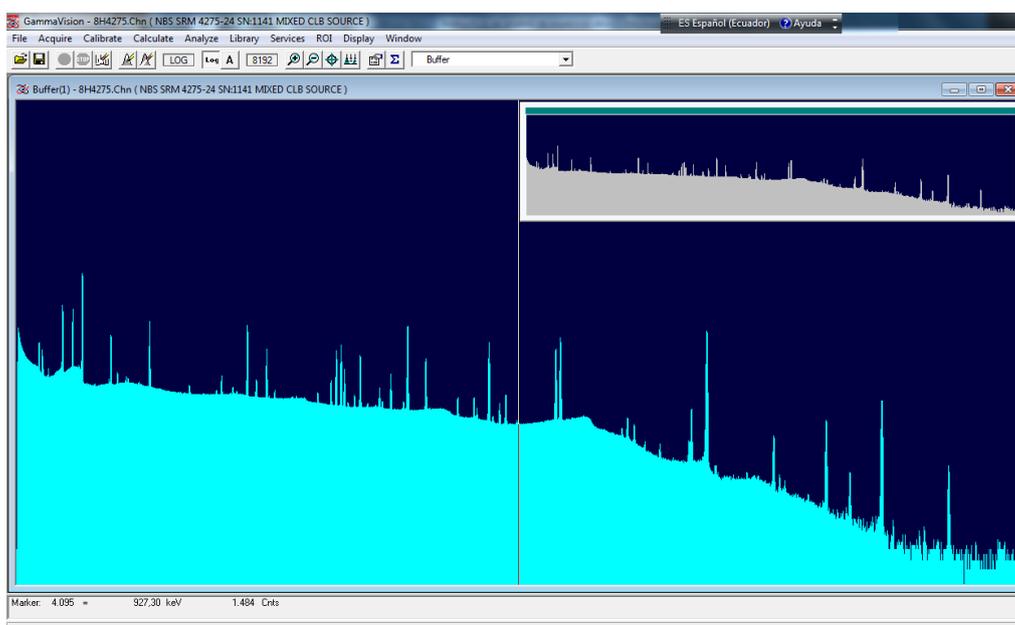


Figura 10. Espectro en el programa Gammavision

Con el archivo abierto se utiliza la función *recall calibrate*, se escoge la calibración: Marin_1215773.Clb y las unidades según la naturaleza de la muestra; un litro para la geometría del agua de formación y un kilo para las muestras de lodo.

Se procedió a realizar la calibración en energía y en eficiencia que ya fue detallado en el punto de calibración del equipo de Germanio Hiperpuro. Para la calibración en energía se tomaron como picos de referencia a las líneas de K-40 y aniquilación, configurando a 1461 KeV y 511 KeV respectivamente.

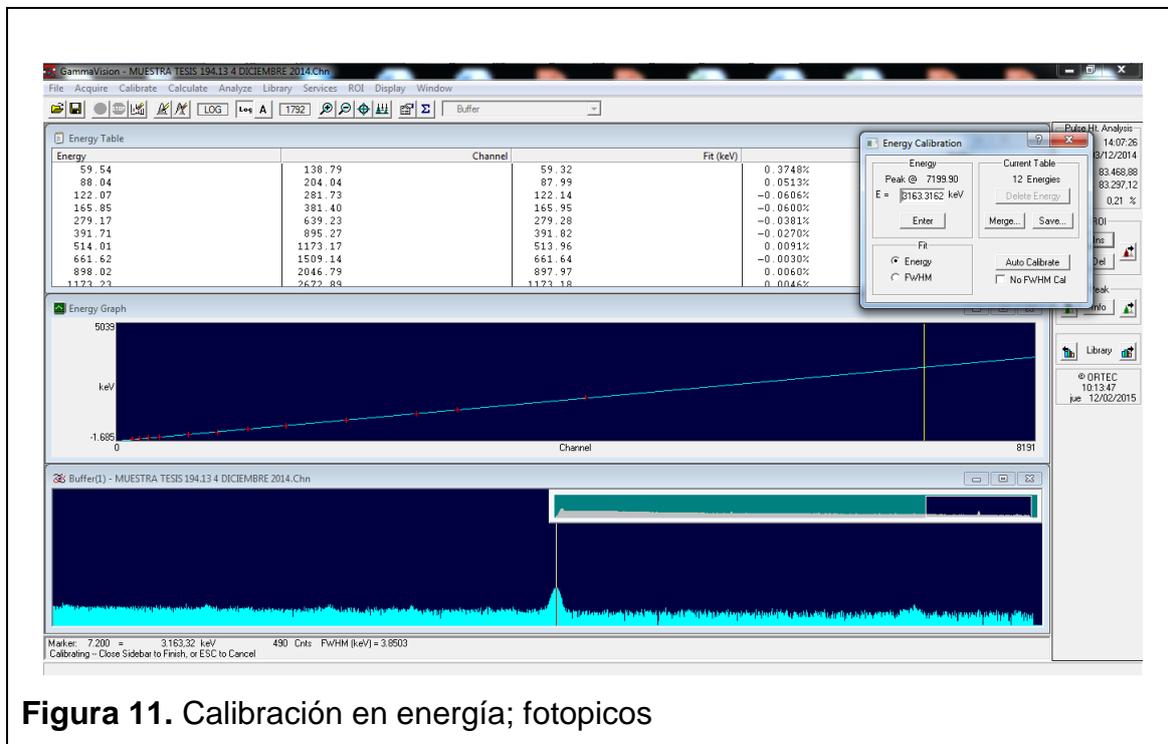


Figura 11. Calibración en energía; fotopicos

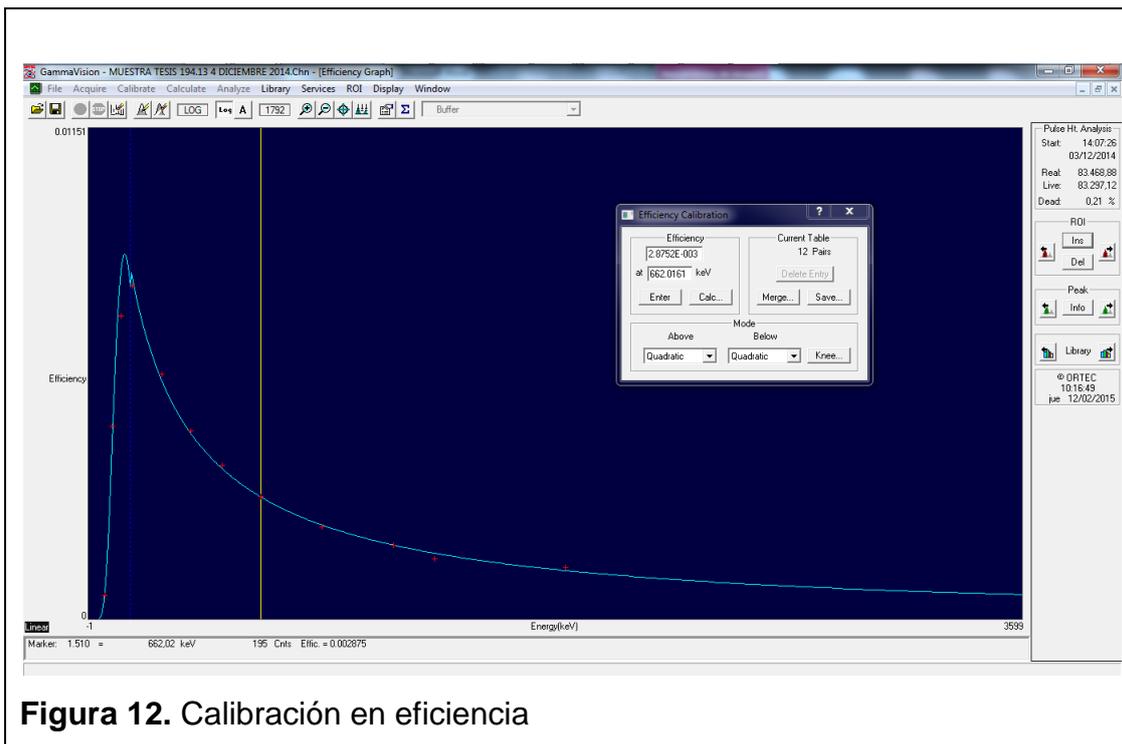


Figura 12. Calibración en eficiencia

Una vez calibrado el equipo se procedió a escoger las librerías utilizando el comando *library* y se seleccionó la biblioteca referente a NORM; ya que son el objeto de estudio.

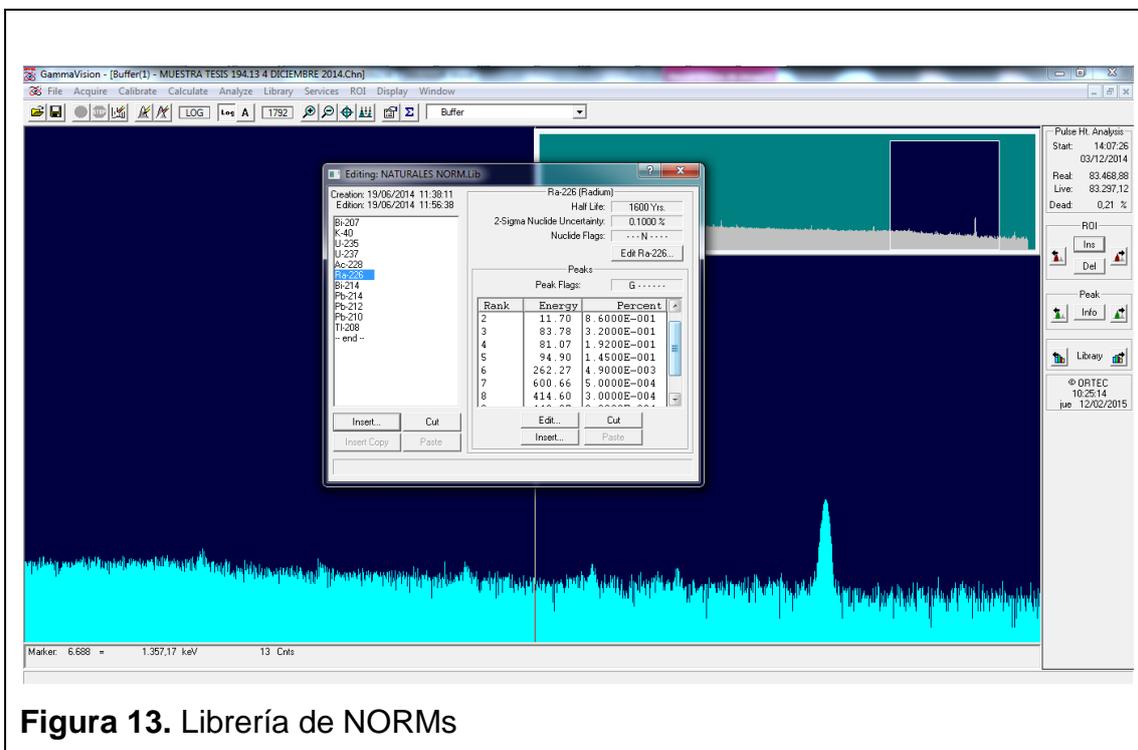


Figura 13. Librería de NORMs

Con la función *analyze*, se estableció el rango de lectura de energías entre 120 y 8192 KeV; debido a la configuración y energías registradas en el software Gammavision y ENV 32 ya que las muestras son de origen natural. Se procedió a oprimir el comando *Entire spectrum in memory*, y el equipo utilizó los algoritmos, las calibraciones y datos de la muestra para generar el reporte de análisis con la caracterización de las muestras.

2.4 Centelleo Líquido

2.4.1 Preparación de muestras para centelleo líquido

Conforme a la metodología interna del Laboratorio de VAR para el análisis por centelleo líquido SCAN-ARAD-013, y las metodologías ISO 13163:2013 y 13165-1:2013 para caracterización de agua mediante conteo de centelleo líquido; se procedió a la preparación de las muestras de agua de formación, para lo cual se tomaron 4 ml de muestra y se la colocó en un vial de boro silicato de 20 ml con la respectiva identificación.

Al vial que contenía los 4 ml de muestra se le añadió 12 gramos de coctel centellador. Una vez preparada la solución; se agitó al vial por 10 ocasiones; obteniendo una mezcla espumosa; se esperó aproximadamente 2 minutos, desapareció la espuma y la muestra se tornó de un color blanco azulado.



Figura 14. Viales

El coctel centellador que se utilizó fue *Ultima Gold* de la marca *Pekin Elmer* el cual se encuentra formado por un solvente a base de naftaleno que posee la capacidad de acumular la radiactividad y conducir la energía al flúor elemento que en presencia de la radiactividad emite luz; el solvente solubiliza al flúor, al agua de formación y produce la solución que va a ser analizada.

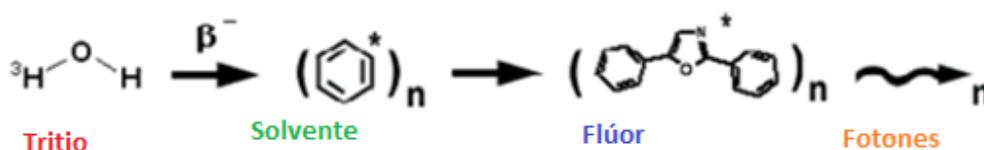


Figura 15. Proceso de centelleo líquido.

Adaptado de: Mingote, 2007, p. 6.

2.4.2 Funcionamiento

La evaluación por centelleo líquido inicia al mezclar la muestra de agua de formación con el coctel centellador, el mismo que tiene la propiedad de emitir luz al estar en contacto con material radiactivo; la solución pasa a un tubo fotomultiplicador que es aplanado en uno de sus extremos y recubierto por material fotocátodo que en presencia de la luz que emite el centellador produce electrones que son almacenados al otro lado del tubo fotomultiplicador que actúa como amplificador y produce un pulso eléctrico que es proporcional al número de electrones que son producidos por el fotocátodo; y a la vez es similar a la luz emitida por el centellador, que es correspondiente a la energía que contiene el radionúclido; dicha energía es reflejada en el software como un espectro que depende de la actividad del radionúclido emisor.

El equipo de conteo por centelleo líquido utilizado fue TRICARB 1600TR, en base a la metodología interna del Laboratorio de VAR, MEER-SCAN-ARAD-012 se cuantificaron las muestras de agua de formación. Antes de iniciar la lectura de las muestras se requiere la normalización de los tubos fotomultiplicadores, para ello, se utilizó un estándar de C^{14} y se colocó en una

canastilla con su protocolo. En la pantalla de inicio se verificó que se indique “*status page*” y se presionó la tecla F2. Luego del proceso se comprobó que en la pantalla del equipo se encuentre la palabra “*normalized*” para continuar con la lectura de las muestras.

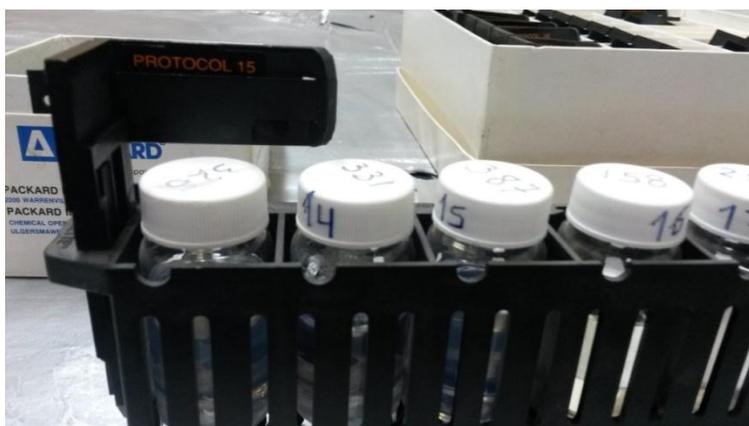


Figura 16. Canastilla y protocolo

Se colocó las muestras en una canastilla, asignándoles el protocolo 15, correspondiente a beta total, que mide la presencia de H^3 , C^{14} y todo el rango de energías para permitir la identificación de otros radionúclidos; se programó para un tiempo de lectura de 15 minutos por vial y de una repetición. Se utilizó la tecla F1 para retornar a la *status page* y se presionó la tecla F2 para iniciar el programa de lectura.

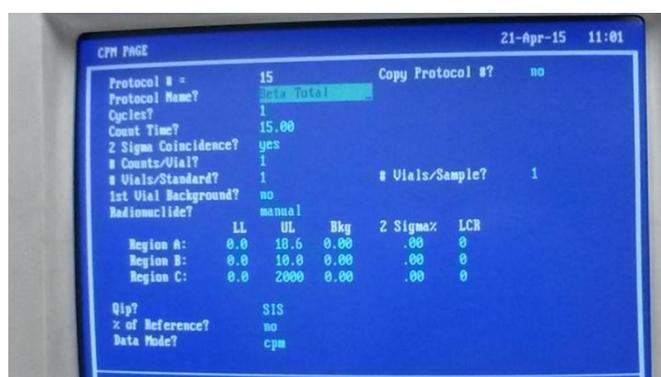


Figura 17. Protocolo 15, beta total

En el equipo TRICARB 1600 que en su interior posee una cámara oscura, la muestra es observada por dos tubos fotomultiplicadores (TFM) que son posicionados en sentido opuesto; uno de los tubos TFM, permite la detección de fotones y la adición de los pulsos coincidentes, que es una condición necesaria para la detección de radionúclidos de baja energía; y para distinguir el fondo de las desintegraciones que provienen de la muestra. Cuando las desintegraciones ocurren dentro del vial, los fotones son emitidos en todas las direcciones; el fotón producido es detectado por los TFM en un tiempo de 2 a 10 ns. Cuando las señales salen simultáneamente de los TFM se produce el circuito de coincidencia, que es la condición necesaria para que sea aceptado como un evento nuclear. Si por otro lado un evento de fondo ocurre en uno de los tubos o en el circuito electrónico, él producirá apenas un evento que será solamente detectado por uno de los dos TFM, permitiendo distinguir entre conteo de fondo y el conteo real de la muestra, de este modo un evento unitario es un evento de fondo y no se considera en el conteo.

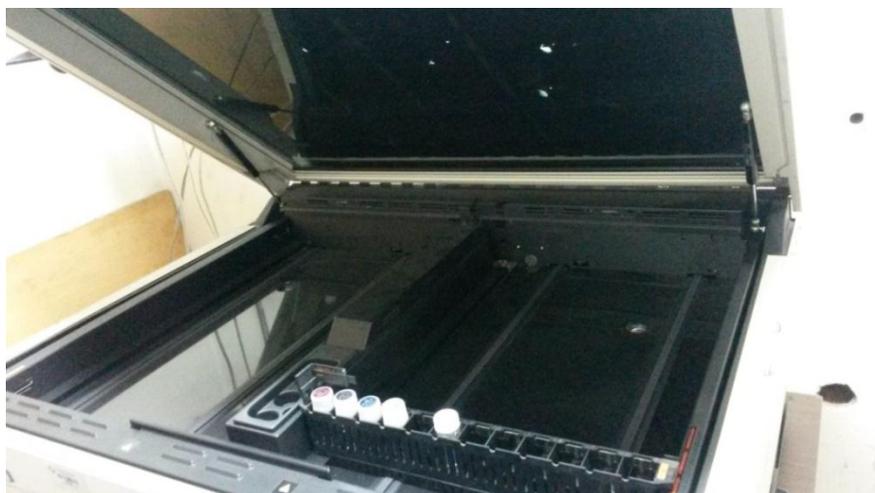


Figura 18. Equipo de centelleo líquido, TRICARB 1600

Una vez realizado el circuito electrónico, los fotones pasan al circuito de adición que tiene dos objetivos. Primero recombinar las dos señales coincidentes en una señal individual con la intensidad adicionada optimizando la razón señal-fondo del instrumento. Segundo, compensar las variaciones de intensidad

debido a la posición del decaimiento en el frasco, que ocurre cuando la muestra presenta una coloración. Si solamente uno de los tubos fuese utilizado en el conteo de la muestra colorida, la altura del pulso sería dependiente de la posición en que el fotón fuese producido dentro del frasco. Los fotones emitidos próximos a las extremidades de los frascos son más luminosos para el TFM. Así, con dos TFMs y un circuito de adición, señal (TFM1 + señal TFM2) la amplitud del pulso no es afectada por la posición del decaimiento nuclear.

Después de la adición la señal es ampliada y enviada para un conversor analógico-digital, que convierte el pulso de una altura determinada en un número que representa esta altura o intensidad. Los pulsos digitales son clasificados en base a su magnitud por un analizador de multicanal (MCA). Hay dos tipos de MCA lineales y logarítmicos. El MCA lineal presenta los datos con las alturas de pulsos calibradas para representar la energía de decaimiento en KeV en una escala lineal, para un MCA lineal de 4000 canales cada canal puede representar aproximadamente 0,5KeV de energía. Este multicanal permite generar un espectro de energía en KeV sin pérdida de información de los pulsos que están siendo detectados. El MCA logarítmico presenta los canales en escala logarítmica, sin relación con el intervalo de energía de decaimiento del radionúclido, lo que dificulta determinar al radionúclido que está siendo cuantificado.

Para cuantificar los eventos nucleares como actividad en término de desintegraciones por minuto (dpm) el contador registra el número de fotones en un intervalo de tiempo preseleccionado para calcular la tasa de conteo (cpm) de la muestra. La tasa de conteo de una muestra es dependiente de la eficiencia, es decir, de cuan eficientes los eventos de decaimiento nucleares son convertidos en fotones que son detectados y cuantificados por el equipo. La eficiencia de conteo es definida como:

$$\frac{CPM \times 100}{DPM} = \% \text{ Eficiencia}$$

(Ecuación 2)

CPM=Cuentas por minuto

DPM= Desintegraciones por minuto

El equipo no tiene registro digital, por lo que las impresiones constituyen el registro de análisis.

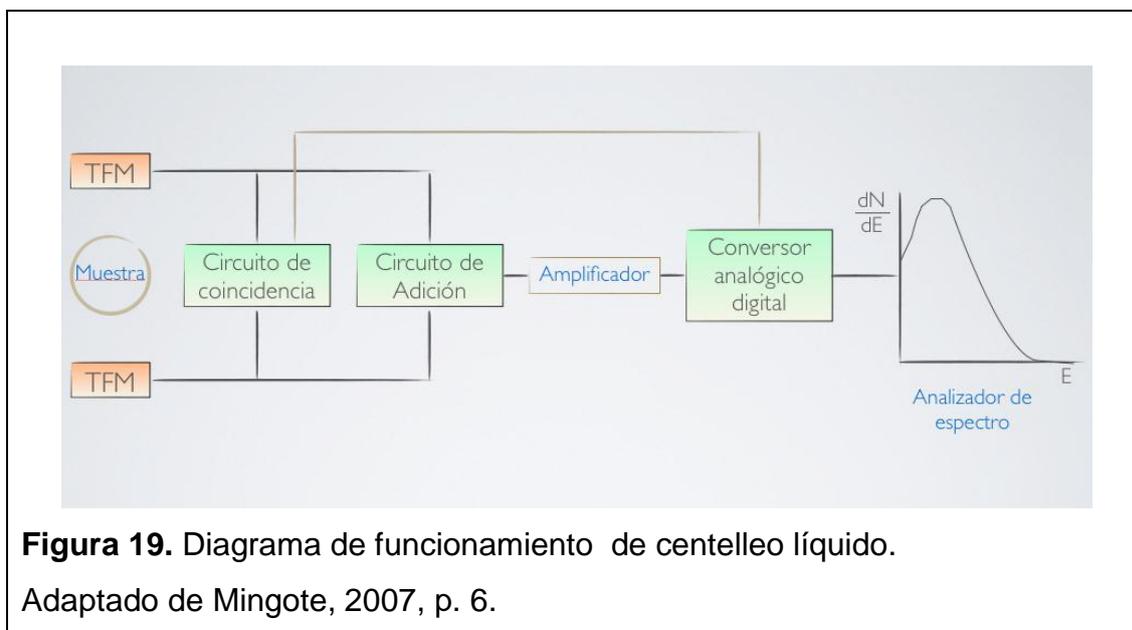


Figura 19. Diagrama de funcionamiento de centelleo líquido.

Adaptado de Mingote, 2007, p. 6.

2.4.3 Calibración centelleo líquido

La cuantificación por centelleo líquido se puede ver afectada por factores químicos o de color; denominados “*quench*” los factores químicos absorben la energía emitida por la sustancia radiactiva antes de que llegue al agente centellador y reducen la eficiencia de la cuantificación, mientras que los de color son una atenuación de los fotones de luz debido a que son absorbidos por la solución antes de llegar al fotomultiplicador. Para evitar que existan *quench* y poder determinar la actividad absoluta es necesaria la calibración adecuada del equipo.

Se utilizaron muestras standard de H^3 y C^{14} por sus elevadas vidas medias y se colocó una cantidad conocida de cada uno de ellos variando la concentración de *quench*; mientras mayor es la cantidad de *quench* en la muestra, menor es la eficiencia de la lectura.

La curva de *quench* consiste en la lectura de varios viales que contienen una actividad absoluta constante (DPM) y la cantidad de *quench* aumenta por cada vial. La curva utiliza la eficiencia y el QIP (parámetros indicadores de *quench*) para corregir las cuentas por minuto (CPM) que lee la máquina y a la actividad absoluta (DPM) que es la energía que realmente está emitiendo el radionúclido.

El método de calibración utilizado fue el método de patrón externo (t-SIE), que consiste en la adición de una fuente externa de radiación gamma de Ba¹³³ la cual produce la ionización de la solución que se encuentra dentro del vial “efecto compton” y son los electrones liberados por la radiación gamma los que producen el centelleo, y se genera un nuevo espectro denominado t-SIE que va desde 0 hasta 1000. Mientras mayor sea la cantidad de *quench* de la muestra el valor del t-SIE va disminuyendo.

2.5 Determinación de la tasa de dosis

La determinación de la tasa de dosis fue basada en el documento de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), No 34 “*Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the oil and Gas Industry*”. El equipo utilizado fue Radiogem 2000 de la marca Canberra, con la Sonda SABG-15 que actúa con el principio de los contadores Geiger Muller y posee la capacidad de detectar partículas (alfa, beta y gamma) y un detector Geiger Muller convencional; para medir la exposición externa debido a la concentración de NORMs en los diferentes puntos de monitoreo en nanosievert por hora (nSv/h).

Los puntos de monitoreo se determinaron según el documento No 40 de la IAEA; de tal manera que se realizó la medición de tasa de dosis en: tuberías, cabezales, válvulas, bombas, separadores, quemador de gas y tanque de almacenamiento de petróleo.

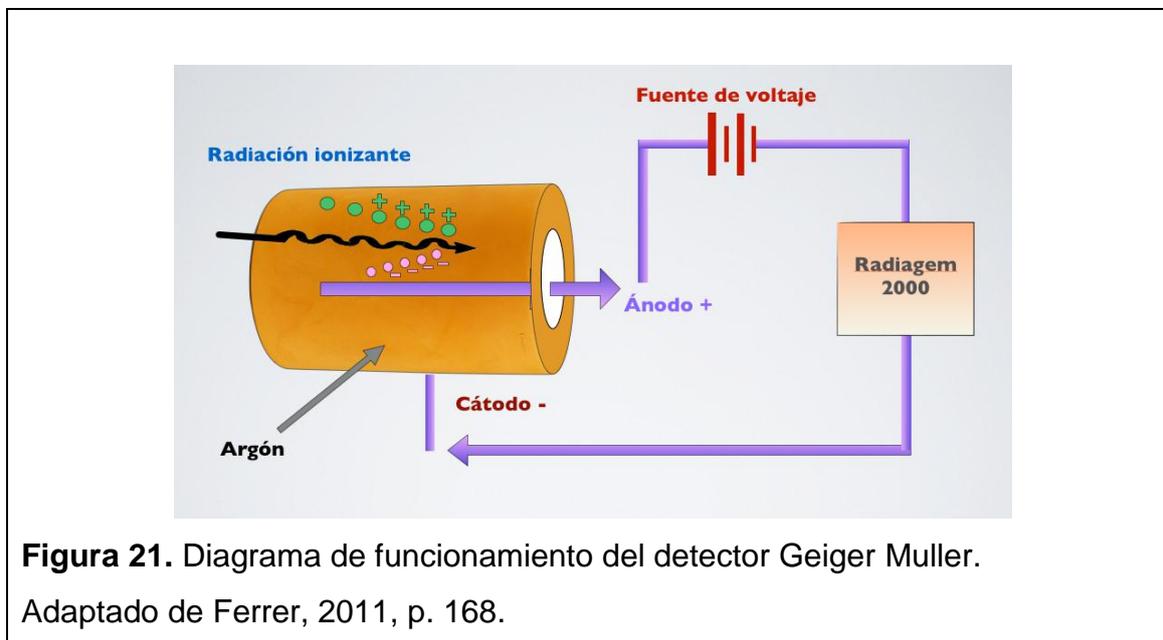


Figura 20. Medición de tasa de dosis

Antes de iniciar con la utilización del equipo *radiagem 2000* se comprobó que el equipo se encuentre calibrado; como se puede observar en el Anexo 3.

El equipo *radiagem 2000* es un medidor de tasa de dosis que actúa junto con un contador *Geiger-Muller* que mide la dosis equivalente inmediatamente después de ser encendido. El contador *Geiger-Muller* caracterizado por su forma tubular, posee en su interior un alambre fino, conocido como ánodo que es un electrodo interno; el mismo que se encuentra rodeado por cátodos que corresponde a la envoltura del tubo. Entre el ánodo y el cátodo se encuentra un gas noble, en este caso argón, generando de esta manera un campo magnético por la diferencia de potencial en el interior del tubo. El momento en que el material radiactivo ingresa al contador Geiger Muller; se produce la ionización de los átomos de argón y los iones son atraídos según su carga al (ánodo o al cátodo) formando pares de electrones; los mismos que son acelerados y en su recorrido en busca de su par, producen la ionización de otros átomos formando una cascada electrónica, su impulso depende de la

actividad que posee el radionúclido de origen, estos impulsos son amplificados y registrados en el *Radiagem 2000*.



El detector *Radiagem 2000* posee dos formas de medición la “instantánea” que es una barra que se basa en una escala semi-logarítmica la misma que lee las variaciones en la tasa de dosis equivalente y se demora de $\frac{1}{4}$ a 10 segundos en detectarla. Y la “escala numérica” donde se indica el valor de la tasa de dosis y su valor depende de la detección del pulso emitido por los electrones y varía de 1 a 10 segundos. El equipo se encuentra configurado para detectar de $0,01\mu\text{Sv/h}$ asta $99,9\mu\text{Sv/h}$.

Una vez prendido el equipo con la tecla (On) oprimida por 2 segundos; se procedió a tomar 3 medidas del fondo de la radiación del ambiente y se obtuvo el promedio antes de acercarse al equipo que iba a ser monitoreado; una vez determinada la tasa de dosis de manera superficial de los puntos de monitoreo; se tomó la medida a un metro de distancia; con los resultados obtenidos se realizó el mapa de tasa de dosis, en los campos Auca, Sacha y Shushufindi, con sistemas de la información geográfica.

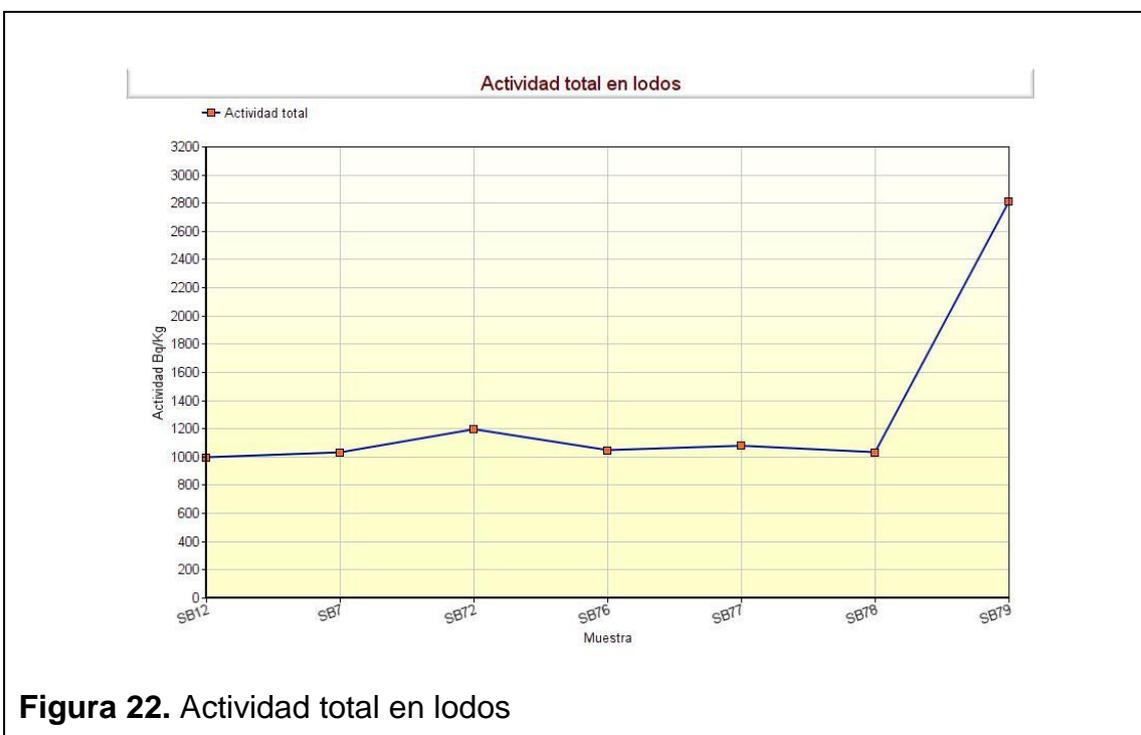
3. Capítulo III. Análisis de resultados y discusión

Las tablas y espectros de los resultados obtenidos se pueden observar en el anexo 4. Los nombres de los pozos fueron reemplazados por nombres genéricos, debido a un acuerdo de confidencialidad con la empresa SERTECPET S.A.

3.1 Resultados espectrometría gamma Germanio Hiperpuro

3.1.1 Radioactividad en lodos

La actividad encontrada en lodos producto de la fase de perforación petrolera varió entre 995 y 2806 Bequerelios por Kilogramo (Bq/Kg), correspondientes a las muestras SB12 y SB79, como se indica en la siguiente figura. La radiactividad depende de la cantidad de producción del pozo, la zona donde se ubica y la antigüedad del mismo, según la APPEA (2002, p.12).



En promedio la cantidad de K^{40} fue de 883 Bq/Kg y se encuentra dentro de los niveles normales establecidos por la IAEA (2010, p. 103) que señala que para suelos arcillosos la actividad del radionúclido oscila entre 600 - 1300 Bq/Kg.

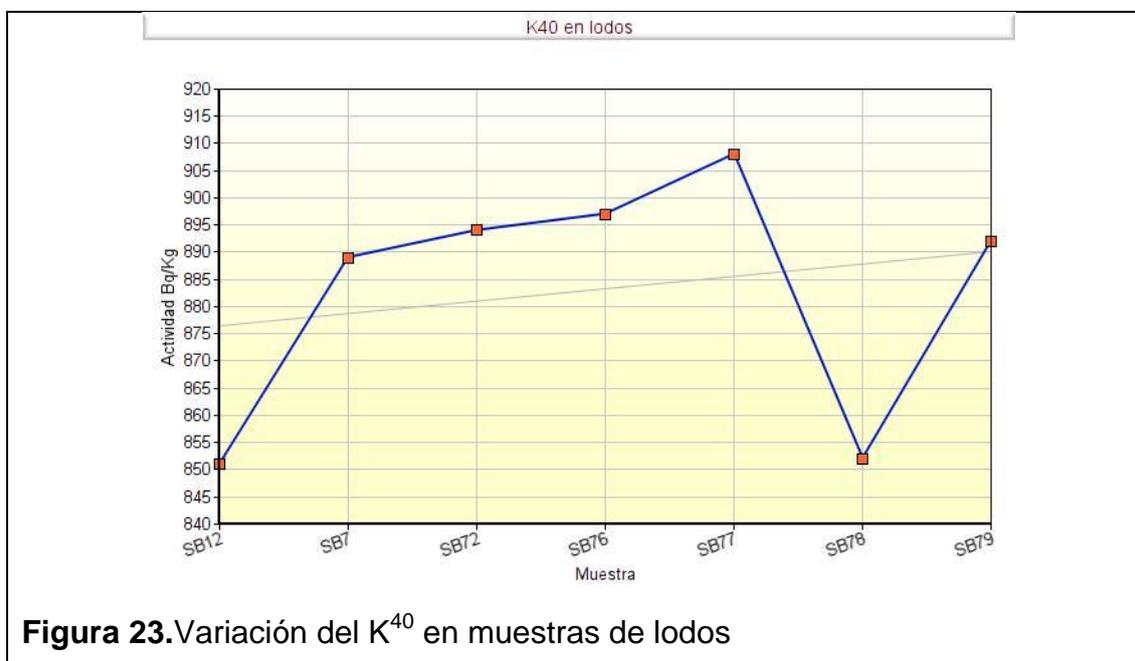


Figura 23. Variación del K^{40} en muestras de lodos

Los radionúclidos pertenecen a la cadena de desintegración del U y Th, encontrando Ac^{228} , Bi^{214} , Pb^{214} , Pb^{212} , Bi^{207} , Tl^{208} que son producto del decaimiento del Ra^{226} , Ra^{228} , Th^{228} y Pb^{210} que como indica la Comisión Europea (2003, p. 6) son los principales elementos radiactivos de los lodos.

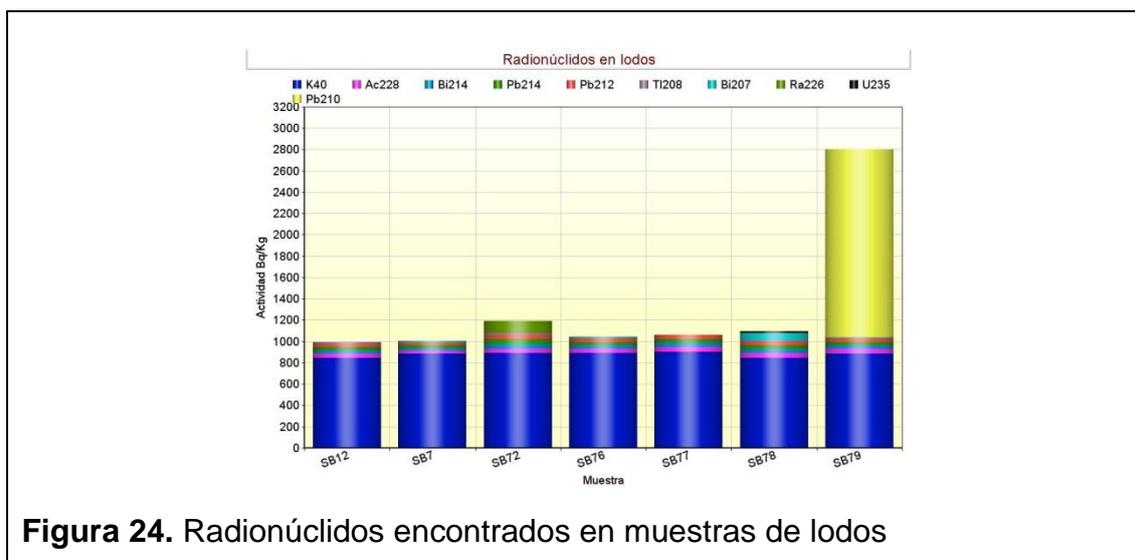


Figura 24. Radionúclidos encontrados en muestras de lodos

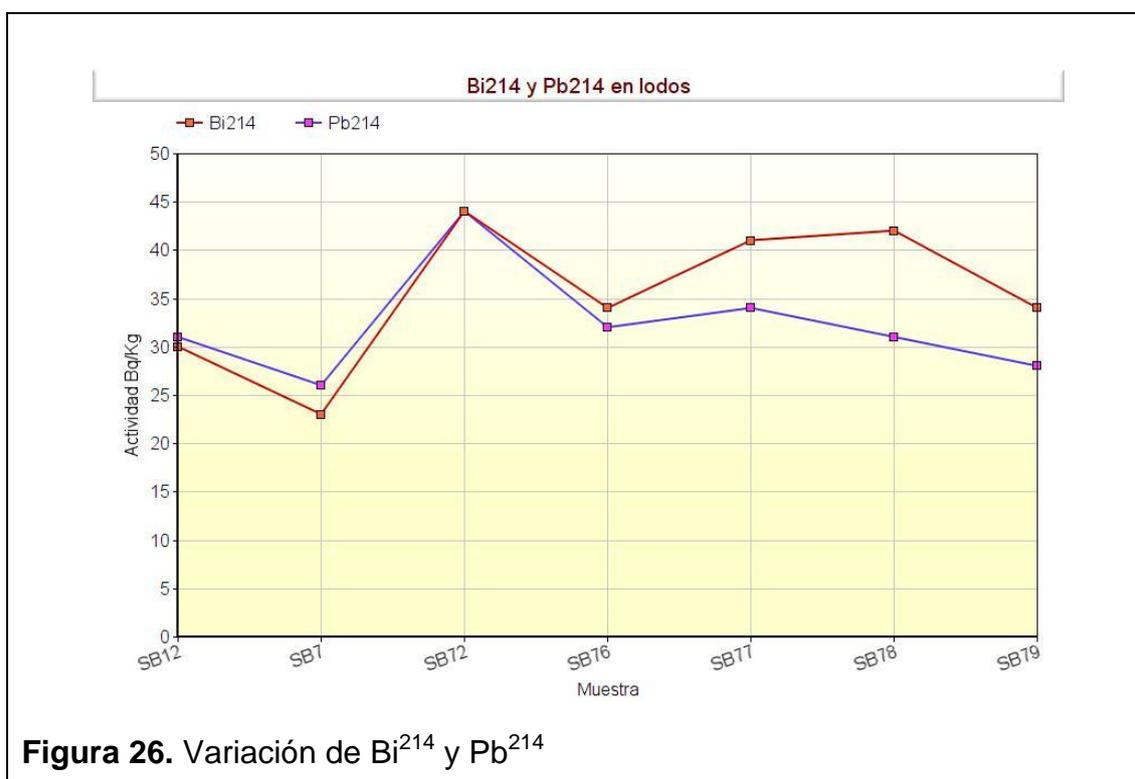
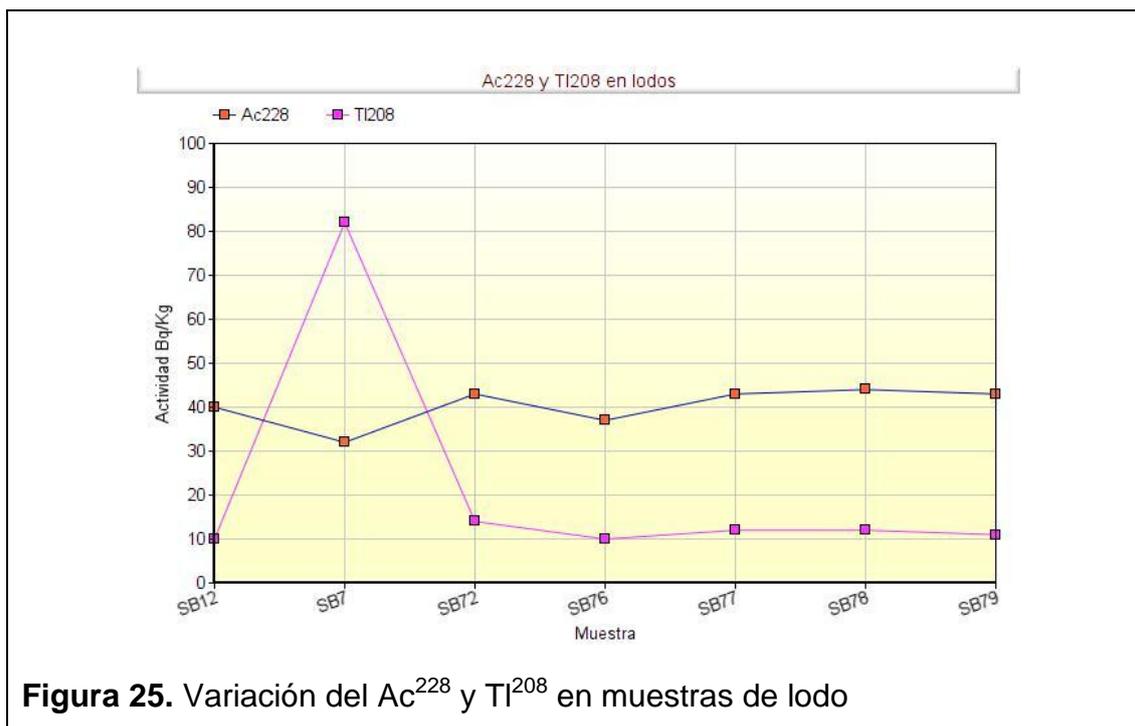




Figura 27. Concentración de Pb^{212} en lodos

La muestra SB72, posee la presencia de Ra^{226} que es un elemento móvil y se puede encontrar adherido a la arena, arcilla y a metales pesados; por lo que es frecuente dentro de los lodos de perforación, tal como lo señala la IAEA (2010, p.110).

Si bien el U^{235} es un elemento que para la IAEA (2010, p. 107) se mantiene inmóvil dentro del reservorio, en la muestra SB79, tabla 7, se encontró la presencia mínima del radionúclido, esto se debe a que probablemente el taladro y el equipo de excavación intervinieron en el reservorio, llevando parte de este mineral a la superficie.

El único elemento que se encuentra en cantidades superiores al límite permisible que conforme indica el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (2007, p.11) debe ser menor a 1000 Bq/Kg, es el Pb^{210} que se encuentra con 1759 Bq/Kg.

3.1.2 Radiactividad en agua de formación

En las muestras de agua de formación se pudo identificar la presencia de la cadena de desintegración del Uranio y Torio, siendo los radionúclidos de mayor influencia K^{40} , Ac^{228} , Bi^{214} , Pb^{214} , Pb^{212} , Tl^{208} , Pb^{210} y Ra^{226} producto del decaimiento del U^{238} y del Th^{232} los mismos que no son solubles en el agua y por tal motivo permanecen estáticos en las formaciones geológicas. Según la IAEA (2010, p. 106) el agua de formación posee cationes de Ca, Sr, Ba y Ra que fueron diluidos de la roca madre el momento de la extracción (petróleo-agua-gas), y por tal motivo se encuentra Ra^{226} y su cadena de desintegración como lo indican los siguientes esquemas.

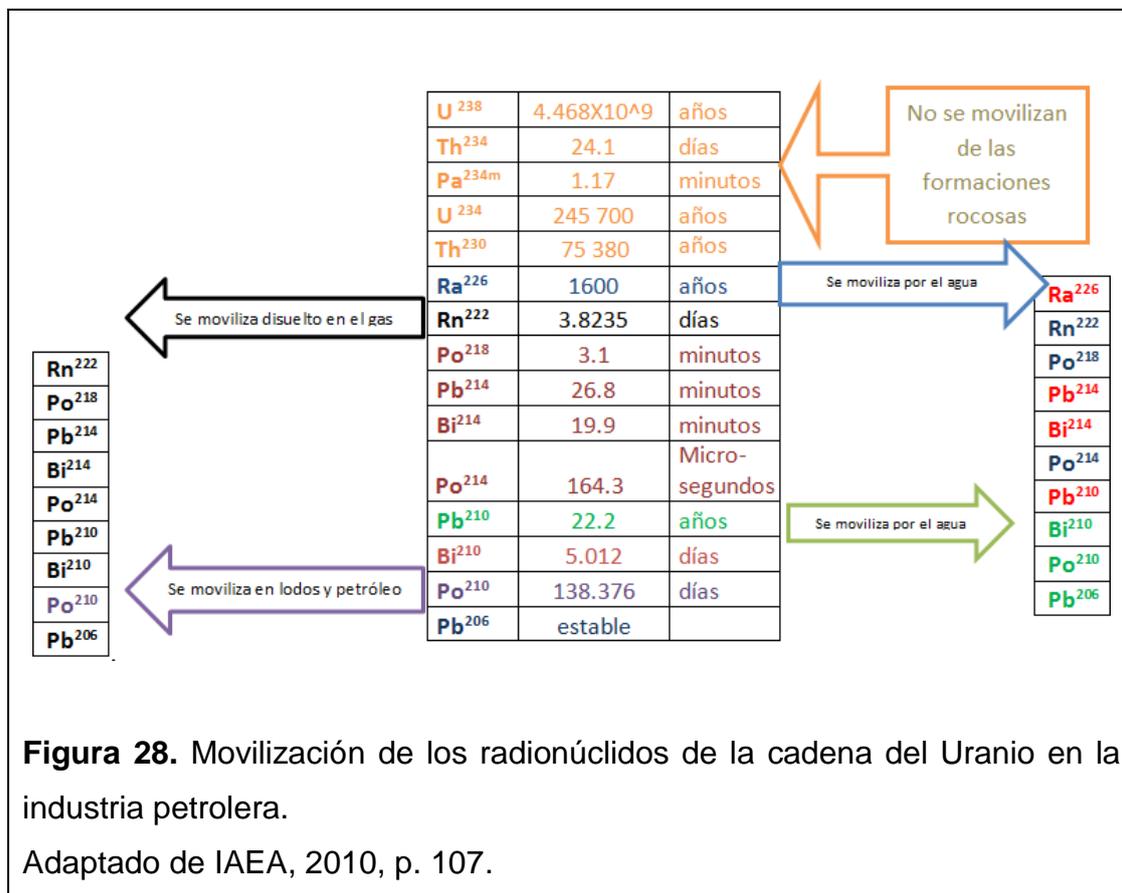
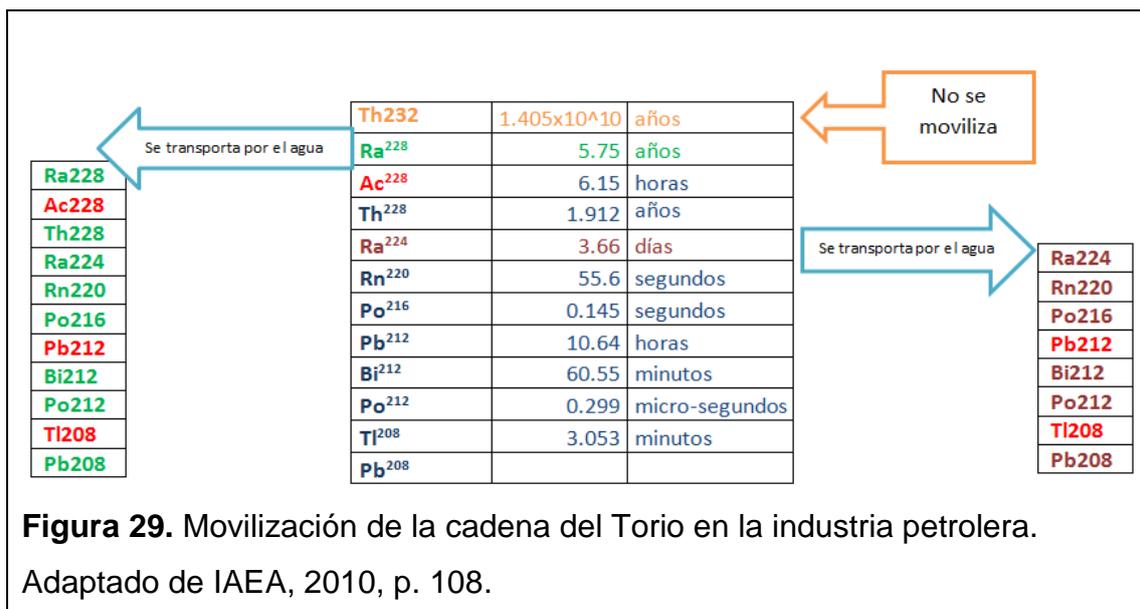


Figura 28. Movilización de los radionúclidos de la cadena del Uranio en la industria petrolera.

Adaptado de IAEA, 2010, p. 107.



El agua de formación transporta al Ra^{226} que posee una vida media de 1600 años encontrándose en las muestras SB6, SB18 y SB22; las tres poseen diferentes orígenes, SB 18 es producto de un separador trifásico de Shushufindi, SB6 pertenece a la estación central del Sacha donde se almacena el agua de formación de varios pozos antes de ir al campo S3 reinjector, mientras SB22 fue tomada del pozo A1 de reinyección. Por lo cual podemos determinar que la presencia del radionúclido se encuentra en diferentes etapas del proceso que posee el agua de formación en la industria petrolera.

Conforme a la APPEA (2002, p. 13) el Ra^{226} que se encuentra en el agua de formación depende principalmente de la cantidad de uranio y torio adherido a las formaciones geológicas. El Radio de las muestras se encuentra en pequeñas cantidades, siendo la muestra SB 6 la que mayor presencia del radionúclido posee con 769 Bq/L, seguida por SB 22 con 390 Bq/L y por último SB18 con tan solo 29 Bq/L siendo así las formaciones geológicas de Sacha poseen mayor cantidad de uranio y torio en comparación con los campos Auca y Shushufindi. La cantidad de Ra^{226} evaluada se encuentra dentro del rango establecido por la IAEA (2010, p. 111) donde se menciona que la cantidad de Ra^{226} en el agua de formación varía entre 0.002 y 1200 Kg/L.

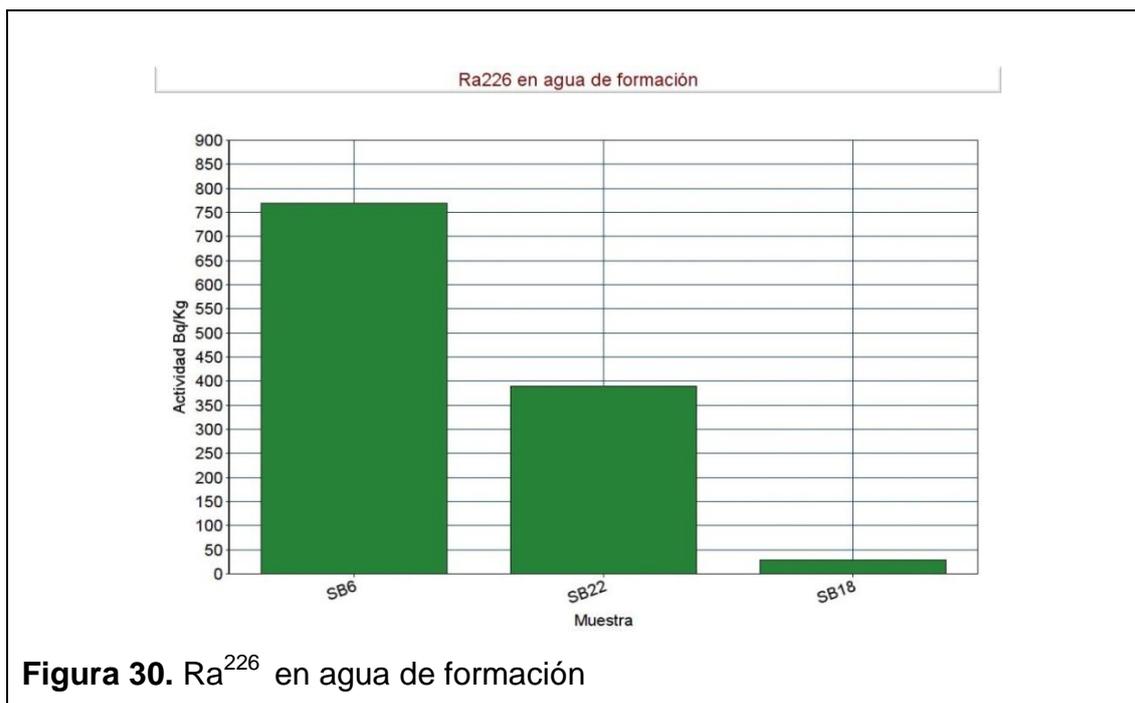


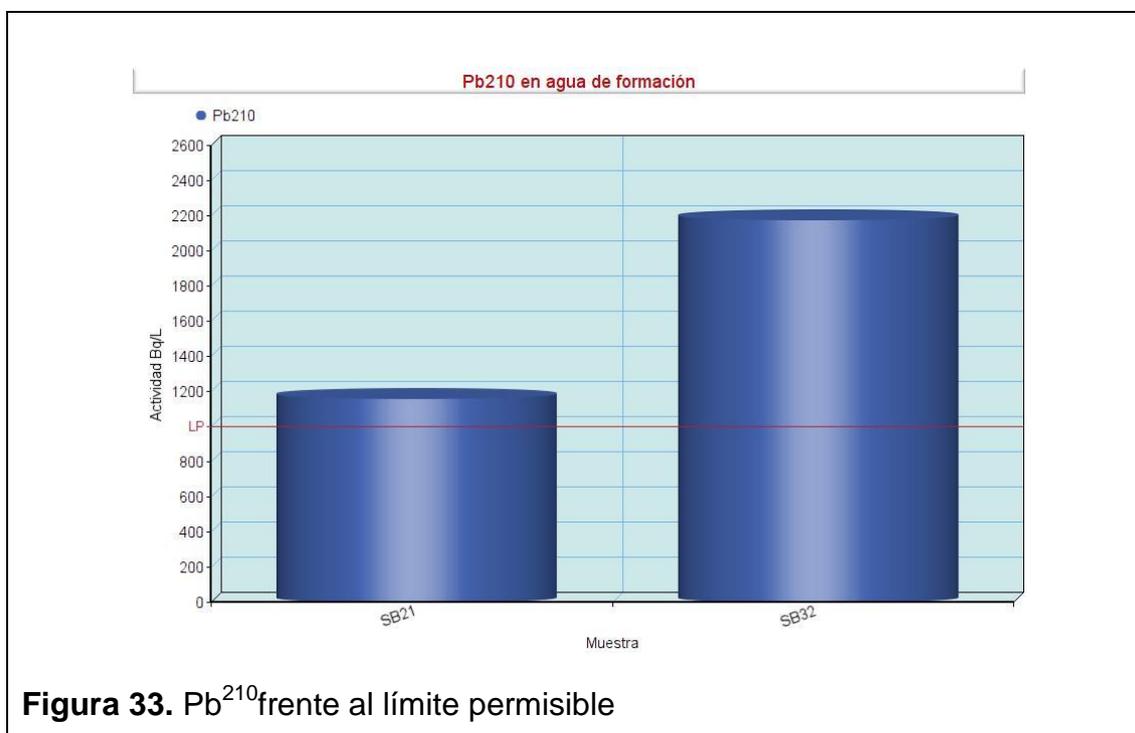
Figura 30. Ra²²⁶ en agua de formación



Figura 31. Actividad total en muestras de agua de formación

La actividad evaluada posee una mínima de 300 Bq/L y una máxima de 2991 Bq/L; las muestras con mayor radiactividad pertenecen a SB21 y SB32, las cuales se caracterizan por poseer toda la cadena de NORMs y estar

conformadas en más del 50% por Pb^{210} ; que en SB21 y SB32 supera el límite permisible para los radionúclidos que según lo establecido por el OIEA (2007, p. 11) debe ser menor a 1000 Bq/L.



Conforme a lo señalado por la APPEA (2002, p. 7) el Pb^{210} se caracteriza por ser el elemento producto del decaimiento del Ra^{226} que posee la mayor vida media con 22.2 años, el mismo que se deposita en las facilidades petroleras y es el principal responsable de la formación de escalas. Los resultados de la presencia de Pb^{210} corroboran lo que indica la IAEA (2010, p.110) donde se menciona que a este radionúclido es común encontrarlo formando parte del agua de formación.

Los radionúclidos de la desintegración del Ra^{226} poseen vidas medias muy cortas y se encontraron en todas las muestras como es el caso del Bi^{214} y Pb^{214} , la APPEA (2002, p. 7) señala que los principales radionúclidos de la industria petrolera son el Ra^{226} , el Pb^{210} y los productos del decaimiento que poseen una vida media muy corta. Varias muestras carecen de Ra^{226} , sin embargo los radionúclidos producto de su desintegración, están presentes.

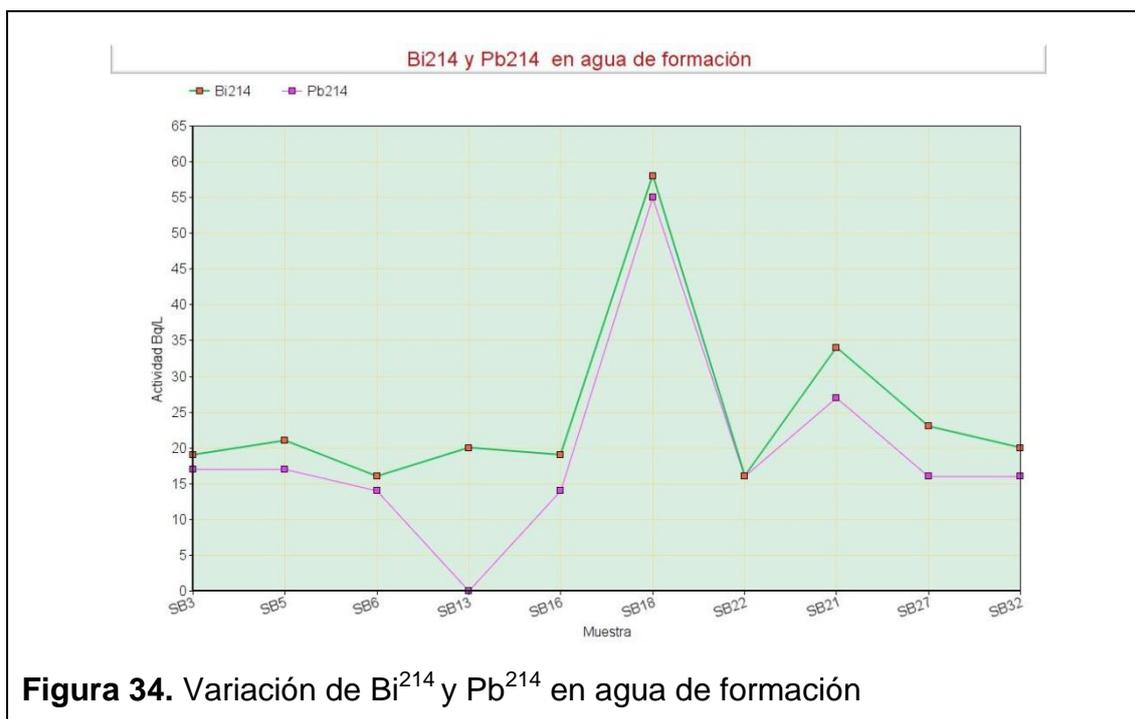


Figura 34. Variación de Bi^{214} y Pb^{214} en agua de formación

La empresa SERTECPET, se caracteriza por realizar la extracción petrolera en un circuito cerrado, de tal manera que el agua de formación/producción es reinyectada a los pozos petroleros; por tal motivo no existe un impacto al medio ambiente de forma directa; sin embargo, para el monitoreo del pozo los

operadores toman muestras de agua de formación cada 2 horas por lo que se encuentran expuestos a una contaminación interna por inhalación principalmente por la presencia de Pb^{210} , tanto el momento de la toma de muestra como en el almacenamiento en el sumidero que corresponde a su disposición final.

3.1.3 Radiactividad en incrustaciones

La actividad de las muestras de incrustaciones tomadas de los diferentes puntos de la industria petrolera fluctuó entre los 830 y 3374 Bq/Kg. Las escalas presentaron la cadena de decaimiento del Ra^{226} encontrando K^{40} , Ac^{228} , Bi^{214} , Pb^{210} , Pb^{214} , Pb^{212} y Tl^{208} siendo el elemento más importante el Pb^{210} , el mismo que se forma por el decaimiento del Ra^{226} y por cambios de condiciones en las facilidades petroleras se precipita en forma de finas películas contaminando a los equipos con NORM tal como lo menciona la IAEA (2003, p. 13).

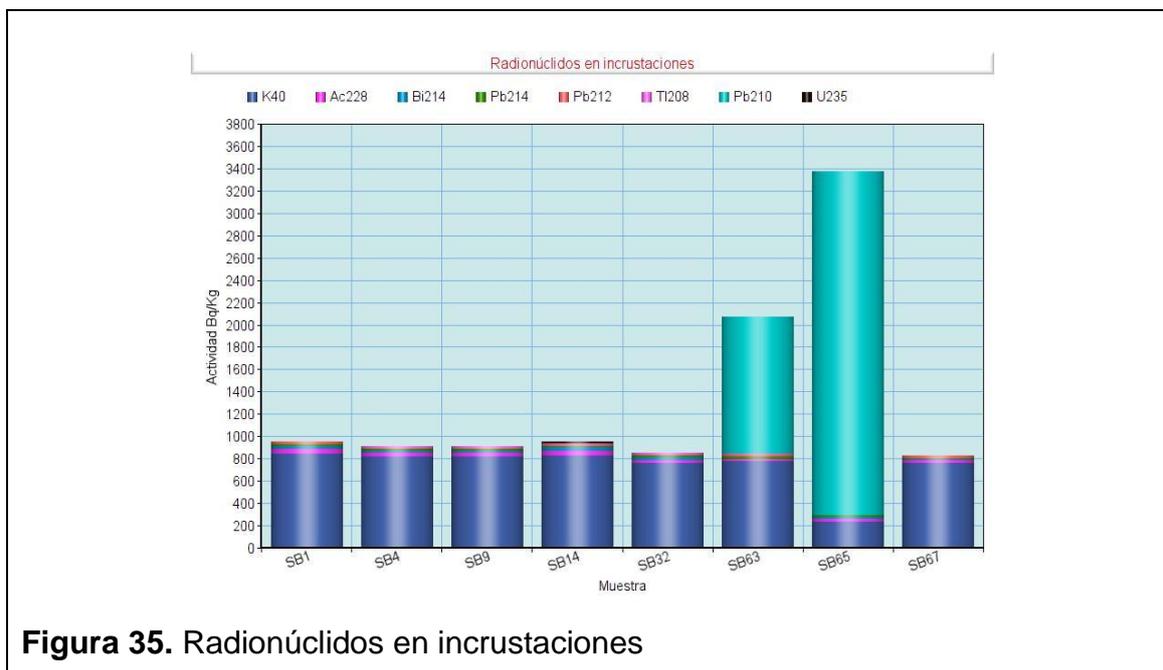


Figura 35. Radionúclidos en incrustaciones

La APPEA (1992, p. 10) asegura que las escalas se forman en las tuberías de los pozos petroleros debido al cambio de temperatura y presión que existe entre el reservorio y el petróleo crudo dentro de las tuberías, la evaluación de NORMs correspondiente a la muestra SB67 tomada de tuberías, dio como

resultado 830 Bq/Kg cantidad relativamente baja en comparación con la actividad registrada en el inventario preliminar realizado por (Suárez & González, 2010).

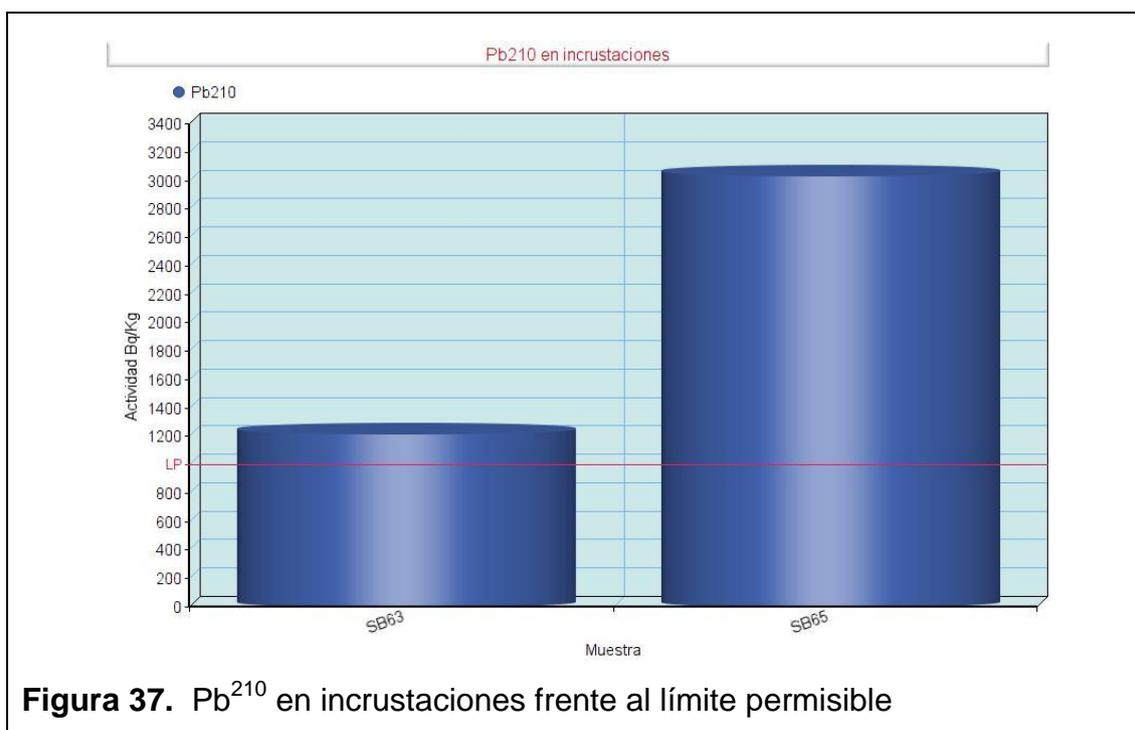
Las muestras con mayor radiactividad pertenecieron a SB63 y SB65, las mismas que corresponden a un calentador y a accesorios petroleros respectivamente, las incrustaciones se las puede observar en la siguiente figura.



Los accesorios son contaminados con NORMs debido al cambio de presión por la disminución del volumen de la tubería y la velocidad del fluido, la misma que llega a ser tan baja que no es capaz de arrastrar el material radiactivo que tiende a acumularse en las paredes de los accesorios como lo señala la IAEA (2003, p. 15) y Kemmer (1989, p. 25) sobre la formación de escalas. La actividad de Pb^{210} fue de 1215 Bq/Kg superando el límite permisible establecido por el OIEA (2010, p.11) de 1000 Bq/Kg.

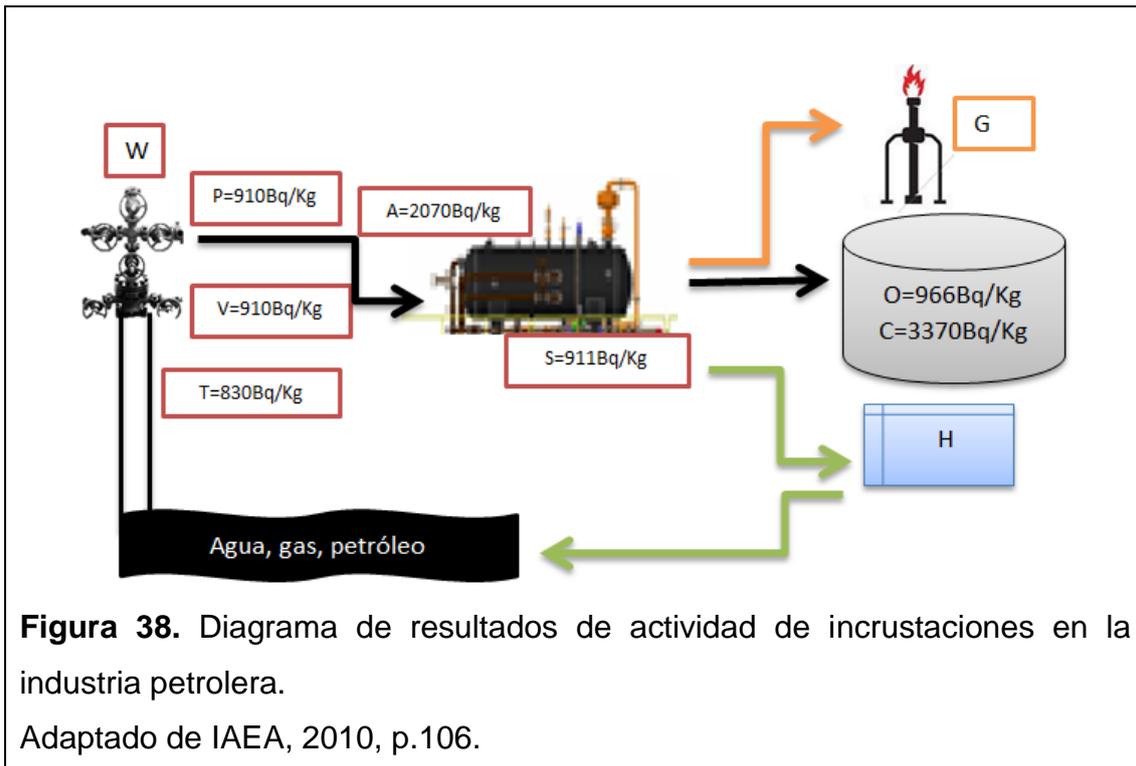
La IAEA (2003, p. 15) indica que las incrustaciones o escalas se forman en los equipos que almacenan el crudo, en este caso el calentador que posee la función de cambiar la viscosidad del fluido mediante el incremento de la

temperatura para lograr el transporte del mismo, posee las propiedades necesarias para la adherencia de los radionúclidos en su interior, siendo la muestra con mayor radiactividad encontrada con una cantidad de Pb^{210} de 3067 Bq/Kg comparado con el límite permisible de 1000 Bq/Kg impuesto por el OIEA (2010, p. 11).



En el siguiente diagrama podemos observar los resultados obtenidos de radiactividad de incrustaciones en la industria petrolera, corroborando los sitios de almacenamiento de NORMs que indica la IAEA (2010, p.106) en los cuales podemos observar la actividad de las escalas correspondientes a W=cabezal, V=válvulas, P=bombas, S=separador, G=tratamiento de gas, O=almacenamiento de crudo, H=almacenamiento de agua de formación y añadiendo A=accesorios y C=calentador.

El tratamiento de gas que posee la empresa SERTECPET, es la quema del mismo mediante mecheros, por lo que no se pudo obtener una muestra de incrustaciones; de igual manera, ya que no existían tanques de almacenamiento de aguas de formación en desuso, no se pudo evaluar la actividad dentro de los mismos.



Podemos observar que la radiactividad incrementa conforme el proceso de la industria petrolera avanza, siendo menor en las tuberías de extracción y aumentando en válvulas, bombas, accesorios, separadores y tanques de almacenamiento, esto se debe a la presencia del anti-escala; que como lo indica la IAEA (2010, p. 54) los operadores inyectan este químico en los pozos de producción, el mismo que evita que se adhieran los sulfatos y carbonatos que son quienes llevan el material radiactivo; ya que los compuestos no son depositados en las tuberías y cabezales por la acción del anti-escala, los radionúclidos contenidos se movilizan junto con la mezcla de petróleo-agua-gas y se depositan en aquellos equipos que poseen cambios de temperatura y presión conforme va perdiendo acción el anti-escala.

Las muestras con mayor actividad correspondieron a las incrustaciones frente al agua de formación y a los lodos como se indica en el siguiente gráfico.



Figura 39. Comparación de actividad entre las muestras

Las muestras fueron tomadas de los campos Auca, Sacha y Shushufindi pertenecientes a la provincia de Orellana y Sucumbíos. Los lodos se extrajeron principalmente de Sacha y Auca, ya que en el momento del estudio eran los sitios donde se localizaban los taladros de perforación. Las muestras de agua de formación se tomaron de los pozos de reinyección tanto de Sacha como Auca, y de las MTUs pertenecientes a la empresa SERTECPET.S.A, que se encontraban operando desde Shushufindi (Norte) hasta el Auca (Sur); las incrustaciones pertenecen a los equipos en desuso situados en el campo "A" y tuberías de perforación petrolera de los campos de estudio. El siguiente mapa se realizó con el fin de sintetizar los resultados en el área de muestreo.

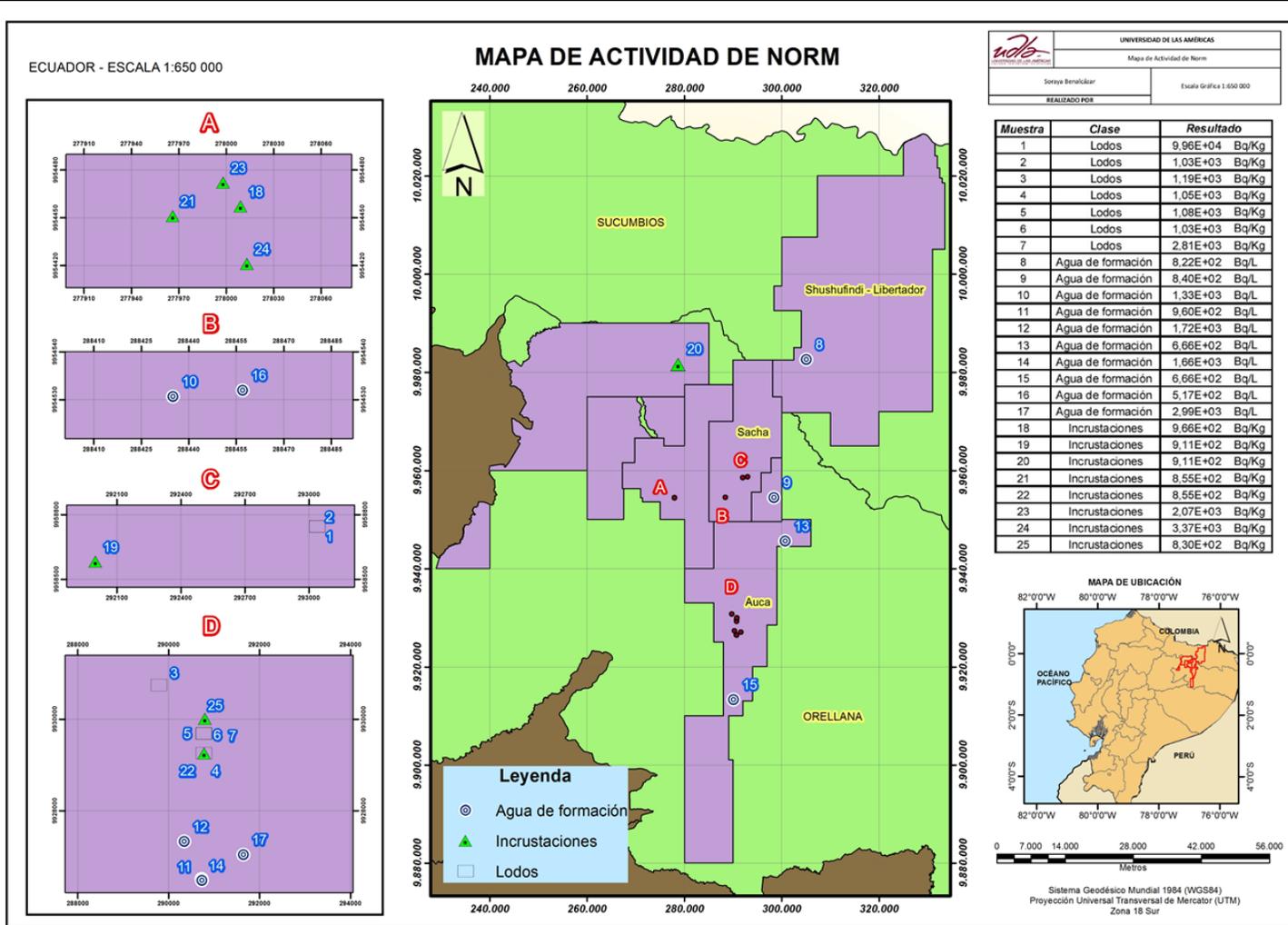


Figura 40. Mapa de Actividad de NORM

3.2 Resultados por centelleo líquido

Las muestras evaluadas por centelleo líquido fueron preparadas como se indicó en la metodología; obteniendo como resultado dos muestras con quenching de color, correspondientes a los viales Sb 20 y Sb 28; la solución Sb 15 en primera instancia se tornó lechosa, sin embargo en la siguiente preparación se obtuvo la coloración blanco azulada esperada.

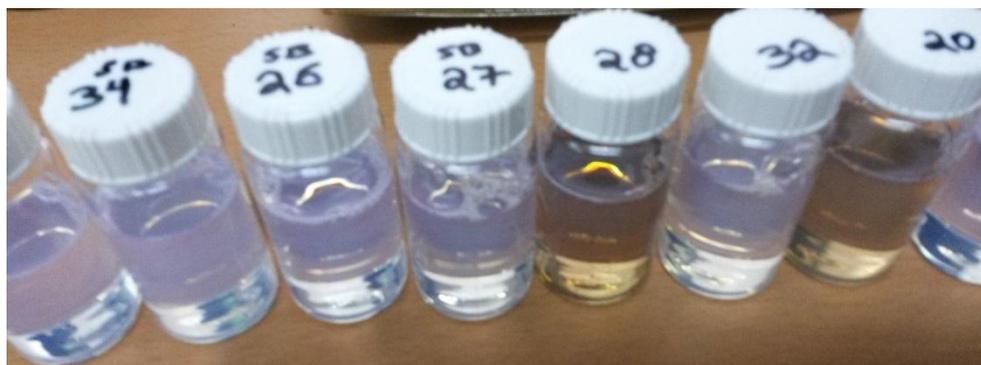


Figura 41. Quenching de color.

La determinación de la cantidad de quenching de las muestras se corroboró mediante la cuantificación del t-sie como se indica en la siguiente tabla, donde las muestras con menor t-sie corresponden a las que poseen mayor quenching de color.

Tabla 1. T-sie de las muestras de agua

Muestra	CPMA	t-sie
Agua potable	19.4	381
Sb3	18.1	373
Sb5	17.9	435
Sb6	19.3	340
Sb11	24.47	325
Sb14	17.4	378
Sb15 cortada	25.13	313
Sb15	21.13	346
Sb16	18.1	369

Sb20	144.2	152
Sb24	16.33	374
Sb26	17.27	374
Sb27	21.07	324
Sb28	249.53	122
Sb29	57.87	221
Sb32	20.47	308
Sb34	18.8	347
Sb21	16.8	367

Los resultados de las muestras fueron comparadas con los valores normales de radiactividad que posee el agua potable, de manera cualitativa como se puede observar en el Anexo 5 mediante los espectros logarítmicos y de forma cuantitativa como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados por centelleo líquido

Muestra	CPMA	CPMB	CPMC
1 Agua potable	19.2	16.8	8.3
2 Sb3	18.1	13.9	42.1
3 Sb5	17.9	13.9	45.2
4 Sb6	19.3	15.3	45.9
5 Sb11	24.47	21.13	63.27
6 Sb14	17.4	13.07	44
7 Sb15 cortada	25.13	20.93	70.13
8 Sb15	21.13	17.2	61.47
9 Sb16	18.1	14.2	44.2
10 Sb20	144.2	139.93	189.8
11 Sb24	16.33	12	45.13
12 Sb26	17.27	13.47	43.87
13 Sb27	21.07	16.93	51.53
14 Sb28	249.53	255.93	276.6
15 Sb29	57.87	53.6	105.53
16 Sb32	20.47	15.53	48.93
17 Sb34	18.8	14.2	53.6
18 Sb21	16.8	12.2	43.5

Nota. CPMA: 0-25 KeV; CPMB: 25-250KeV; CPMC: 250-2000KeV

Las muestras Sb11, Sb15, Sb20, Sb27 y Sb28 poseen valores superiores a los del agua potable; por lo cual se procedió a realizar el análisis de los

diferentes espectros para la identificación de material radiactivo de origen natural según la energía que poseen; como se indica en el Anexo 6; y los resultados correspondientes en la siguiente tabla.

Tabla 3. Identificación de NORM según la energía

Muestra	Energía (KeV)	Radionúclido	Cuentas por segundo
Fondo	7	Pb ²¹⁴	15
	9	Bi ²¹²	10
Sb11	2	K ⁴⁰	10
	4	Ra ²²⁶	18
	7	Pb ²¹⁴	17
	9	Bi ²¹²	16
	30	Pb ²¹⁰	5
	60	Pb ²¹⁴	11
Sb15	4	Ra ²²⁶	13
	7.5	Pb ²¹⁴	11
	9	Bi ²¹²	10
	30	Pb ²¹⁰	4
	180	Tl ²⁰⁸	4
	230	Ac ²²⁸	4
Sb15 cortada	4	Ra ²²⁶	15
	6	Pb ²¹⁴	13
	10	Bi ²¹²	8
	13	Ra ²²⁸	3
	30	Pb ²¹⁰	4
	50	Bi ²¹⁰	3
	75	Pb ²¹²	3
	140	Tl ²⁰⁸	4
Sb20	2.5	K ⁴⁰	19
	4	Ra ²²⁶	12
	5.5	Pb ²¹⁴	8
	13	Ra ²²⁸	6
	30	Pb ²¹⁰	7
	40	Ra ²²⁸	7
	70	Pb ²¹²	6
	100	Tl ²⁰⁸	7
Sb21	4	Ra ²²⁶	15
	7.5	Pb ²¹⁴	23
	9	Bi ²¹²	7

Sb24	3	Ra ²²⁶	20
	6	Pb ²¹⁴	7
	9	Bi ²¹²	8
	30	Pb ²¹⁰	6
	35	Bi ²¹²	5
	40	Ra ²²⁸	4
	55	Pb ²¹²	5
Sb28	4	Ra ²²⁶	24
	7.5	Pb ²¹⁴	13
	10	Bi ²¹²	7
	15	Ra ²²⁸	6
	23	Bi ²¹⁴	6
	30	Pb ²¹⁰	8
	40	Ra ²²⁸	7

Se identificaron las cadenas de Uranio y Torio, encontrando Ra²²⁶, Pb²¹⁴, Bi²¹⁴, Pb²¹⁰, Bi²¹⁰, Ra²²⁸, Ac²²⁸, Pb²¹², Bi²¹² y Tl²⁰⁸.

Según la APPEA (2002, p. 7) el agua de formación tiene la capacidad de diluir al Ra²²⁶ y al Ra²²⁸ de las formaciones geológicas; dichos radionúclidos son los principales NORM que se encuentran en las facilidades petroleras junto a su cadena de desintegración.

Tabla 4. Decaimiento del Ra226

Radionúclido	Vida media	Tipo de radiación
Ra ²²⁶	1602 años	α,γ
Rn ²²²	3.8 días	A
Po ²¹⁸	3 minutos	A
Pb ²¹⁴	26.8 minutos	β,γ
Bi ²¹⁴	19.8 minutos	β,γ
Po ²¹⁴	162 milisegundos	A
Pb ²¹⁰	22.3 años	β,γ
Bi ²¹⁰	5 días	B
Po ²¹⁰	138.4 días	A
Pb ²⁰⁶	Estable	-

Adaptado de APPEA, 2002, p. 8.

Tabla 5. Decaimiento del Ra228

Radionúclido	Vida media	Tipo de radiación
Ra²²⁸	5.75 años	B
Ac²²⁸	6.13 horas	β,γ
Th²²⁸	1.9 años	α,γ
Ra²²⁴	3.64 días	α,γ
Rn²²⁰	55.3 segundos	A
Po²¹⁶	0.15segundos	A
Pb²¹²	10.64horas	β,γ
Bi²¹²	60.6 minutos	α,γ,β
Po²¹²	0.3 milisegundos	A
Tl²⁰⁸	3 minutos	β,γ
Pb²⁰⁸	Estable	-

Adaptado de APPEA, 2002, p. 8.

Como se observa los resultados obtenidos coinciden con los radionúclidos de desintegración β producto del decaimiento del Ra²²⁶ y Ra²²⁸; que son los elementos responsables de la formación de escalas en los equipos petroleros.

Se determinó el límite de detección del equipo según la eficiencia teórica de los radionúclidos de origen natural mediante la siguiente fórmula:

$$LLD = \frac{4.65\sqrt{(Bg * T)}}{60EVT}$$

(Ecuación 3)

Donde:

Bg*T = Cuentas del fondo y su tiempo de conteo;

60 = Factor de conversión de dpm a Bq;

E= Eficiencia teórica;

V=Volumen de la muestra

T = Tiempo de conteo (Annunziata, 2003, p. 513)

Tabla 6. Datos para la determinación del LLD

Datos	
Factor	4.65
Tiempo	15min
Fondo	19.4cpm
Volumen	4ml

Tabla 7. LDD de los NORM

Radionúclido	Eficiencia	LDD (Bq/L)
Pb212/Bi212	53	11.37
Pa234	54	11.16
Ra226/Bi214/Pb214	77	7.83
Pb210/Bi210	18	33.5

Una vez determinado el límite de detección para cada radionúclido se cuantificó la actividad de los elementos de desintegración β provenientes del Uranio y del Torio. Los niveles más elevados de las cuentas por minutos generadas por el equipo detector constituyen a la región A de análisis, de tal manera que la evaluación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{D(Csa - Cbg)}{60EV}$$

(Ecuación 4)

Donde:

A=actividad;

Csa=cuentas por minuto en A;

Cbg=Cuentas del agua potable;

60 factores de conversión segundo/minuto;

E=eficiencia teórica;

V=volumen de la muestra;

D=factor de decaimiento (Mingote, 2007, p. 2).

Tabla 8. Datos determinación de la actividad

Datos	
Cbg	19.2
D	1
Conversor	60
V	0.004L

Tabla 9. Resultados de actividad del Ra²²⁶, Bi²¹⁴ y Pb²¹⁴

Muestra	Radionúclido	Eficiencia	CsAmuestra	Actividad Bq/L
Sb3	Ra ²²⁶ /Bi ²¹⁴ /Pb ²¹⁴	77	18.1	-0.06
Sb5			17.9	-0.07
Sb6			19.3	0.01
Sb11			24.47	0.29
Sb14			17.4	-0.10
Sb15 cortada			25.13	0.32
Sb15			21.13	0.10
Sb16			18.1	-0.06
Sb20			144.2	6.76
Sb24			16.33	-0.16
Sb26			17.27	-0.10
Sb27			21.07	0.10
Sb28			249.53	12.46
Sb29			57.87	2.09
Sb32			20.47	0.07
Sb34			18.8	-0.02
Sb21			16.8	-0.13

Tabla 10. Resultados de actividad Pb²¹² y Bi²¹²

Muestra	Radionúclido	Eficiencia	CsAmuestra	Actividad Bq/L
Sb3	Pb ²¹² /Bi ²¹²	53	18.1	-0.09
Sb5			17.9	-0.10
Sb6			19.3	0.01
Sb11			24.47	0.41
Sb14			17.4	-0.14
Sb15 cortada			25.13	0.47
Sb15			21.13	0.15

Sb16	18.1	-0.09
Sb20	144.2	9.83
Sb24	16.33	-0.23
Sb26	17.27	-0.15
Sb27	21.07	0.15
Sb28	249.53	18.11
Sb29	57.87	3.04
Sb32	20.47	0.10
Sb34	18.8	-0.03
Sb21	16.8	-0.19

Tabla 11. Resultados de actividad Pb^{210} y Bi^{210}

Muestra	Radionúclido	Eficiencia	CsAmuestra	Actividad Bq/L
Sb3	Pb^{210}/Bi^{210}	18	18.1	-0.25
Sb5			17.9	-0.30
Sb6			19.3	0.02
Sb11			24.47	1.22
Sb14			17.4	-0.42
Sb15 cortada			25.13	1.37
Sb15			21.13	0.45
Sb16			18.1	-0.25
Sb20			144.2	28.94
Sb24			16.33	-0.66
Sb26			17.27	-0.45
Sb27			21.07	0.43
Sb28			249.53	53.32
Sb29			57.87	8.95
Sb32			20.47	0.29
Sb34			18.8	-0.09
Sb21			16.8	-0.56

Tabla 12. Resultados de actividad Pa²³⁴

Muestra	Radionúclido	Eficiencia	CsAmuestra	Actividad Bq/L
Sb3	Pa234	54	18.1	-0.08
Sb5			17.9	-0.10
Sb6			19.3	0.01
Sb11			24.47	0.41
Sb14			17.4	-0.14
Sb15 cortada			25.13	0.46
Sb15			21.13	0.15
Sb16			18.1	-0.08
Sb20			144.2	9.65
Sb24			16.33	-0.22
Sb26			17.27	-0.15
Sb27			21.07	0.14
Sb28			249.53	17.77
Sb29			57.87	2.98
Sb32			20.47	0.10
Sb34			18.8	-0.03
Sb21			16.8	-0.19

Los resultados de actividad obtenidos fueron comparados con el límite de detección del equipo según cada radionúclido, obteniendo que únicamente la muestra Sb28 posee una actividad superior al LDD, por lo que pudo ser evaluada correctamente; mientras que el resto de las muestras poseen una actividad menor a la que el contador puede responder con exactitud.

Podemos observar que a pesar de estar bajo el LDD las muestras con mayor actividad pertenecen a Sb20, Sb28 y Sb29; provenientes del ingreso de agua de formación de distintos pozos a las locaciones de reinyección. Los radionúclidos con mayor actividad corresponden a Pb²¹⁰ y Bi²¹⁰ con 10.55 Bq/L; los cuales son producto del decaimiento del Ra²²⁶ el mismo que posee una actividad promedio de 2.467 Bq/L con un valor máximo de 12.46Bq/L comparado con el límite de descargas para las actividades nucleares de Estados Unidos equivalente a 2.2 Bq/L (IAEA, 2003, p. 28).

Los radionúclidos del Pb²¹² y Bi²¹² poseen una actividad promedio de 3.58 Bq/L y el Pa²³⁴ de 3.51 Bq/L.

3.3 Resultados tasa de dosis

Durante el monitoreo con el contador Radiagem 2000 se determinó que la radiación de fondo se encuentra significativamente relacionada con la presencia de mecheros en los campos petroleros, de tal manera que en aquellas locaciones en las cuales no existen mecheros o se encuentran a largas distancias, la radiación de fondo es menor a la determinada en las facilidades petroleras con presencia de quemadores de gas.

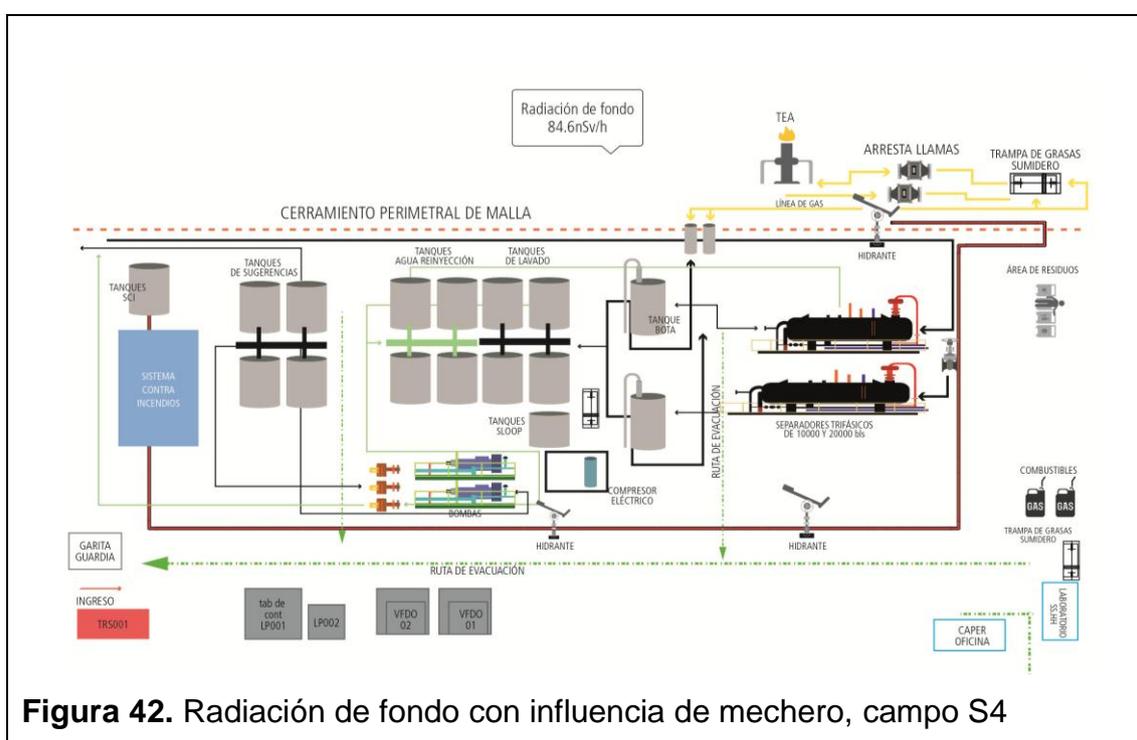


Figura 42. Radiación de fondo con influencia de mechero, campo S4

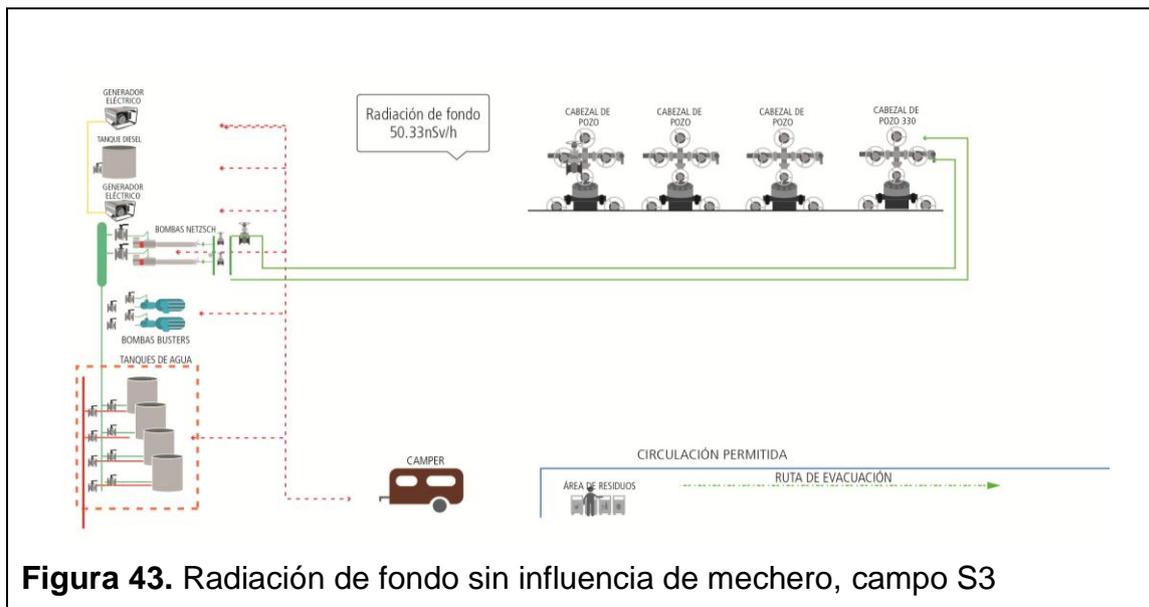


Figura 43. Radiación de fondo sin influencia de mechero, campo S3

Los resultados obtenidos en la medición de la tasa de dosis en las facilidades petroleras determinadas según el documento de la IAEA (2010, p. 109), se indican en las siguientes tablas:

Tabla 13. Resultados tasa de dosis campo Auca

Fecha	Lugar	Coordenadas	FONDO nSv/h				Distancia	Tasa de dosis nSv/h						
			F 1	F 2	F 3	Media		Tubería	Cabezal	Tnq Almace	Separador	Válvulas	Bomba	Camper
16/03/2015	Campo A 1	292116	96	93	95	94.6	Sup	170	150	180			140	
		9925238					1m	190	175	165			175	
	Campo A2	292116	80	82	85	82.3	Sup	80		85			80	
		9925233					1m	82		80			86	
	Campo A 3	290735	60	62	63	61.6	Sup	70	82		72	70		69
		992648					1m	82	93		90	72		72
	Campo A 4	290335	52	60	62	58	Sup	70			95	62		
		9927343					1m	71			82	70		
	Campo A 5	290797	50	51	55	54.6	Sup	57						
		9930007					1m	60						
	Campo A 6	290774	70	71	76	72	Sup	80						
		9929253					1m	82						
17/03/2015	Campo A7	290667	43	52	47	47	Sup	75		86	65	98		
		9929566					1m	66		97	66	76		
										Zaranda	Lodos			

Tabla 14. Resultados tasa de dosis campo Shushufindi

Fecha	Lugar	Coordenadas	FONDO nSv/h				Media	Distancia	Tasa de dosis nSv/h						
			F 1	F 2	F 3	Tubería			Cabezal	Tnq Almace	Separador	Válvulas	Mechero	Camper	
14/03/2015	Campo Sh1	305343	50	49	45	48	Sup	55		66	45	53		87	
		9986627					1m	52		68	64	51			
							8m							108	
							20m							106	
						150m							105	105	
	Campo Sh2	305373	52	60	61	57.60	Sup	111	120					95	
		9986648					1m	97	111					66	
							2m							126	
							5m							120	
	Campo Sh3	315562	90	86	95	90.33	Sup	200	97	83				96	
		9994390					2m	230	120	85			230		
15/03/2015	Campo SA4	0303450	120	121	111	117.33	Sup	82	110		84	70	130	110	
		3099					1m	93	121		96	120			

Tabla 15. Resultados tasa de dosis campo Sacha

Fecha	Lugar	Coordenadas	FONDO nSv/h				Media	Distancia	Tasa de dosis nSv/h					
			F 1	F 2	F 3	Tubería			Cabezal	Tnq Almace	Separador	Válvulas	Bombas	Camper
12/03/2015	Campo S1	781556	79	81	84	81.33	Sup	63	63		47	42	39	50
		9981271					1m	63	66		51	45	42	
	Campo S2	290596	53	54	54	53.67	Sup	48	58		39	32	45	77
		9957404					1m	50	49		63	20		
11/03/2015	Campo S3	278009	50	51	50	50.33	Sup	226		110				66
		9954461					1m	221		80				
							2m	88		64				
12/03/2015	Campo S4	0289702	84	80	90	84.67	Sup	68	94	67	95		86	87
		9954095					1m	72	82	53	80		76	
							10m						110	
							20m						82	
							L.Gas	L.Agua	L.Crudo	Separador	Mechero	Condend	Camper	

Los resultados obtenidos en los equipos de la empresa SERTECPET.S.A se encuentran por debajo del promedio de algunas facilidades evaluadas por la IAEA, en el año 2010.

Tabla 16. Tasa de dosis medida en algunas petroleras

Equipo	Tasa de dosis nSv/h
Interior de tuberías y válvulas	>300 000
Cabezales	100- 22 500
Líneas de producción	300-4000
Separador (externa)	>15 000
Línea de agua/pulmón	200-500

Adaptado de: IAEA, 2010, p. 120.

La tasa de dosis medida en cabezales coincide en su límite inferior con los campos Auca y Shushufindi con valores entre (82-175) nSv/h; sin embargo en Sacha los valores disminuyen a 59nSv/h. Las válvulas medidas en los tres campos poseen una tasa de dosis menor al promedio que se indica en la tabla 16.

En la tasa de dosis medida en las tuberías, se determinó que en los campos reinyectores, (S3, A1 y A2) el valor incrementa significativamente, comparado con las tuberías que pertenecen a las *Movil Testing Units* (MTU) utilizadas por la empresa Sertecpet S.A. Sin embargo la tasa de dosis encontrada en los campos de reinyección de agua siguen siendo menores al promedio establecido por la IAEA (2010, p. 7).

Los separadores poseen una tasa de dosis baja, con una mínima de 39nSv/h y con una máxima de 95nSv/h correspondiente al campo S4; locación que colecta la producción de varios pozos. En la misma locación realizamos la comparación de la tasa de dosis entre la línea de gas, de crudo y de agua; siendo esta última 27nSv/h superior a los valores medios de la separación (gas-crudo-agua).

Las bombas correspondientes a los reinyectores A1 y A2 poseen las mayores tasas de dosis de 140 y 85 nSv/h respectivamente, debido a la mayor concurrencia de agua de formación, comparado con las bombas de las MTU, que en promedio poseen 42nSv/h.

Los tanques de almacenamiento de agua analizados corresponden a los campos de reinyección de agua en los que se pudo establecer una relación entre el olor a ácido sulfúrico y la tasa de dosis; en el campo A1 la tasa corresponde a 180nSv/h y el olor era fuerte; en el caso del A2 la emisión de gases proveniente del tanque de almacenamiento era mínima y la tasa de dosis disminuyó a 85nSv/h; mientras que en el S3 el olor era moderado y su tasa correspondió a 110nSv/h.

Los tanques de almacenamiento de crudo del campo Sh1 y Sh3 tienen en promedio 74nSv/h; pudiendo definir que la tasa de dosis en facilidades correspondientes al agua de formación poseen mayor radiación que aquellas que pertenecen al crudo, corroborando con el estudio de (Spitz et al., 2008, p. 41) el mismo que menciona que los pozos de reinyección de agua son más propensos a estar contaminados por NORMs.

El elemento petrolero con mayor tasa de dosis corresponde a los mecheros, llegando a valores de 230nSv/h a 2 metros de distancia.

Mediante la fórmula de la ley inversa del cuadrado de las distancias; que consiste en que si la distancia entre el emisor y el receptor incrementa, la tasa de dosis disminuye a razón del cuadrado de la distancia. Se estableció la tasa de dosis de los mecheros a un metro de distancia y de forma superficial.

$$X2 = \frac{X1 * D^2_1}{D^2_2}$$

(Ecuación 5)

Donde, X1 y D1 son los datos de tasa de dosis a la distancia conocida; D2 es la distancia a la que se desea conocer la tasa de dosis X2.

Para definir la tasa de dosis superficial se utilizó D2=0.001m y para X1 y D1 los valores conocidos medidos mediante el equipo Radiagem 2000.

Tabla 17. Resultado tasa de dosis de los mecheros

	Superficial	1m
Campo Sh1	691.2uSv/h	11uSv/h
Campo Sh2	504uSv/h	3uSv/h
Campo Sh3	92uSv/h	920nSv/h
Campo S4	11000uSv/h	32.8uSv/h

Podemos observar que la tasa de dosis en los mecheros es elevada ya que como lo menciona la IAEA (2010, p.106) la mezcla de gas, petróleo y agua; es portadora de Rn^{222} que se encuentra de manera natural en las rocas y se libera el momento de la extracción adherido principalmente a la mezcla agua/gas; el Rn^{222} tiene mayor afinidad por el gas, de tal manera que después de pasar por el separador, gran parte del Rn^{222} es liberado a la atmósfera por medio del mechero; mientras que la otra parte se precipita y decae a Pb^{210} acumulándose en las líneas de gas.

Al determinar la influencia del mechero en las locaciones petroleras, se realizó la relación entre la distancia del camper donde se encuentran los operadores y la tasa de dosis que reciben, según la distancia camper-mechero.

Tabla 18. Relación Mechero-distancia-camper

Locación	Mechero (uSv/h)	Interior Camper (nSv/h)	Distancia (m)
Campo Sh2	504	95	10
Campo Sh3	92	96	25
Campo S4	11000	87	120
Campo Sh1	691.2	87	150

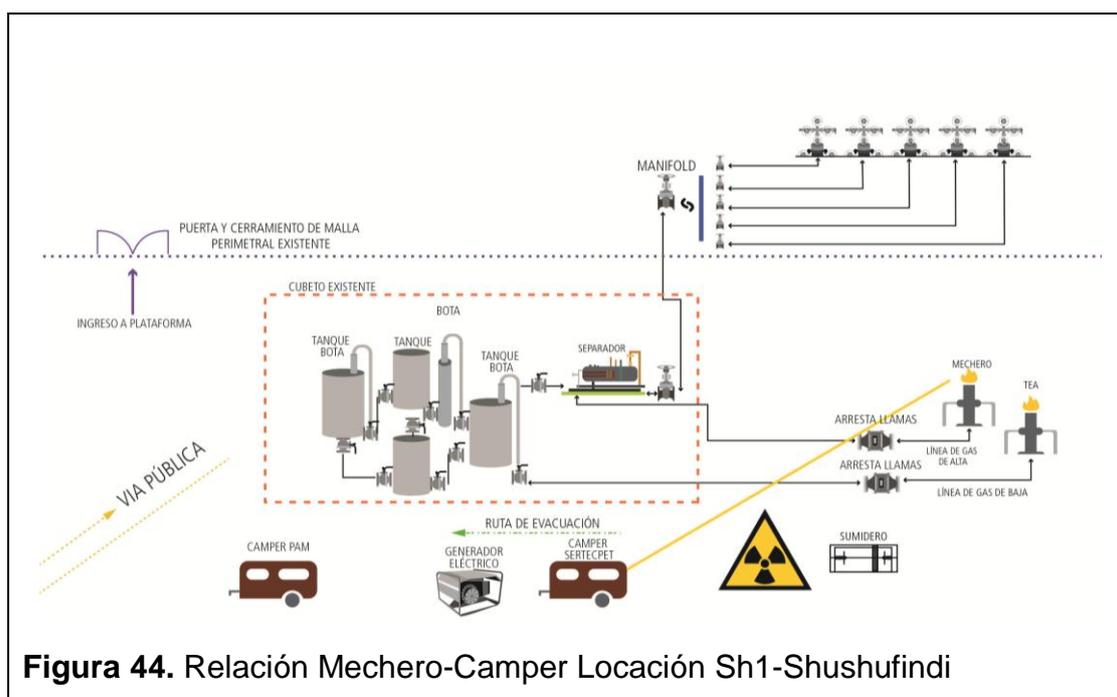
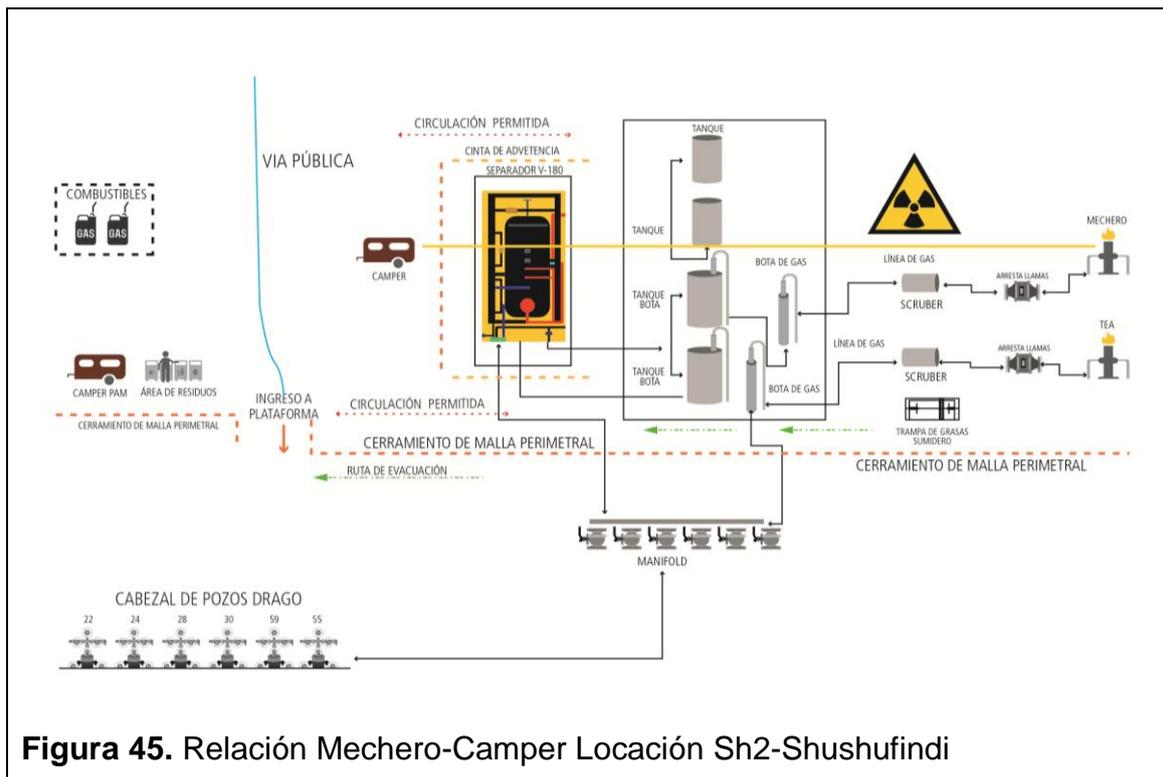


Figura 44. Relación Mechero-Camper Locación Sh1-Shushufindi



Podemos observar que conforme aumenta la distancia del camper al mechero, la tasa de dosis en el interior del camper disminuye, con los datos obtenidos en el interior del camper se determinó la tasa de dosis que reciben los operadores durante sus 12 horas de trabajo, en jornadas de 14 días al mes lo que corresponden a 26 jornadas anuales; obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 19. Tasa de dosis camper anual

Locación	Interior Camper(nSv/h)	Dosis de exposición uSv/h	mSv/año
Campo Sh3	96	0.096	0.42
Campo Sh2	95	0.095	0.41
Campo S4	87	0.087	0.38
Campo Sh1	87	0.087	0.38

Según las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica y la Directiva Europea, CSN (2005, p. 7) el límite de dosis para la exposición a miembros del público es de 1mSv/año, por lo tanto la radiación

que reciben los operadores dentro de los campers de estudio corresponde al 38-42% de la radiación anual que deberían recibir en sus actividades normales.

Los operadores poseen una exposición ocupacional que según el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI) (2012, p. 22), Artículo 63; no requiere ser controlada ya que poseen valores de tasa de dosis $<1\text{mSv/a}$.

La tasa de dosis promedio determinada en los 4 campos de estudio, corresponde a $0,39\text{mSv/a}$; difiriendo con los resultados obtenidos por Adbalagba, Avwiri & Chad-Umoren (2013, p. 286) en las que las tasas de exposición de los campos petroleros en Nigeria se encuentran sobre el límite permisible en un 20%. Por otro lado los resultados obtenidos coinciden con los valores de los campos petroleros evaluados en Argentina, donde Canoba & Gnoni (2008, p. 375) determinan que la tasa de dosis a la que se encuentran expuestos los operadores fluctúa entre 0.02 y 1.6mSv/a . En el estudio realizado por Hamlat, Dejeffal & Kadi (2001, p. 144) los valores en las facilidades petroleras de Estados Unidos y Argelia la tasa de dosis es $<1\text{mSv/h}$, al igual que los resultados obtenidos en el presente estudio.

Se analizaron 14 plataformas petroleras, 3 localizadas en Shushufindi, 7 en Auca y 4 en Sacha, en las cuales se evaluó la tasa de dosis correspondiente a tuberías, válvulas, cabezales, bombas, tanques de almacenamiento, separadores, condensador, mecheros, camper, zaranda y lodo. Los siguientes mapas indican la tasa de dosis superficial y a un metro de distancia, según los componentes de cada locación en los 3 campos de estudio. Los campos Shushufindi y Sacha indican los valores más altos debido a la presencia de mecheros.

Los mapas sintetizan la información analizada anteriormente y generan una visión geográfica del área de estudio en los pozos petroleros de la Amazonía ecuatoriana.

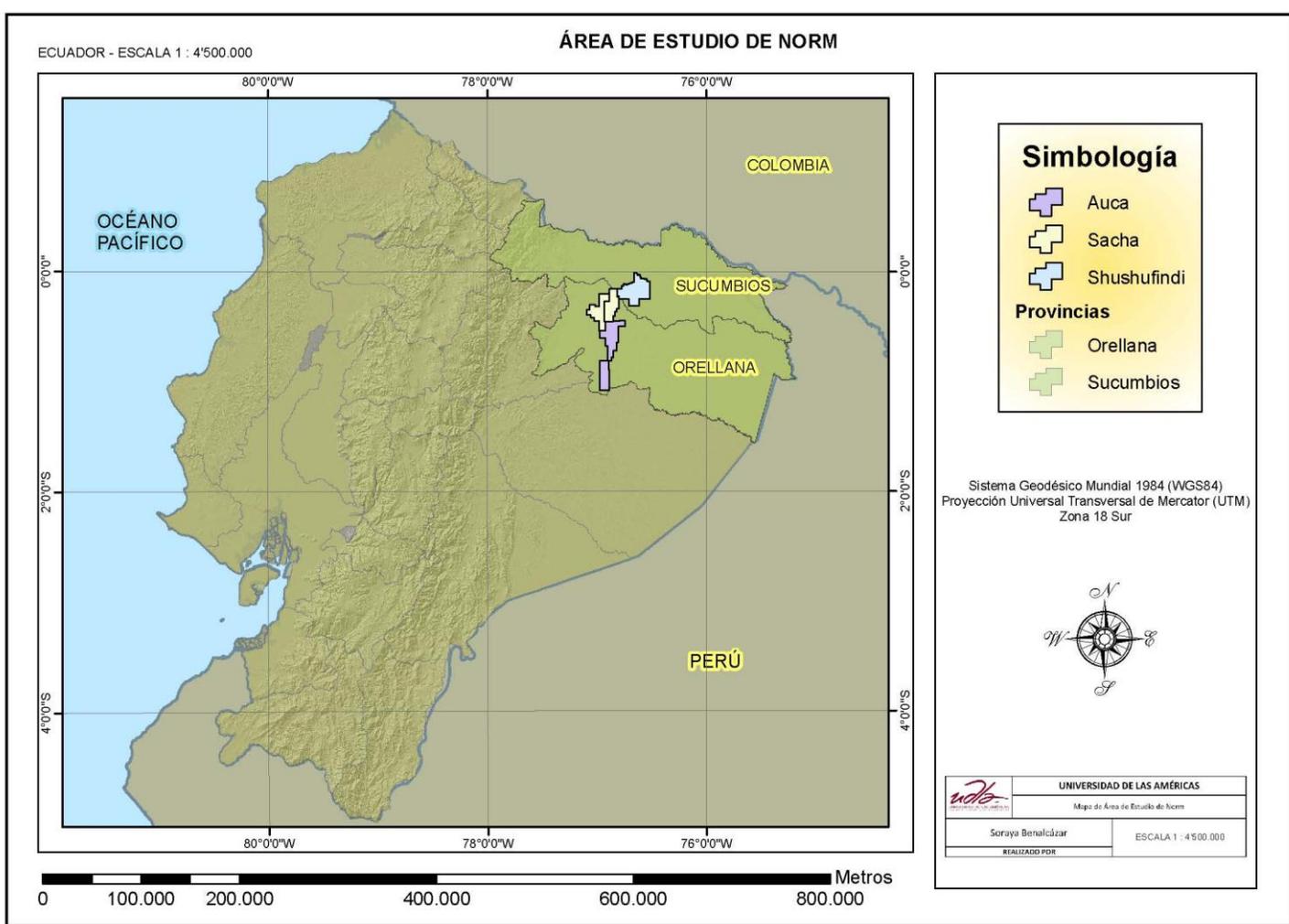


Figura 46. Área de estudio de NORMs

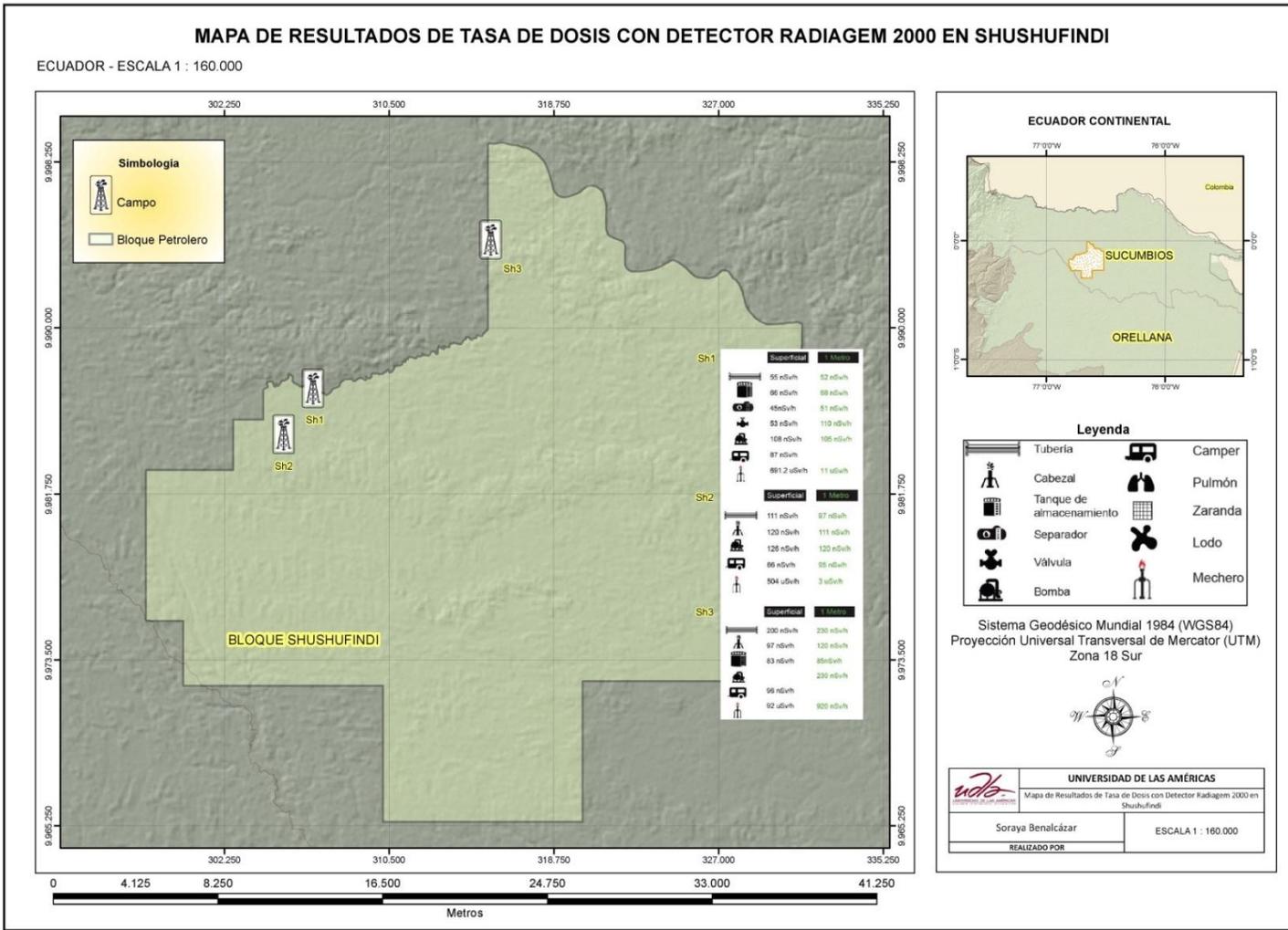


Figura 47. Mapa tasa de dosis de Shushufindi

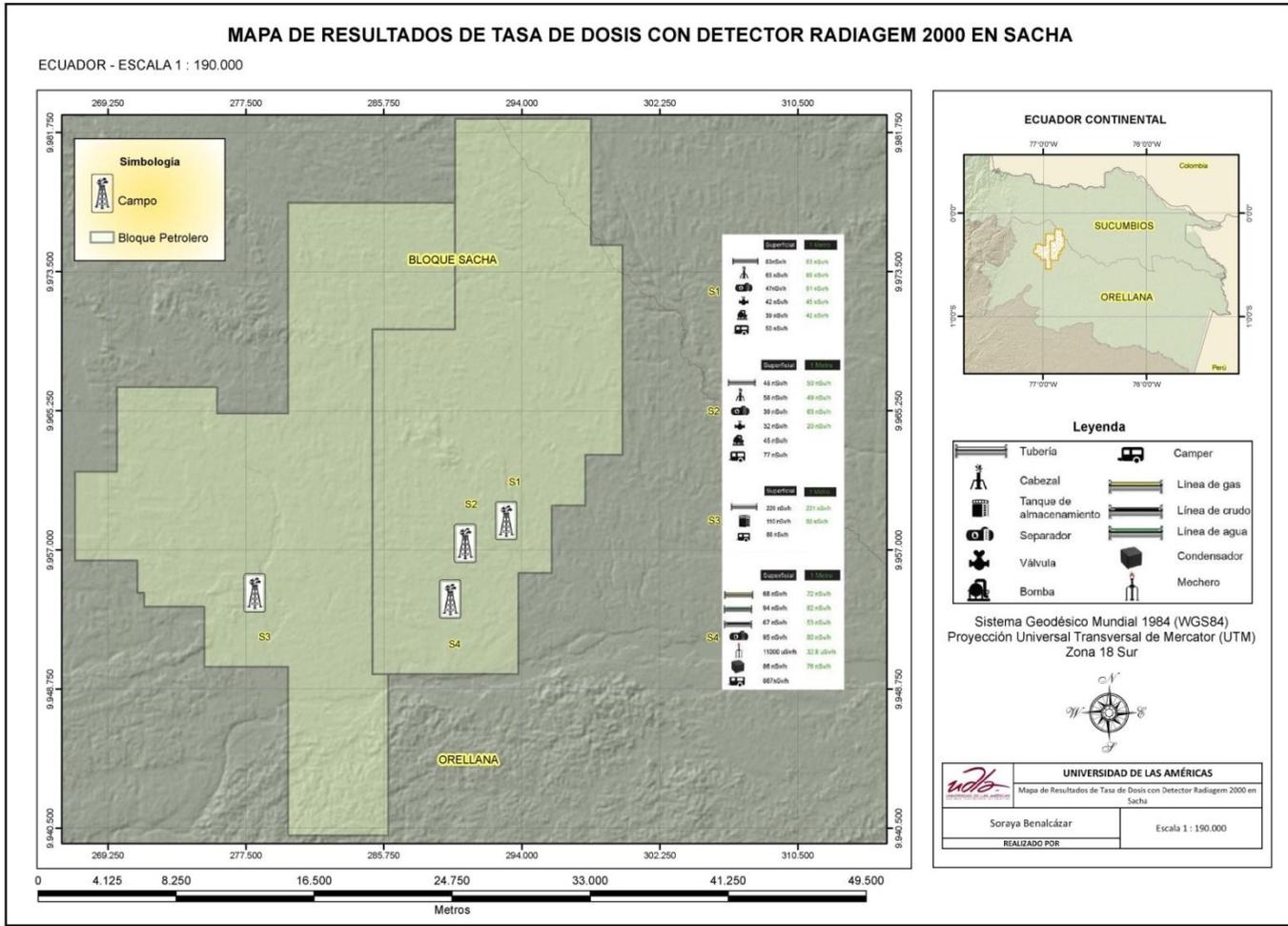


Figura 48. Mapa tasa de dosis de Sacha

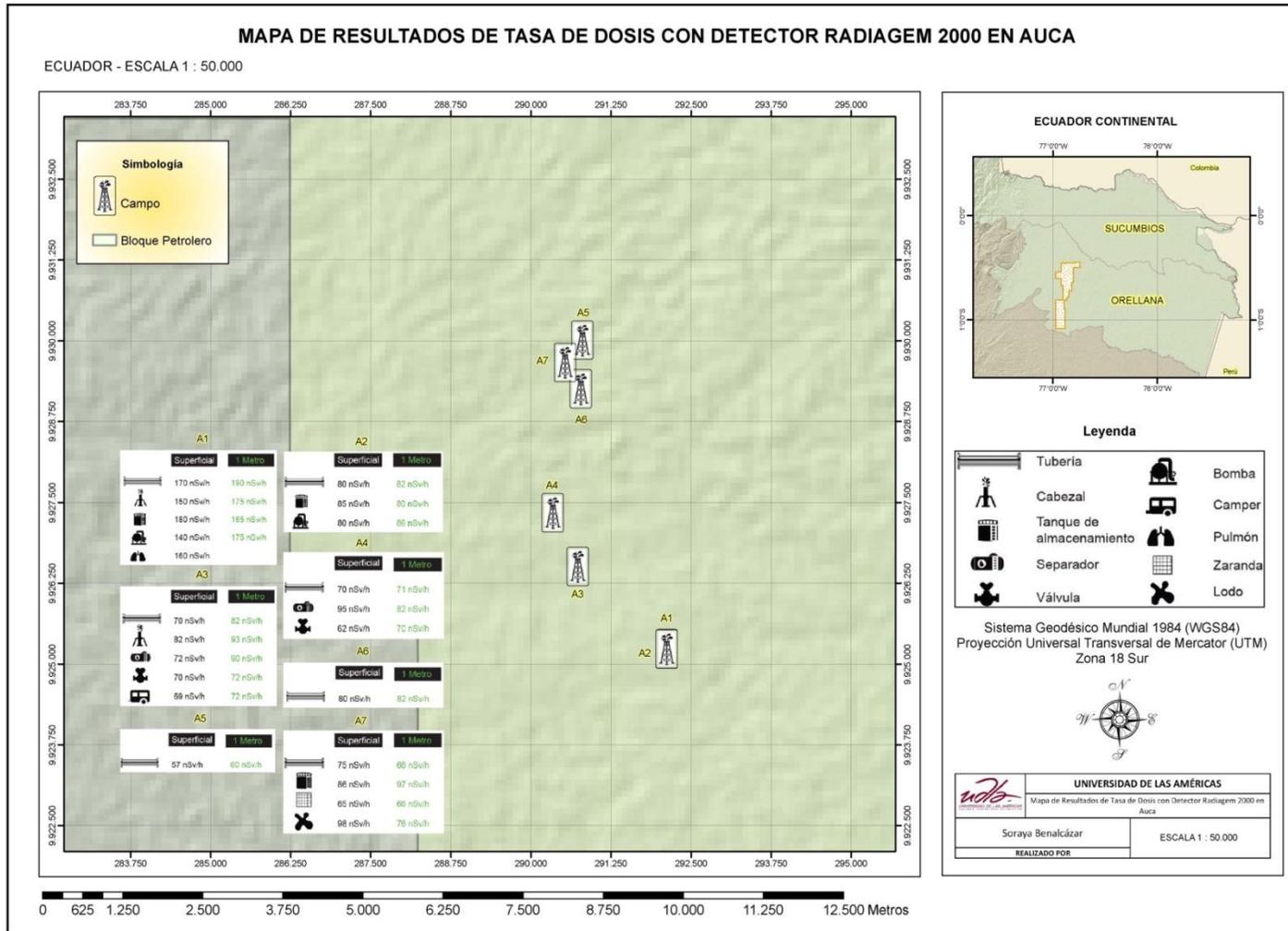


Figura 49. Mapa tasa de dosis de Auca

4. Conclusiones

Tanto en lodos, agua de formación e incrustaciones, se encontró la presencia de la cadena de desintegración del U^{238} y Th^{232} , siendo el radionúclido con mayor concentración el Pb^{210} , el mismo que supera los límites permisibles para NORMs establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica, sin embargo la instrumentación analítica utilizada solamente aproxima los valores de concentración en el rango de 0 a 200 KeV.

El presente estudio corrobora que el agua de formación disuelve al Ra^{226} que se encuentra en las formaciones geológicas y se almacena en los equipos en forma de Pb^{210} producto del decaimiento del mismo, encontrándolo tanto en lodos como incrustaciones.

Los radionúclidos primordiales U^{238} y Th^{232} permanecen inmóviles en el reservorio, ya que no son solubles en agua de formación, sin embargo pueden llegar a la superficie de manera mecánica por los equipos de extracción.

La presencia de material natural radiactivo se extiende en todo el proceso de extracción de petróleo, desde tubos de perforación hasta tanques de almacenamiento; los químicos utilizados para evitar la formación de escalas, producen que los NORMs se encuentren en los equipos de almacenamiento y que se asienten en accesorios donde existe mayor presión.

La actividad del agua de formación evaluada por centelleo líquido se encontró bajo el límite de detección del equipo, sin embargo, se pudo apreciar la presencia de los radionúclidos de desintegración β correspondientes al decaimiento del Ra^{226} y Ra^{228} , especialmente Pb^{210} y Bi^{210} los mismos que también fueron identificados por el detector de germanio hiperpuro.

La tasa de dosis es superior en un 40% en tuberías y tanques de almacenamiento de agua de formación, frente al almacenamiento y transporte de crudo; debido a que el Ra^{226} posee mayor afinidad por el agua.

Los datos de tasa de dosis en las facilidades petroleras son una aproximación a los equipos que se encuentran contaminados con NORMs, ya que al poseer una desintegración de tipo α y β , el acero de los equipos sirve como blindaje a la radiación.

Los operadores de la empresa SERTECPET. S.A no deben ser considerados Personal Ocupacional Expuesto (POE) pues la tasa de dosis que reciben es menor a 1mSv/año en el presente estudio.

5. Recomendaciones

La tasa de dosis es superior en los mecheros, es recomendable que los campers de los operadores se localicen más distantes a los mismos y se realice un estudio de cuantificación de Rn^{222} dentro de las plataformas petroleras. La probable presencia de películas de Pb^{210} y Po^{210} en tuberías y quemadores de gas debería ser evaluada.

La utilización del equipo de protección personal adecuado reducirá los daños a la salud por exposición interna el momento de tomar muestras para la evaluación del BSW; dicha muestra debe permanecer tapada y no ser descargada al medio ambiente.

Se recomienda que se realicen estudios periódicos de la cantidad de NORMs en las facilidades petroleras, ya que la concentración varía según el tiempo de uso de los equipos y la localización de los pozos.

El estudio de NORMs en incrustaciones debe ser realizado en las acerías que laburan en el sector, pues es la disposición final de varias de las tuberías de

perforación y según los registros de la SCAN, muestras de piezas de tuberías de empresas dedicadas a la fundición de metal suelen poseer NORMs.

Se recomienda que la industria petrolera cuente con detectores de radiación que alerten a los operadores sobre la presencia de material radiactivo. Los detectores mencionados deberían ser: detectores tipo pankey de ventana fina para poder detectar las partículas alfa y beta emitidas por el material radiactivo de origen natural o de cristal pero con una sensibilidad adecuada para las radiaciones de baja energía.

La inclusión de temas de protección radiológica debería ser añadida a la educación continua del personal.

Cuando se realiza la limpieza de los equipos y tuberías, se deberá verificar con los detectores de radiación que los equipos no se encuentran contaminados; en caso de estarlo, es recomendable que los lodos de fondo e incrustaciones sean guardadas en contenedores y aislados con la señalética adecuada.

Para determinar el efecto de los NORMs en la naturaleza es necesario que se realice un estudio eco-toxicológico en función de la diversidad y abundancia de especies que existen en el lugar y su respuesta al incremento de la radiación natural.

Es recomendable que la industria petrolera del Ecuador se rija a los parámetros establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica, hasta que exista una legislación ambiental con los parámetros permisibles de actividad en desechos radiactivos de origen natural que sea específica para el país, para precautelar el bienestar del ser humano y la calidad y equilibrio del medio ambiente.

REFERENCIAS

- Abojassim, A. (2014). *Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Environmental Sciences and Engineering Applications*, 25, 257–261. doi:10.13140/2.1.3574.4644
- Agbalagba, Avwiri, & Chad-Umoren. (2013). *Radiological impact of oil and Gas Activities in selected oil fields in Production Land Area of Delta State, Nigeria*, 17, 279–288.
- Ahmed, M. (2012). *Ionizing Radiation Induced Radicals*. 30, 650–672. doi:10.5772/34925
- American Petroleum Institute. (1992). *Bulleting on Management of Naturally Occurring Radioactive Materials in Oil and Gas Production*. 1, 2.
- Amidi, J., Hafezi, S., & Attarilar, A. (2005). *Concentration of natural radionuclides in soil and assessment of external exposure to the public in Terhan* (Vol. 3). Iran: Scientific Information Databasa.
- Annunziata, M. (2003). *Handbook radioactivity analysis* (2nd ed.). Great Britain: Academic Press.
- APPEA. (2002). *Guidelines for Naturally Occurring Radioactive Materials*. (1st ed., Vol. 3). Australia: APPEA.
- Australian Radiation Protection, & and Nuclear Safety Agency. (2008). *Safety Guide. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)* (Vol. 15). Australia: ARPANSA.
- Botezatu, & Lacob. (2015). *The Hazard of Naturally Occurring Radioactive Materials for workers in phosphate fertilizers industry and energy production*, 11, 19–27. doi: 10.1.1.560.8285
- Bracciaforte. (2014). *Manual de Química General* (1st ed.). Argentina: Brujas.
- Cabrerizo, D., Bozal, J., & Perez, J. (2008). *Física y Química 4 ESO*: (Vol. 4). España: Editex.
- Campos, M. (2005). *Energía y tecnología nuclear: discusiones éticas, sociales y ambientales* (1st ed.). Costa Rica: Tecnología de Costa Rica.
- Canoba, A. (2013). *Glosario de términos radiológicos* (1st ed.). Argentina: Autoridad Reguladora Nuclear.

- Canoba, A., & Gnoni, W. (2008). *NORM Measurements in the oil and gas industry in Argentina* (V). Sevilla: España: IAEA.
- Canoba, Gnoni, & Truppa. (2008). *NORM Measurements in the oil and gas industry in Argentina* (6th ed.). España: IAEA.
- Cássica, F., & Lima, F. (2010). *Tecnologias emissoras de radiação ionizante e a necessidade de educação permanente para uma práxis segura da enfermagem radiológica*, 62, 767–770. doi: 10.1590/S0034-71672009000500021
- Cherry, J. (2012). *Radiation ionizing* (Vol. II). España: e libro.
- CIA World Factbook. (2013). *Country Comparison: Crude oil-production*. United States.
- Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). (2008). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (103rd ed.). Vienna: ICRP.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). (2008). *Esquemas de desintegración radiactiva. Interacción de partículas cargadas y radiaciones con la materia. Detección de partículas y radiaciones*. España: CSN.
- CSN. (2005). *Las nuevas Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, 34, 1–57.
- CSN. (2008). *Neutrones. Interacción con la materia. Secciones eficaces de las reacciones neutrónicas. Fisión nuclear. Difusión y moderación de neutrones*. (Vol. 10). España: CSN.
- Del Cura, Pedraza, & Gayete. (2010). *Radiología esencial*. España: Médica Panamericana.
- Desidery, D. (2006). *The importance of radiochemistry for the characterization of NORM and of environments contaminated by NORM*, 86, 601–613. doi: 10.1080/03067310500392011
- Díaz, J. (2007). *Técnicas de prevención de riesgos laborales: seguridad e higiene del trabajo* (9th ed.). Madrid: España: Tébar.
- El-Missiry, Othman, & Alabdan. (2012). *Melatonin for Protection Against Ionizing Radiation*. 21, 444–460. doi: 10.5772/33801

- European Commission. (2003). *Effluent and dose control from European Union NORM industries Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach* (Vol. 1). Belgium: European Commission.
- Ferrer, A. (2011). *Física nuclear y de partículas*. (2da ed). Valencia, España.
- Finestres, F. (2012). *Protección en radiología odontológica* (Vol. 368). Barcelona: España: Edicions Universitat Barcelona.
- Fisher, S. (2008). *Geologic and Geochemical Controls on Naturally Occurring Radioactive Materials*. (NORM) in *Produced Water from Oil, Gas, and Geothermal Operations*, 5. doi:10.1046/j.1526-0984.1998.08018.x
- Fontaine, G. (2005). *Petróleo y desarrollo sostenible* (1st ed.). Quito Ecuador: FLACSO.
- Fundación Estatal de Ingeniería en Medio Ambiente. (2004). *Informe de visita técnica a Petrobras*.
- Gómez, M. (2009). *Mercancías Peligrosas*. Madrid:España: Etrasa.
- Hamlat, M., Dejeffal, S., & Kadi, H. (2001). *Assessment of radiation exposures from naturally occurring radioactive materials in the oil and gas industry*. *PERGAMON*, 55, 141–146.
- Hewitt, P. (2002). *Conceptual Physis* (9th ed.). México: Pearson Education.
- Holden, N. (2008). *Half-lives of long-lived A-Decay, B-Decay-BB-Decay and Spontaneous Fission Nuclides*, 42, 1–12. doi:11973-5000
- IAEA. (2003). *Extent of Environmental Contamination by NORM and Technological Option for Mitigation* (Vol. II). Vienna: IAEA.
- IAEA. (2010). *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry*. Vienna.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2008). *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V) Proceedings of an international symposium* (5th ed.). Sevilla:España: IAEA.
- International Energy Agency. (2014). *Medium-Term Oil Market Report* (1st ed., Vol. 1). United States: IEA.
- Kemmer. (1989). *Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones* (II). McGraw-Hill.

- Kiren, Gudennavar, & Bubbly. (2013). *Alpha decay favoured isotopes of some superheavy nuclei: Spontaneous fission versus alpha decay*. Romanian Journal of Physics, 57, 1335 – 1345.
- López, F. (2012). *Materiales radiactivos de procedencia natural en la industria minera*. Argentina: Universidad de Palermo.
- Martin y James. (2013). *Physics for radiation protection* (3rd ed.). United States: Jhon Wiley and Sons.
- McConkey, & Ramachers. (2012). *Liquid Scintillator Time Projection Chamber Concept* (2nd ed.). England: University of Warwick.
- Menéndez, F. (2008). *Formación superior en Prevención de Riesgos Laborales* (3rd ed.). España: LEX NOVA.
- Mertens, C., Kress, B., & Wiltberger, M. (2012). *Atmospheric Ionizing Radiation from Galactic and Solar Cosmic Rays*, 31, 684–710. doi: 0.5772/32664
- Mingote, R. (2007a). *Fundamentos de espectrometría de centelleo líquido* (3rd ed.). Brasil: CDTN.
- Mingote, R. (2007b). *Uncertainty evaluation in tritium activity assay in water by using direct liquid scintillation spectrometry* (1st ed., Vol. 1). Santos:Brazil: Asociación Brasileira de Energía Nuclear.
- Moliner, A. (2010). *Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas* (2nd ed.). México: Departament de Física Atómica.
- Mosqueda, F. (2009). *Desarrollo de procedimientos para la determinación de radioisótopos en muestras ambientales mediante técnicas de bajo recuento por centelleo líquido y radiación Cerenkov* (1st ed.). España: Universidad de Huelva.
- Núñez, M. (2010). *Efectos biológicos de las radiaciones* (Vol. 5). México: ALASBIMN.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2007). *Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispersa* (5th ed., Vol. 6). Vienna: OIEA.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2012). *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. OMS.

- Otto, G. (2012). *Ionizing Radiation Carcinogenesis*, 300–346. doi: 10.5772/32682
- Plasencia, I. G., Perdices, M. B., Vitales, F. F., Celemín, M. D. R. H., Gómez-Tejedor, G. G., García-Conde, A. G., others. (2008). *Fuentes de energía para el futuro*. España: Ministerio de Educación.
- Poveda, R. (2013). *El petróleo en el Ecuador la nueva era petrolera* (1st ed.). Ecuador: Manthra Comunicación integral y Producción editoria.
- Ramírez, F. (2010). *Instrumentación electrónica nuclear* (Vol. 22). México: ININ.
- Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI). (2012). *Boletín Oficial del Estado*. 1238, III, 6833.
- Riola, J. (2009). *Detección e identificación de material nuclear y radiológico* (Vol. 4). España: Ministerio de Defensa y Secretaría General Técnica.
- Robledo, R. (2007). *Riesgos Físicos II: Iluminación* (1st ed.). Ecoe-ediciones.
- Roy, M., Harrison, Ronald, E., & Hester, M. (2011). *Nuclear Power and the environment* (Vol. 32). Great Britain: RSC Publishing.
- Shahbazi, D. (2013). *A review on natural background radiation*. doi: 10.4103/2277-9175.115821
- Siegbahn, K. (2012). *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy* (7th ed.). Great Britain: North Holland.
- Simonescu, C. (2013). *Application of FTIR Spectroscopy in Environmental Studies*, 2(2), 50–73. doi:10.5772/48331
- Spitz, H., Lovinz, L., & Becker, C. (2008). *Evaluation of residual soil contamination from commercial oil well drilling activities and its impact on the naturally occurring background radiation environment*. Taylor and Francis, 37–59. doi:10.1080/15320389709383545
- Stewart, C., & Bushong. (2013). *Manual de radiología para técnicos: Física, biología y protección radiológica* (10th ed.). España: Elsevier.
- Suárez, O., & González, Y. (2010). *TENORM en el Ecuador. Inventario preliminar y papel de la Autoridad Reguladora*. MEER.
- United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2010). *Sources and effects of ionizing radiation. Anexo B*, 1, 229.

- UNSCEAR. (2010). *Sources and effects of ionizing radiation* (Vol. 1). New York: Naciones Unidas.
- Veloza, S. (2005). *Curso de protección radiológica práctica de espectrometría gamma*. Universidad Nacional.
- World Nuclear Association. (2014). *Naturally Occurring Radioactive Materials*. NORM.
- Yehuwdah, E. (2012). *Ionizing Radiation Profile of the Hydrocarbon Belt of Nigeria*. 19, 408–430. doi:10.5772/32526

ANEXOS

ANEXO 1

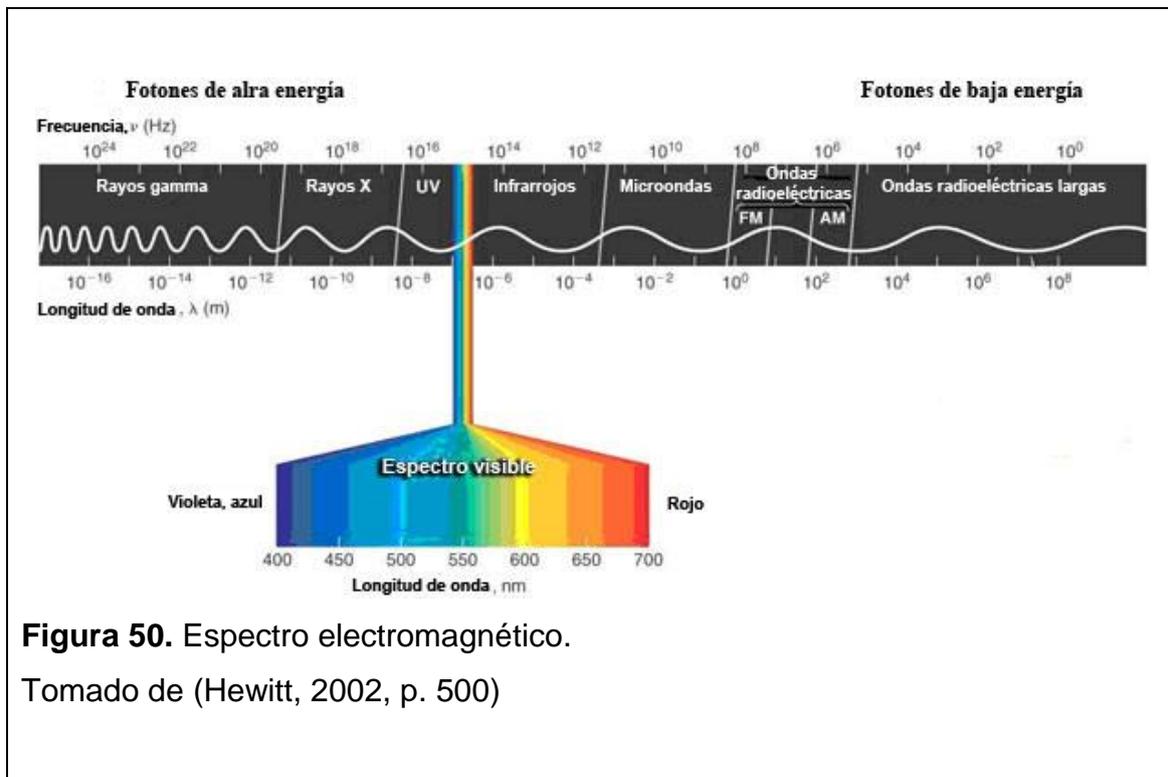


Figura 50. Espectro electromagnético.

Tomado de (Hewitt, 2002, p. 500)

ANEXO 2

Tabla 20. Datos muestras agua de formación

TOMA DE MUESTRAS								
Soraya Benalcázar Jalkh				ING. AMBIENTAL			UDLA	
AGUAS DE FORMACIÓN								
Código	Coordenadas	Lugar	Fecha	Hora	Responsable	Antigüedad	MTU #	Observación
SB16	0290727 9926512	Pozo A3	27/11/2014	1:45pm	SBJ	2014	35	Tubería, agua de retorno
SB3	305088 9982682	Pozo Sh2	26/11/2014	10:30am	SBJ	2013		Separador BSW 22%
SB4	0288439 9954565	Pozo S3	26/11/2014	2:52pm	SBJ			Reinyector de agua
SB5	028435 9954528	Pozo S3	26/11/2014	2:55pm	SBJ			Reinyector de agua / 38 Pozos
SB6	0288435 9954526	Pozo EP	26/11/2014	3:40pm	SBJ			Va a Pozo S3
SB22	0290083 9913353	Pozo A1	27/11/2014	1:30pm	SBJ			Reinyector
SB16	0290339 9927336	Pozo A1	27/11/2014	2:43pm	SBJ		27	Reiyección Bomba 5ple
SB18	0300729 9945664	Yul	27/11/2014	3:40pm	SBJ		40	Separador
SB17	0300729 9945665	Yul	27/11/2014	3:45pm	SBJ		37	Separador
SB11	0303450 0003099	Pozo Dur 2	13/03/2015	8am	Fernando Paredes		38	
SB15	0303450 0003099	Pozo Gu12	15/03/2015	12:20pm	Enrique Carrión		5	Agua de reinyección
SB21	0290731 9926484	Pozo A3	14/03/2015	4:30pm	Nelson Castillo		32	BSW 50%
SB20	0292116 9925238	Pozo A1	14/03/2015	4:45pm	Richard Daquilema			3 unidades
SB24	0289694 9954075	Pozo S1	12/03/2015	5:00pm	Gregory Bonilla			Separador
SB27	0288457 9954528	Pozo S3	12/03/2015	3:30pm	Fernando Paredes			Salida del reinyector
SB28	0288457 9954529	Pozo S3	12/03/2015	3:35pm	Fernando Paredes			Entrada al reinyector
SB32	0291643 9927048	Pozo A2	16/03/2015	4:00pm	Luis Benalcázar			

Tabla 21. Datos muestras incrustaciones

TOMA DE MUESTRAS								
Soraya Benalcázar Jalkh			ING. AMBIENTAL			UDLA		
Incrustaciones								
Código	Coordenadas	Lugar	Fecha	Hora	Responsable	DATO	MTU #	Observación
SB1	278009 9954457	BC	25/11/2014	5:17pm	SBJ	2013		Tanque de almacenamiento, Válvula
SB4	0291997 9958581	Pozo S5	26/11/2014	17:00pm	SBJ	Pozo abandonado		Válvula, escalas duras
SB9	0778777 9981642	BC	25/11/2014	5:10pm	SBJ	Separador bifásico	Separado	Línea de alta
SB14	0277966 9954451	BC	28/11/2014	9:30am	SBJ	Acumulador		Arenas de formación
SB32	0290777 9929253	Pozo A6	14/03/2015	8:00pm	Diego Cáceres			Tubos de perforación
SB63	0277998 9954472	BC	17/03/2015	9:30pm	Diego Cáceres			NORM caldero
SB65	0278013 9954421	BC	17/03/2015	10:00am	Diego Cáceres			Válvulas/accesorios
SB67	0290797 9930007	Pozo A5	14/03/2015	6:00pm	Diego Cáceres			Tubos abandonados

Tabla 22. Datos muestras lodos

TOMA DE MUESTRAS								
Soraya Benalcázar Jalkh			ING. AMBIENTAL			UDLA		
Lodos								
Código	Coordenadas	Lugar	Hora	Responsable	FECHA	MTU #	Observación	
SB7	293040 9958744	Tal A7	10am	SBJ	27/11/2014	RIG 156	Piscina sedimentos	
SB12	293040 9958744	Tal A7	10am	SBJ	27/11/2014	RIG 157	Piscina sedimentos	
SB72	0289786 9930737	Con-Sh	6:00pm	SBJ	12/03/2015		Perforación	
SB76	290776 9929253	Yur101	5:15pm	Diego Cáceres	12/03/2015		Simbra de arroz	
SB77	0290780 9929680	Acap 1	3:00pm	Diego Cáceres	17/03/2015		Relleno sanitario	
SB78	0290776 9929687	Acapari 2	3:15pm	Diego Cáceres	17/03/2015	RIG 125	Relleno sanitario	
SB79	0290774 9929682	Cho-S	3:20pm	Diego Cáceres	17/03/2015		Relleno sanitario	

ANEXO 3

 Ministerio de Electricidad y Energía Renovable	SUBSECRETARÍA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES	 Gobierno Nacional de la República del Ecuador
--	---	---

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE DETECTORES DE RADIACIÓN

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE
SUBSECRETARÍA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES
LABORATORIO DE PATRONES SECUNDARIOS

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No.: **CAL 53 - 2015**

INSTITUCIÓN:			FECHA DE CALIBRACIÓN:			FECHA DE PRÓXIMA CALIBRACIÓN:	
SCAN " ANALISIS RADIATIVOS "			2015-03-03			2016-03-02	
INSTRUMENTO:	EQUIPO DIGITAL	Marca:	CANBERRA	Modelo:	RADIAGEM 2000	Serie:	1933
DETECTOR:	GEIGER MÜLLER						

Condiciones ambientales durante la calibración:

Temperatura (°C): **22** Presión (mbar): **712** Humedad rel. (%): **58%**

Instrumentos de Referencia:

Cámara de Ionización Marca - Modelo: **N.E. - 2570C** Serie No: **470**
Electrómetro Marca - Modelo: **FARMER - 2570/1B** Serie No: **1124**
Multímetro Marca - Modelo: **FLUKE - 189** Serie No: **94200084**

Revisión de Características del instrumento:

Chequeo Mecánico: **OK**
Chequeo Audio y/o Alarma: **OK**

Condiciones de pruebas realizadas al instrumento:

Substracción de Background: **SI**
Se determinó Linealidad: **SI**
Fuentes de Calibración: **OB6**
Atenuadores (mm): **22.0**
Rango en Escala Normal (X1): **(0 - 1000) (uSv/h)**

DATOS DE CALIBRACIÓN PARA TASAS DE DOSIS POR RADIACIÓN GAMA CON CESIO 137

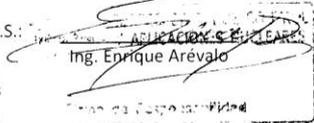
ESCALA	FUENTE DE REFERENCIA	DOSIS DE REFERENCIA	LECTURA PROMEDIO DEL INSTRUMENTO	FACTOR DEL INSTRUMENTO
(0 - 1000) uSv/h	OB6	491 uSv/h	499 uSv/h	0,98

NOTA: **LAS MEDICIONES REALIZADAS CON EL EQUIPO DEBEN SER MULTIPLICADAS POR EL FACTOR INDICADO PARA TENER UN VALOR MÁS EXACTO**

El Laboratorio de Patrones Secundarios (LPS) del Ecuador, certifica que el instrumento ha sido calibrado bajo las normas y procedimientos establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Calibrado por: **E.AREVALO/W.PAVÓN**
Fecha de Emisión: **2015-03-10**

Responsable del L.P.S.:


Ing. Enrique Arevalo

ANEXO 4

Actividad muestras de lodos por HPGe

Tabla 23. Resultado muestra SB12

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB12	K^{40}	8.5160E+02	
	Ac^{228}	4.0570E+01	
	Bi^{214}	3.0554E+01	
	Pb^{214}	3.1348E+01	
	Pb^{212}	3.0440E+01	
	Tl^{208}	1.0871E01	
			9.956E+02

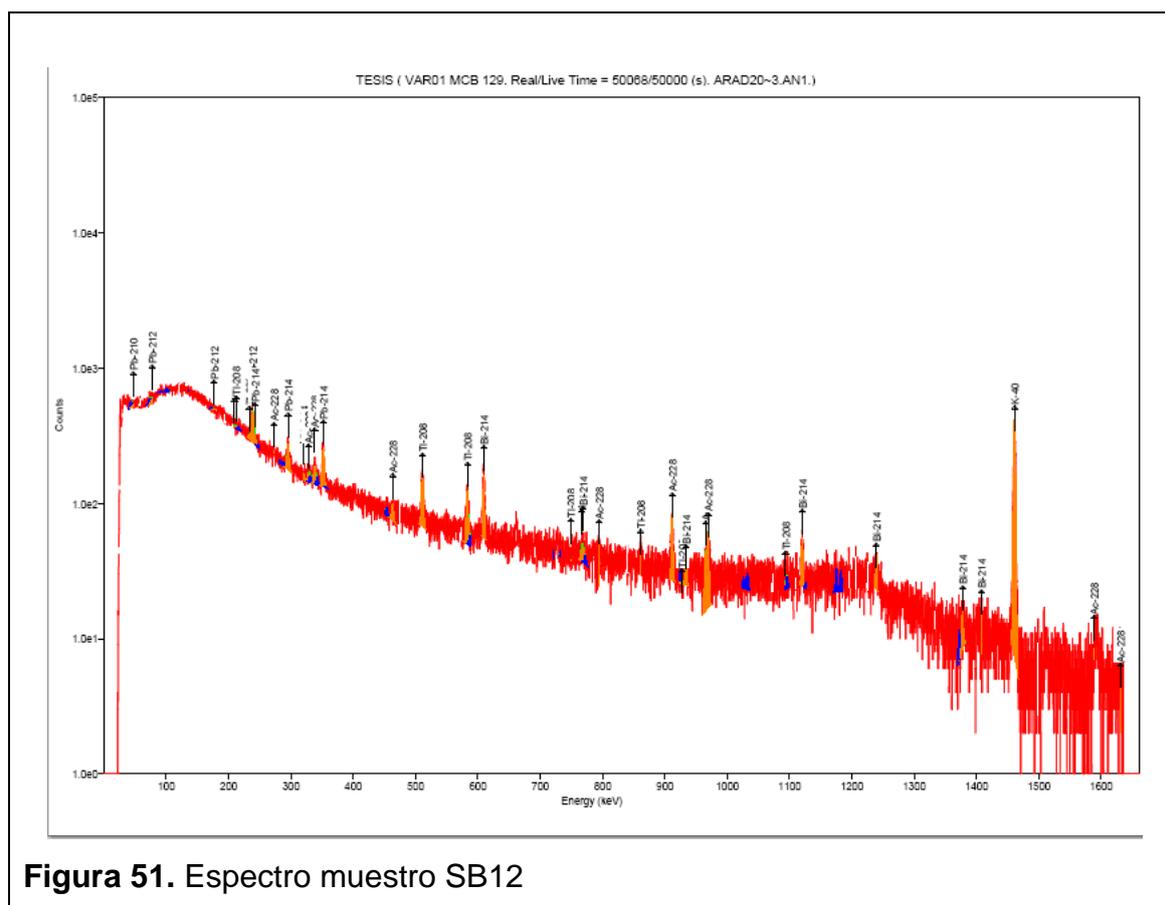


Figura 51. Espectro muestra SB12

Tabla 25. Resultado muestra SB72

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB72	K^{40}	8.9473E+02	
	Bi^{214}	4.4284E+01	
	Pb^{214}	4.4764E+01	
	Pb^{212}	4.2893E+01	
	Tl^{208}	1.4210E+01	
	Ac^{228}	4.3390E+01	
	Ra^{226}	1.1022E+02	
			1.194E+03

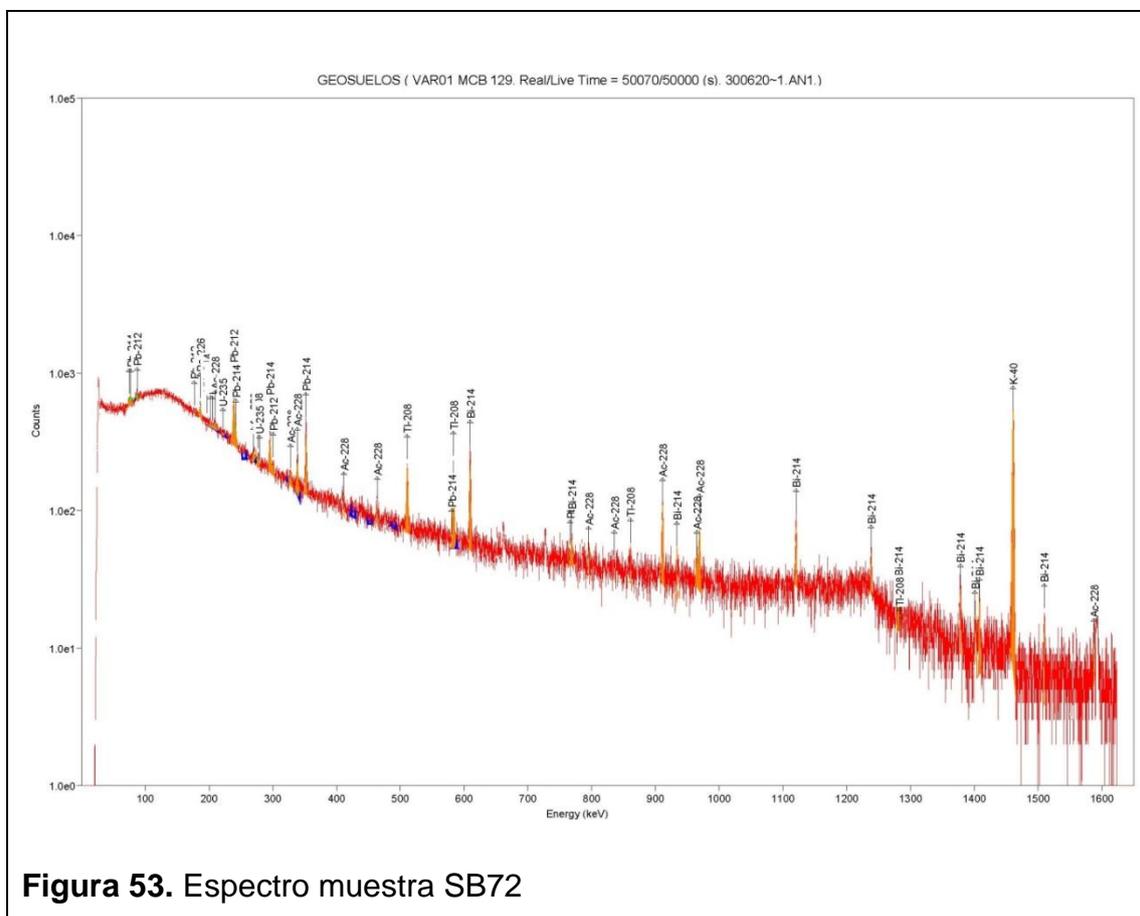


Figura 53. Espectro muestra SB72

Tabla 27. Resultados muestra SB77

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB77	K^{40}	9.0876E+02	
	Bi^{214}	4.1800E+01	
	Pb^{214}	3.4311E+01	
	Pb^{212}	3.6536E+01	
	Tl^{208}	1.2865E+0	
	Ac^{228}	4.3144E+01	
			1.077E+03

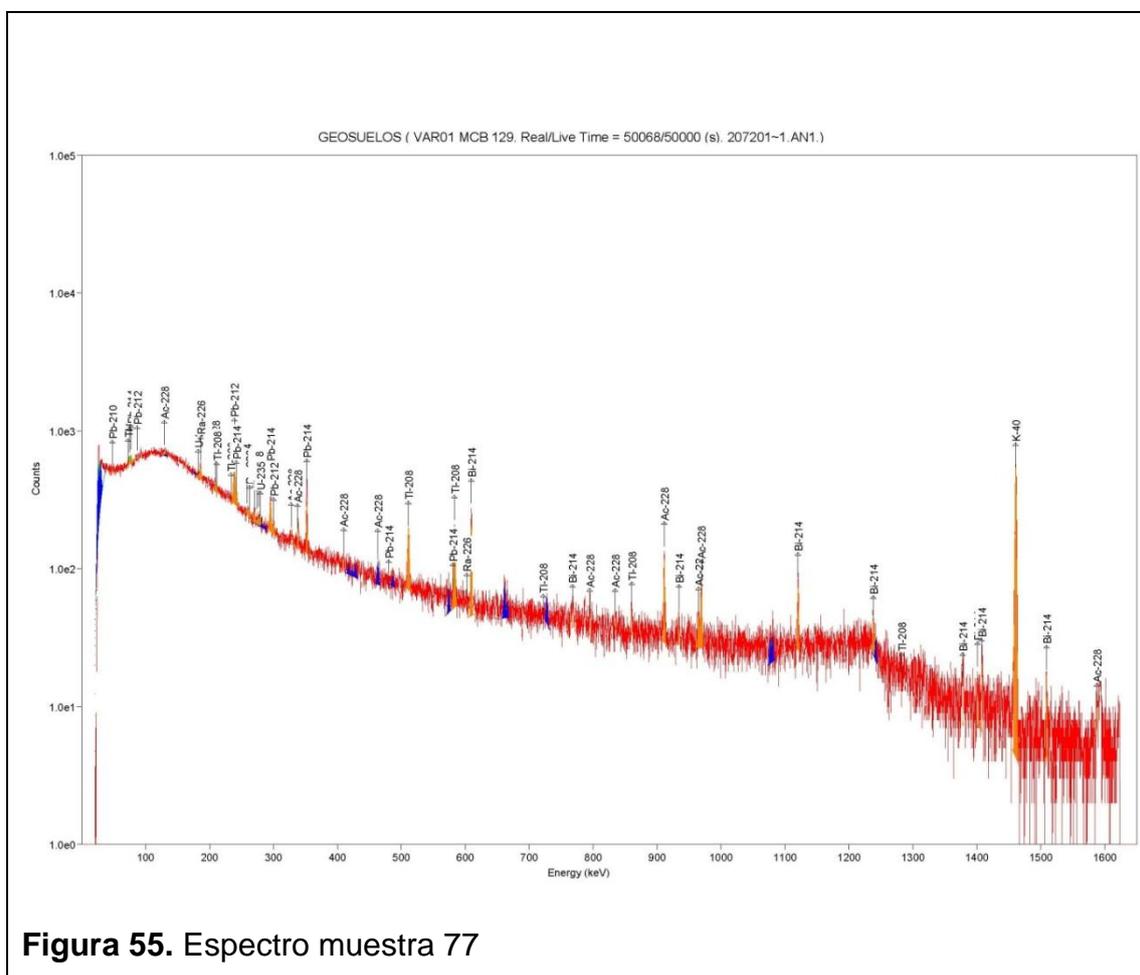


Figura 55. Espectro muestra 77

Tabla 28. Resultados muestra SB78

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB78	K^{40}	8.5290E+02	
	Bi^{214}	4.2543E+01	
	Pb^{214}	3.1515E+01	
	Pb^{212}	3.5221E+01	
	Tl^{208}	1.2026E+01	
	Ac^{228}	4.4402E+01	
	Bi^{207}	6.7997E-01	
	U^{235}	1.1713E+01	
			1.031E+03

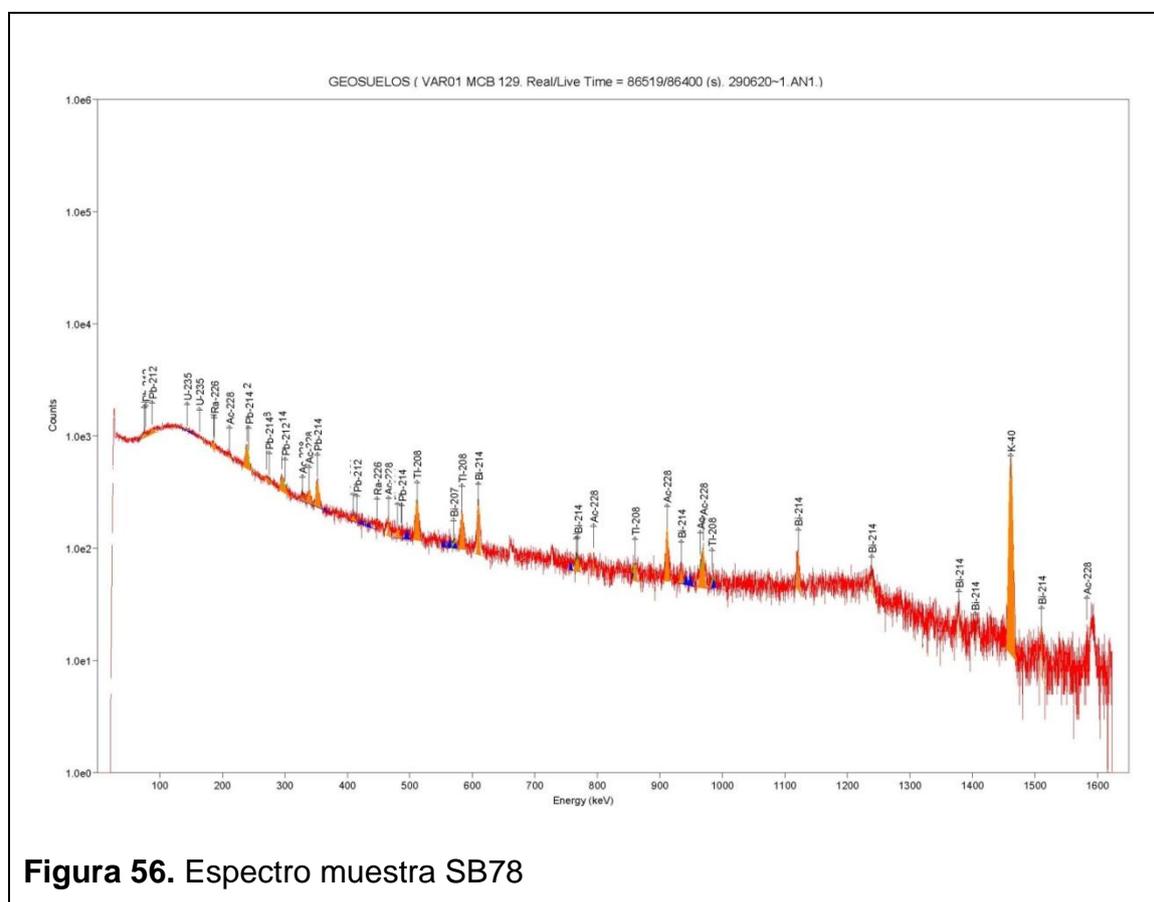


Figura 56. Espectro muestra SB78

Tabla 30. Resultados muestra SB3

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/L	Actividad total Bq/L
SB3	K^{40}	7.4963E+02	
	Ac^{228}	1.9324E+01	
	Bi^{214}	1.9916E+01	
	Pb^{214}	1.7066E+01	
	Pb^{212}	1.0482E+01	
	Tl^{208}	5.3382E+00	
			8.218E+02

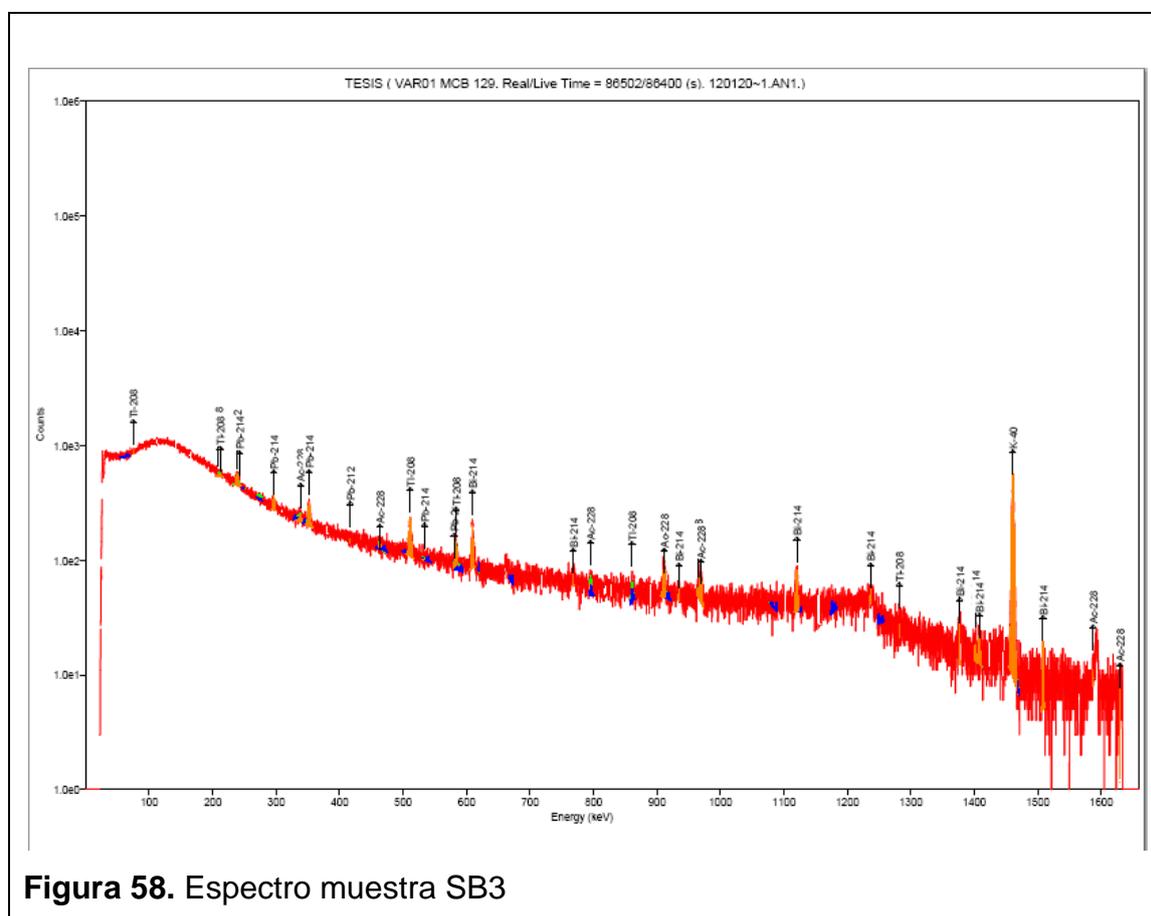


Figura 58. Espectro muestra SB3

Tabla 35. Resultados muestra SB18

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/L	Actividad total Bq/L
SB18	Bi ²¹⁴	5.8371E+01	
	Pb ²¹⁴	5.5140E+01	
	Pb ²¹²	7.4544E+01	
	Tl ²⁰⁸	2.9551E+01	
	Ra ²²⁶	2.9917E+01	
			6.661E+02

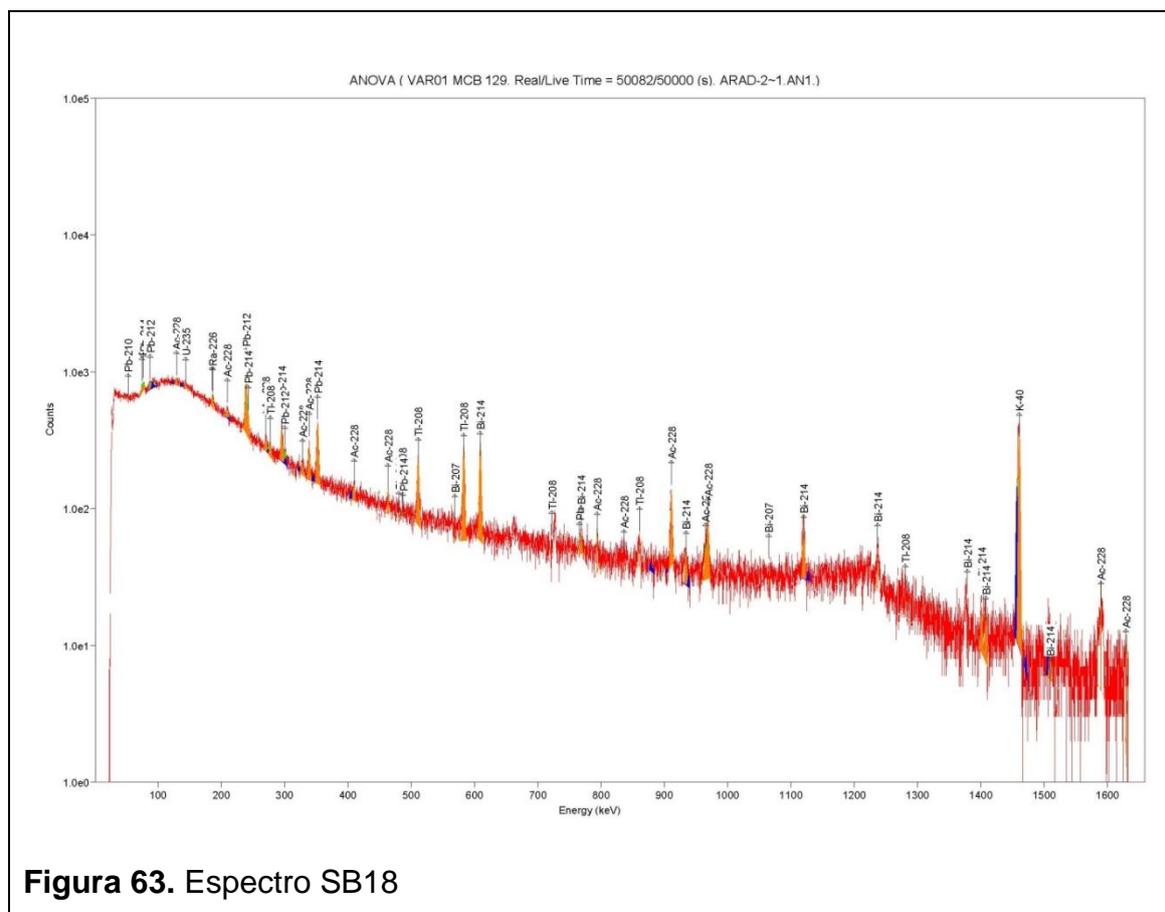


Tabla 36. Resultados muestra SB22

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/L	Actividad total Bq/L
SB22	K^{40}	2.1963E+02	
	Ac^{228}	1.4529E+01	
	Bi^{214}	1.6646E+01	
	Pb^{214}	1.6269E+01	
	Pb^{212}	4.9268E+00	
	Tl^{208}	3.1390E+00	
	Ra^{226}	3.9095E+02	
			6.661E+02

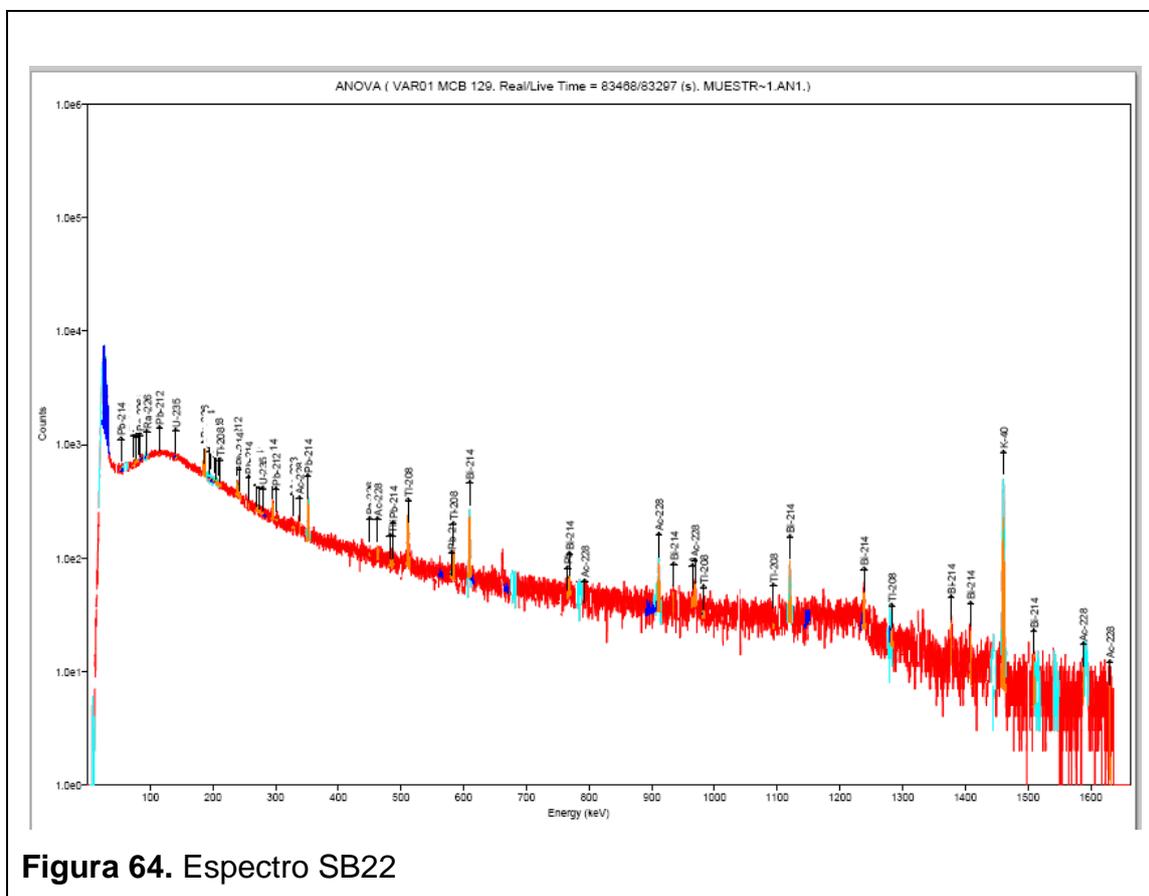


Tabla 37. Resultados muestra SB21

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/L	Actividad total Bq/L
SB21	K^{40}	4.0300E+02	
	Bi^{214}	3.4910E+01	
	Pb^{214}	2.7968E+01	
	Tl^{208}	1.0378E+01	
	Bi^{207}	1.3290E+00	
	Pb^{212}	2.6979E+01	
	Pb^{210}	1.1592E+03	
			1.664E+03

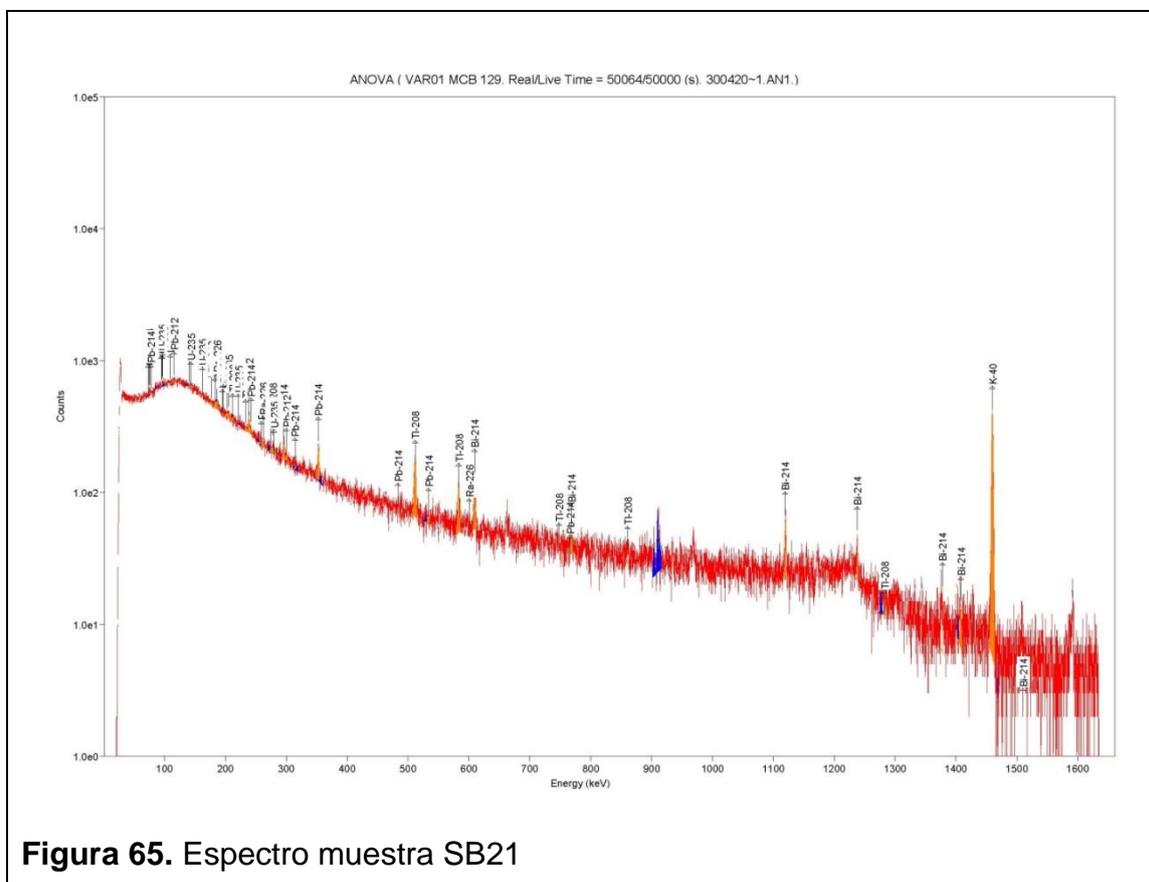
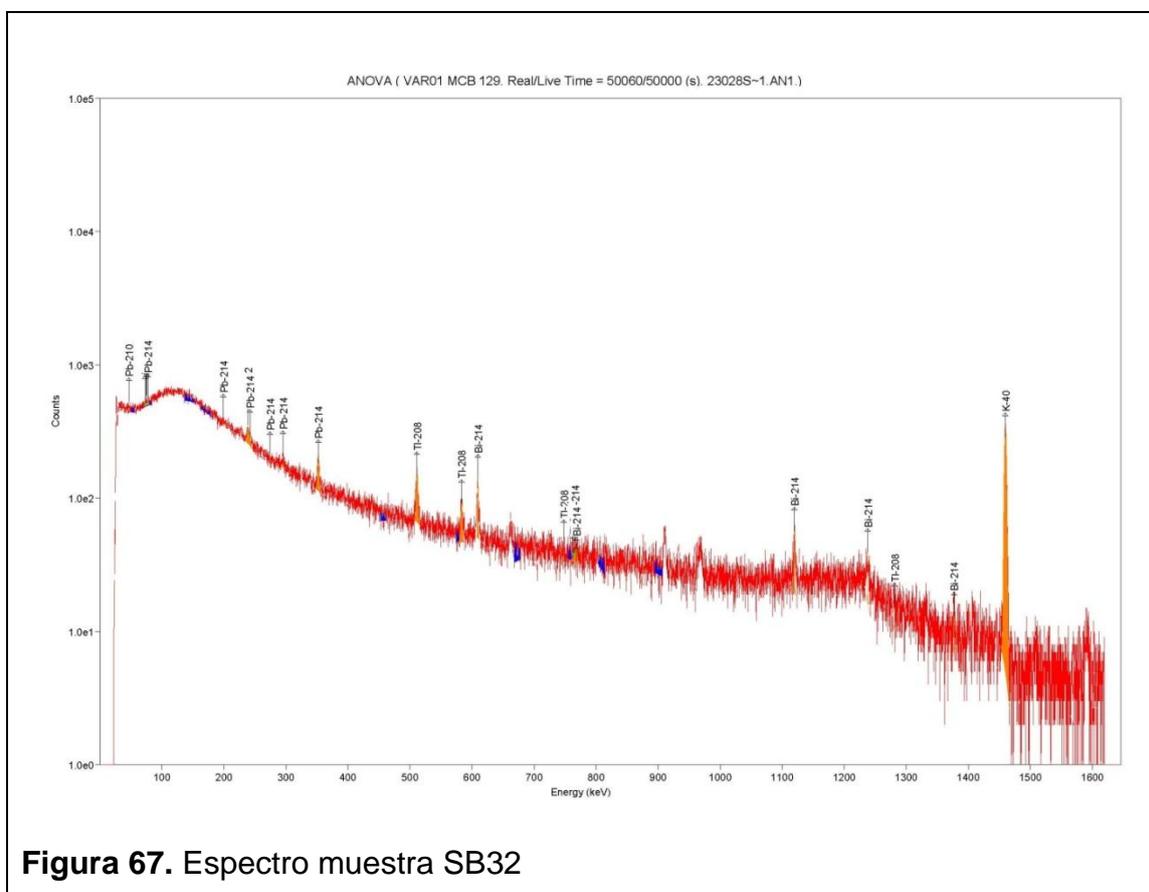


Tabla 39. Resultados muestra SB32

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/L	Actividad total Bq/L
SB32	K^{40}	7.6355E+02	
	Bi^{214}	2.0231E+01	
	Pb^{214}	1.6704E+01	
	Pb^{212}	8.8473E+00	
	Tl^{208}	5.3683E+00	
	Pb^{210}	2.1765E+03	
			2.991E+03



Radiactividad en incrustaciones por HPGe

Tabla 40. Resultados muestra SB1

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB1	K^{40}	8.5418E+02	
	Ac^{228}	3.8087E+01	
	Bi^{214}	2.9621E+01	
	Pb^{214}	1.6556E+01	
	Pb^{212}	1.1440E+01	
	Tl^{208}	8.8328E+00	
			9.663E+02

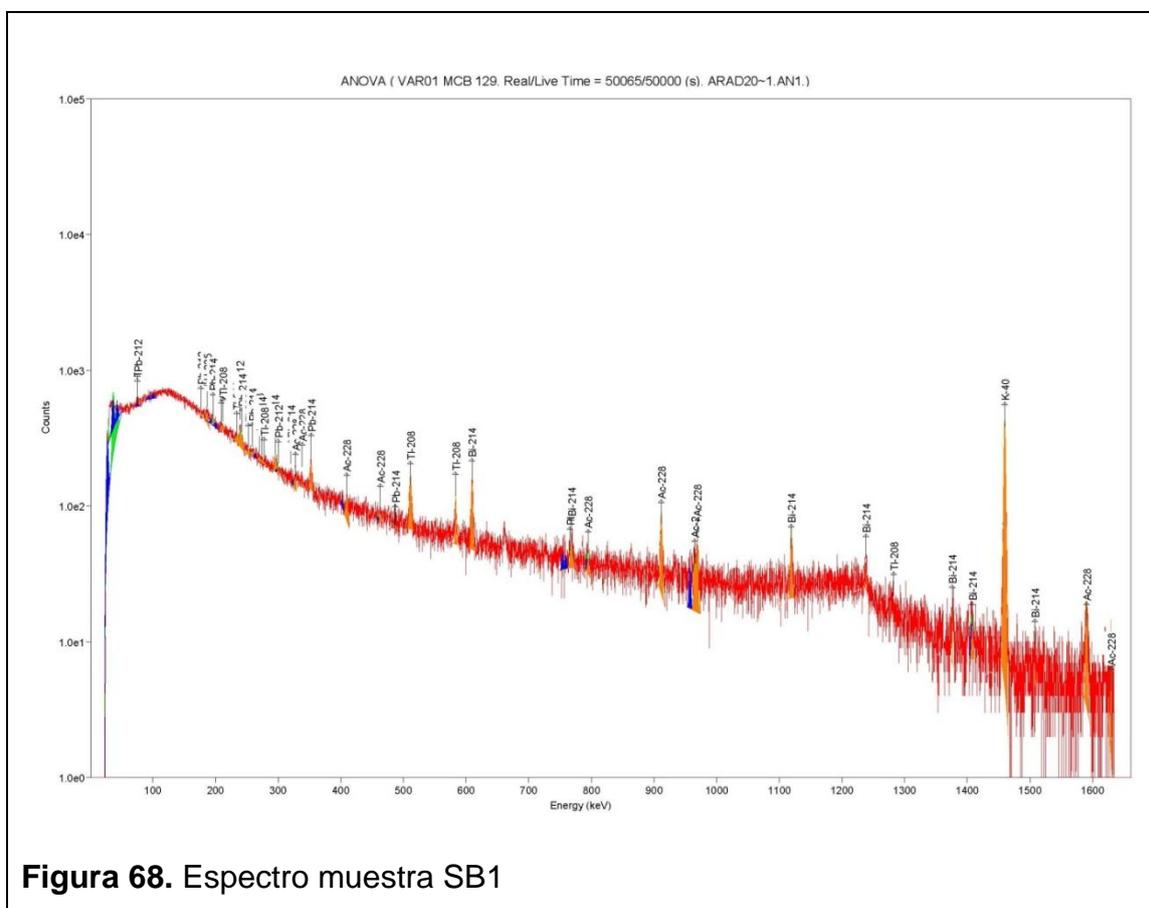


Tabla 41. Resultados muestra SB4

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB4	K^{40}	8.2366E+02	
	Ac^{228}	3.8427E+01	
	Bi^{214}	1.4703E+01	
	Pb^{214}	1.9737E+01	
	Pb^{212}	9.6437E+00	
	Tl^{208}	4.7731E+00	
			9.109E+02

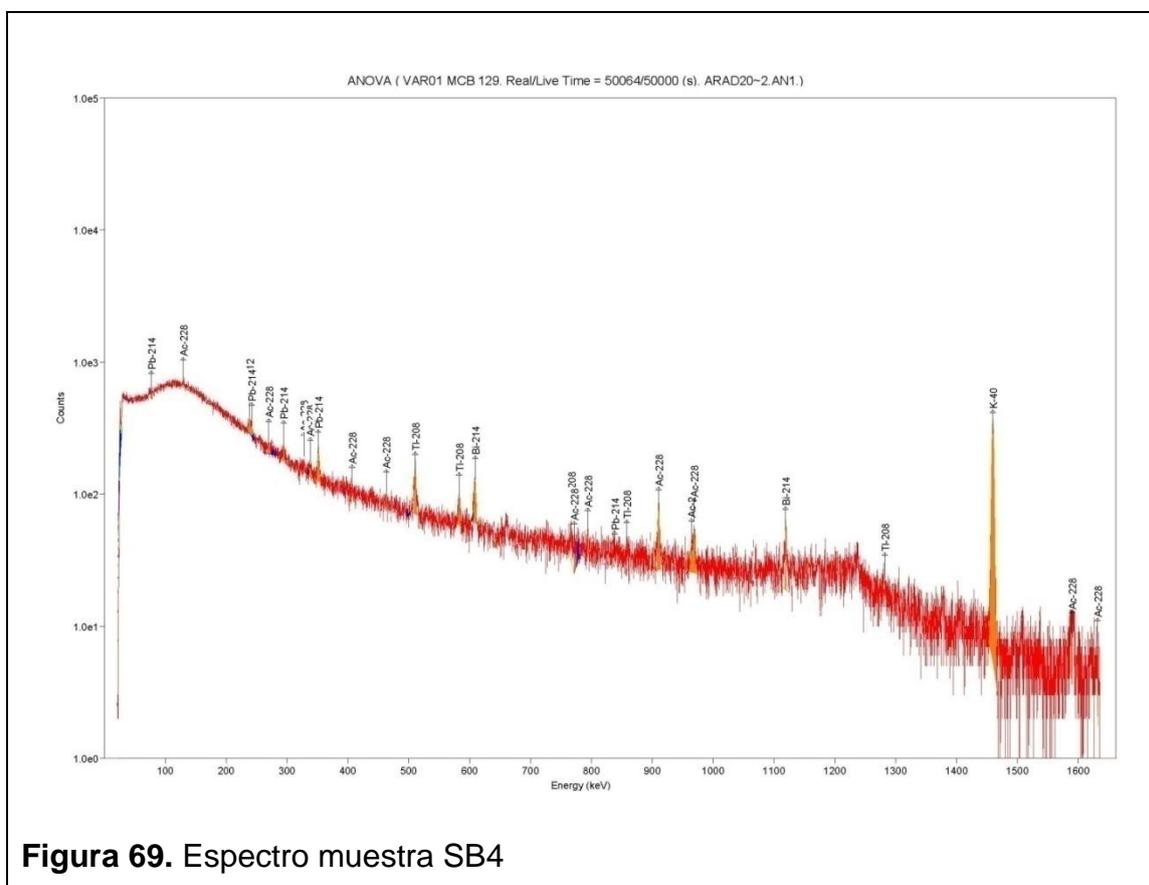


Figura 69. Espectro muestra SB4

Tabla 43. Resultado muestra SB14

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB14	K^{40}	8.3129E+02	
	U^{235}	3.7390E+00	
	Bi^{214}	3.4368E+01	
	Pb^{214}	1.1092E+01	
	Pb^{212}	1.5723E+01	
	Tl^{208}	1.0846E+01	
	Ac^{228}	4.3073E+01	8.552E+02

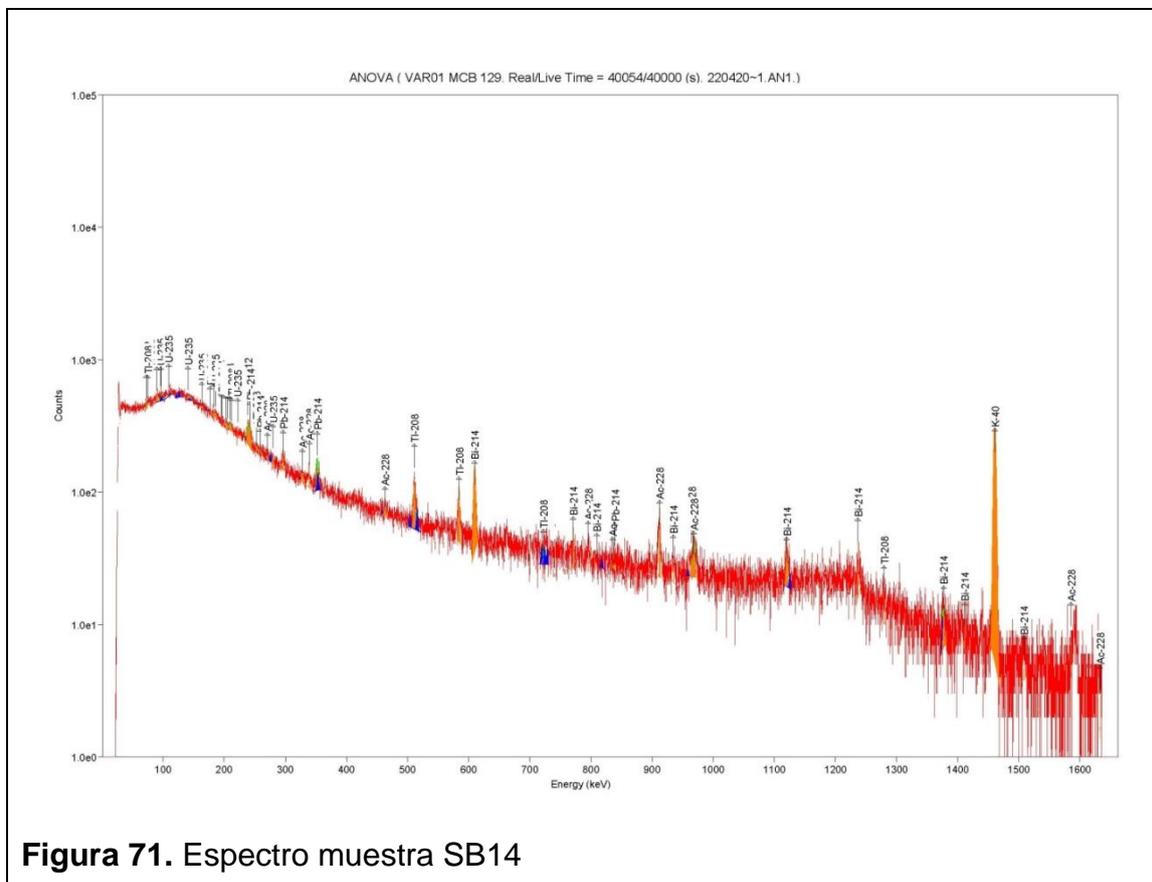


Figura 71. Espectro muestra SB14

Tabla 44. Resultados muestra SB32

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB32	K^{40}	7.6823E+02	
	Ac^{228}	2.4736E+01	
	Bi^{214}	2.4715E+01	
	Pb^{214}	1.8267E+01	
	Pb^{212}	1.2794E+01	
	Tl^{208}	6.4883E+00	
			8.552E+02

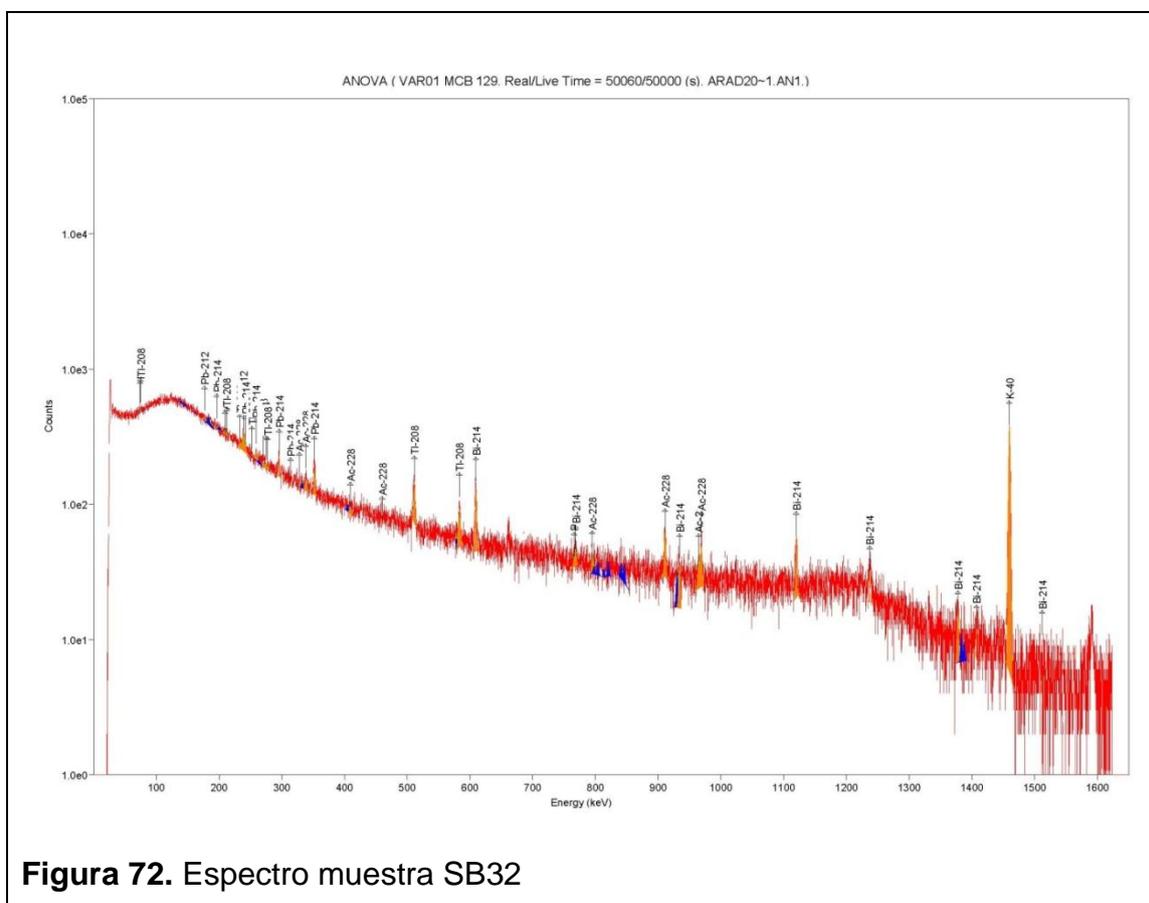


Figura 72. Espectro muestra SB32

Tabla 45. Resultados muestra SB63

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB63	K^{40}	7.8162E+02	
	Ac^{228}	2.3368E+01	
	Pb^{214}	2.5659E+01	
	Pb^{212}	1.5312E+01	
	Pb^{210}	1.2158E+03	
	Tl^{208}	8.9737E+00	
			2.071E+03

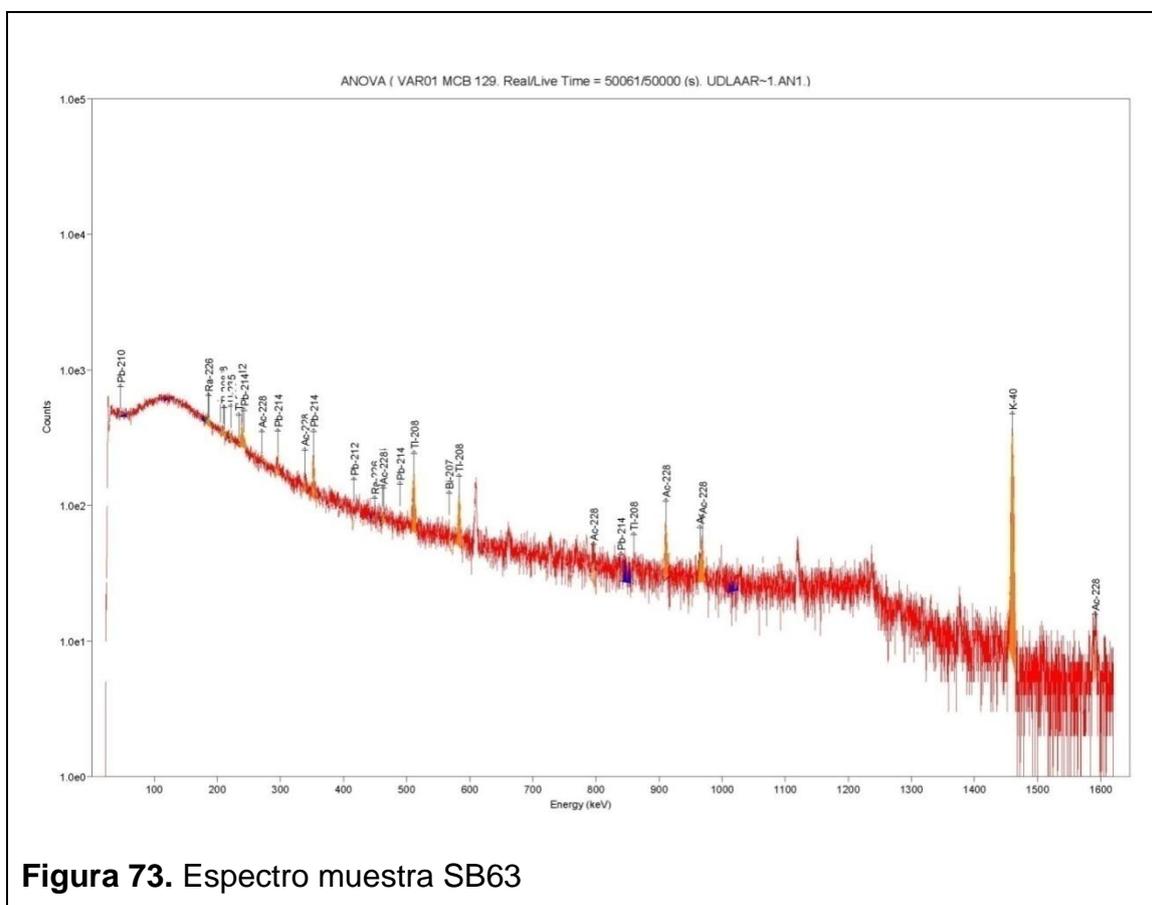
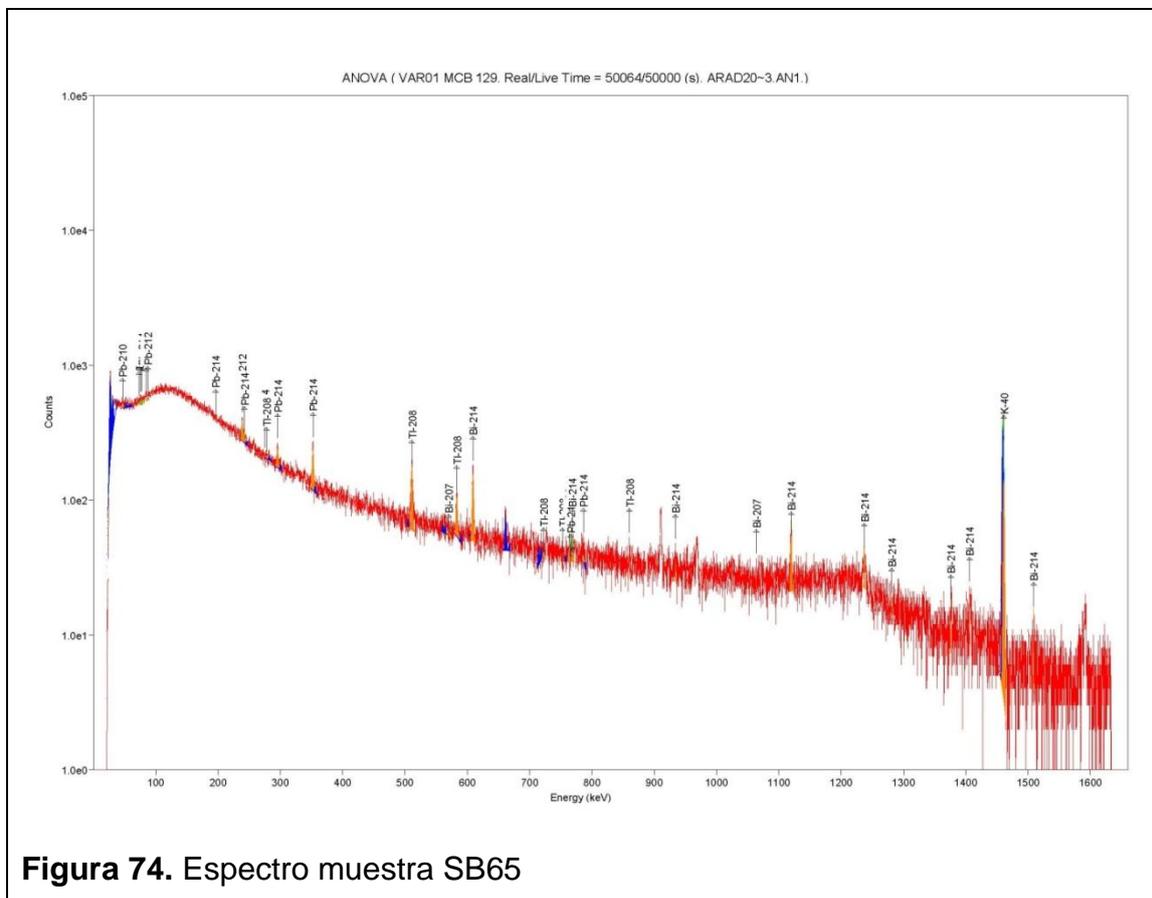


Tabla 46. Resultados muestra SB65

Código de muestra	Radioisótopos	Actividad Bq/Kg	Actividad total Bq/Kg
SB65	K^{40}	2.4299E+02	
	Bi^{214}	2.2857E+01	
	Pb^{214}	2.1347E+01	
	Pb^{212}	1.2458E+01	
	Pb^{210}	3.0672E+03	
	Bi^{207}	1.0006E+00	
	Tl^{208}	6.0436E+00	
			3.374E+03



ANEXO 5

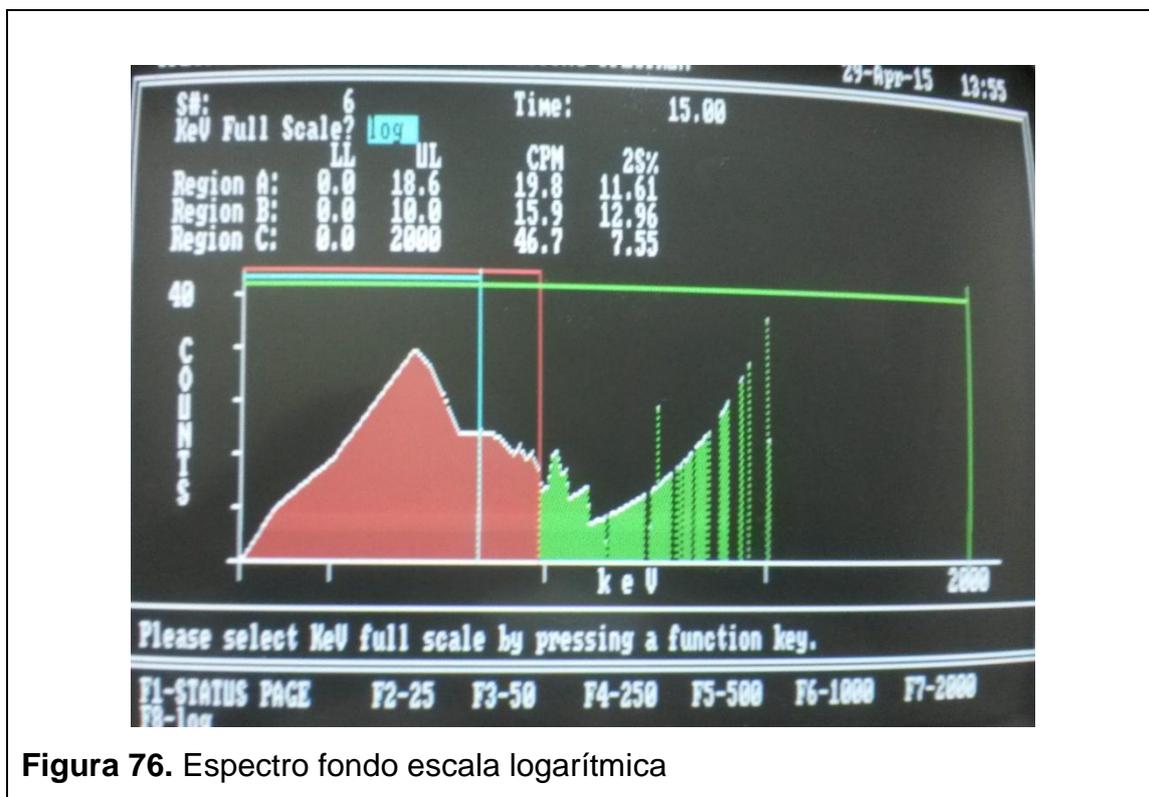


Figura 76. Espectro fondo escala logarítmica

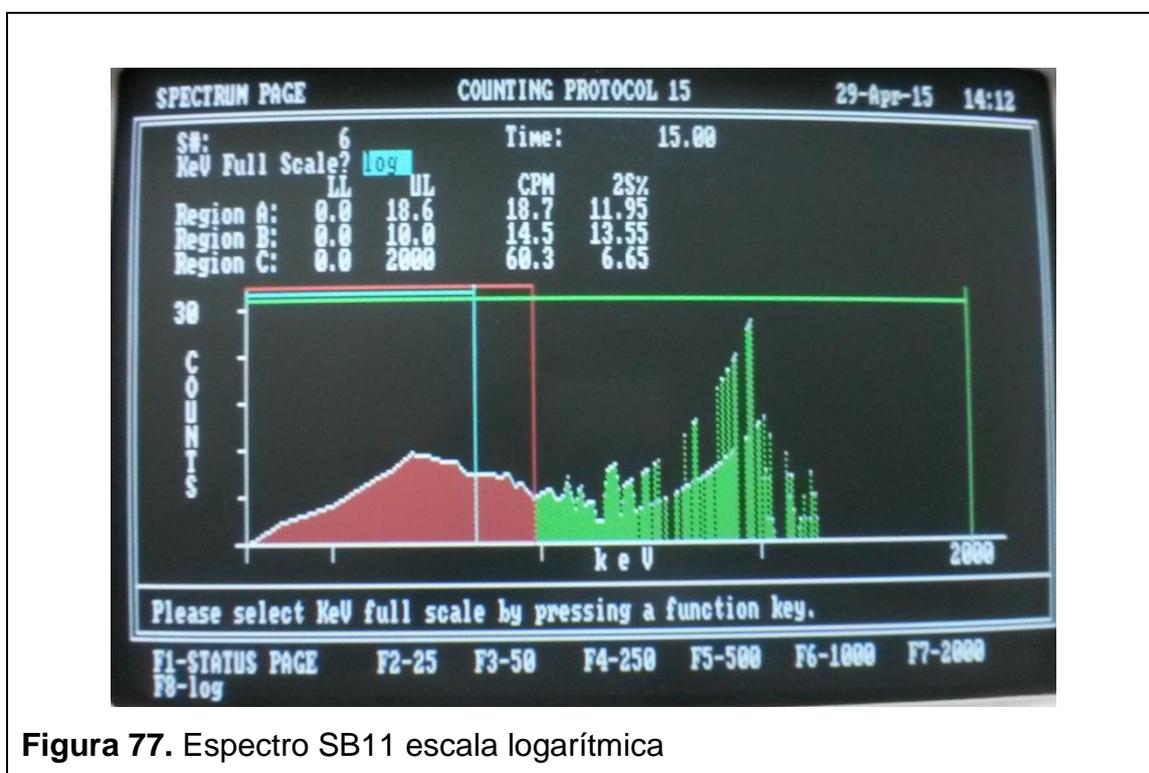


Figura 77. Espectro SB11 escala logarítmica



Figura 78. Espectro SB14 escala logarítmica

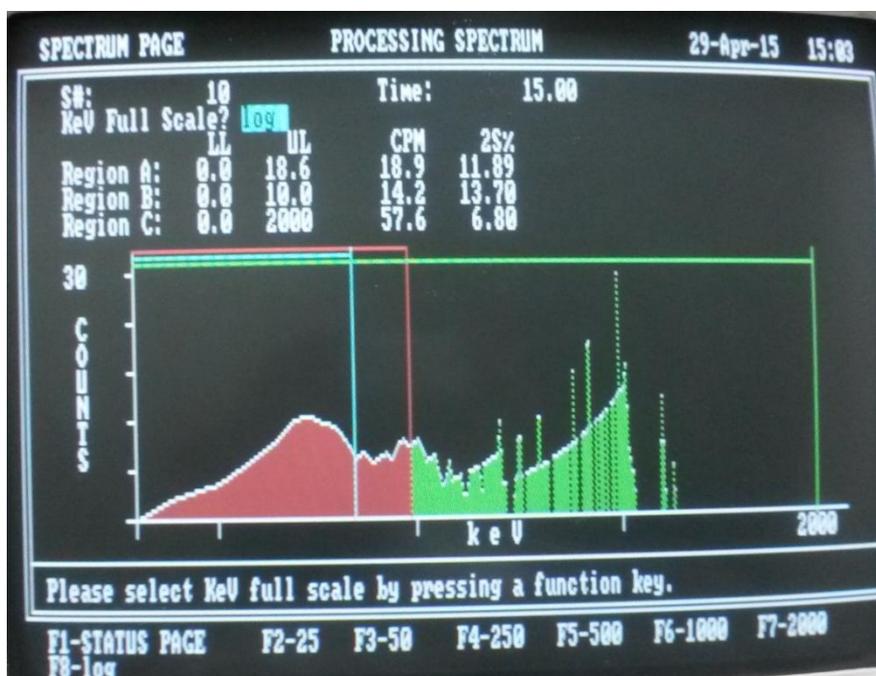


Figura 79. Espectro SB15 escala logarítmica

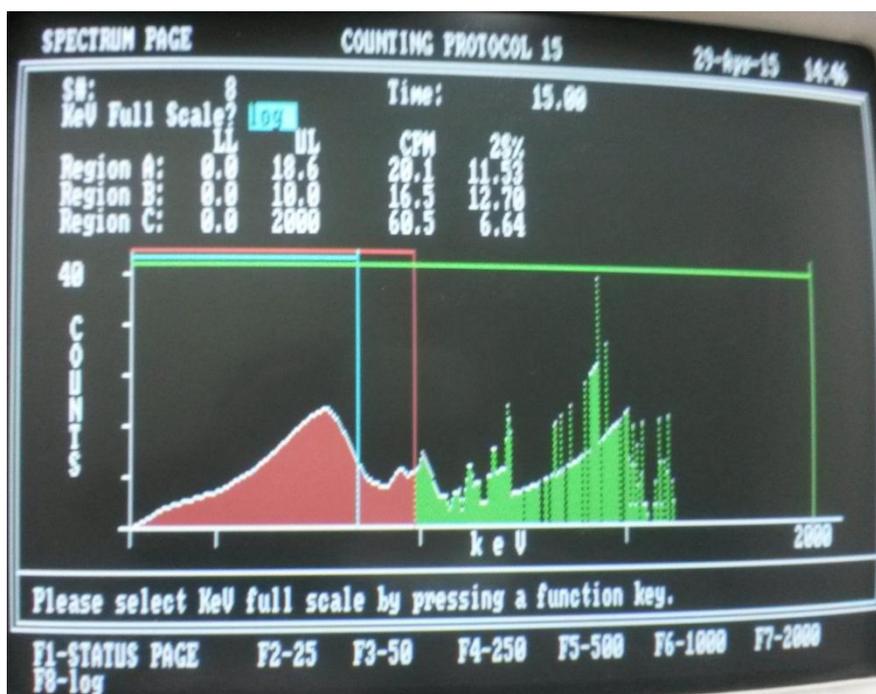


Figura 80. Espectro SB15 cortada escala logarítmica

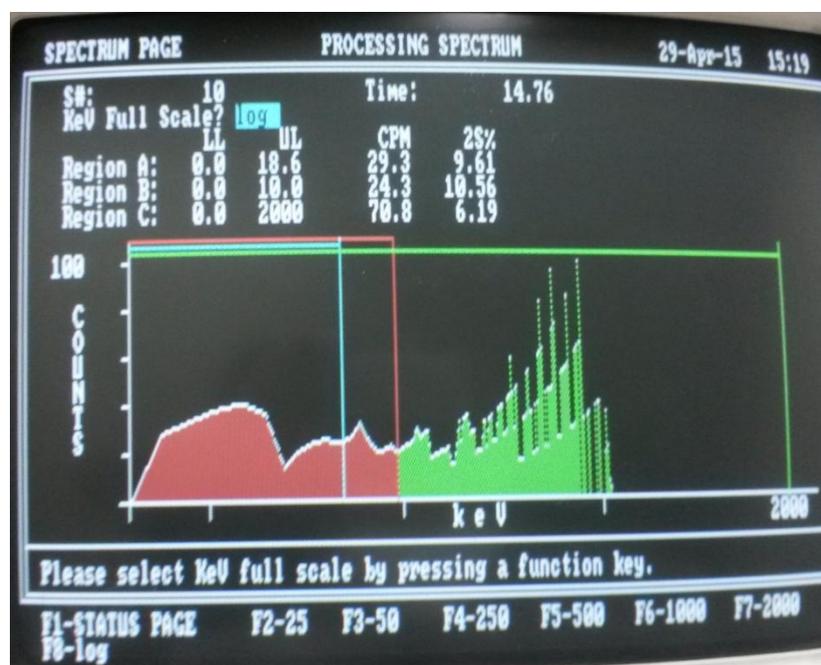


Figura 81. Espectro SB20 escala logarítmica



Figura 82. Espectro SB21 escala logarítmica

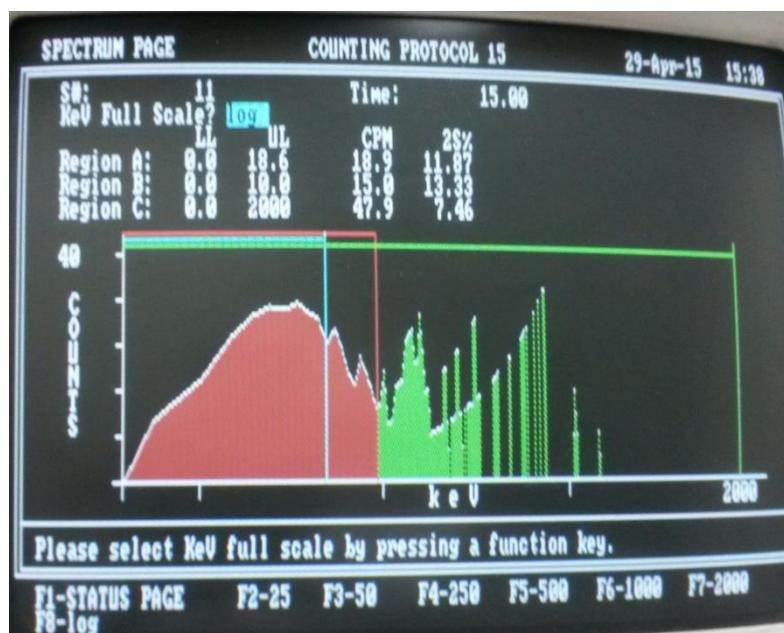


Figura 83. Espectro SB24 escala logarítmica

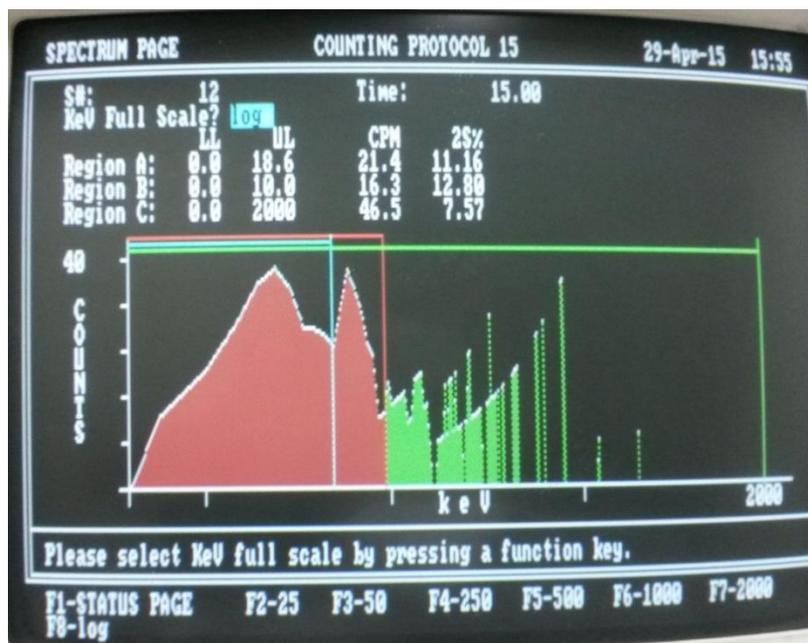


Figura 84. Espectro SB26 escala logarítmica

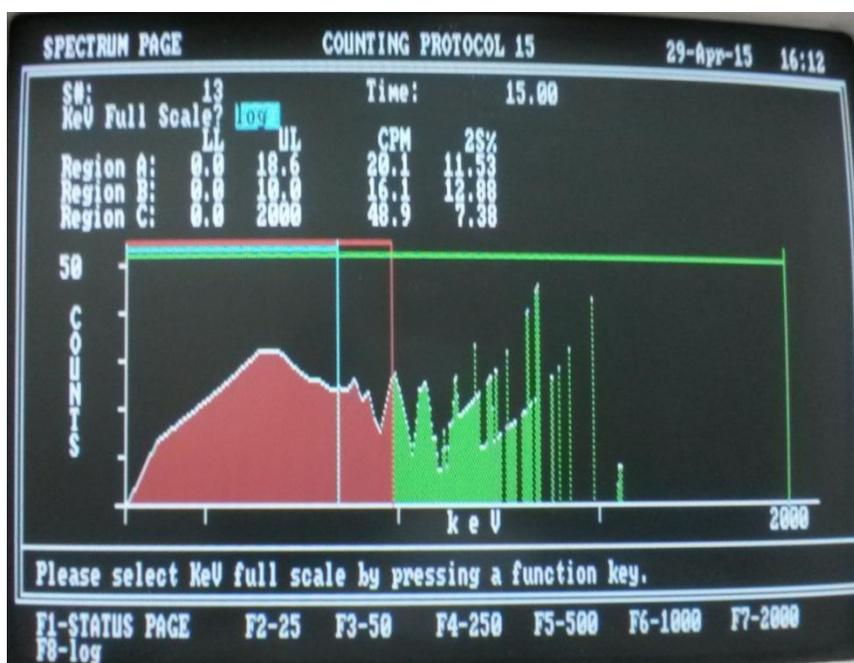


Figura 85. Espectro SB27 escala logarítmica

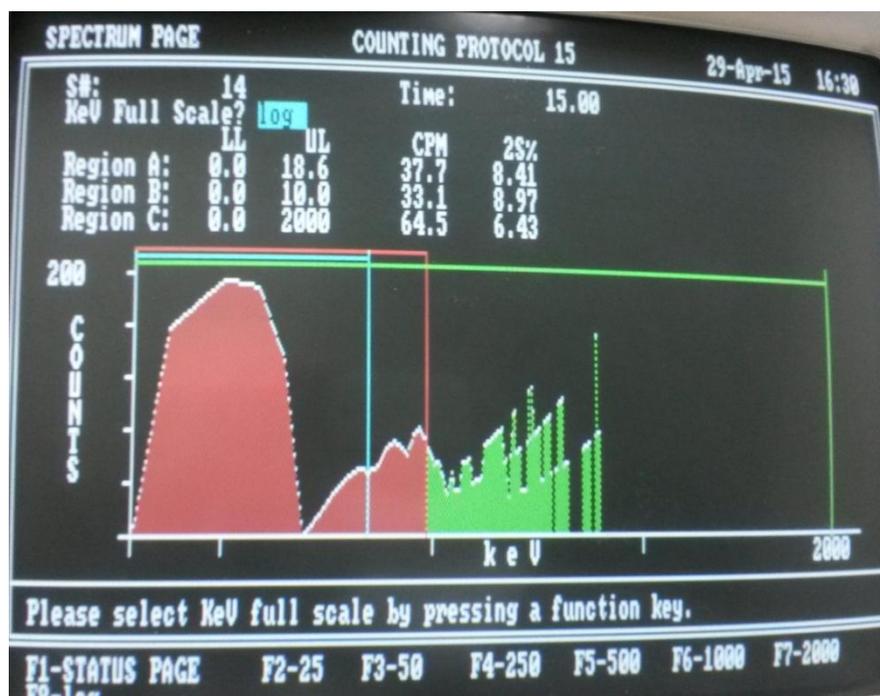


Figura 86. Espectro SB28 escala logarítmica

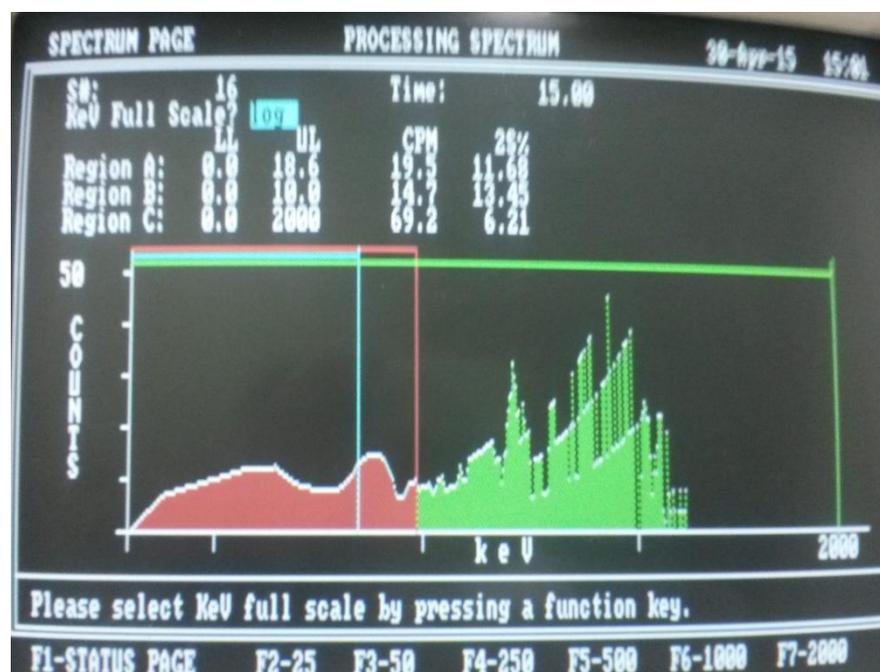


Figura 87. Espectro SB29 escala logarítmica



Figura 88. Espectro SB32 escala logarítmica



Figura 89. Espectro SB34 escala logarítmica

ANEXO 6

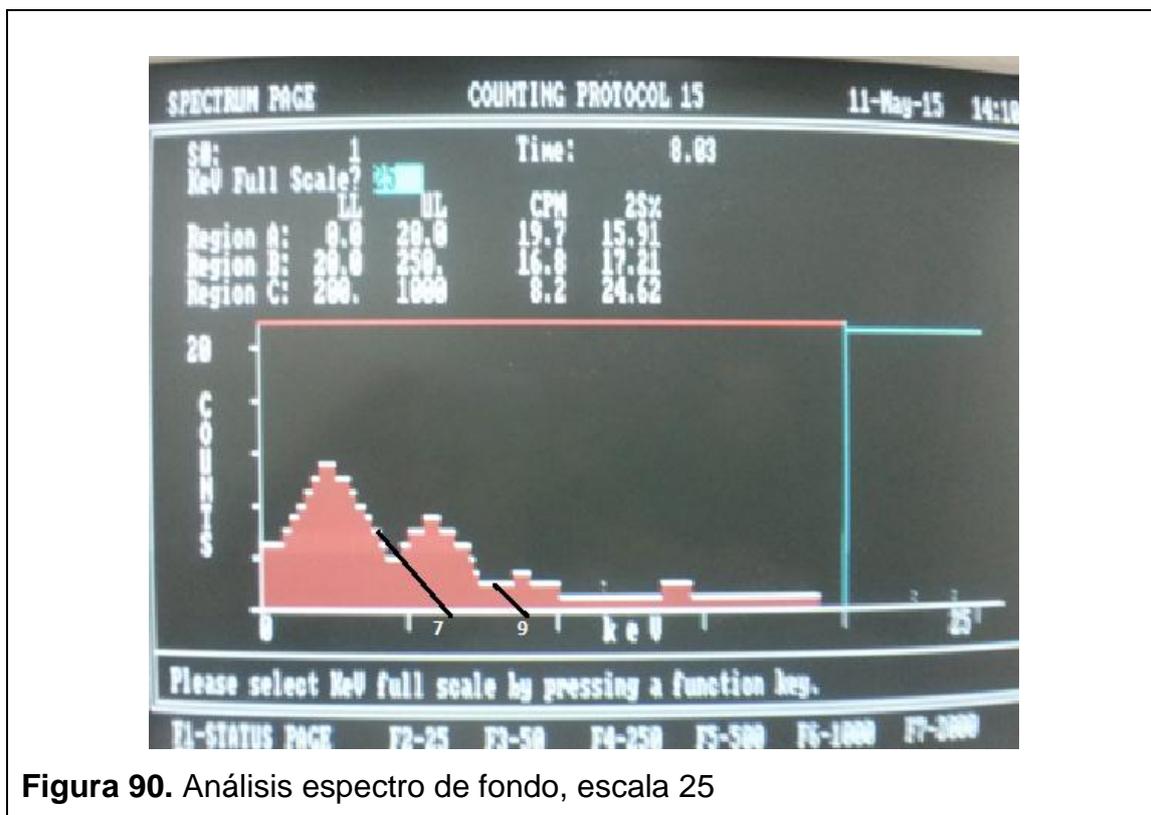


Figura 90. Análisis espectro de fondo, escala 25



Figura 91. Análisis espectro de fondo, escala 250

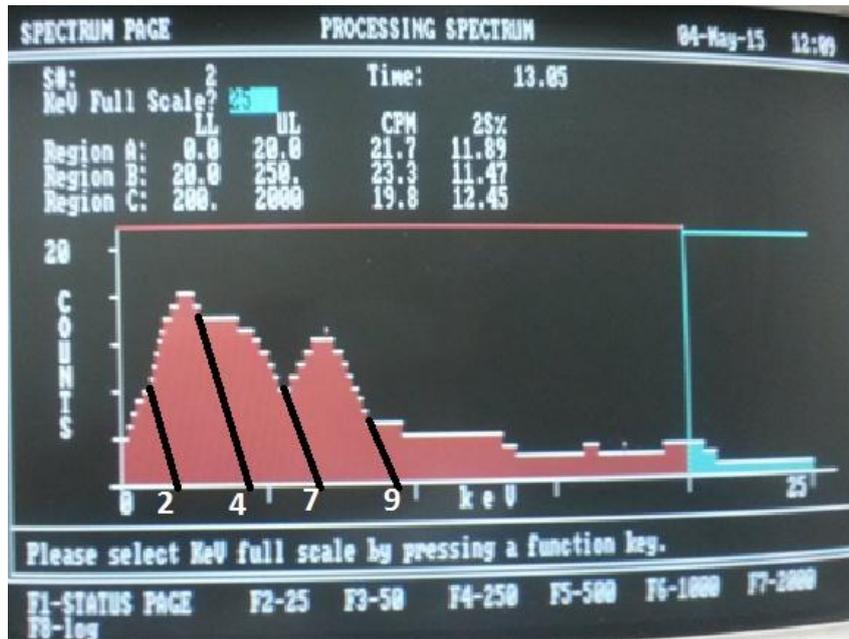


Figura 92. Análisis espectro SB11, escala 25

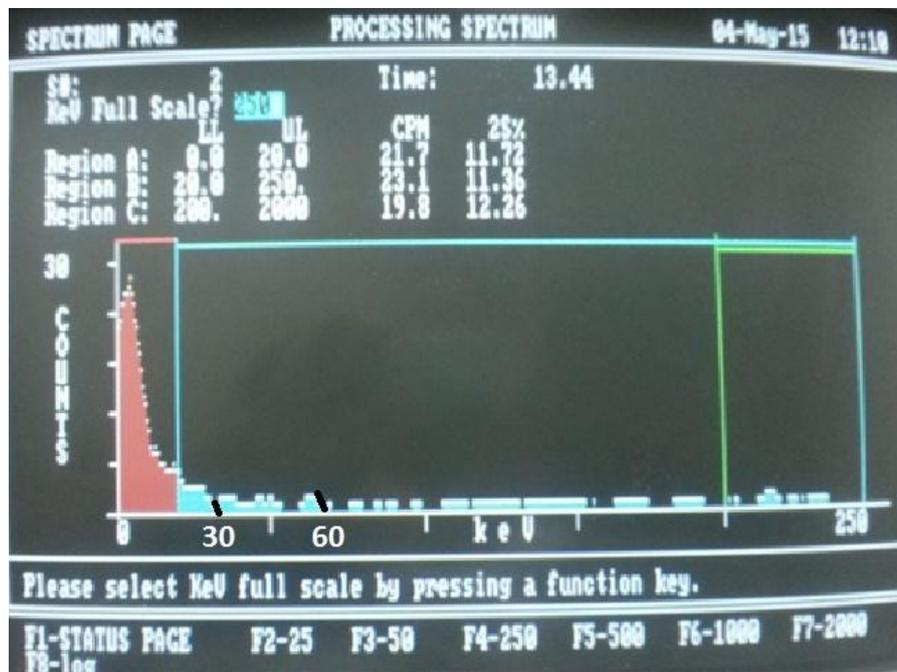


Figura 93. Análisis espectro SB11, escala 250

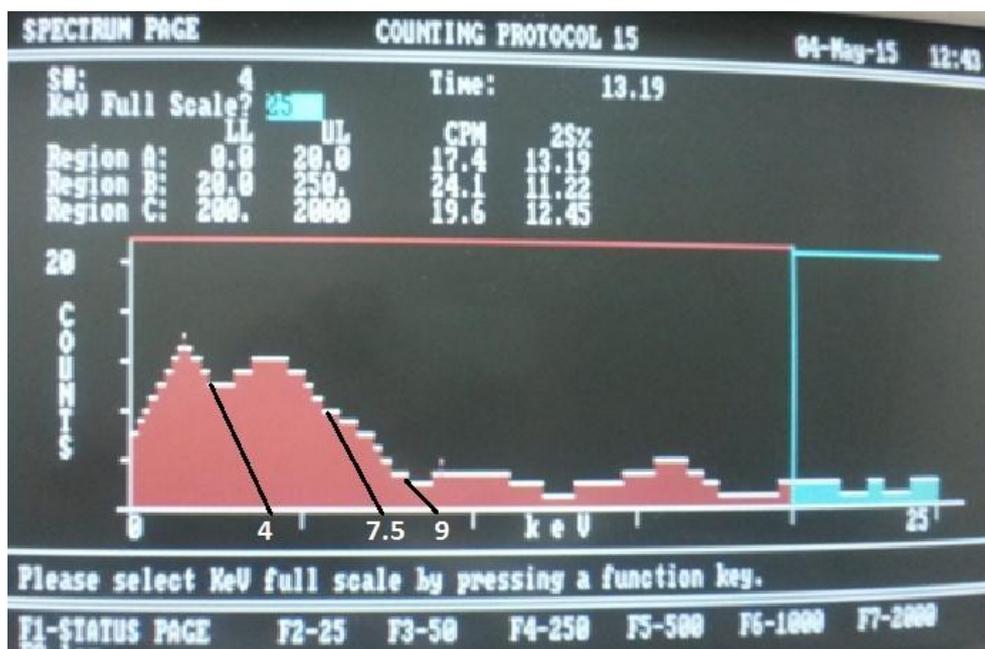


Figura 94. Análisis espectro SB15, escala 25

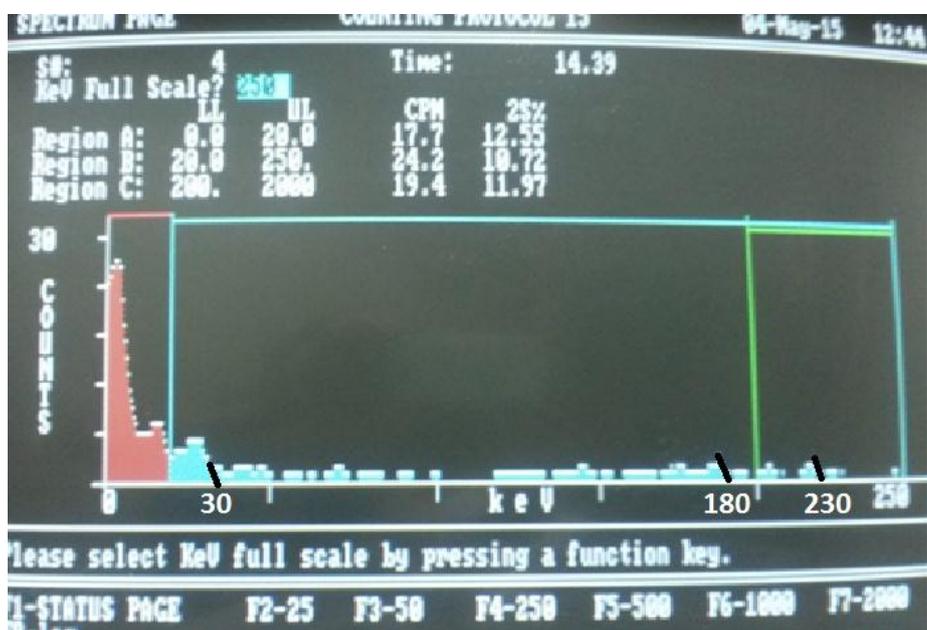


Figura 95. Análisis espectro SB15, escala 125



Figura 96. Análisis espectro SB15 cortada, escala 25

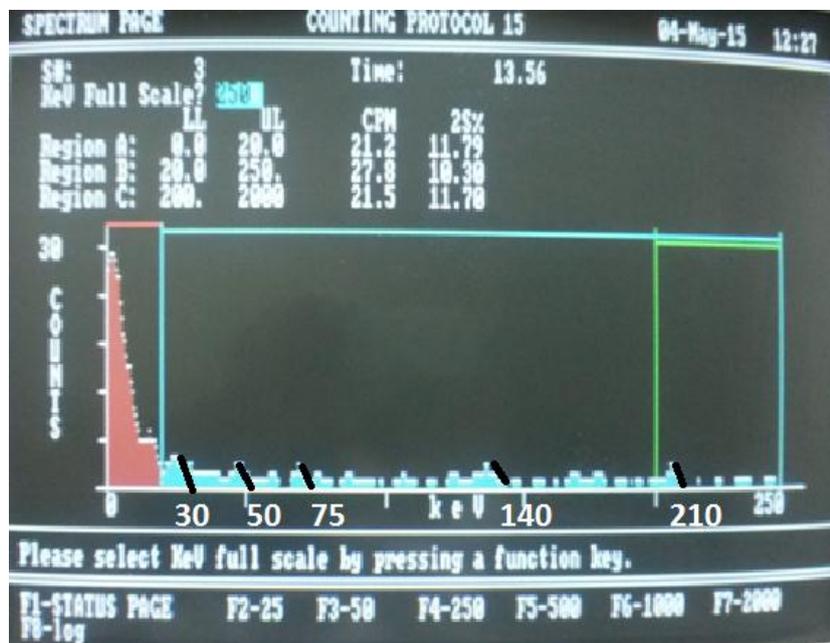


Figura 97. Análisis espectro SB15 cortada, escala 125

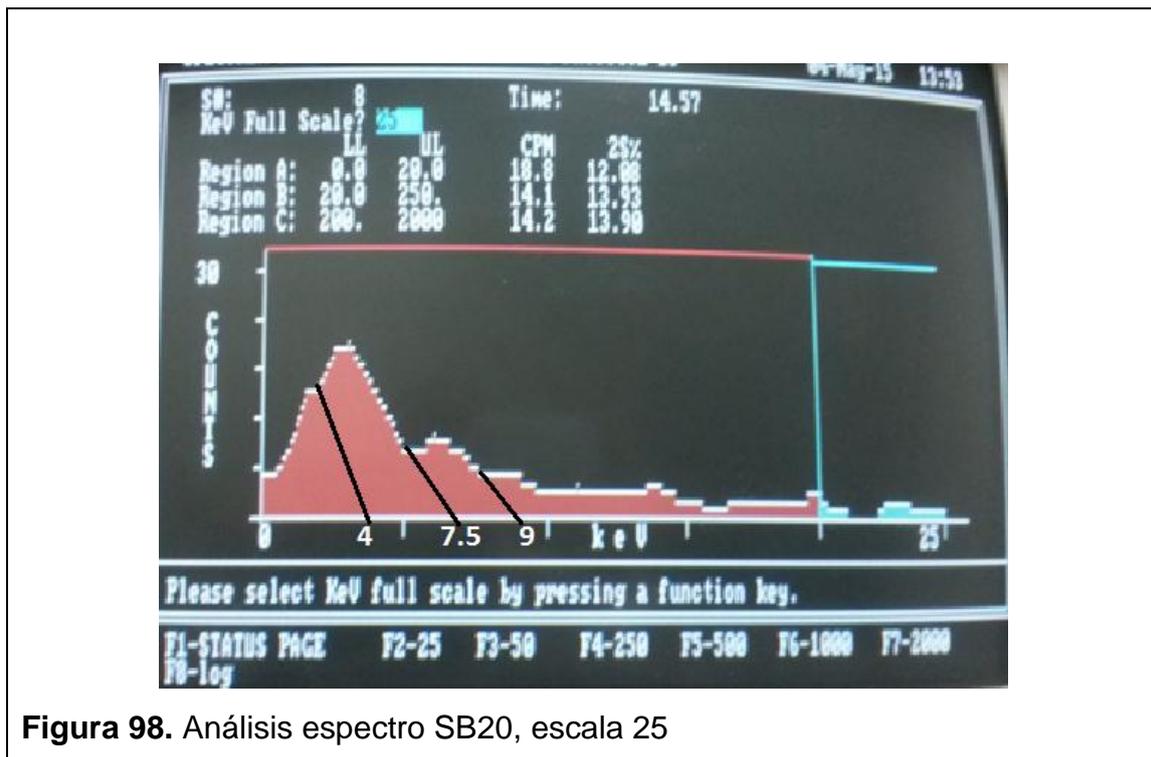


Figura 98. Análisis espectro SB20, escala 25



Figura 99. Análisis espectro SB20, escala 125

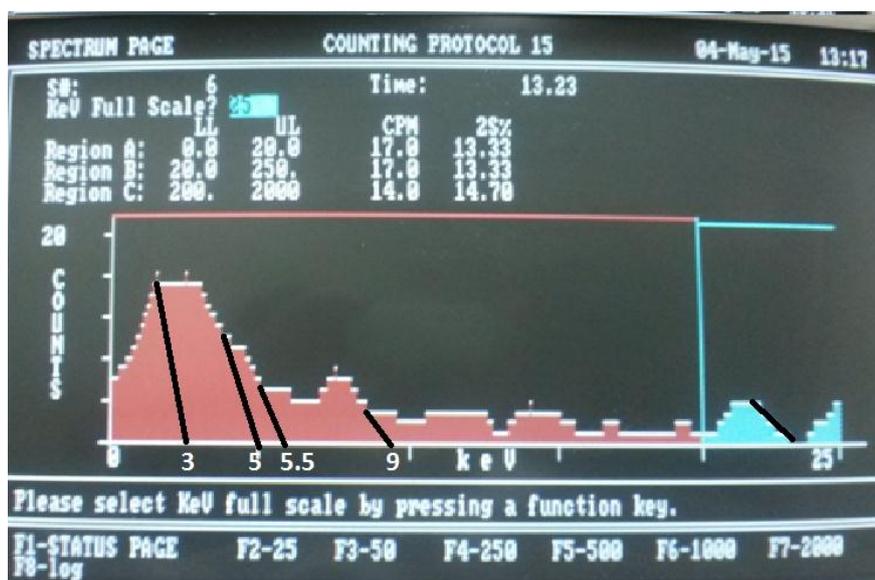


Figura 100. Análisis espectro SB24, escala 25

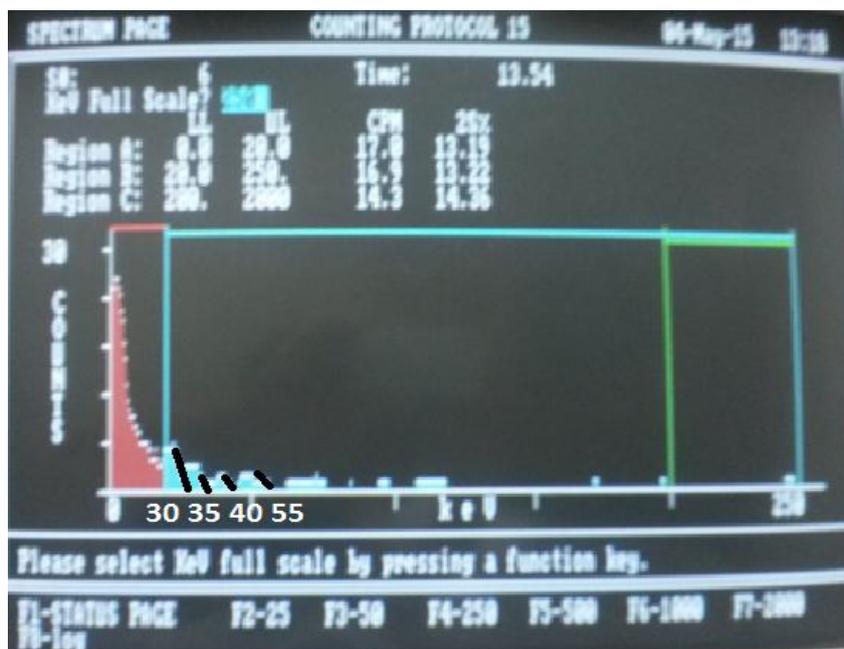


Figura 101. Análisis espectro SB24, escala 125



Figura 102. Análisis espectro SB28, escala 25

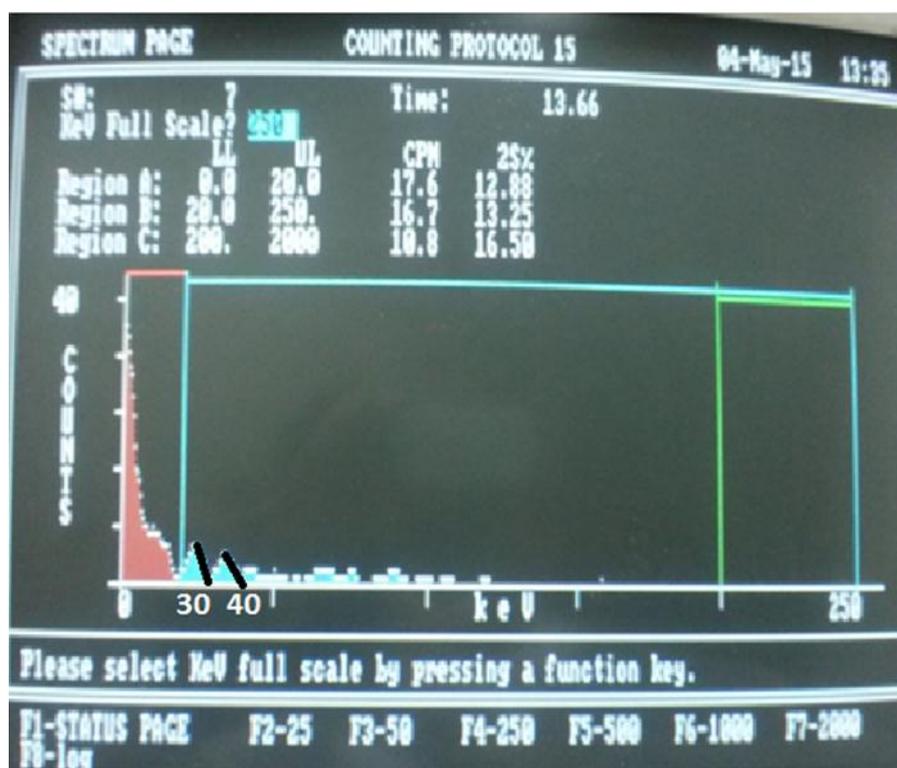


Figura 103. Análisis espectro SB28 escala 125