



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“Francisco García Salinas”

MAESTRÍA EN CIENCIAS NUCLEARES

UNIDAD ACADÉMICA DE ESTUDIOS NUCLEARES



**“Estudio de las Relaciones de Equilibrio y Desequilibrio
de la Actividad Gamma Ambiental.”**

TESIS

**Presentada en la Unidad Académica de Estudios Nucleares en cumplimiento parcial
de los requisitos para obtener el grado de:**

MAESTRA EN CIENCIAS NUCLEARES

Con opción terminal en Técnicas Analíticas Nucleares

PRESENTA:

L.Q.A Liliana López Guerrero

Director de Tesis

Dr. Carlos Ríos Martínez

Asesores

Dr. J. Ignacio Dávila Rangel

Dr. Fernando Mireles García

Zacatecas. Zac., diciembre de 2018.

“Estudio de las Relaciones de Equilibrio y Desequilibrio de la Actividad Gamma Ambiental”

Aprobada por el jurado

Dr. Carlos Ríos Martínez

Dra. Sonia Azucena Saucedo Anaya

Dr. José Luis Pinedo Vega

Dr. Fernando Mireles García

Dr. J. Ignacio Dávila Rangel

Propiedad intelectual de Liliana López Guerrero y la
Unidad Académica de Estudios Nucleares
2018 © todos los derechos reservados

[*lili16-lopez@outlook.com*](mailto:lili16-lopez@outlook.com)

[*criosmtz@hotmail.com*](mailto:criosmtz@hotmail.com)

Esta tesis es propiedad conjunta de la autora y la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas. No podrá ser publicada en parte o en su totalidad sin el consentimiento por escrito de la autora y la Unidad Académica de Estudios Nucleares. La tesis deberá ser citada debidamente cuando sean utilizados los resultados para cualquier propósito.

Dedico esta tesis:

**A mis padres, hermanas y hermanos que fueron la razón de emprender este proyecto,
les doy las gracias por confiar en mí siempre, espero que con este se sientan muy
orgullosos de la persona que hoy en día soy.**

Agradecimientos

Al Dr. Carlos Ríos Martínez, por la oportunidad que me dio al participar en este proyecto, por las enseñanzas los conocimientos compartidos, consejos y sus opiniones y la amistad que me brindo durante mi paso por esta unidad.

A mis profesores de la maestría: Dr. José Luís Pinedo, Dra. Sonia Saucedo, Dr. Fernando Mireles, M. en C. Hugo López y al Dr. J. Ignacio Dávila Rangel les doy las más eternas gracias, por haberse preocupado por cada una de nosotras y por sus enseñanzas, brindarnos su amistad, y asesorías que fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis, por sus amabilidades y sus buenos consejos.

A mis amigas la M. en C. Leticia Hernández Ramírez, la M. en C. Anahid Zharazan López Espinoza, al igual que mis amigos el L.Q.A. José Gabriel Bernal y al ISC Carlos Vilchis Martínez por apoyarme en todo momento, les agradezco infinitamente el ser parte de este trayecto y proyecto no encuentro la manera de agradecerles su gran amistad y apoyo.

A la Unidad Académica de Estudios Nucleares y al CONACYT, por el apoyo económico brindado durante estos dos años de estudios sin su apoyo no sería posible.

ÍNDICE

1	Resumen	XII
2	Abstract	XIII
1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Justificación	1
1.3	Antecedentes	2
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo general	4
1.4.2	Objetivos específicos	4
2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Radiactividad Ambiental	5
2.2	Decaimiento radiactivo simple: vida media, constante de decaimiento, vida promedio	5
2.3	Series radioactivas	8
2.4	Equilibrio Radioactivo	12
2.4.1	Equilibrio secular.....	14
2.4.2	Equilibrio transitorio	15
2.5	Desequilibrio radioactivo.....	16
2.6	Espectrometría gamma	18
2.6.1	Espectrometría gamma <i>In Situ</i>	19
2.6.2	Espectrometría gamma de Laboratorio.....	20
3	MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1	Diagrama de actividades	22
3.1.1	Calibración del equipo.....	23
3.1.2	Arreglo Experimental y condiciones para la obtención de espectros <i>In Situ</i> ..	23

3.1.3	Arreglo experimental para la obtención de espectros gamma por Laboratorio	25
3.2	Área de estudio, muestreo y preparación de muestras	25
4	Resultados y Discusión	27
4.1	Obtención de espectros	27
4.1.1	Actividad Mínima Detectable <i>In Situ</i>	30
4.1.2	Actividades mínimas detectables (AMD) para muestras de Laboratorio.....	35
4.2	Actividades de las mediciones por espectrometría gamma <i>In Situ</i>	40
4.3	Actividades específicas en muestras de la serie 4n, por espectrometría gamma en Laboratorio.....	43
4.3.1	Actividades específicas en muestras de la serie 4n+2 y de ⁴⁰ K, por espectrometría gamma en Laboratorio.....	48
4.4	Correlación de las relaciones de Actividad gamma ambiental	55
5	Conclusiones	66
6	REFERENCIAS	68

Lista de Tablas

Tabla 1	Localización y descripción general de los sitios de medición. (GeoInfoMex .2018).	24
Tabla 2.	Actividad Mínima Detectable In Situ de cada emisor gamma perteneciente a la serie 4n y 4n+2.....	32
Tabla 3	de Actividad superficial <i>In Situ</i> en Bq/m ² de la serie 4n.....	41
Tabla 4	Actividad superficial (Bq/m ²) que se obtienen de la medición <i>In situ</i> para el caso de la serie de 4n+2.....	42
Tabla 5	Actividades específicas de lo región del Chique 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.	44

Tabla 6 Actividades específicas de lo región del Loreto 1, 2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.	45
Tabla 7 Actividades específicas de lo región del Obraje 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.	46
Tabla 8 Actividades específicas de lo región del Hancón 2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.	47
Tabla 9 Actividades específicas de lo región del Chique 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2,	48
Tabla 10 Actividades específicas de lo región de Loreto 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2.	50
Tabla 11 Actividades específicas de lo región del Obraje 1,2 de los radionúclidos emisores gamma de la serie 4n+2.	51
Tabla 12 Actividades específicas de lo región del Hancón 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2.	52
Tabla 13 Actividades específicas de ⁴⁰ K (Bq/kg), de cada uno de los sitios de interés en cada núcleo de profundidad vs <i>In Situ</i>	53
Tabla 14 Correlación de las razones de Actividad 4n+2 (Bq/kg)de los sitios del Chique comparando los núcleos vs <i>In Situ</i>	56
Tabla 15 Correlacion de las razones de actividad (Bq/kg) de la serie 4n+2 Loreto del punto 1 y 2.	57
Tabla 16 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg) del Obraje 4n+2 de Laboratorio vs In Situ del punto 1 y 2.	59
Tabla 17 Correlación de las razones de actividad de la serie 4n+2 del Hancón en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs <i>In situ</i>	60
Tabla 18 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg- Bq/m ²) de la serie 4n del Chique en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs <i>In Situ</i>	61
Tabla 19 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg-Bq/m ²) de la serie 4n de Loreto en los puntos 1 y 2 de laboratorio vs <i>In Situ</i>	62
Tabla 20 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg) de la serie 4n del Obraje en el punto 1 y 2 de laboratorio vs <i>In Situ</i>	64

Tabla 21 Correlación de las razones de Actividad la serie 4n del Hancón de los puntos 1 y2 correlación de laboratorio vs <i>In Situ</i>	65
---	----

Lista de Figuras

Figura. 1 Esquema de decaimiento de la serie del Torio (4n) (Hyperphysics, 2005)	9
Figura. 2 Esquema de decaimiento de la serie de Uranio (4n+2) (Hyperphysics, 2005).	10
Figura. 3 Esquema de decaimiento de la serie del Actinio (4n+3) (Hyperphysics, 2005). .	11
Figura. 4 Esquema de decaimiento del Potasio (⁴⁰ K) (“Nudat 2.7” 2018).....	12
Figura. 5 Detector a 1 m de altura del suelo con cristal de Germanio con dirección hacia abajo, sin blindaje.	24
Figura. 6 NIM/BIN (Fuente de voltaje y amplificador), alimentado mediante las baterías (de gel y líquida) conectado al inversor de voltaje, dando una salida 117 Volts AC.	24
Figura. 7 Recolección de muestras de suelo.....	26
Figura. 8 Tamizado de muestras de suelo.....	26
Figura. 9 Vaciado y sellado de muestras en Marinellis.....	27
Figura. 10 Espectro de rayos gamma <i>In Situ</i> No. 1 Chique rio arriba del Municipio de Tabasco.....	28
Figura. 11 Espectro de rayos gamma del sitio 1 de medición del Obraje Pinos <i>In Situ</i>	29
Figura. 12 Espectro de rayos gamma <i>In Situ</i> del Municipio de Loreto.	30
Figura. 13 Acercamiento de un fotopico.	31
Figura. 14 Actividades mínimas detectables de las mediciones <i>In Situ</i> de los diferentes sitios de interés y radionúclidos perteneciente a la serie 4n.	33
Figura. 15 Actividades mínimas detectables de las mediciones <i>In Situ</i> de los diferentes sitios de medición y radionúclidos perteneciente a la serie 4n+2.	34
Figura. 16 Actividad mínimas detectables (AMD) de las muestras de laboratorio de la región del Chique del punto 1 y 2 de la serie 4n.....	36
Figura. 17 Actividad mínimas detectables (AMD) de la serie 4n en muestras de laboratorio de la región de Loreto de los puntos de medición 1 y 2.	36

Figura. 18 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Obraje de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n$	37
Figura. 19 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Hancón de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n$	37
Figura. 20 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Chique de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$	38
Figura. 21 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Loreto de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$	38
Figura. 22 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Obraje de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$	39
Figura. 23 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Hancón de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$	39
Figura. 24 Actividad superficial de la serie $4n$ de las mediciones <i>In situ</i> de los sitios que se midieron.....	42
Figura. 25 Actividad superficial de la serie $4n+2$ de las mediciones <i>In situ</i> de los sitios que se midieron.	43
Figura. 26 Actividades específicas de los radionúclidos pertenecientes a la serie $4n$ de la región del Chique en ambos puntos de medición.	45
Figura. 27 Actividades específicas de los radionúclidos pertenecientes a la serie $4n$ de la región de Loreto de ambas mediciones.	46
Figura. 28 Actividad específica de los radionuclidos que conforman la serie $4n$ de la region del Obraje Pinos de las mediciones de ambos puntos.	47
Figura. 29 Acctividad específica de los radionuclidos que conforman la serie $4n$ de la region de Lazon Cardenaz el Hancón.	48
Figura. 30 Actividades específicas de los radionuclidos pertenecientes a la serie $4n+2$ de la region del Chique.	49
Figura. 31 Actividades específicas de los radionúclidos que pertenecen a la serie $4n+2$ de la region de Loreto de ambos puntos de medición.	51
Figura. 32 Actividades específicas de ambos puntos de medición de la región del Obraje Pinos $4n+2$	52

Figura. 33 Actividades específicas de los radionuclidos que forman la serie $4n+2$ del Hancón.	53
Figura. 34 Actividades específicas y superficiales de los diversos sitios en ^{40}K	54
Figura. 35 Correlación de los núcleos de lab vs <i>In Situ</i> de el Chique 1,2 serie $4n+2$	56
Figura. 36 Correlación de las razones de Actividad Loreto de los sitios 1 y 2 de la serie $4n+2$	58
Figura. 37 Correlación de las razones de actividad del Obraje en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs <i>In Situ</i> de la serie $4n+2$	59
Figura. 38 Correlación de Laboratorio vs <i>In Situ</i> del Hancón 1,2 de la serie $4n+2$	60
Figura. 39 Correlación de laboratorio vs <i>In Situ</i> del Chique 1 y 2 de la serie $4n$	62
Figura. 40 Correlación de las razones de actividad de Loreto del punto 1 y 2 de la serie $4n$ correlación de los núcleos vs <i>In Situ</i>	63
Figura. 41 Correlación de la razón de actividad de los núcleos vs <i>In Situ</i> del Obraje del punto 1 y 2 de la serie $4n$	64
Figura. 42 Correlación de las razones de actividad de la serie $4n$ del Hancón en el punto 1 y 2 de la serie $4n$	66

1 Resumen

El trabajo previamente realizado en el estudio de la radiactividad gamma natural y artificial en el medio ambiente ha proporcionado un medio para estimar la abundancia de los emisores gamma y su riesgo radiológico potencial. Algunas estimaciones fueron hechas bajo la suposición de la existencia de equilibrio radioactivo secular entre progenitores y descendientes en las series radioactivas naturales. Esta condición ocurre debido a la gran vida media de los precursores (millones de años) y las pequeñas vidas medias (unos cuantos segundos) de los descendientes, bajo condiciones de no perturbación.

Procesos geoquímicos y otras perturbaciones, tales como reacciones de disolución y precipitación, difusión gaseosa, lixiviación y retroceso alfa pueden crear una condición de desequilibrio, de tal manera que las actividades de los descendientes serán diferentes de las actividades de los precursores.

En este trabajo, las condiciones de desequilibrio de las series radioactivas $4n$ y $4n+2$ se estudiaron en varios sitios utilizando espectrometría gamma *In situ* y de Laboratorio. Se encontraron desequilibrios en ambas series en todos los sitios y particularmente, se encontró que el desequilibrio para la serie $4n$ es más pronunciado. Por otra parte, se encontró que las mediciones en Laboratorio coinciden con las mediciones *In situ*.

Palabras clave: Series radioactivas naturales, espectrometría gamma in situ, espectrometría gamma, desequilibrio radioactivo

2 Abstract

The work done in studying the natural and artificial gamma radioactivity in the environment has given a way to estimate the abundance of the gamma emitters and their potential radiologic risk. Some estimation were done under the assumption that a secular equilibrium condition exists among the progenitors and descendants of the natural radioactivity series. This condition occurs due to very long half-life (million years) of the precursors and the very short half-lives (down to very few seconds) of the descendants, and under no perturbation conditions.

Geochemical process and other perturbations such as dissolution and precipitation reactions, gaseous diffusion, lixiviation and alpha recoil can create a disequilibrium condition, in such a way that the activities of the descendants are different of the activities of the parents.

For this work, the equilibrium-disequilibrium conditions of the radioactive series $4n$ and $4n+2$ were studied in various sites using Lab and *In situ* gamma spectrometry. It was found disequilibrium conditions in both series and in all sites. Particularly, the $4n$ series has a pronounced disequilibrium, compared to the $4n+2$ series. On the other hand, it was found that the *In situ* measurements are coincident with the Lab measurements.

Key words: Radioactive series, In situ gamma-ray spectrometry, gamma-ray spectrometry, radioactive disequilibrium.

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La espectrometría gamma *In Situ* proporciona información de la presencia de emisores gamma en suelos, misma que puede verificarse por mediciones en Laboratorio. Los emisores gamma pertenecientes a las cadenas radiactivas observan diferentes relaciones de equilibrio – desequilibrio con respecto a sus progenitores y en especial a los isotopos padre de cada serie, ^{232}Th ($4n$), ^{238}U ($4n+2$). Con el objetivo de caracterizar las relaciones de equilibrio - desequilibrio de la radiactividad gamma ambiental por comparación de espectros obtenidos *In Situ* y en Laboratorio en suelos, se realizaron mediciones y se obtuvieron muestras de varias localidades para su análisis. Dado que con esta información se puede establecer el estado de equilibrio correspondiente, se pretende comparar las mediciones *In Situ* con las mediciones en Laboratorio de cada sitio para correlacionar la correspondencia de dichos estados.

1.2 Justificación

En trabajos previos se obtuvieron los factores de riesgo radiológico a partir de mediciones gamma *In Situ* y los factores provistos por ICRU 53 (Margarita Rivera Belmontes 2011), adicionalmente, se encontraron factores de calibración actividad – dosis para Uranio y Torio (Flavio Nava 2012) y se realizó una correlación mediante el análisis multivariante para determinar las relaciones de las actividades gamma con los diferentes tipos de suelos y zonas de estudio (Fernando López Ibarra, 2017). En el presente trabajo se pretende caracterizar las relaciones de equilibrio-desequilibrio radiactivo por tipo de suelo y región en el Estado, a través de comparar las mediciones por espectrometría gamma *In Situ* en ciertas localidades y la espectrometría gamma en Laboratorio de muestras obtenidas en dichos sitios.

1.3 Antecedentes

La población está expuesta a la radiación proveniente de los radionúclidos naturales que se encuentran distribuidos en la corteza terrestre (las cadenas radiactivas con precursores: ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U , las que a través de decaimientos sucesivos producen un isotopo estable del ^{208}Pb , ^{207}Pb y ^{206}Pb y del ^{40}K es el Ar), los rayos cósmicos provenientes del espacio exterior y la radiación producida por el hombre (máquinas de rayos x, radiofármacos e industria nuclear)

Los radionúclidos presentes en la litosfera pueden pasar a formar parte del ciclo biológico de los organismos vivos, produciendo la llamada exposición interna. Algunos radionúclidos y sus descendientes existentes en suelos, rocas y materiales de construcción, por ser emisores gamma, se convierten en la principal fuente de exposición externa.

Efectos tales como la meteorización, erosión del suelo, agua de lluvia, interflujo y lixiviación, pueden romper las llamadas condiciones de equilibrio en las cadenas de decaimiento produciendo entonces el desequilibrio radioactivo. (UNSCEAR 2000) (Mohamed et al. 2015).

El estado de Zacatecas tiene una superficie aproximada de 75 284 km², representa el 3.84% del territorio nacional; su capital es la ciudad de Zacatecas y está dividido en 58 municipios y se localiza en la región Norte de la región central de la República Mexicana, sus coordenadas geográficas extremas son al Norte 25⁰ 09', al Sur 21⁰ 01' de latitud Norte; al Este 100⁰ 48' y al Oeste 104⁰ 20' de longitud Oeste. Colinda al norte con los estados de Durango, Coahuila y Nuevo León; al sur con los estados de Nayarit, Jalisco, Aguascalientes y Guanajuato; al Oeste con Durango y a Este con San Luis Potosí. El 48.27% de la superficie del estado presenta clima semiseco, el 24.78% clima seco, el 21.23% clima subhúmedo y el 5.72% presenta clima muy seco.

Estudios previos (Landsberger *et al.* 2016), determinaron el desequilibrio de las series de uranio y torio en muestras de sarro de tuberías en la industria petrolera. Ellos encontraron que tanto el ^{226}Ra (90,200 ± 4300 Bq / kg) y el ^{228}Ra presentan actividades específicas en

órdenes de magnitud mayores a sus precursores, ^{238}U ($1,83 \pm 0,36 \text{ Bq / kg}$) y al ^{232}Th ($7,0 \pm 0,4$), respectivamente. Además, la actividad específica del ^{210}Pb ($24.400 \pm 1200 \text{ Bq / kg}$) fue aproximadamente 3.6 veces menor que la del ^{226}Ra .

Por otra parte, F. de Corte, *et al.* (2005) investigó mediante espectrometría de rayos gamma, el equilibrio radiactivo por lo que en la serie ^{238}U , se consideran ^{214}Pb y ^{214}Bi como indicadores de movilidad ^{226}Ra , y ^{210}Pb como indicador de emanación ^{226}Rn . La medición directa de ^{226}Ra , puede proporcionar información adicional sobre la interpretación del desequilibrio radiactivo, se investiga en cuanto a su precisión y exactitud. Debido a que existe una grave interferencia espectral en su línea gamma de 186.2 keV (por ^{235}U a 185.7 keV), se describieron varios procedimientos de corrección y se verificó su desempeño a través del análisis de materiales de referencia (certificados), lo que llevó a la recomendación de un método de elección "

Mohammad Hannan *et al.* (2015) cuantificaron los niveles de radiactividad gamma en el área de Mission, Texas determinando las actividades específicas de radionúclidos naturales y antropogénicos (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{137}Cs) en 30 muestras representativas de la superficie del suelo. Los resultados de estas determinaciones siguieron una distribución aproximadamente normal para las muestras y se encontró que eran comparables con otros estudios similares. Además, calcularon los factores de evaluación del impacto radiológico y se encontraron dentro de los valores recomendados.

Así mismo, M.S Al-Masri & A.W. Doubal (2013), determinaron ^{226}Ra , ^{40}K y ^{137}Cs en el suelo donde validaron y compararon la actividad mínima detectable, la repetibilidad y la reproducibilidad fueron los principales parámetros de validación. Los resultados demostraron que la humedad del suelo influye en los resultados de las mediciones *In Situ* en forma tal que las actividades *In Situ* son menores en comparación a las actividades de laboratorio. Las incertidumbres de medición también se estimaron y compararon para ambas técnicas. La incertidumbre debida a la humedad del suelo (55%) utilizando la medición *In Situ* fue el principal contribuyente a la incertidumbre total, mientras que la falta de nitidez debido al recuento neto (71%) utilizando las mediciones de Laboratorio fue el mayor contribuyente al valor total de incertidumbre

En la determinación de radionúclidos naturales mediante espectrometría gamma, es importante establecer las condiciones de equilibrio o desequilibrio radiactivo para la evaluación de radionúclidos padres (Murray, *et al* 1987). Para reconocer similitudes entre las actividades de los diferentes emisores gamma ambientales, con la finalidad de identificar el rompimiento de las condiciones del equilibrio radiactivo en las series de Uranio y Torio se calculan los valores de la relación de actividad entre los radionúclidos emisores gamma como los son ^{208}Tl , ^{212}Pb , ^{214}Bi y ^{228}Ac por mencionar algunos que se usaron para obtener la información de las relaciones isotópicas que conforman las diferentes series radioactivas. En el caso de la serie de ^{238}U no todos los miembros de esta serie emiten radiación gamma solamente seis miembros son emisores gamma tales como el ^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb . En la serie de ^{232}Th cinco de sus miembros también son emisores gamma, ^{228}Ac , ^{224}Ra , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl .

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

1. Comparar las relaciones de equilibrio - desequilibrio en los espectros gamma *In Situ* con las obtenidas por mediciones en Laboratorio para las series $4n$ y $4n+2$, y su posible asociación con el tipo de suelo y localidad.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Establecer el perfil de las relaciones de equilibrio en muestras de suelo
2. Comparar las abundancias de emisiones gamma características en las mediciones *In Situ* con las obtenidas en Laboratorio.
3. Establecer la correspondencia de estados de equilibrio entre espectros *In Situ* y de Laboratorio con el tipo de suelo y localidad.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Radiactividad Ambiental

La radiactividad fue descubierta en 1896 en París por Henri Becquerel, al investigar el fenómeno de fluorescencia proveniente de los minerales de Uranio. La radiactividad es un fenómeno físico en el cual ocurren transformaciones en el núcleo de los átomos inestables que dan como resultado la emisión espontánea de partículas alfa (α) beta (β) y/o radiación electromagnética (γ). Como consecuencia, el núcleo original o núcleo padre, se transmuta por lo general en otro núcleo distinto (núcleo hijo) y así sucesivamente hasta formar un elemento estable.

La radiactividad natural ocurre en la corteza terrestre por radionúclidos de origen natural como el ^{232}Th , ^{238}U y sus descendientes, además del ^{40}K , llamados primordiales. La presencia de otro tipo de radiación que ingresa a la atmósfera desde el exterior, se llama radiación cósmica. La radiación cósmica se genera por reacciones nucleares en el sol y las estrellas, en cuanto a las fuentes artificiales, destacan los usos médicos y actividades industriales que implican el uso de radiaciones ionizantes, tales como la industria nuclear en las que se liberan productos de fisión a la atmósfera. Éstas son conocidas como antropogénicas (Lieser, 2001).

2.2 Decaimiento radiactivo simple: vida media, constante de decaimiento, vida promedio

El decaimiento radiactivo es conocido por ser un proceso aleatorio. De tal manera que no se puede tener certeza de cuando un núcleo inestable va a decaer. La probabilidad de que un átomo decae en el tiempo dt está dado por λdt donde λ es la constante de proporcionalidad conocida como constante de decaimiento. En el que un sistema en el que están presentes al inicio $N(0)$ átomos, la variación en el número de átomos que decaen en el tiempo dt está dado por $-dN = \lambda N dt$. En el límite de intervalos que son muy pequeños se pueden expresar como en la siguiente ecuación 1:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Al integrar con respecto al tiempo se conoce el número de átomos presentes en cualquier tiempo t , como se presenta en las ecuaciones 2 y 3:

$$\int_{N(t)}^{N(0)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_t^0 dt' \quad (2)$$

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Para denotar el tiempo en el cual el número de átomos ha disminuido a la mitad de su valor inicial se le conoce como vida media ($t_{1/2}$) y de esta manera la vida media se relaciona con la constante de decaimiento a través de la relación de la ecuación 4:

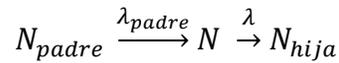
$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

El número de decaimientos por unidad de tiempo es conocido como actividad A , y se define como en la ecuación 5:

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

Cuando N disminuye en producto al decaimiento sucesivo, los hijos obedecen a una ecuación con un término para el decaimiento (desaparición) y otro de acumulación (razón de

producción) desde el padre. Cuando el hijo es un isotopo estable, tan solo habrá el término de producción



En el caso de la ecuación de la velocidad queda de la siguiente manera:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \lambda_{padre} N_{padre}. \quad (6)$$

La unidad de actividad es Becquerel, 1 Bq = 1 desintegración por segundo.

Cuando la vida media es menos a 1 s. se considera que la actividad es un problema técnico en la evaluación. La definición anterior de actividad nos daría una velocidad de desintegración instantánea si la vida media es del orden de 1s, una considerable cantidad de material que ha decaído en ese primer segundo.

La vida promedio de un radionúclido es una propiedad estadística y se caracteriza por ser un concepto valido por el gran número de átomos involucrados. Un átomo individual de un radionúclido puede transformarse en cualquier momento, desde el tiempo cero hasta infinito. Para algunos cálculos, conviene usar la vida promedio del radionúclido. Se le asigna la definición de la suma de los tiempos de vida de los átomos individuales dividida entre el número total de átomos presentes en el tiempo cero. Durante un intervalo de tiempo de $t + dt$ el número total de transformaciones es $\lambda N dt$. Cada átomo que decae en ese intervalo tiene un tiempo de vida t . la suma de los tiempos de vida de todos los átomos que se transformaron durante el intervalo de tiempos dt tienen una supervivencia $t = 0$ esto es $t \lambda N dt$. Es la vida promedio que se espera que un átomo existe antes de que decaiga. La vida promedio está dada por la siguiente expresión en la ecuación:

$$\tau = \frac{1}{N(0)} \int_0^{\infty} t \lambda N dt \quad (7)$$

Es sencillo demostrar que la relación entre la vida promedio y la vida media está dada por $\tau = 1.44 t_{\frac{1}{2}}$ (Magill & Galy, 2005).

2.3 Series radioactivas

Existen tres series naturales de desintegración radiactiva. La primera conocida como serie del torio, consiste en un grupo de radionúclidos relacionados por decaimiento en el que todos los números de masa son igualmente divisibles por el número cuatro, serie (4n). Esta serie tiene su origen en el radionúclido ^{232}Th , su abundancia isotópica es de 100%, que presenta decaimiento alfa con una vida media de 1.41×10^{10} años. El núclido final en esta serie de decaimiento es el ^{208}Pb . En esta serie, la transformación del padre original ^{232}Th al producto final ^{208}Pb requiere la emisión de 7 partículas α y 4 partículas β^- , el decaimiento de ^{212}Bi está ramificado y solamente el 35.94% del decaimiento produce ^{208}Tl por decaimiento alfa. La ramificación de decaimiento beta produce ^{212}Po , que no puede ser medido por espectrometría gamma. Si la medición del ^{208}Tl se va a emplear para determinar la actividad de torio, debe dividirse entre 0.3594 para obtener el porcentaje de decaimiento como se puede ver en Figura 1.

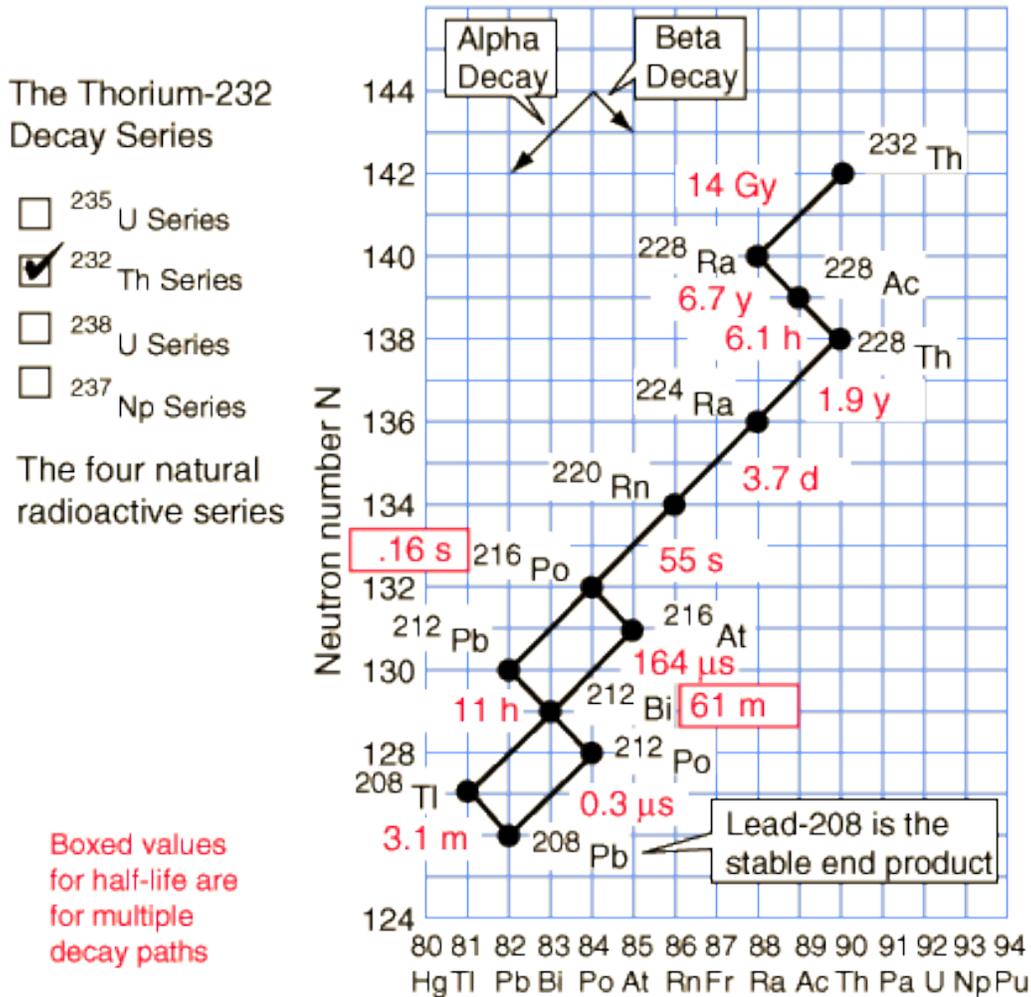


Figura. 1 Esquema de decaimiento de la serie del Torio ($4n$) (Hyperphysics, 2005)

La segunda es la serie del uranio, el radionúclido padre en esta serie es ^{238}U ($4n + 2$), su abundancia isotópica es de 99.27%, el ^{238}U experimenta decaimiento alfa con una vida media de 4.47×10^9 años. El producto estable de la serie de uranio es ^{206}Pb , el cual se alcanza después de la emisión de 8 partículas α y 6 partículas β , ver Figura 2. Esta es una serie particularmente importante en la naturaleza, ya que proporciona los isótopos de los elementos de Ra, Rn y Po.

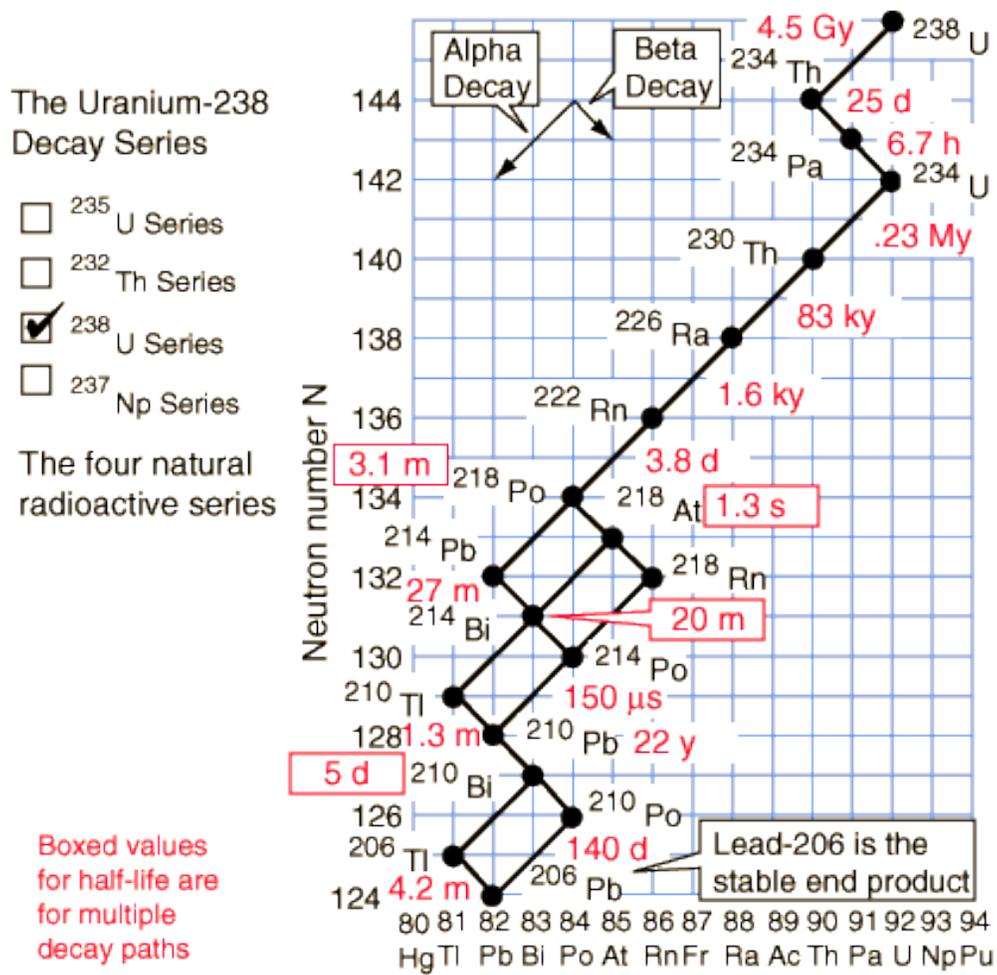


Figura. 2 Esquema de decaimiento de la serie de Uranio ($4n+2$) (Hyperphysics, 2005).

La tercera serie de decaimiento radiactiva ($4n + 3$) conocida como serie de actinio, el padre de esta serie es ^{235}U , que tiene una abundancia de 0.72% y una vida media de 7.1×10^8 años y decae por alfa. El producto final estable de esta serie es ^{207}Pb , que se forma después de la emisión de 7 partículas α y 4 partículas β . La actividad específica de ^{235}U es 4.8×10^6 Bq/g ver Figura 3 (M. F. Attallah, *et al.* 2012).

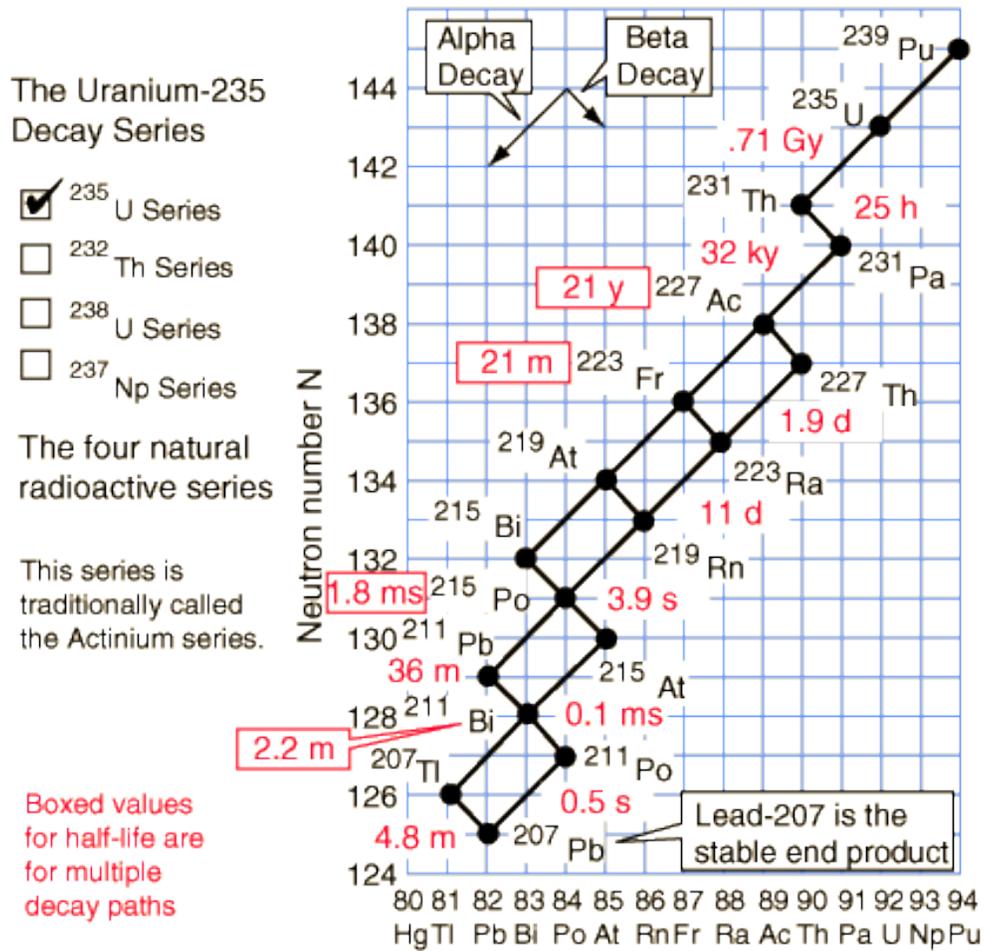


Figura. 3 Esquema de decaimiento de la serie del Actinio ($4n+3$) (Hyperphysics, 2005).

Existe otro elemento radioactivo emisor gamma de origen natural que es el ^{40}K , es sabido que el ^{40}K decae a ^{40}Ar (10.7%) por captura electrónica, y a ^{40}Ca por decaimiento beta (89.3%). El decaimiento del ^{40}K por captura electrónica emite una línea característica de energía gamma de 1460.8 keV como se puede ver Figura 4 (“National Nuclear Data Center,” 2018).

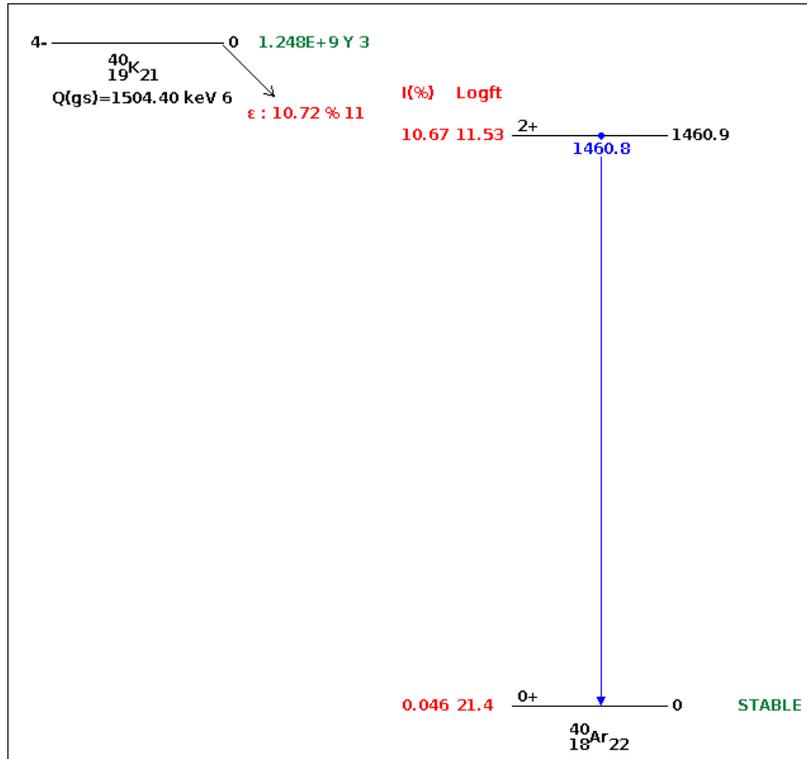


Figura. 4 Esquema de decaimiento del Potasio (^{40}K) (“Nudat 2.7” 2018).

2.4 Equilibrio Radioactivo

Cuando una serie radioactiva está en equilibrio, las razones entre las cantidades de los radionúclidos que la integran permanecen constantes, durante un tiempo, únicamente decrece el número de átomos del elemento que va al inicio de la serie, N_1 aumenta el número de átomos del elemento final estable de la serie N_{n+1} y se pueden escribir en la siguiente forma:

$$N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n \dots \quad (8)$$

Donde el núclido 1 se transforma por desintegración radioactiva en el núclido 2 y este al núclido 3 sucesivamente hasta estar en un radionúclido estable:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{dN_1}{dt} - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (9)$$

En el decaimiento del radionúclido 1 sigue:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (10)$$

Donde N_1^0 es el número de átomos de radionúclido en el tiempo 0. La solución de la ecuación diferencial de primer orden (13).

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (11)$$

N_2^0 Es el número de átomos del radionúclido 2 presentes en $t=0$, si los núclidos 1 y 2 están separados cuantitativamente en $t=0$, la situación se vuelve más simple y se obtienen dos fracciones. En la fracción que contiene el radionúclido 2, este radionúclido ya no se produce por la descomposición del radionúclido 1, y para la fracción que contiene el radionúclido 1 se sigue con $N_2^0 = 0$:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (12)$$

Reordenando:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \quad (13)$$

Después de la sustitución de las constantes de decaimientos λ en el tiempo de vida media $\left(t \frac{1}{2}\right)$.

$$N_2 = \frac{t_{1/2}(2)/t_{1/2}(1)}{1 - t_{1/2}(2)/t_{1/2}(1)} N_1 [1 - (1/2)^{\frac{t_{1/2}(2) - t_{1/2}(1)}{t_{1/2}(1)}}] \quad (14)$$

Para que se alcance el equilibrio radioactivo dependerá de la vida media del radionúclido hijo al igual que la relación de las vidas medias. Esto para que, pasado el tiempo largo necesario, la función exponencial se convierta en cero y se establezca el equilibrio radioactivo de interés.

En el equilibrio radioactivo secular, la relación N_2 / N_1 , la relación de las masas y la relación de las actividades son constantes. Cabe destacar que este no es un equilibrio utilizado en termodinámica y química cinética, porque no es reversible y en general no representa un estado estacionario.

2.4.1 Equilibrio secular

Núclido 1 → Núclido 2 → Núclido 3

Entonces la actividad al tiempo $t = t$ del i -ésimo descendiente $A_i(t) = \lambda_i N_i(t)$ cuando al tiempo $t = 0$ sólo existe el padre ($N_{1,0}$) está dada por la expresión desarrollada por Bateman:

$$A_i = \lambda_i N_i = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_i N_{1,0} \sum_{j=1}^i \frac{e^{-\lambda_i t}}{\prod_{k \neq j} (\lambda_k - \lambda_j)} \quad (15)$$

La característica del equilibrio secular es que todos los miembros de la serie tienen la misma actividad del padre, el equilibrio secular se produce cuando el periodo es muy grande (varios ordenes de magnitud) que el hijo. Bajo la condición para el equilibrio radiactivo resulta simplemente:

$$\frac{A_B(t)}{A_A(t)} \rightarrow 1 = A_B(t) \sim A_A(t) \Rightarrow \lambda_B N_B \sim \lambda_A N_A \quad (16)$$

Para el establecimiento de este tipo de equilibrio se requiere que transcurran siete u ocho vidas medias del descendiente para que haya desaparecido cualquier cantidad que de este existiera al tiempo $t = 0$. Para el establecimiento del equilibrio radiactivo permanente permite que alguno o algunos de los miembros de la serie de decaimiento puedan ser tomados para estimar la actividad del radionúclido padre y posteriormente, la de todos los otros radionúclidos de la serie y en esa situación permanece indefinidamente.

Debido a que los iniciadores de las familias tienen periodos muy grandes, se establece equilibrio secular entre cada uno de ellos y sus descendientes cuando se encuentran en el interior de los minerales. En la superficie de estos pueden no estarlo debido a la acción de agentes exteriores.

2.4.2 Equilibrio transitorio

Cuando en una serie radioactiva en el que la vida media del hijo y del padre son del mismo orden, $t_{\frac{1}{2}1} > t_{\frac{1}{2}2}$ ($\lambda_1 < \lambda_2$). La ecuación general, en los términos de las constantes de desintegración esto significa quede $\lambda_1 < \lambda_2$, de la siguiente expresión:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (17)$$

Para tiempos $t \ll \frac{t_1}{2}$ el primer término exponencial se aproxima a la unidad y a N_2 incrementa acorde con $(1 - e^{-\lambda_2 t})$. Para tiempos $t \gg \frac{t_1}{2}$, el segundo exponencial se hace mucho más pequeño que el primero con forme N_2 disminuye de acuerdo con $(e^{-\lambda_1 t})$.

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad (18)$$

Donde se usa la relación de la ecuación $N_1 = N_1(0)e^{\lambda_1 t}$.

2.5 Desequilibrio radioactivo

En esta situación, la vida media del padre es más corta que la del hijo. Cuando el padre tiene una vida media inferior a la del hijo, la actividad del hijo crece hasta un máximo y después decae con su propia vida media característica (T.C.Feng M.Y.Jia *et al* 2008).

El desequilibrio llega a ocurrir por diferencias en las condiciones geoquímicas y por diferentes procesos que conllevan a mover el padre o al hijo dentro o fuera de un sistema que es indicador en relación con el tiempo de vida media del hijo. Los diferentes procesos que conllevan a romper estos equilibrios en un ambiente superficial son los siguientes; Reacciones de solución y precipitación (debido a diferencias de las propiedades químicas de los elementos de las series de decaimiento), difusión gaseosa de los isotopos del radón, retroceso de la partícula alfa. Si posteriormente el sistema se cierra y si el padre tiene más vida media que el descendiente, el hijo se puede desintegrar o bien puede crecer en equilibrio con su progenitor, siempre y cuando si la concentración de actividad es mayor o menor que la del padre. Cabe destacar que un equilibrio nunca se alcanzara si el sistema se encuentra o permanece abierto.

Los isotopos de Uranio y Torio, así como sus respectivos descendientes, son de particular interés, por la formación de los diferentes radionúclidos durante estos decaimientos. El gas

radón (^{222}Rn) es de especial interés, por ser producto de decaimiento de la serie $4n$ y $4n+2$, en suelos y rocas. Este puede migrar desde el suelo a la atmosfera, donde decae y forma diversos productos hijos. Como los radionúclidos de bismuto, plomo y polonio, estos pueden permanecer en el aire hasta que nuevamente decaen o se depositan por medio de las lluvias radiactivas o por difusión en suelos.

Los estudios isotópicos de las series radiactivas de origen natural tienen aplicación inmediata en el estudio de diversas matrices, pero en el caso de un sistema geológico los radionúclidos descendientes de las series naturales estarán en equilibrio con los padres en función de dos factores:

- El aislamiento del sistema
- El tiempo que este tarda en transcurrir desde su formación, en el caso de ^{238}U tarde hasta 1 millón de años para que la serie alcance su equilibrio secular, siempre y cuando este la matriz en total aislamiento.

Un sistema aislado se refiere a un sitio que no ha sido alterado o perturbado. En un sistema aislado el comportamiento químico del Uranio es parecido, porque los dos se encuentran con un numero de oxidación de $4+$. La relación que existe entre U y Th del sistema sin alterar permanece constante desde su origen. Cuando el sistema se altera el número de oxidación de U^{4+} se oxida fácilmente a U^{6+} , como el complejo UO_2^{2+} es muy soluble. En el caso del Th presenta solamente el estado de oxidación de $4+$ donde es muy insoluble en agua. De esta forma, el ^{226}Ra , producto de desintegración de las diferentes series radioactivas naturales, es muy soluble y susceptible a escapar del sistema. Donde la perdida de ^{238}U o la de ^{226}Ra son parte fundamental en la ruptura del equilibrio secular entre los miembros de las diversas series radioactivas naturales.

Otras razones de desequilibrio en los diversos miembros de las series naturales, ocurre mediante los procesos de lixiviación y de igual forma por algunos fenómenos físicos, como es el efecto de retroceso radioactivo (Hernández Benítez, 1993).

La difusión del gas radón, es otra de las causas de desequilibrio radioactivo, (Ramírez, Morón, García, & Correa, 2011). El ^{238}U se desintegra dando lugar al ^{226}Ra que a su vez se desintegra produciendo ^{222}Rn y por lo tanto constituye una fuente continua de radón en la

Tierra. Esto debido a que son elementos gaseosos y se pueden liberar fácilmente del suelo. El contenido de uranio varía según el terreno, así por ejemplo en suelos de origen arcilloso o granítico la proporción de uranio es mayor que en suelos de origen basáltico y suelos carbonatados como areniscas, donde el potencial emisor de radón es pequeño (Olguin *et al.*, 1990).

Otro de los mecanismos que puede causar desequilibrio en cualquier interfase es el retroceso de los descendientes en el proceso de decaimiento alfa (Otero 2014).

2.6 Espectrometría gamma

Rayos gamma. - Son emisiones pertenecientes al espectro electromagnético de alta energía características de las transiciones nucleares. Cuya energía está dada por:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (19)$$

Dónde:

E = energía

h = Constante de Planck, $6.614 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

c = Velocidad de la luz

λ = Longitud de onda

ν = Frecuencia

este no es una forma de decaimiento como el alfa, beta o fisión espontánea, ya que en este proceso no hay cambio en el número o tipo de nucleones del núcleo atómico; no existe cambio en Z , N ni A . Este proceso involucra solamente la pérdida del exceso de energía de excitación (Murray, *et al.* 1987).

Si un núcleo cambia de un estado excitado al estado fundamental o a algún estado excitado de menor energía, se emiten fotones (rayos gamma). Todos los rayos gamma emitidos por un determinado núcleo son monoenergéticos. Como la energía de retroceso transmitida hacia el núcleo por la emisión de un fotón gamma es muy pequeña comparada con la energía del rayo gamma, esta última es prácticamente igual a la energía de excitación o la diferencia en las energías de excitación del núcleo (Lieser, 2001).

Cada fotón de rayos gamma tiene una energía discreta y esta energía es característica del radionúclido que emite el fotón. Esto forma la base de la espectrometría de rayos gamma; al medir las energías de los fotones de rayos gamma, podemos determinar la fuente de la radiación.

La metodología es inusual ya que requiere que se consideren varios factores: la intensidad de la fuente y la geometría del detector de fuente afectan las velocidades de fluencia del rayo gamma observadas, la sobrecarga no radiactiva y la distribución de las fuentes de radiación en el aire, afectan todas las velocidades de fluencias medidas.

El sistema de espectrometría gamma es una herramienta eficiente para las mediciones de campo y las de laboratorio, estableciendo los procedimientos de calibración y operación del sistema para cada técnica (*Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*, 2003).

2.6.1 Espectrometría gamma *In Situ*

La expresión *In Situ* es tomada del latín y traducida como “en el lugar de origen”. De esta manera, el sitio bajo investigación de radiactividad o niveles de radiación con “la espectrometría de rayos gamma *In Situ* implica que el espectro del flujo de rayos gamma será adquirido y analizado prácticamente para identificar y cuantificar los radionúclidos presentes en suelos y muestras para análisis. La técnica de espectrometría gamma *In Situ* tuvo su origen al cabo de las pruebas de armas nucleares, para obtener información rápida y fiable sobre los componentes radiactivos del entorno exterior (Tyler & Copplestone 2007).

La espectrometría gamma constituye una de las técnicas más eficaces para el estudio de la dispersión de radionúclidos en el medio ambiente. El objetivo general de esta técnica consiste en la determinación cuantitativa de los radioelementos emisores gamma presentes en las muestras objeto de estudio. Para ello, el sistema de espectrometría recoge el espectro de radiación de la muestra, que, una vez comparado con el espectro de energías discreto de los radioelementos de referencia, permiten la identificación de tales radioelementos presentes en la muestra (Barrera. & Romero 2013): La espectrometría gamma es una técnica no

destruccion y representa una poderosa herramienta para determinar las concentraciones de actividad de uno o más radionúclidos en el suelo. A pesar de que esta técnica consume menos tiempo y recursos que la espectrometría gamma convencional, tiene el inconveniente de que hay que asumir una serie de aproximaciones geométricas para modelar las características de la muestra. Entre ellas, se debe suponer que la muestra es una superficie plana (sin obstáculos, en la que la distribución horizontal de los radionúclidos) (Baeza & Corbacho, 2010)

2.6.2 Espectrometría gamma de laboratorio

En el análisis de laboratorio se usa un blindaje de plomo para proteger un detector de la radiación de fondo. Un analizador multicanal se utiliza para detectar, analizar y visualizar los rayos gamma emitidos por las muestras (de suelo o rocas). El análisis cuantitativo es esencialmente comparativo: la radiación de una muestra se compara con la radiación de estándares conocidos. A exactitud y precisión de los resultados depende de muchos factores: como es el tamaño, la resolución de energía del detector, la masa, la geometría de la muestra; el blindaje del fondo de laboratorio; contar el tiempo; procedimientos de procesamiento de datos y la calidad de los estándares radiactivos.

La técnica convencional de espectrometría gamma se puede usar para la identificación de contaminación isotópica ambiental, la identificación de fuentes desconocidas de radiación gamma y estudios detallados de equilibrio radioactivo y la distribución de radionúclidos en muestras de suelo.

Los espectrómetros de rayos gamma de laboratorio de semiconductores tiene la capacidad de identificar isotopos desconocidos en diversos materiales y muestras de suelos. La interpretación cualitativa de los espectros de rayos gamma con buena resolución de energía es mediante la comparación de los fotopicos observados con una biblioteca de energías de fuentes emisoras de rayos gamma conocidas. El área del pico neto esta relacionada con la actividad o concentración del elemento. El sistema de espectrometría gamma es una herramienta eficiente para realizar las mediciones de campo y de laboratorio, estableciendo

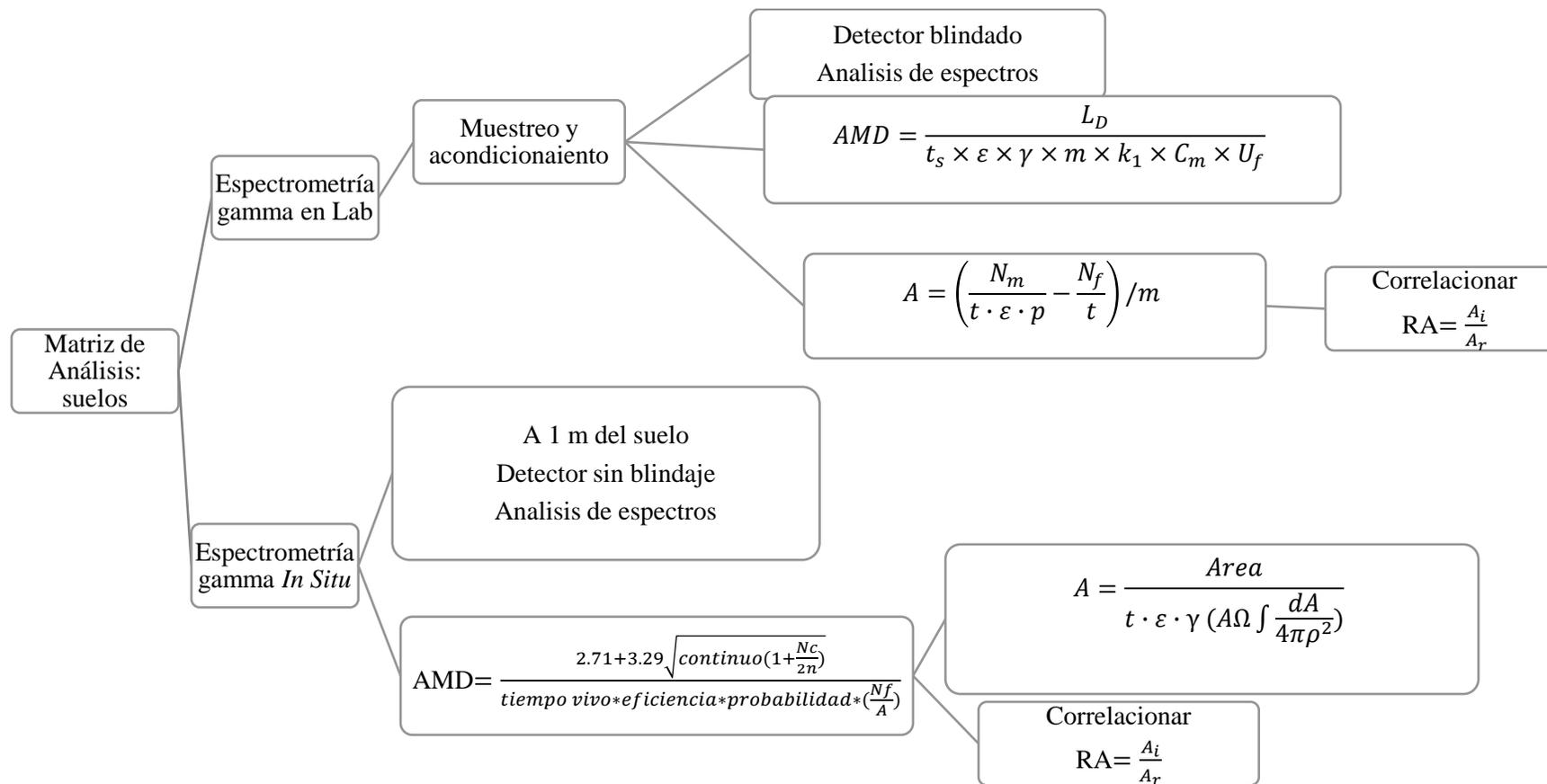
procedimientos de calibración y operación del sistema para cada técnica (*Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*, 2003)

La desventaja fundamental de los detectores es la necesidad de su enfriamiento constante a la temperatura del nitrógeno líquido, como es el caso de los HPGe, en los que el enfriamiento solo se requiere durante su funcionamiento para reducir a un nivel aceptable el ruido electrónico que se origina por la estimulación térmica de los portadores de carga.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Diagrama de actividades

En la siguiente figura del diagrama de bloques se presentan las actividades para la medición de espectros *In Situ* y en Laboratorio.



3.1.1 Calibración del equipo

Para la medición de las intensidades y de energías de los fotones gamma emitidos por los diferentes puntos seleccionados en la medición *In Situ* y de las muestras para la medición en Laboratorio es necesario que el detector este calibrado en energía y eficiencia usándose las líneas existentes del estándar Multinúclido son de ^{241}Am (59.5 keV), ^{137}Cs (661.66 keV) y ^{60}Co (1173.24 y 1332.51 keV) y una fuente puntal de ^{152}Eu de acuerdo con Fernando Lopez Ibarra *et al* (2017) y Flavio Manuel Nava Maldonado *et al* (2012).

3.1.2 Arreglo experimental y condiciones para la obtención de espectros *In Situ*

Los espectros se obtuvieron en el mes de marzo del 2018, las áreas propuestas de muestreo y estudio se ubican en el estado de Zacatecas en las diferentes localidades que pertenecen a los diferentes Municipios que conforman a este Estado, donde se realizaron dos mediciones por sitio, el primer sitio de medición fue en la localidad de Santiago el Chique situado en el municipio de Tabasco, la Presa grande de San Marcos situada en el municipio de Loreto, ; pero cabe señalar que por problemas técnicos no se pudo finalizar la medición de un sitio (Loreto presa chica sitio No. 4). El Obraje situado en Pinos, y por último se midió en Lázaro Cárdenas (Rancho Grande) Fresnillo. Los sitios de medición se encuentran registrados en la Tabla 1 donde se ilustra la información de cada sitio de muestreo.

Este trabajo fue realizado con el sistema de espectrometría gamma GeRe 3522 basado en un detector de germanio de electrodo inverso con una eficiencia nominal del 35% y una resolución característica de 2.2 MeV. Para la modalidad *In Situ* el arreglo experimental del sistema y de calibración se utilizó de acuerdo con (Margarita Rivera Belmontes 2011) además de seguir la metodología que propone el reporte ICRU 53 tal como se presentan en las siguientes Figuras 5 y 6.



Figura. 5 Detector a 1 m de altura del suelo con cristal de Germanio con dirección hacia abajo, sin blindaje.



Figura. 6 NIM/BIN (Fuente de voltaje y amplificador), alimentado mediante las baterías (de gel y líquida) conectado al inversor de voltaje, dando una salida 117 Volts AC.

Tabla 1 Localización y descripción general de los sitios de medición. (GeoInfoMex .2018).

Sitio de medición	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			Tipo de suelo	Tipo
	Longitud	Latitud	Altura msnm		
Santiago El Chique, Tabasco (Río arriba)	-102°54'7.0992"	21° 59' 25.173"	1504	Riolita-Ignimbrita	RURAL
Santiago El Chique, Tabasco (Río Abajo)	-102° 32'58.907"	21° 35' 30.4512	1504	Toba Riolítica	
Presa de San Marcos, Loreto (Presas Grande)	-101°55'17.7378"	22° 16'14.3688	159	Riolita	

Presa de San Marcos, Loreto (Presita chica)	-101° 56' 19.363"	22° 16' 8.755"	2122	Riolita	ZONA DE CULTIVO
El Obraje Pinos #1	-101° 36' 24.313"	22° 10' 57.0894"	2470	Arena-limo	
El Obraje Pinos #2	-101° 38' 6.7488"	22° 10' 29.3772"	2470	Arena-Limo	
Lázaro Cárdenas (Rancho Grande) El Hancón #1	-102° 57' 55.0794"	23° 28' 9.8688"	2010	Aluvión	ZONA DE CULTIVO
Lázaro Cárdenas (Rancho Grande) El Hancón #2	-102° 57' 52.6788"	23° 28' 30.2196"	2010	Arenisca-conglomerado Polimictico	

3.1.3 Arreglo experimental para la obtención de espectros gamma por Laboratorio

Para la determinación en Laboratorio de la radiactividad ambiental, las muestras pretratadas contenidas en los Marinellis de 500 g se colocaron dentro del blindaje de plomo para ser medidas con el detector por un tiempo de 40000 segundos ya que es el tiempo necesario para lograr un error estándar inferior al 2% en el pico de ^{40}K (Flavio Manuel Nava Maldonado 2012).

3.2 Área de estudio, muestreo y preparación de muestras

Las mediciones *In Situ* se realizaron en un área de aproximadamente de 10 m, en el cual se recolectaron muestras de cada sitio donde se hizo medición *In Situ*, consistió en excavaciones a 25 cm de profundidad; utilizándose como herramientas una barra de hierro, cinta métrica y una pala de plástico; dentro del mismo núcleo se realizaron perfiles de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm, 15 a 20 cm y de 20 a 25 cm, donde se recolectaron un total de 10 muestras por sitio colocándose en bolsas de polietileno limpias para rotularse con su código de identificación como se muestra en la siguiente Figura 7.



Figura. 7 Recolección de muestras de suelo

Cada muestra de suelo fue colocada a temperatura ambiente en charolas de aluminio cubiertas con películas plásticas con la finalidad de evitar cualquier tipo de contaminación cruzada durante el secado. Después se tamizaron a una malla de $25.4\ \mu\text{m}$ para la eliminación de piedras y vegetación que las muestras pudieran contener y así homogenizar cada muestra, tal como se muestran en la Figura 8.



Figura. 8 Tamizado de muestras de suelo.

Se colocaron nuevamente en charolas de aluminio para ponerse una vez más a secado en estufa a 90°C durante dos horas cada muestra, hasta llegar a peso constante para después pesarse y transvasarse en un recipiente cilíndrico estándar hermético (Marinelli). Los recipientes fueron sellados para evitar la fuga de radón, En promedio se pesaron 500g de suelo procesado, tal como se aprecia en la Figura 9.



Figura. 9 Vaciado y sellado de muestras en Marinellis.

4 Resultados y Discusión

4.1 Obtención de espectros

Los espectros de rayos gamma que se obtuvieron mediante las mediciones *In Situ* y de Laboratorio utilizando el sistema de espectrometría gamma GeRe-3522, con el software Genie 2000 que controla la adquisición y el análisis de los picos corresponden a las principales emisiones gamma en las cuales se destacan por su altura y área para el conteo.

En la figura 9 se muestra el espectro que se obtuvo en el primer sitio de medición de la presa de *Santiago el Chique, Tabasco (Río arriba)*, destacando los fotopicos de interés en color rojo.

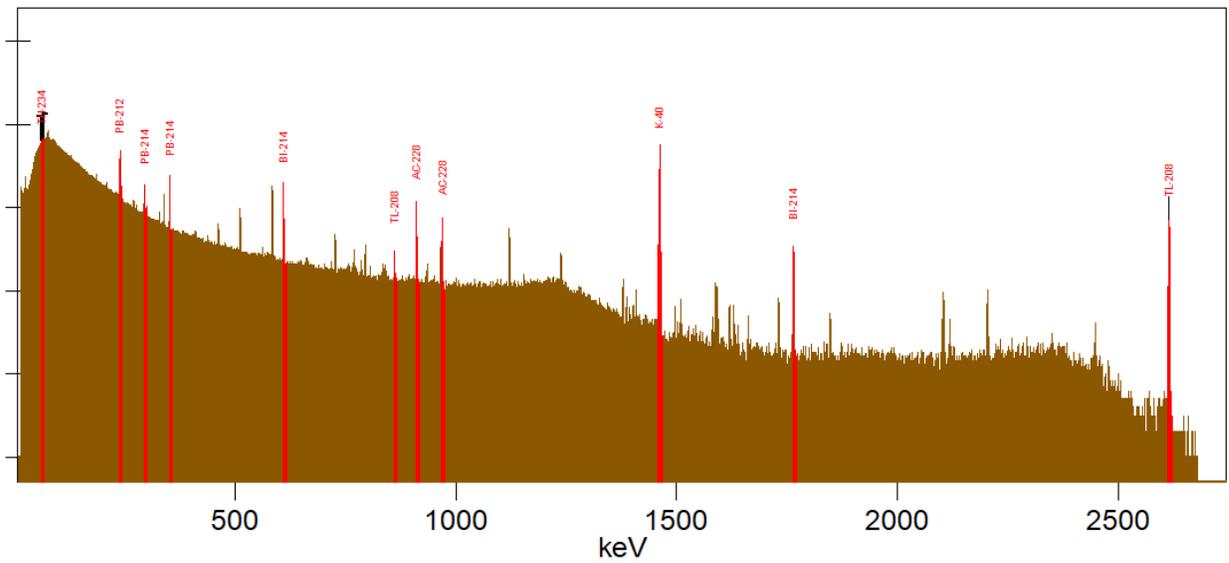


Figura. 10 Espectro de rayos gamma *In Situ* No. 1 Chique río arriba del Municipio de Tabasco

La Figura 10 muestra el espectro gamma obtenido en el Obraje, Pinos y de igual forma que anterior en forma logarítmica marcado con los fotopicos de interés.

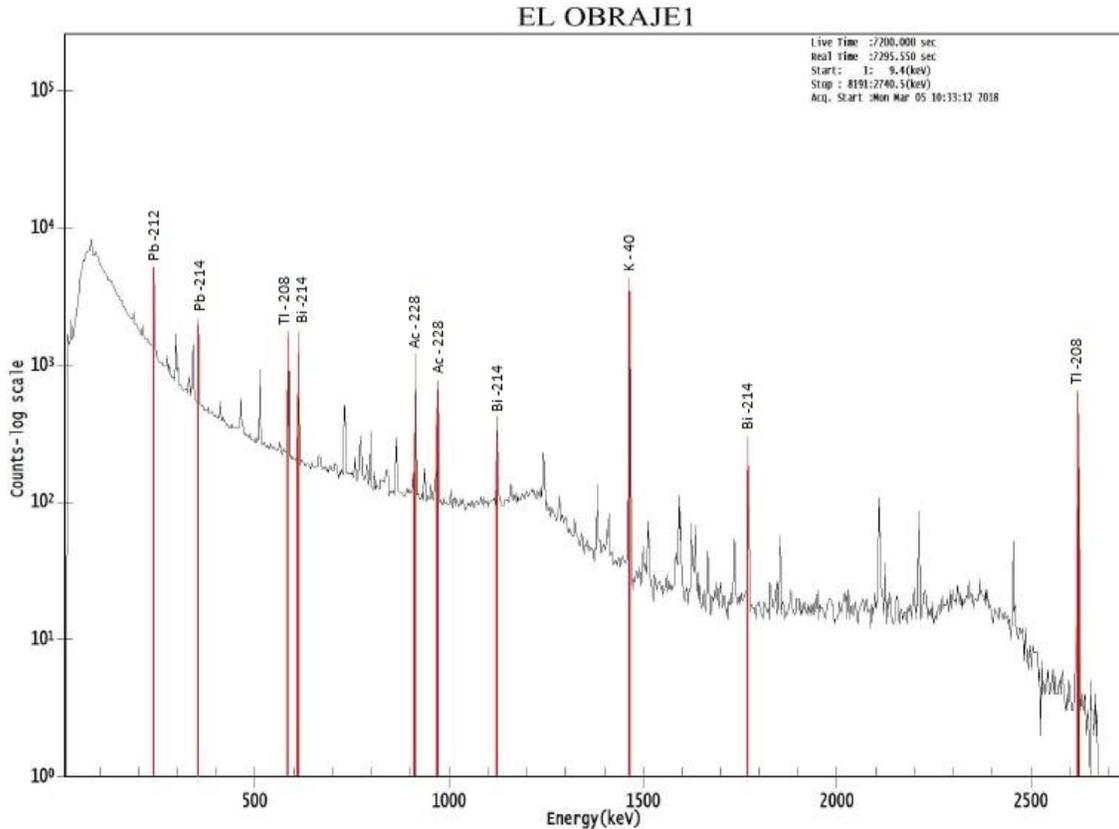


Figura. 11 Espectro de rayos gamma del sitio 1 de medición del Obraje Pinos *In Situ*.

En la Figura 12 se muestra el espectro que se obtuvo *In Situ* en la presa grande de San Marcos del municipio de Loreto mostrando los diferentes radionúclidos de interés cabe mencionar que no se obtuvo un 2 do espectro en el segundo punto de localización debido a fallas técnicas de energía en este punto no se podrá hacer una correlación con las muestras de Laboratorio.

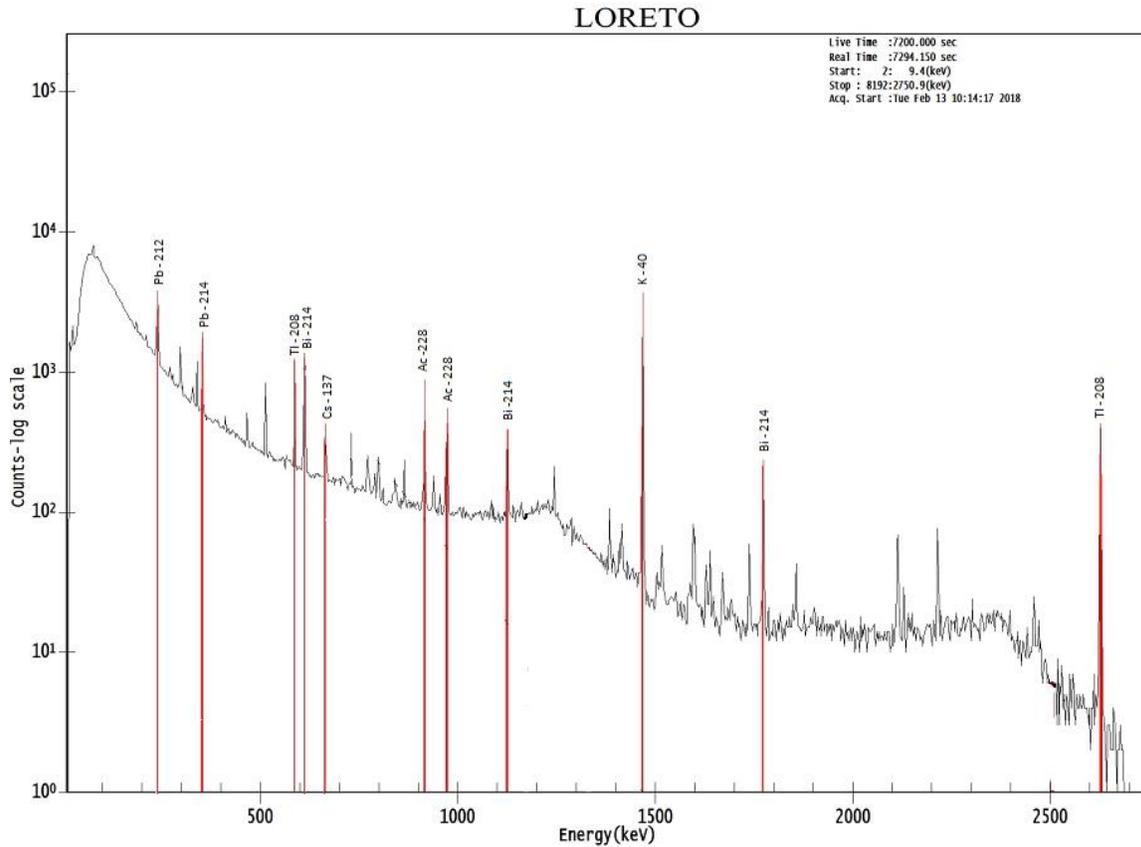


Figura. 12 Espectro de rayos gamma *In Situ* del Municipio de Loreto.

4.1.1 Actividad Mínima Detectable *In Situ*.

La actividad mínima detectable se conoce por ser la actividad mínima que puede ser detectada con un 95 % de fiabilidad, en la Figura 13 se muestra un acercamiento a un fotopico obtenido de las mediciones *In Situ*; donde se observan dos regiones, una que sobresale y que corresponde al área neta y la otra, la base en la que ésta está montada y es una parte del llamado continuo Compton. Esta base se utiliza para calcular de acuerdo con el ICRU 53 (1934) y Nir-El & Haquin, (2001) para determinar la Actividad mínima detectable para la energía en cuestión.

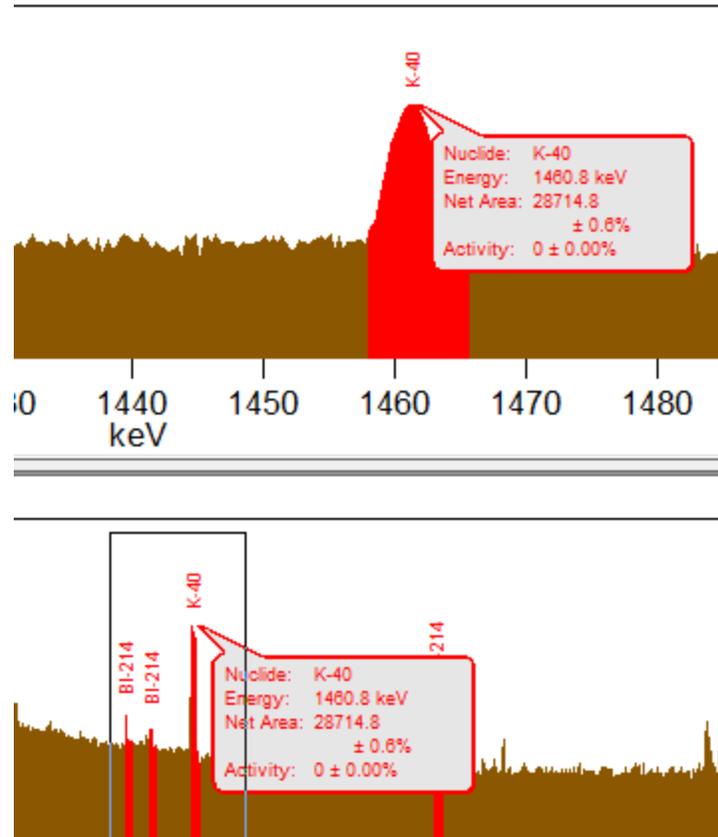


Figura. 13 Acercamiento de un fotopico.

La ecuación que se utiliza para la obtención de estos resultados es la siguiente;

$$AMD = \frac{2.71 + 3.29 \sqrt{\text{continuo} \left(1 + \frac{N_c}{2n}\right)}}{\text{tiempo vivo} * \text{eficiencia} * \text{probabilidad} * \left(\frac{N_f}{A}\right)} \quad (20)$$

Donde:

N_c es la cantidad de canales en el ROI (Región de interés) , n : la cantidad de canales utilizados a ambos lados de la ROI para la estimación de fondo, *Tiempo vivo* (t_s): es el tiempo vivo en segundos, *Eficiencia* (ϵ), (γ): Probabilidad de emisión del rayo gamma y (N_f/A) : es el área del campo de conteo (m^2) haciendo el álgebra correspondiente y las consideraciones pertinentes para mediciones *In Situ* la expresión matemática para AMD para mediciones in situ queda de la siguiente manera:

$$AMD = \frac{\left(\frac{2.71 + 3.29\sqrt{2 * \text{continuo}}}{\text{tiempo vivo} * \text{eficiencia} * \text{probabilidad}} \right)}{\text{factor de correccion} \left(\frac{Nf}{A} \right)} \quad (21)$$

Y eso lo dividimos entre el factor de corrección que sería $\left(\frac{Nf}{A}\right)$ un ajuste lineal y un ajuste superficial que de acuerdo en la literatura se considera un 1m^2 para las unidades.

La actividad mínima detectable para la serie de $4n$ tiene valores de 1.04 Bq/m^2 hasta 9.16 Bq/m^2 y para la serie $4n+2$ comprende valores de 6.61 Bq/m^2 y para el caso de ^{40}K se obtuvo de 21.47 a 28.27 Bq/m^2 se presenta un modelo similar para cada sitio en la tabla 2

Tabla 2. Actividad Mínima Detectable *In Situ* de cada emisor gamma perteneciente a la serie $4n$ y $4n+2$.

Serie 4n								
		Chique 01	Chique 02	Loreto 01	Obraje 01	Obraje 02	Hancón 01	Hancón 02
Núclido	Energía keV	AMD Bq/m ²						
²¹² Pb	238.6	1.63	1.95	1.63	1.66	1.59	1.72	1.48
²⁰⁸ Tl	583	1.34	1.85	1.05	1.04	1.50	1.69	1.54
²²⁸ Ac	911	1.61	2.19	1.48	2.36	1.98	2.14	1.55
²²⁸ Ac	969.1	2.43	2.77	2.33	2.29	6.56	2.48	2.31
²⁰⁸ Tl	2615	9.16	3.42	2.68	9.04	8.56	8.52	2.19
Serie 4n+2								
Núclido	Energía	AMD Bq/m ²						
²¹⁴ Pb	295.2	3.14	1.68	2.97	3.02	2.75	3.17	2.93

^{214}Pb	351.9	1.63	1.70	1.49	1.49	1.47	1.58	1.49
^{214}Bi	609	1.13	1.11	1.02	1.04	1.04	1	1.22
^{214}Bi	1123	3.46	3.41	3.06	2.84	3.05	3.53	3.38
^{214}Bi	1765	2.28	2.52	2.19	2.22	6.61	2.29	1.86
^{40}K	1460.8	25.72	28.27	22.28	23.19	21.47	26.92	25.55

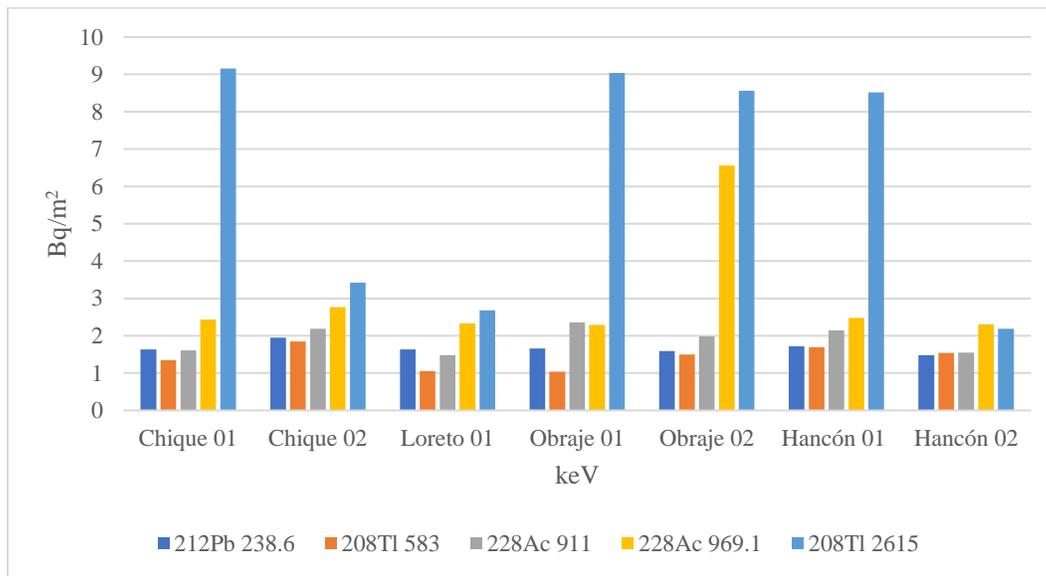


Figura. 14 Actividades mínimas detectables de las mediciones *In Situ* de los diferentes sitios de interés y radionúclidos perteneciente a la serie 4n.

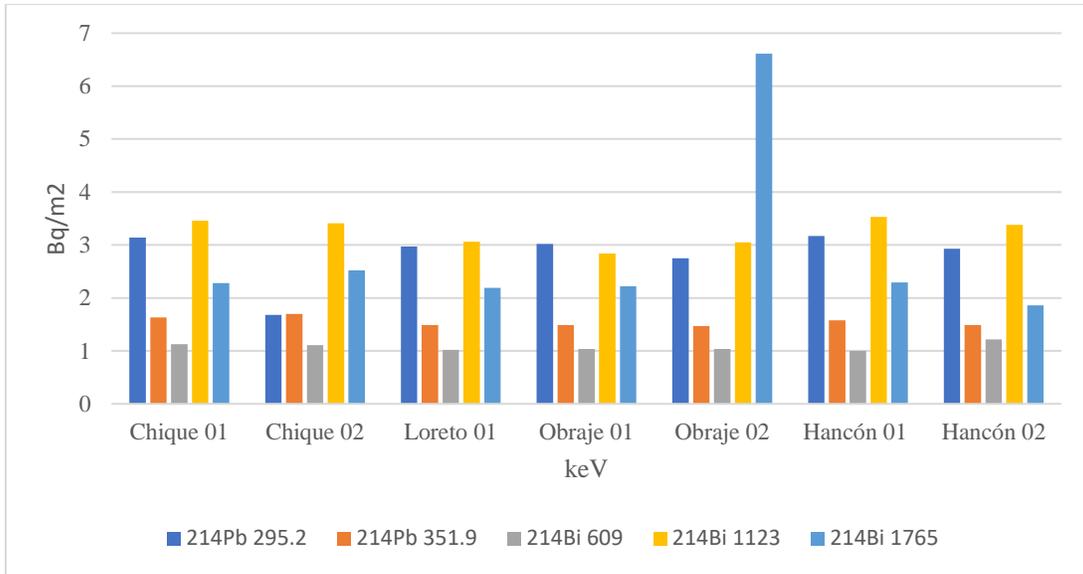


Figura. 15 Actividades mínimas detectables de las mediciones *In Situ* de los diferentes sitios de medición y radionúclidos perteneciente a la serie 4n+2.

Se aprecia en la Figura 14 que las AMD presentan un comportamiento constante en los diferentes puntos de medición, pero a diferencia de ellos se presenta una mayor elevación en los radionúclidos del ^{208}Tl con una energía de 2615 keV en los sitios del Chique 1, Obraje 1, 2 y finalmente en Hancón 1; así como el ^{228}Ac con la energía de 911 keV únicamente en el sitio del Obraje 2.

A diferencia en la Figura 15 para la serie de 4n+2 se muestran las mediciones más constantes y en los diferentes puntos de medición únicamente se presenta en el Obraje 2 el Radionúclido de ^{214}Bi con la energía de 1765 keV.

Las mediciones de espectrometría de rayos gamma *In Situ* depende de la distribución de la tasa de recuento que contribuye de manera importante en la incertidumbre total que se usa en la espectrometría de rayos gamma de laboratorio en cuanto la humedad del suelo contribuye de manera importante a la incertidumbre total esto para identificar y corregir.

4.1.2 Actividades mínimas detectables (AMD) para muestras de Laboratorio

Para la detección de la AMD de laboratorio se basa con Al-Masri & Doubal, (2013) y por Fong & Alvarez, (1997):

$$AMD = \frac{L_D}{t_s \times \varepsilon' \times \gamma \times m \times K_1 \times C_m \times U_f} \quad (22)$$

Donde:

L_D : es el límite de detección (en conteos) en el cual este valor asegura la cantidad mínima de radiación emitida por la muestra que puede ser detectada.; es la eficiencia de detección corregida por atenuación (en conteos por rayos gamma) a cada energía en cuestión; t_s : Tiempo vivo en segundos, ε : Eficiencia, m : Es la masa de la muestra medida, en kg. γ : Probabilidad de emisión del rayo gamma, K_1 : es el factor de corrección para la descomposición del núclido desde el momento en que se recolectó la muestra hasta el inicio de la medición dada como, es el tiempo transcurrido desde el momento del muestreo hasta el comienzo de la (s) mediciones C_m : factor de conversión de masa de la muestra para traducir los valores de radiactividad calculados a la masa de la muestra original, U_f : es el factor de conversión de unidad de Bq a la unidad de actividad seleccionada.

Para un sistema de detección radiológica, se recomienda la Ecuación de acuerdo con Currie (1968) y solo se usa para calcular el límite de detección un área de interés, la tasa de conteo que es estadísticamente diferente al fondo con los errores preestablecidos de Tipo I y Tipo II se eligen para que sean de 0.05 cada uno;

$$LD_{95} = 4.65 \sqrt{\frac{R_b}{t_b}} + \frac{2.71}{t_b} \quad (23)$$

Donde: el L_D es el límite de detección en cuentas por minuto (cpm) inferior al 95%, donde R_b es la tasa de conteo del fondo en cpm y t_b es el tiempo de conteo para la medición de fondo en minutos (Fong & Alvarez, 1997).

Para la conversión de unidades relativas a específicas se obtienen al dividirse entre la masa de cada una de las muestras.

$$\frac{AMD (Bq)}{masa (Kg)} \quad (24)$$

Las actividades mínimas detectables de laboratorio para los diferentes puntos y cada una de las series se presentan en las Figuras 16 a 23. De tal manera que para cada sitio se presentan ambos puntos de medición por Figura.

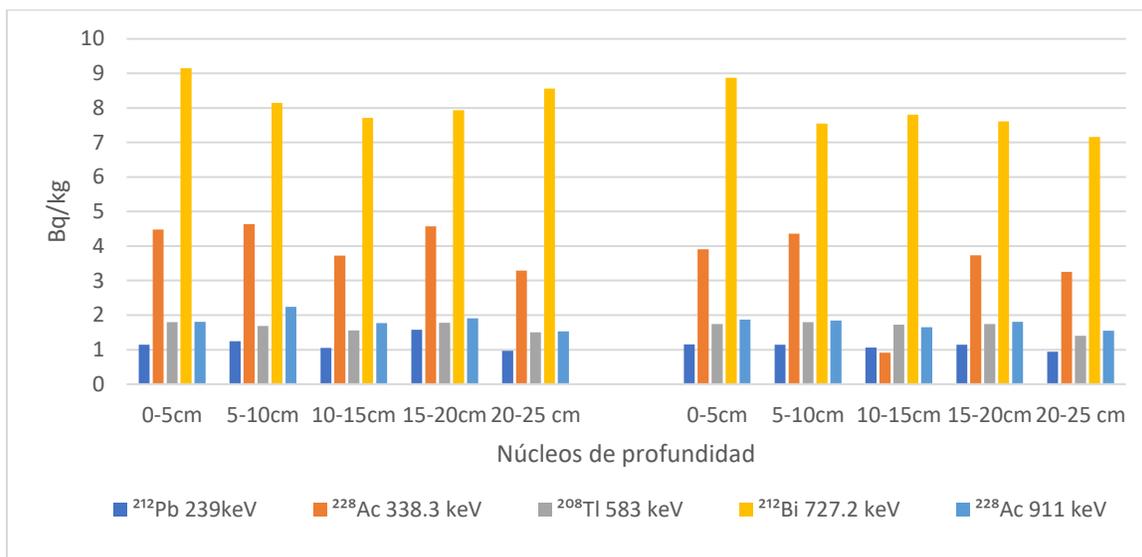


Figura. 16 Actividad mínimas detectables (AMD) de las muestras de laboratorio de la región del Chique del punto 1 y 2 de la serie 4n.

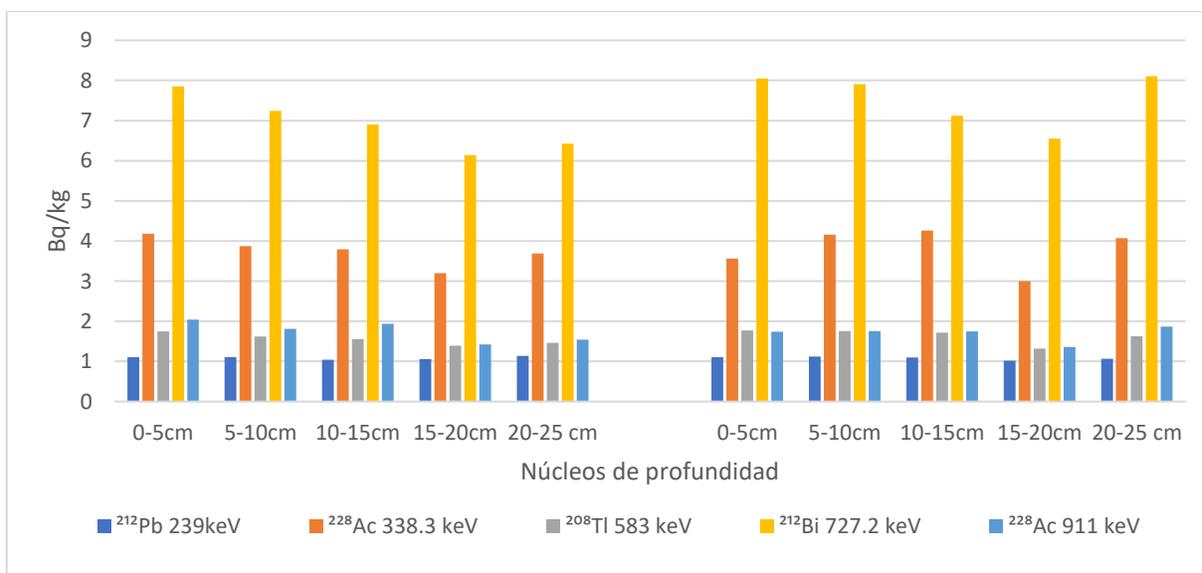


Figura. 17 Actividad mínimas detectables (AMD) de la serie 4n en muestras de laboratorio de la región de Loreto de los puntos de medición 1 y 2.

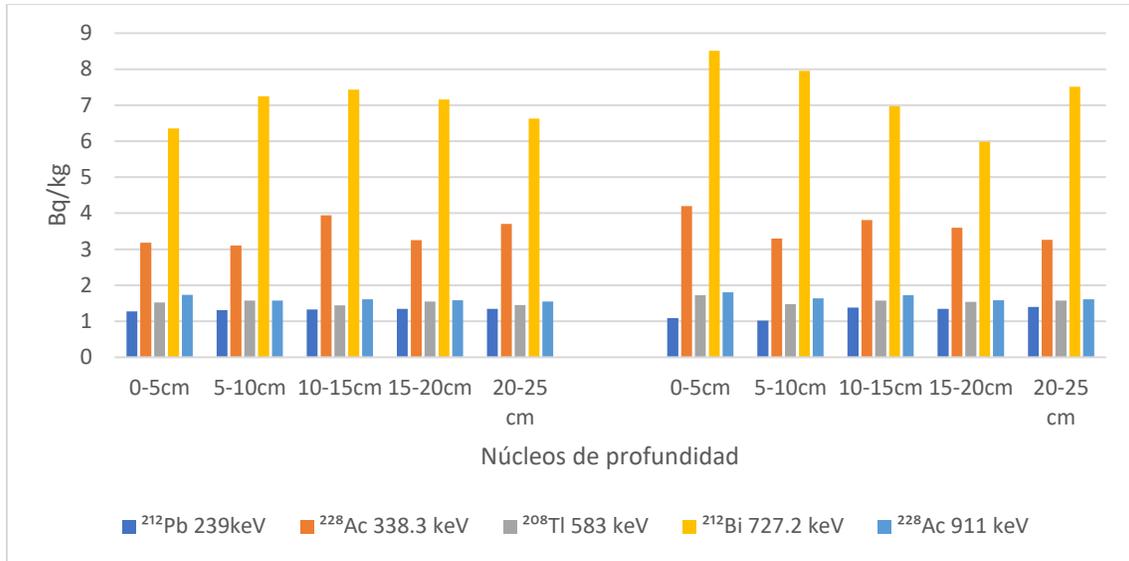


Figura. 18 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Obraje de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie 4n.

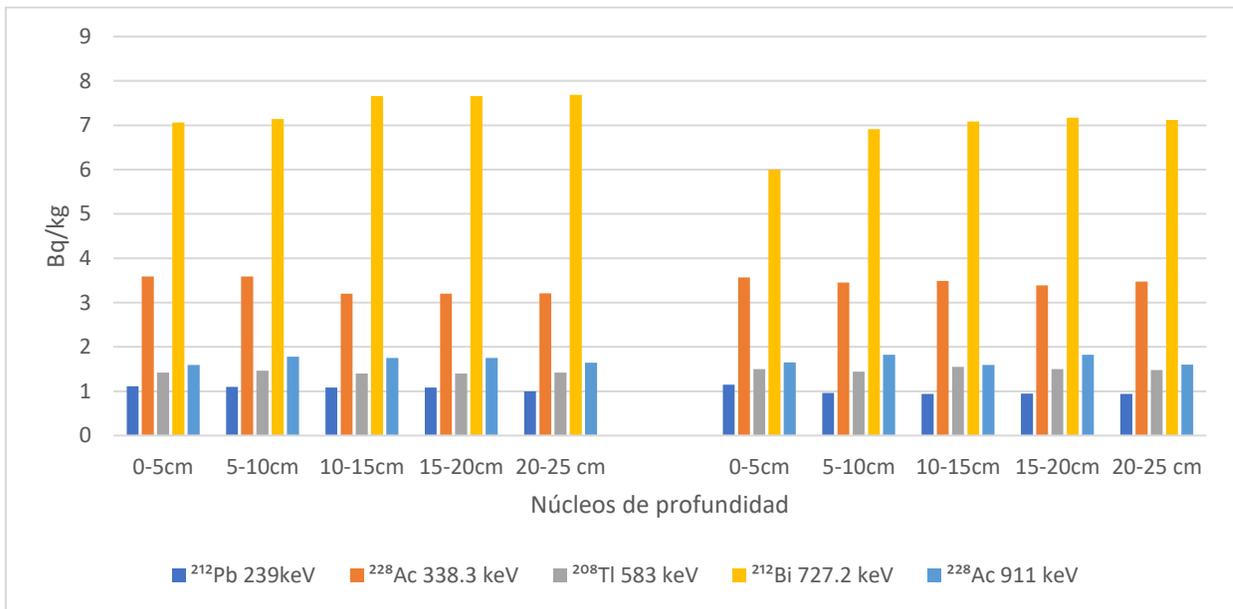


Figura. 19 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Hancón de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie 4n.

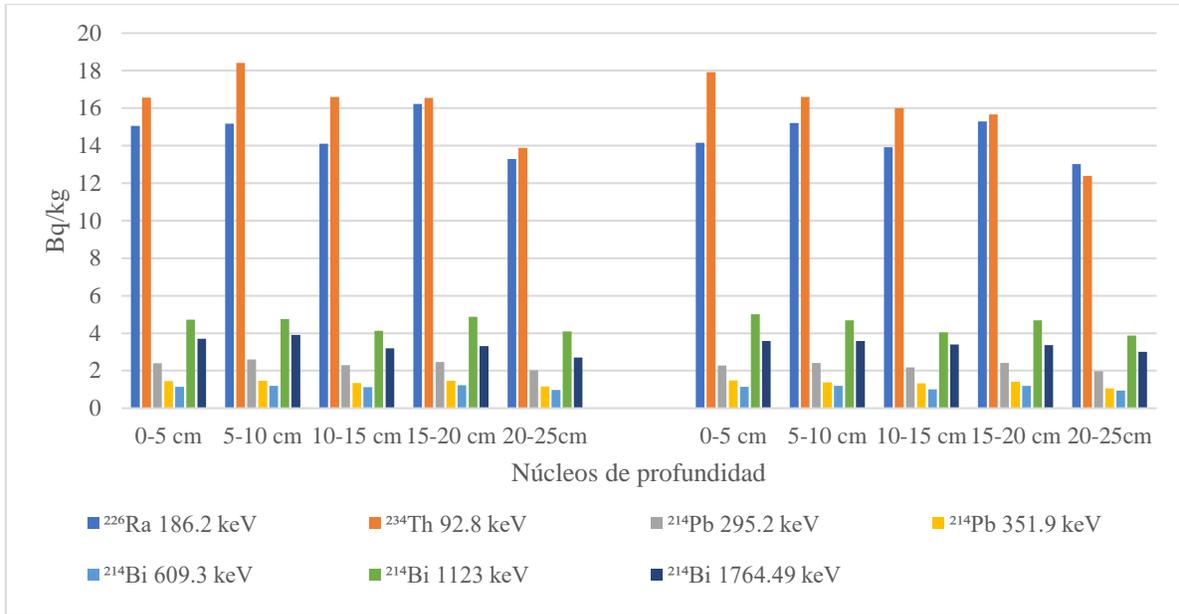


Figura. 20 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Chique de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$.

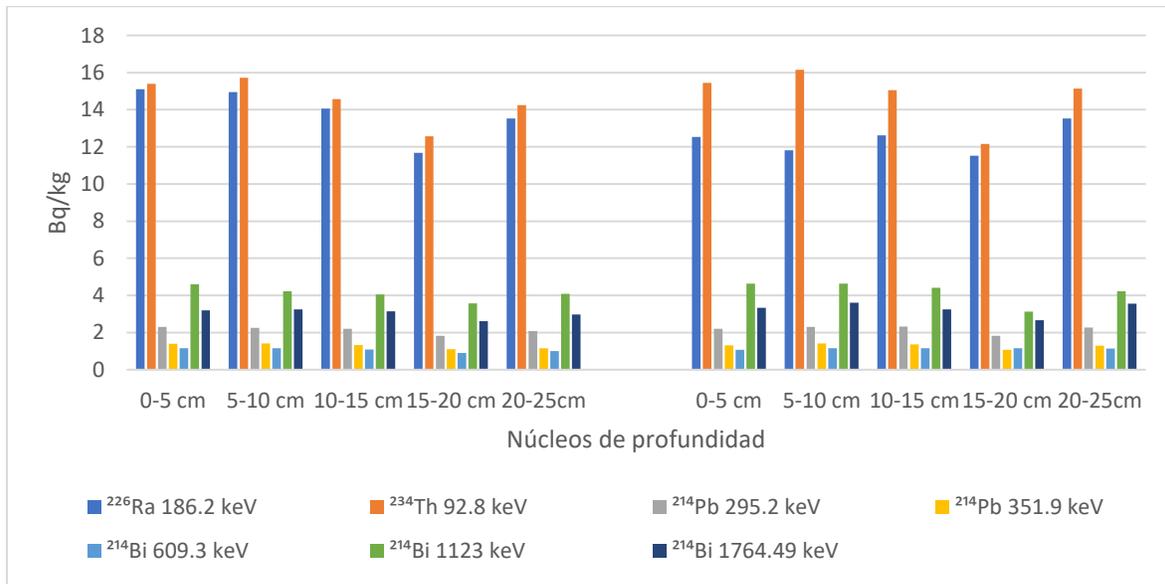


Figura. 21 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Loreto de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie $4n+2$.

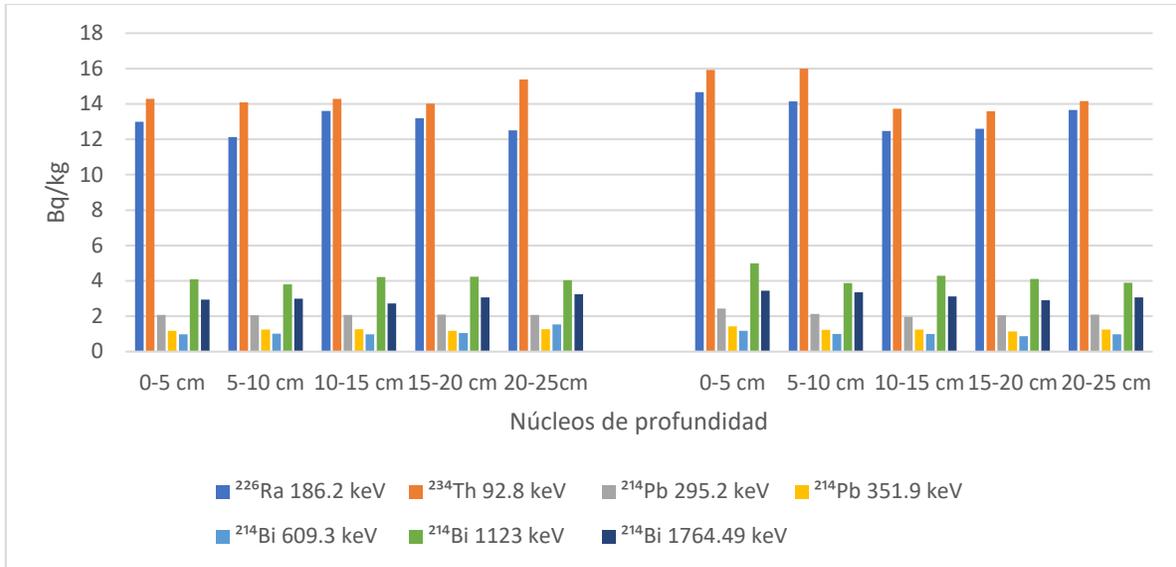


Figura. 22 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Obraje de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie 4n+2.

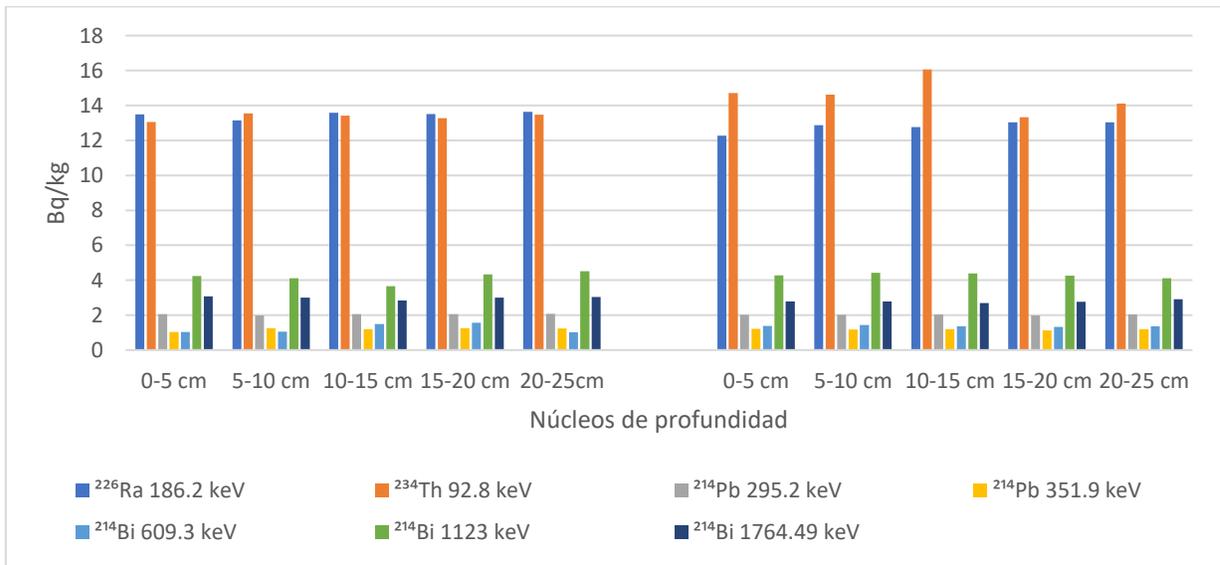


Figura. 23 Actividades mínimas detectables (AMD) de la región del Hancón de las mediciones del punto 1 y dos pertenecientes a la serie 4n+2.

4.2 Actividades de las mediciones por espectrometría gamma *In Situ*.

Se establecen criterios estadísticos que permiten afirmar la existencia de niveles de radiación superior al fondo ambiental. Los criterios, que se emplean, se basan en las ideas propuestas por Currie (1995).

La ecuación que se utiliza para la obtención de las actividades en superficie de los sitios de interés es la siguiente:

$$A = \frac{Area}{t \cdot \epsilon \cdot \gamma \left(A \Omega \int \frac{dA}{4\pi\rho^2} \right)} \quad (25)$$

- Donde: **Area**: es la razón de conteo bajo el fotopico de energía característica del radionúclido medido (cps); **t** es el tiempo de conteo vivo; **ε** es la eficiencia; **γ** probabilidad de emisión del rayo gamma. $A \Omega \int \frac{dA}{4\pi\rho^2}$ es el ajuste lineal del Angulo sólido donde se aplica un factor logarítmico utilizando las condiciones geométricas de un cilindro.

La tabla 3 muestra los datos *In situ* que fueron recabados y procesadas con las cuentas por minuto obtenidas de los fotópicos de cada espectro que representa a cada sitio de medición a partir de los cuales se consideran los factores de análisis del ICRU 53, se obtuvo la actividad superficial de los valores que corresponden a la serie 4n y ⁴⁰K, la serie 4n se presenta a través de sus líneas de interés ²¹²Pb, ²²⁸Ac, ²⁰⁸Tl, ²¹²Bi, ²²⁸Ac.

La desviación estándar es un parámetro importante que denota cuan dispersos están los datos respecto a la media muestral. Se puede expresar en porcentaje. Por lo general, si toma valores mayores al 10%, se dice que el experimento en cuestión no es reproducible.

En las tablas se puede observar que la distribución de las actividades es constante es sus diferentes radionúclidos.

Tabla 3 de Actividad superficial *In Situ* en Bq/m² de la serie 4n

SITIO	²¹² Pb		²²⁸ Ac		²⁰⁸ Tl		²¹² Bi		²²⁸ Ac	
	239 keV	σ %	338.3 keV	σ %	583 keV	σ %	727.2 keV	σ %	911.2 keV	σ %
Chique 1	31.479	2.13	35.508	3.88	38.941	1.7	53.598	4.39	41.296	1.79
Chique 2	17.601	1.34	19.173	3.35	19.638	1.4	21.745	4.29	20.503	1.45
Loreto 1	24.842	2.29	25.937	4.94	28.782	2.1	34.650	6.19	32.461	2.08
Obraje 1	12.708	1.7	15.193	3.71	15.026	1.5	18.028	4.46	15.872	1.62
Obraje 2	33.028	1.76	36.259	4.4	36.241	1.7	39.408	5.35	37.738	1.82
Hancón 1	10.474	2.08	12.010	4.77	13.125	1.8	13.323	6.22	13.365	1.97
Hancón 2	16.778	3.2	20.979	6.71	25.727	2.3	24.462	8.49	24.623	2.55

Al observar la distribución de las actividades superficiales en comparación con los otros sitios se puede observar mayor valor en los sitios del Chique 1 y Obraje 2, en que las últimas dos líneas de interés de la serie 4n como lo son ²¹²Bi y el ²²⁸Ac

En la figura 24 se presenta la distribución de los diferentes valores superficiales de actividad en las energías de cada radionúclido de interés para el caso de la serie 4n, se observa tiene una variación más elevada en las concentraciones quizá porque está sujeta a depósitos de material externo de actividades antropogénicas (fertilizantes entre otras actividades humanas) o a partir de la acumulación natural de sedimentos de acuerdo con Perrin, Carrier, & Guillot, (2006) pero también como resultado del proceso de meteorización esto para ambos sitios del Hancón.

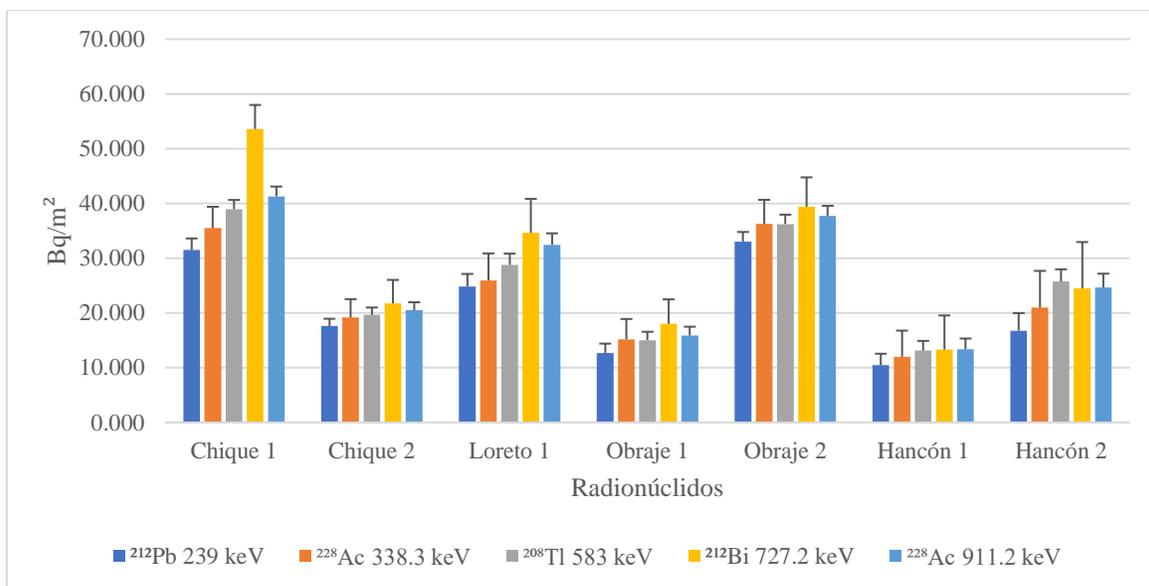


Figura. 24 Actividad superficial de la serie 4n de las mediciones *In situ* de los sitios que se midieron.

Al correr la secuencia de análisis desarrollada con la intención de obtener las cuentas netas por fotopico y su respectiva desviación estándar en porcentaje para el caso de la serie 4n+2 como se presenta en la tabla 4 basado en las líneas principales que recomienda el ICRU 53 para la serie de 4n+2 se obtuvo la actividad superficial.

Tabla 4 Actividad superficial (Bq/m^2) que se obtiene de la medición *In situ* para el caso de la serie de 4n+2.

Sitios	^{214}Pb	σ %	^{214}Pb	σ %	^{214}Bi	σ %	^{214}Bi	σ %	^{214}Bi	σ %
	295.2 keV		351.9 keV		609.3 keV		1123 keV		1764.49 keV	
Chique 1	28.316	3.58	29.434	1.88	29.812	1.53	38.099	3.53	52.253	2.63
Chique 2	25.821	3.91	28.631	2.13	27.297	1.74	35.709	3.95	49.538	2.81
Loreto 1	22.349	4.57	23.381	2.21	22.716	1.82	28.188	3.97	42.699	2.99
Obraje 1	26.985	3.89	30.013	1.90	28.282	1.55	33.239	3.74	51.177	2.60
Obraje 2	21.808	4.56	24.066	2.13	23.772	1.72	32.331	3.63	45.875	2.70

Hancón1	30.097	3.98	37.906	1.67	35.344	1.36	37.526	3.70	60.065	2.38
Hancón2	27.442	3.77	29.252	1.80	29.249	1.47	34.562	3.68	48.103	2.59

Se presenta en la Figura 25 los sitios de medición donde se presentan los valores de mayor y menor actividad de los diferentes radionúclidos que conforman la serie de 4n+2 en el que se puede ver a ^{214}Pb 295.2 keV como la de menor actividad en el sitio del Obraje 2 y la línea del ^{214}Bi 1764.49 keV resaltando como la de mayor actividad y en específico en el sitio del Hancón 1.

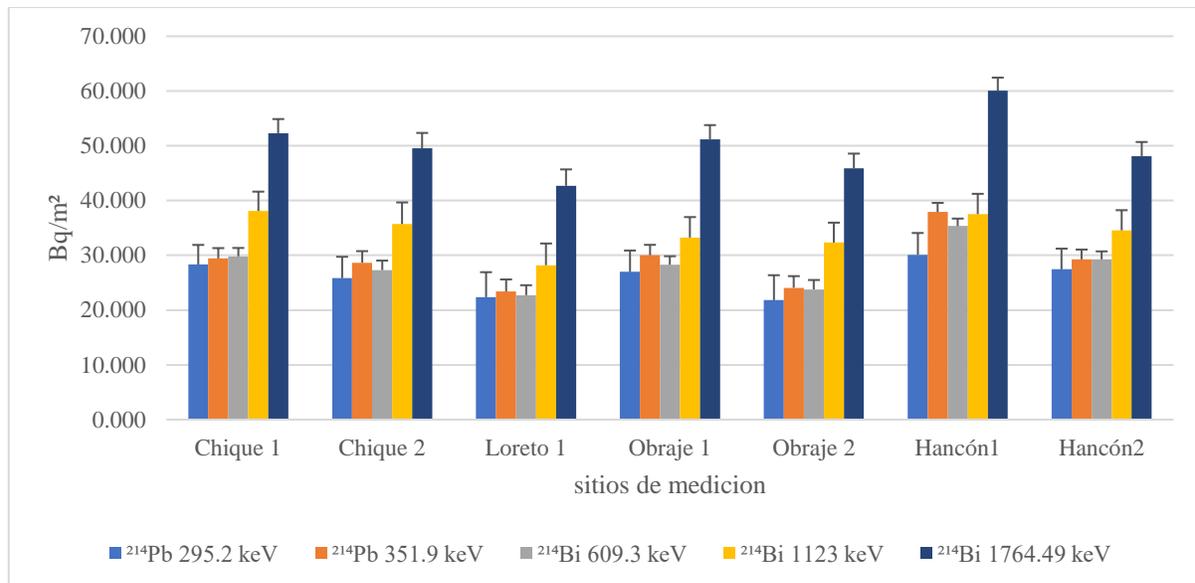


Figura. 25 Actividad superficial de la serie 4n+2 de las mediciones *In situ* de los sitios que se midieron.

4.3 Actividades específicas en muestras de la serie 4n, por espectrometría gamma en Laboratorio.

La ecuación para obtener estos resultados es la siguiente esto se aplica para mediciones de laboratorio:

$$A = \left(\frac{N_m}{t \cdot \epsilon \cdot p} - \frac{N_f}{t} \right) / m \quad (26)$$

Donde:

N_m = número de cuentas totales detectadas en el fotopico.

N_f = número de cuentas detectadas por el fondo.

ε = eficiencia del detector a dicha energía.

$\rho(E)$ = probabilidad de fotones con energía E.

t_s = tiempo de conteo.

m = masa de la muestra

Los resultados que se obtienen aplicando esta ecuación para determinar actividad específica se presentan los resultados obtenidos de los diferentes sitios en las diversas tablas de la 5 a la 8; para la serie 4n, además en cada tabla se observa en seguida con estos valores en las Figuras 26 a la 29.

Tabla 5 Actividades específicas de lo región del Chique 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.

Chique 1, 2											
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	22.718	0.82	24.192	0.80	22.718	0.82	24.329	0.84	19.695	0.86
Ac 228	338.3	21.451	2.24	27.129	1.94	20.293	2.25	24.295	2.28	22.798	1.97
Tl 208	583	19.346	1.17	19.928	1.20	17.878	1.23	21.997	1.15	17.991	1.17
Bi 212	727.2	19.573	4.09	28.009	3.38	23.597	3.53	24.875	3.78	24.975	3.18
Ac 228	911	19.706	1.35	21.433	1.38	19.706	1.35	23.417	1.32	20.053	1.32
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
		(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	29.013	0.74	29.783	0.71	35.718	0.68	30.760	0.75	32.596	0.73
Ac 228	338.3	28.042	2.02	31.305	1.97	31.224	2.01	35.611	1.82	35.579	1.88
Tl 208	583	22.738	1.14	25.115	1.14	26.147	1.16	26.405	1.14	27.848	1.15
Bi 212	727.2	28.535	3.40	31.306	3.13	34.934	3.27	34.518	3.28	35.118	3.44

Ac 228	911	25.265	1.29	28.488	1.29	30.436	1.28	30.726	1.26	31.933	1.29
--------	-----	--------	------	--------	------	--------	------	--------	------	--------	------

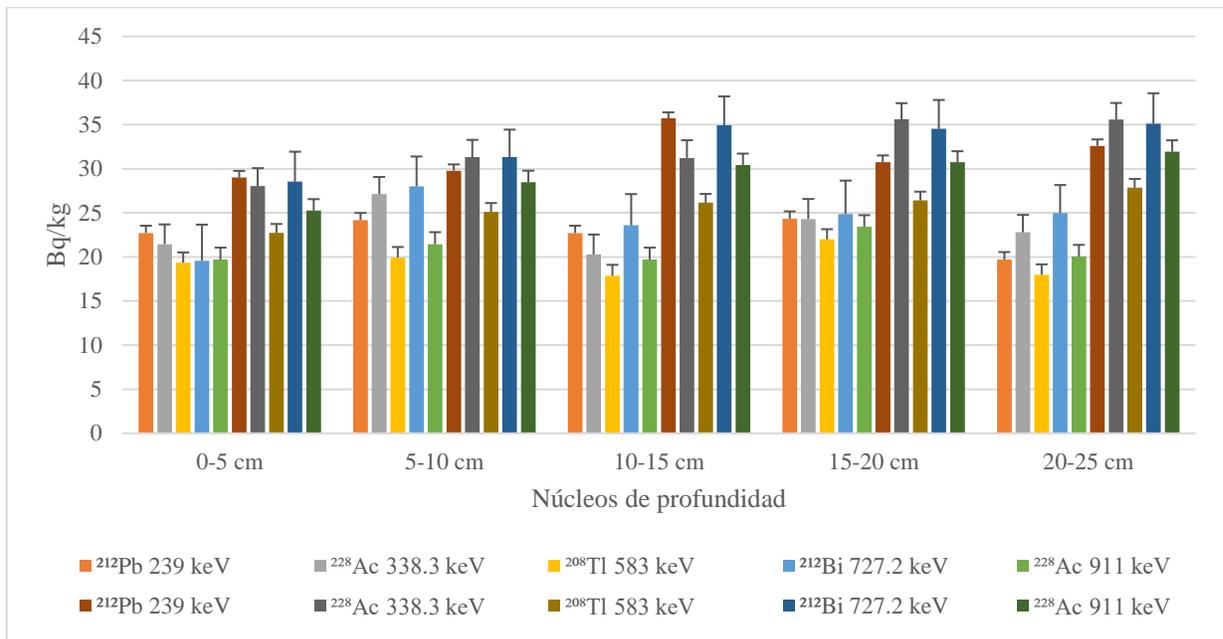


Figura. 26 Actividades específicas de los radionúclidos pertenecientes a la serie 4n de la región del Chique en ambos puntos de medición.

Tabla 6 Actividades específicas de lo región del Loreto 1, 2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.

Loreto 1 4n											
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	14.875	1.17	15.505	1.10	15.340	0.98	12.811	1.1	13.779	1.13
Ac 228	338.3	16.760	2.78	18.508	2.56	17.104	2.58	14.819	2.53	17.908	2.45
Tl 208	583	14.048	1.47	14.386	1.47	13.828	1.44	11.995	1.41	13.258	1.43
Bi 212	727.2	18.632	4.11	17.471	4.25	16.056	4.33	14.919	4.42	18.360	4.03
Ac 228	911	16.921	1.55	16.400	1.62	15.789	1.59	14.239	1.51	15.929	1.51
Loreto 2 4n											
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ

Pb 212	239	13.440	1.27	15.542	1.16	16.128	1.11	16.290	1.14	16.156	1.14
Ac 228	338.3	16.174	3.02	18.171	2.59	18.424	2.68	18.170	2.82	18.210	2.52
Tl 208	583	13.448	1.51	14.721	1.43	14.853	1.4	13.194	1.54	14.807	1.45
Bi 212	727.2	16.853	4.47	16.713	4.74	17.785	4.3	19.736	4.32	19.128	4.32
Ac 228	911	15.815	1.62	16.861	1.59	16.291	1.6	16.252	1.68	16.752	1.56

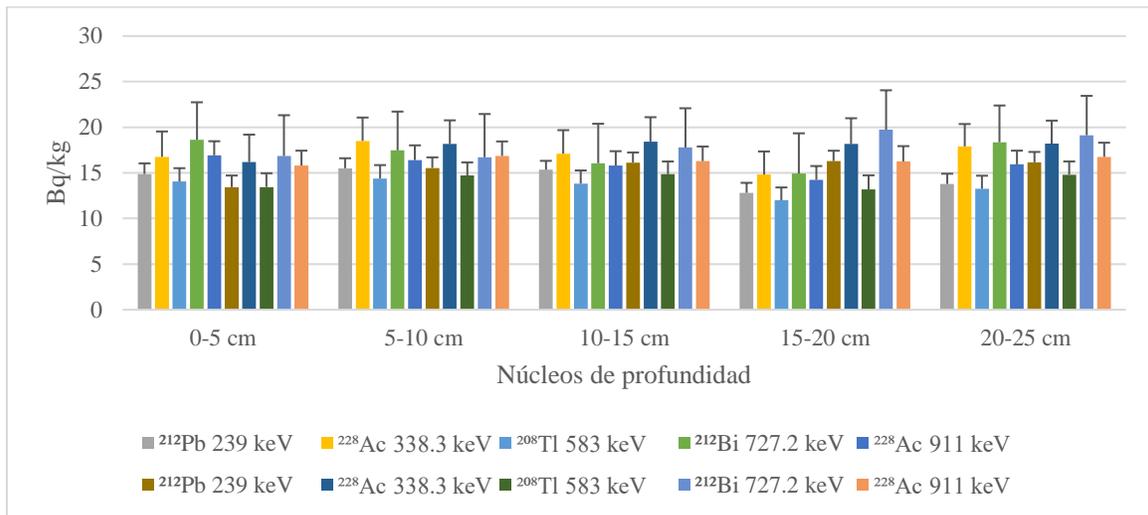


Figura. 27 Actividades específicas de los radionúclidos pertenecientes a la serie 4n de la región de Loreto de ambas mediciones.

Tabla 7 Actividades específicas de lo región del Obraje 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.

Obraje 1 4n											
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	16.709	0.94	19.421	0.88	17.116	0.95	17.758	0.97	14.073	1.10
Ac 228	338.3	19.203	2.37	20.191	2.27	20.492	2.30	20.882	2.22	21.234	2.07
Tl 208	583	15.400	1.27	15.526	1.26	15.976	1.23	15.957	1.27	12.795	1.40
Bi 212	727.2	18.892	3.96	19.015	4.01	23.144	3.30	20.755	3.75	24.725	3.24
Ac 228	911	17.738	1.43	17.713	1.44	18.213	1.35	19.178	1.33	14.616	1.56
Obraje 2 4n											
Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ

Pb 212	239	16.678	0.94	18.191	0.96	18.229	0.93	18.262	0.94	28.643	0.69
Ac 228	338.3	17.191	2.47	19.508	2.32	20.001	2.30	22.018	2.10	21.747	2.15
Tl 208	583	15.027	1.30	16.071	1.28	16.020	1.24	16.322	1.23	16.899	1.21
Bi 212	727.2	20.576	3.65	20.678	3.83	18.699	3.88	20.230	3.52	22.939	3.27
Ac 228	911	18.092	1.38	18.597	1.43	18.774	1.39	18.791	1.39	19.832	1.35

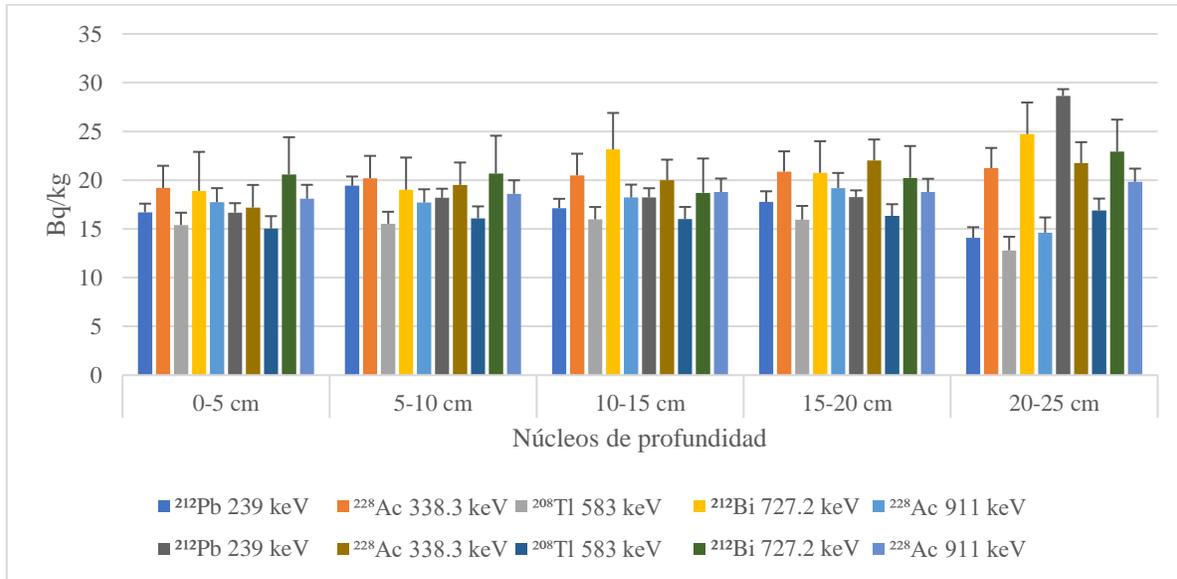


Figura. 28 Actividad específica de los radionuclidos que conforman la serie 4n de la region del Obraje Pinos de las mediciones de ambos puntos.

Tabla 8 Actividades específicas de lo región del Hancón 2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n.

Núcleos 4n		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	13.648	1.18	35.756	1.22	12.761	1.23	45.565	1.23	12.965	1.17
Ac 228	338.3	15.813	2.70	42.358	2.80	15.513	2.58	41.201	2.79	16.089	2.58
Tl 208	583	12.314	1.45	34.534	1.46	12.313	1.46	33.546	1.47	11.622	1.51
Bi 212	727.2	14.404	4.69	46.560	4.38	17.105	4.29	40.085	4.60	15.135	4.71
Ac 228	911	14.934	1.60	39.440	1.67	15.104	1.57	39.643	1.65	14.509	1.63
Núcleos 4n Radioisótopo		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
		(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 212	239	7.414	1.83	7.676	1.80	7.410	1.89	7.341	1.77	8.662	1.60

Ac 228	338.3	9.861	4	10.955	3.54	11.066	3.49	10.260	3.58	11.292	3.36
Tl 208	583	8.406	1.80	8.114	1.86	8.376	1.81	7.830	1.86	8.664	1.75
Bi 212	727.2	11.549	4.74	10.788	5.25	10.134	5.78	10.644	5.75	12.291	5.18
Ac 228	911	9.468	2.05	10.479	1.91	9.782	2.02	9.543	2.02	10.176	1.97

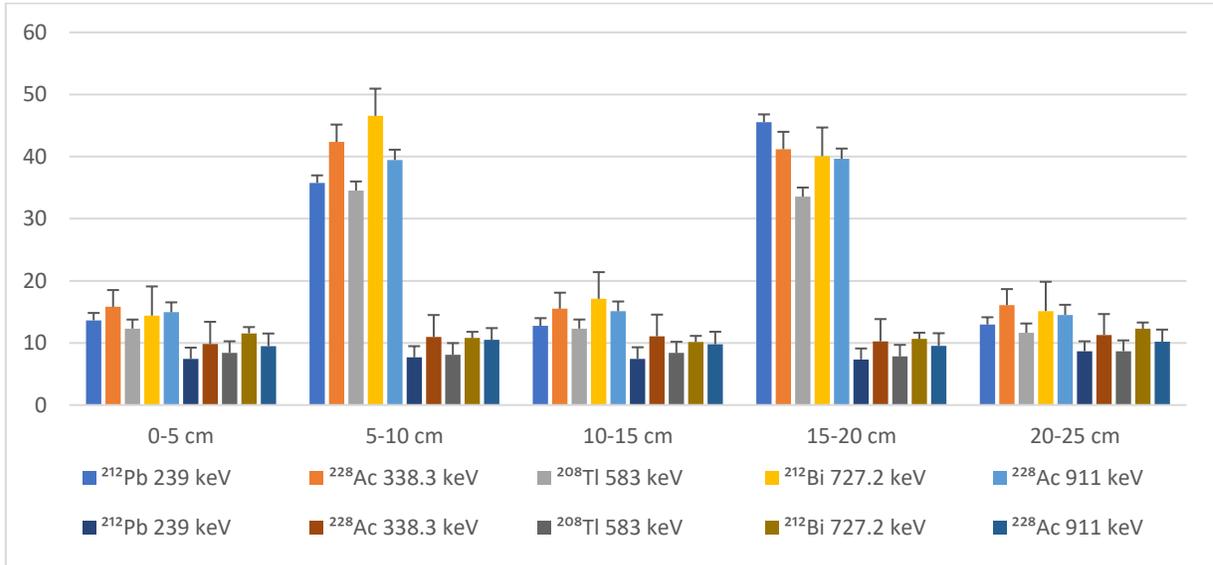


Figura. 29 Actividad específica de los radionuclidos que conforman la serie 4n de la region de Lazaron Cardenaz el Hancón.

4.3.1 Actividades específicas en muestras de la serie 4n+2 y de ⁴⁰K, por espectrometría gamma en Laboratorio.

Los resultados obtenidos para la serie 4n+2 al aplicar la ecuación 26 se obtienen las actividades específicas para cada sitio estos se presentan a partir de las tablas 9 a la 12 y seguida de sus respectivas graficas tal como se muestran en las Figuras 30 a la 33.

Tabla 9 Actividades específicas de la región del Chique 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2, .

Chique 1, 2											
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	37.609	2.14	36.514	2.37	35.109	2.28	42.006	2.13	34.343	2.14
Pb 214	351.9	38.961	1.23	40.809	1.26	38.961	1.23	44.886	1.2	36.092	1.22
Ra 226	186.2	73.154	4.63	68.649	5.20	69.111	4.49	73.175	4.43	65.417	3.90

Th 234	92.8	42.932	5.98	29.069	7.98	28.296	8.82	16.640	8.56	27.515	7.03
Bi 214	609	32.023	1.25	33.416	1.29	32.023	1.25	37.765	1.18	29.473	1.26
Bi 214	1123	34.452	2.93	33.803	3.37	34.452	2.93	41.244	3.19	31.826	3.36
Bi 214	1765	48.896	2.31	45.960	2.53	48.896	2.31	57.586	2.27	47.591	2.29
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
		(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	37.186	2.37	41.219	2.31	43.897	2.31	43.463	2.28	42.987	2.49
Pb 214	351.9	39.565	1.32	42.939	1.32	45.288	1.32	44.865	1.34	44.016	1.4
Ra 226	186.2	65.004	4.53	66.438	5.00	65.852	3.58	64.743	4.47	67.286	4.52
Th 234	92.8	14.644	9.52	38.883	6.74	44.234	7.97	32.346	7.35	19.070	7.42
Bi 214	609	33.108	1.13	34.699	1.3	35.837	1.38	35.969	1.36	36.739	1.39
Bi 214	1123	37.560	3.22	35.373	3.69	35.568	3.38	42.860	3.3	42.393	3.52
Bi 214	1765	47.355	2.49	53.372	2.47	57.938	2.44	56.454	2.37	50.918	2.68

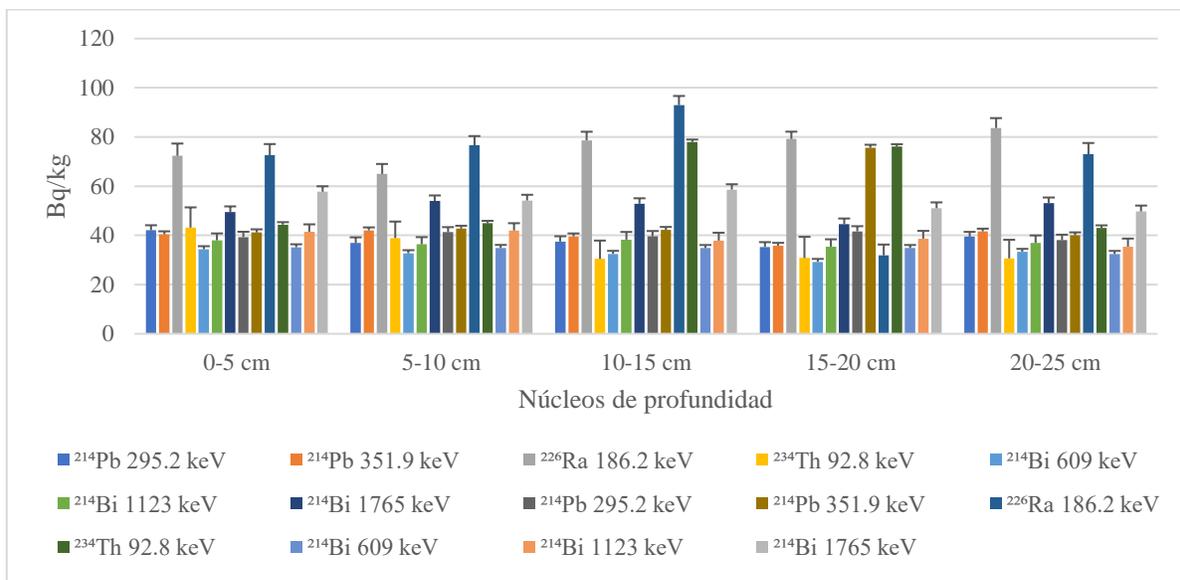


Figura. 30 Actividades específicas de los radionuclidos pertenecientes a la serie 4n+2 de la region del Chique.

Tabla 10 Actividades específicas de lo región de Loreto 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2.

Loreto 1 4n+2											
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	42.095	2.03	36.926	2.29	37.509	2.14	35.327	1.93	39.499	1.93
Pb 214	351.9	40.418	1.24	42.039	1.21	39.577	1.22	35.798	1.17	41.619	1.11
Ra 226	186.2	72.350	4.98	64.961	4.07	78.630	3.50	79.195	2.96	83.629	4.05
Th 234	92.8	43.163	8.22	38.883	6.74	30.437	7.46	30.813	8.60	30.646	7.57
Bi 214	609	34.382	1.23	32.704	1.28	32.469	1.24	29.247	1.19	33.355	1.17
Bi 214	1123	37.990	2.81	36.416	2.88	38.282	3.11	35.434	2.98	36.937	3.06
Bi 214	1765	49.462	2.32	53.953	2.28	52.841	2.24	44.589	2.28	53.173	2.22
Loreto 2 4n+2											
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	39.301	2.17	41.289	2.07	39.640	2.13	41.645	2.09	38.115	2.17
Pb 214	351.9	41.198	1.26	42.718	1.20	42.228	1.2	75.588	1.25	39.999	1.24
Ra 226	186.2	72.589	4.54	76.631	3.74	92.928	3.74	31.883	4.39	72.980	4.58
Th 234	92.8	44.378	8.98	44.928	7.73	77.951	7.73	76.070	6.63	43.077	6.42
Bi 214	609	35.166	1.22	34.896	1.23	34.865	1.23	34.833	1.26	32.406	1.28
Bi 214	1123	41.488	3.00	42.008	2.95	37.895	3.19	38.665	3.16	35.451	3.26
Bi 214	1765	57.733	2.22	54.187	2.32	58.596	2.19	51.045	2.37	49.741	2.38

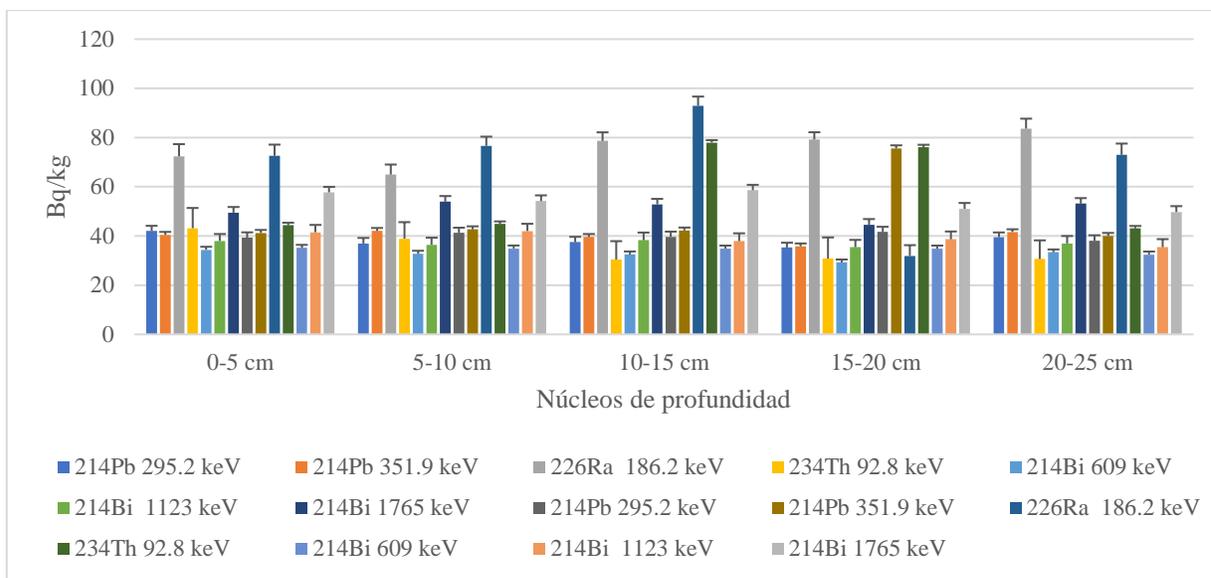


Figura. 31 Actividades específicas de los radionúclidos que pertenecen a la serie 4n+2 de la region de Loreto de ambos puntos de medición.

Tabla 11 Actividades específicas de lo región del Obraje 1,2 de los radionúclidos emisores gamma de la serie 4n+2.

Obraje 1 4n+2											
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	41.564	1.86	40.697	1.90	43.088	1.83	47.590	1.68	44.312	1.78
Pb 214	351.9	42.288	1.11	41.641	1.11	71.806	1.03	47.282	1.03	34.914	1.24
Ra 226	186.2	62.081	2.96	72.469	4.80	76.471	2.92	80.465	2.99	79.730	3.74
Th 234	92.8	23.789	8.19	38.154	8.78	29.560	8.85	36.264	6.42	25.030	7.37
Bi 214	609	35.211	1.15	34.436	1.19	36.109	1.13	36.935	1.12	28.274	1.28
Bi 214	1123	37.955	2.97	38.200	2.66	39.239	2.97	42.423	2.57	30.930	3.26
Bi 214	1765	52.277	2.23	56.505	2.17	59.589	2.04	61.177	2.1	43.398	2.38
Obraje 2 4n+2											
Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	41.780	1.73	43.552	1.85	44.212	1.77	46.466	1.56	43.959	1.65
Pb 214	351.9	40.647	1.12	44.355	1.10	44.640	1.06	44.797	1.06	46.684	1.03
Ra 226	186.2	68.176	4.64	77.878	4.16	66.038	3.85	74.05	4.04	72.341	3.24

Th 234	92.8	66.815	9.34	41.539	7.75	38.118	6.75	44.14	9.02	42.077	7.32
Bi 214	609	33.377	1.17	36.734	1.13	37.105	1.09	38.373	1.07	36.846	1.12
Bi 214	1123	37.920	2.74	36.541	3.01	40.245	2.98	41.742	2.82	40.829	2.9
Bi 214	1765	52.449	2.19	58.167	2.14	58.885	2.07	62.720	2.02	61.029	2.05

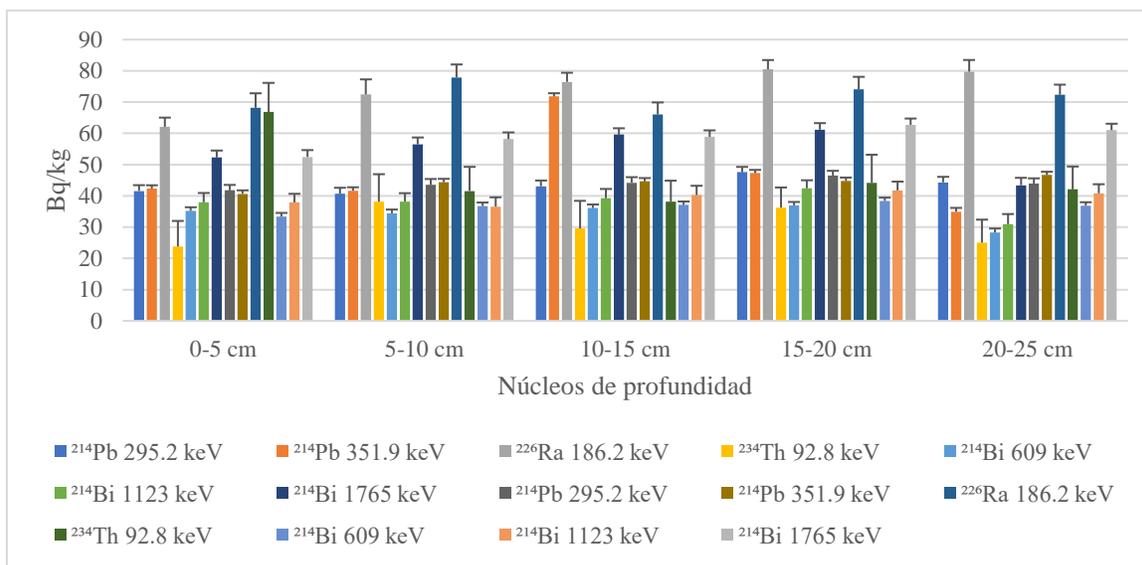


Figura. 32 Actividades específicas de ambos puntos de medición de la región del Obraje Pinos 4n+2.

Tabla 12 Actividades específicas de lo región del Hancón 1,2 de los radionuclidos emisores gamma de la serie 4n+2.

Núcleos 4n+2		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
Radioisótopo	Energía (keV)	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	43.603	1.8	46.780	1.6	45.671	1.72	45.547	1.73	44.924	1.64
Pb 214	351.9	46.549	1.03	47.060	1.03	47.140	1.02	48.077	1.01	45.754	1.04
Ra 226	186.2	70.913	3.82	46.161	4.89	53.654	4.32	76.919	3.06	47.728	4.93
Th 234	92.8	43.241	7.73	37.494	8.74	47.753	6.17	39.072	6.09	42.372	9.41
Bi 214	609	39.989	1.04	38.540	1.09	38.325	1.08	39.427	1.05	38.166	1.07
Bi 214	1123	47.720	2.59	39.281	3.11	43.494	2.84	40.773	3.01	40.689	3
Bi 214	1765	62.294	2.07	62.597	2.05	62.437	2.03	64.603	1.98	58.308	2.11
Núcleos 4n+2 Radioisótopo		0-5 cm		5-10 cm		10-15 cm		15-20 cm		20-25 cm	
		(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ	(Bq/kg)	σ
Pb 214	295.2	39.138	1.92	39.896	1.87	38.796	1.93	35.601	2.04	36.208	2.03

Pb 214	351.9	39.684	1.13	40.707	1.12	41.319	1.11	37.539	1.17	38.135	1.16
Ra 226	186.2	67.550	4.42	65.232	4.01	69.677	3.05	70.140	4.05	49.030	4.48
Th 234	92.8	31.008	6.09	36.466	9.49	33.839	6.86	33.767	9.27	28.663	7.31
Bi 214	609	33.251	1.15	33.783	1.15	32.411	1.18	31.856	1.17	31.355	1.19
Bi 214	1123	34.133	3.31	34.329	3.38	35.775	3.2	34.548	2.83	30.357	3.46
Bi 214	1765	54.983	2.1	50.714	2.2	55.620	2.12	47.201	2.26	46.813	2.31

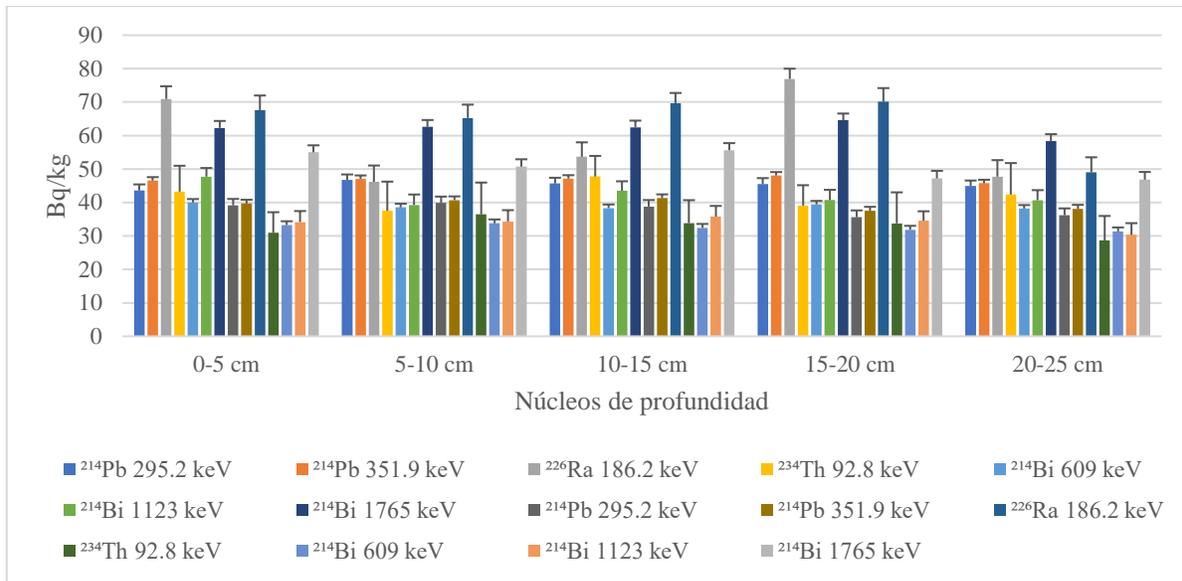


Figura. 33 Actividades específicas de los radionuclidos que forman la serie $4n+2$ del Hancón.

La tabla 13 presenta las actividades específicas de los diferentes sitios de medición de los fotopicos del ^{40}K distribuidos en los diferentes puntos de medición y de igual manera al final de cada apartado se muestran las actividades superficiales de los puntos de medición en el cual estas actividades se presentan comparándose con las mediciones de *In Situ* vs Laboratorio en la Figura 34.

Tabla 13 Actividades específicas de ^{40}K (Bq/kg), de cada uno de los sitios de interés en cada núcleo de profundidad vs *In Situ*.

Perfiles	Chique1, 2		Loreto 1, 2		Obraje 1, 2		Hancón 1, 2	
	Bq/kg	σ %	Bq/kg	σ %	Bq/kg	σ %	Bq/kg	σ %
0-5 cm	1019.171	0.5	852.576	0.54	792.007	0.53	1256.565	0.45
5-10 cm	1014.191	0.52	884.555	0.54	830.776	0.53	1248.861	0.45
10-15cm	948.042	0.51	859.635	0.53	798.234	0.53	1275.197	0.45
15-20 cm	1103.832	0.5	762.212	0.52	770.321	0.54	1226.843	0.46
20-25 cm	921.858	0.5	874.633	0.52	590.381	0.58	1216.4	0.46
<i>In Situ</i>	*1044.893	*0.55	*789.238	*0.64	*851.600	*.61	*1143.692	*0.53
0-5 cm	1132.434	0.5	782.919	0.56	936.209	0.5	1167.004	0.46
5-10 cm	1074.869	0.52	734.826	0.57	877.184	0.52	1182.657	0.46
10-15cm	1107.877	0.53	724.376	0.57	844.152	0.52	1188.982	0.46
15-20 cm	1022.087	0.54	706.262	0.58	811.133	0.53	1079.607	0.47
20-25 cm	1086.255	0.55	675.497	0.58	829.341	0.52	1093.231	0.47
<i>In Situ</i>	*1263.962	*0.50	NP	NP	*735.369	*0.66	*1028.798	*0.55

Los datos * que están en la parte de *In Situ* tanto para cada sitio se reflejan en unidades de Bq/m², se reportan estas actividades en superficie con su respectiva desviación estándar del 0.55.

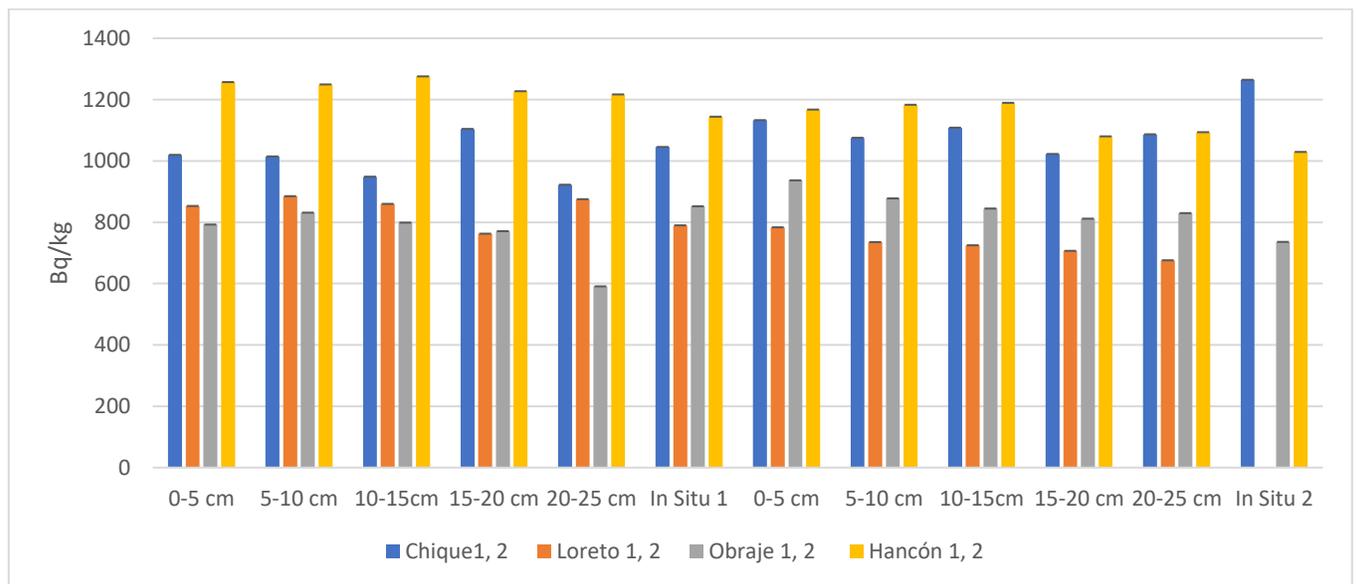


Figura. 34 Actividades específicas y superficiales de los diversos sitios en ⁴⁰K

El ⁴⁰K en cualquier parte que se realice medición siempre estará presente y no solo en los diversos suelos del Estado de Zacatecas, sino que de cualquier parte del mundo y se muestran que sus actividades son similares y constantes.

4.4 Correlación de las relaciones de Actividad gamma ambiental

Tomando como energía característica la línea 583 keV por su proximidad con la línea de interés de calibración para normalizar las líneas de ^{212}Pb , ^{228}Ac y ^{208}Tl esto para el caso de la serie 4n y la línea de emisión de 609.3 keV se usa de referencia con las líneas de 4n+2 son ^{214}Pb , ^{226}Ra , ^{234}Th y ^{214}Bi para normalizar las actividades de los radionúclido correspondientes a cada serie radiactiva de la cual se pretende encontrar las condiciones de equilibrio – disequilibrios presentes en los espectros de Laboratorio e *In Situ* (Kapsimalis *et all* 2009).

Se calcula y grafica la relación de áreas netas de interés respecto a una energía característica y así obtener las razones de actividad correspondientes para cada serie, en el caso de la 4n+2 el error promedio es de 3.42% y el error promedio para la serie 4n es de 3.63%.

$$RA = \frac{A_i}{A_r} \quad (27)$$

Donde:

A_i es la actividad de interés

A_r es la actividad de referencia.

Los radionúclidos ^{214}Pb y ^{214}Bi son descendientes del ^{222}Rn y este es descendiente del ^{238}U , en condiciones ambientales se presenta como un gas. Normalmente del suelo emana un 15% ^{222}Rn donde este alcanza a escapar hacia la atmosfera. Cabe señalar que la determinación de la actividad de 4n+2 se ha efectuado a partir de ^{226}Ra y sus descendientes como lo es ^{214}Pb y ^{214}Bi a partir de la línea de emisión de 1123 keV de ^{214}Bi que es la más cercana a la línea de 1173 del ^{60}Co por ser el pico más cercano a ^{238}U esto para encontrar las relaciones que nos permitan ver los equilibrios o disequilibrios.

Tabla 14 Correlación de las razones de Actividad 4n+2 (Bq/kg) de los sitios del Chique comparando los núcleos vs *In Situ*.

Perfiles	²²⁶ Ra	²³⁴ Th	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi
	186.2 keV	92.8 keV	295.2 keV	351.9 keV	609.3 keV	1123 keV	1764.49 keV
0-5cm	2.28	1.34	1.17	1.22	1.00	1.21	2.15
5-10cm	2.05	0.87	1.09	1.22	1.00	0.83	1.90
10-15cm	2.16	0.88	1.10	1.22	1.00	0.87	2.15
15-20cm	2.12	0.82	1.11	1.19	1.00	1.00	2.37
20-25cm	2.01	0.85	1.17	1.22	1.00	0.80	2.42
<i>In Situ</i>	0.000	0.00	0.95	0.99	1.00	1.28	1.75
Punto 2							
0-5cm	1.96	0.44	1.12	1.20	1.00	1.13	1.43
5-10cm	1.91	1.12	1.19	1.24	1.00	1.11	1.79
10-15cm	1.84	1.23	1.22	1.26	1.00	0.63	1.62
15-20cm	1.80	0.90	1.21	1.25	1.00	1.34	1.84
20-25cm	1.83	0.52	1.17	1.20	1.00	0.76	1.56
<i>In situ</i>	0.00	0.00	0.95	1.05	1.00	1.31	1.81

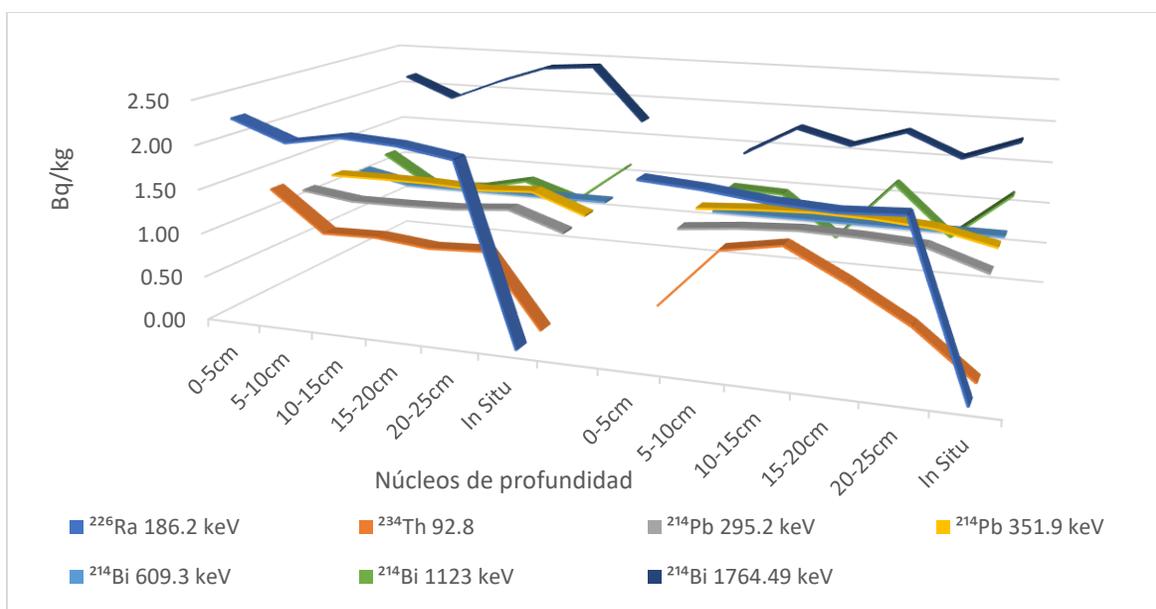


Figura. 35 Correlacion de los nucleos de lab vs *In Situ* de el Chique 1,2 serie 4n+2.

El análisis de las razones de actividad en la serie 4n+2 (tabla 14 y Figura 35) se observa que en el eje de las “Y” se representan las Actividades en Bq/kg, mientras en el eje de las “X” indica la profundidad del estrato analizado donde se encontró el radionúclido perteneciente y por último en “Z” se localizan los radionúclidos de interés.

En las líneas de ^{226}Ra y ^{234}Th no se puede realizar una correlación de equilibrio/desequilibrio debido a que en las mediciones *In situ* no se reporta actividad de todos los sitios de medición y esto se observa en las tablas referentes a la serie 4n+2 ver tablas (14, 15, 16 y 17)

En el caso de la línea de ^{214}Bi 1764.49 se presenta un desequilibrio debido a que sus valores son superiores a la unidad en muestras de laboratorio como en el sitio de interés.

Los desequilibrios pueden ser ocasionados a un posible caso de lixiviación en estos suelos de la región del Chique; ya que son sistemas abiertos y el resultado de un proceso geológico debido a la formación rocosa de estos suelos, de difusión continua o pérdida de agua intersticial, con la subsiguiente alteración química del sistema original.

Las líneas del ^{214}Pb (295.2keV y 351.9 keV) y de ^{214}Bi (609.3 keV y 1123 keV) están cerca de alcanzar el equilibrio secular debido que al hacer la correlación de actividades presentan aproximación a la unidad.

Para el caso de la Figura 36 y la tabla 15 los resultados obtenidos de Loreto presentan similitud con los de Chique en cuanto correlación de equilibrio con las líneas de los ^{214}Pb y ^{214}Bi y el desequilibrio de las líneas de ^{226}Ra y ^{234}Th .

Tabla 15 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg) de la serie 4n+2 Loreto del punto 1 y 2.

Perfiles	^{226}Ra	^{234}Th	^{214}Pb	^{214}Pb	^{214}Bi	^{214}Bi	^{214}Bi
	186.2 keV	92.8 keV	295.2 keV	351.9 keV	609.3 keV	1123 keV	1764.49 keV
0-5cm	2.10	1.26	1.22	1.18	1.00	1.10	1.44
5-10cm	1.99	1.19	1.13	1.29	1.00	1.11	1.65

10-15cm	2.42	0.94	1.16	1.22	1.00	1.18	1.63
15-20cm	2.71	1.05	1.21	1.22	1.00	1.21	1.52
20-25cm	2.31	0.92	1.18	1.25	1.00	1.11	1.59
In Situ	0.00	0.00	0.98	1.03	1.00	1.24	1.88
Punto 2							
0-5cm	2.06	1.26	1.12	1.17	1.00	1.18	1.64
5-10cm	1.98	1.11	1.18	1.22	1.00	1.20	1.55
10-15cm	2.20	1.29	1.14	1.21	1.00	1.09	1.68
15-20cm	2.17	0.92	1.20	1.19	1.00	1.11	1.47
20-25cm	2.25	1.33	1.18	1.23	1.00	1.09	1.53

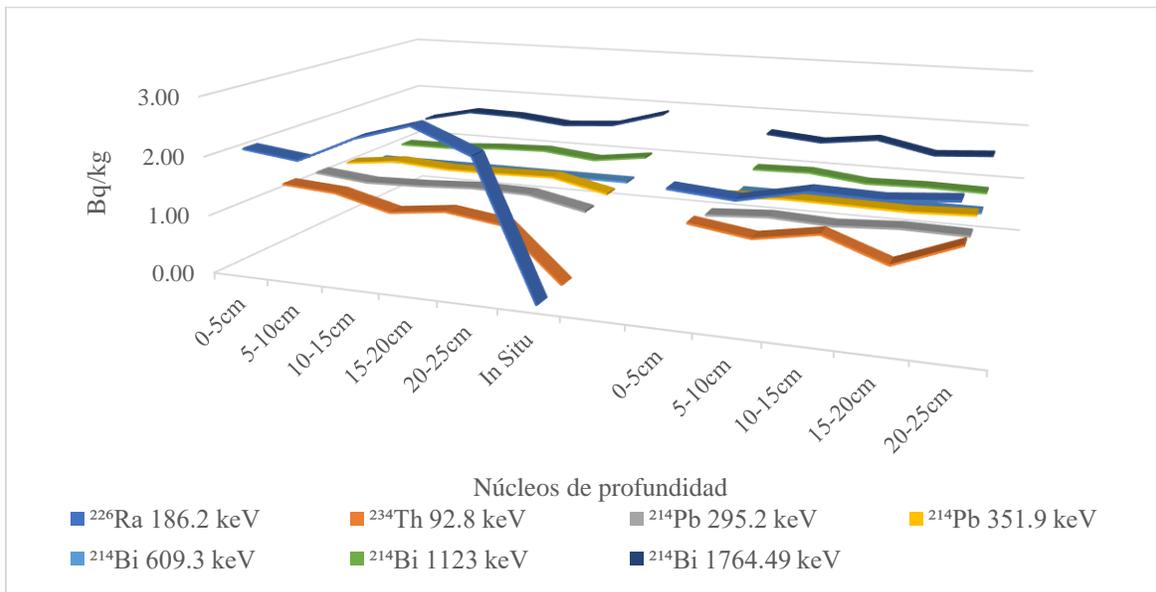


Figura. 36 Correlación de las razones de Actividad Loreto de los sitios 1 y 2 de la serie $4n+2$.

Tabla 16 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg) del Obraje 4n+2 de Laboratorio vs *In Situ* del punto 1 y 2.

Perfiles	²²⁶ Ra	²³⁴ Th	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi
	186.2 keV	92.8 keV	295.2 keV	351.9 keV	609.3 keV	1123 keV	1764.49 keV
0-5cm	1.76	0.68	1.18	1.20	1.00	1.08	1.48
5-10cm	2.10	1.11	1.18	1.21	1.00	1.11	1.64
10-15cm	2.12	0.82	1.19	1.99	1.00	1.09	1.65
15-20cm	2.18	0.98	1.29	1.28	1.00	1.15	1.66
20-25cm	2.82	0.89	1.57	1.23	1.00	1.09	1.53
<i>In Situ</i>	0.00	0.00	0.95	1.06	1.00	1.18	1.81
Punto 2							
0-5cm	2.04	0.93	1.25	1.22	1.00	1.14	1.57
5-10cm	2.12	1.13	1.19	1.21	1.00	0.99	1.58
10-15cm	1.78	1.03	1.19	1.20	1.00	1.08	1.59
15-20cm	1.90	1.20	1.21	1.17	1.00	1.09	1.63
20-25cm	1.96	1.14	1.19	1.27	1.00	1.11	1.66
<i>In Situ</i>	0	0	0.92	1.01	1.00	1.36	1.93

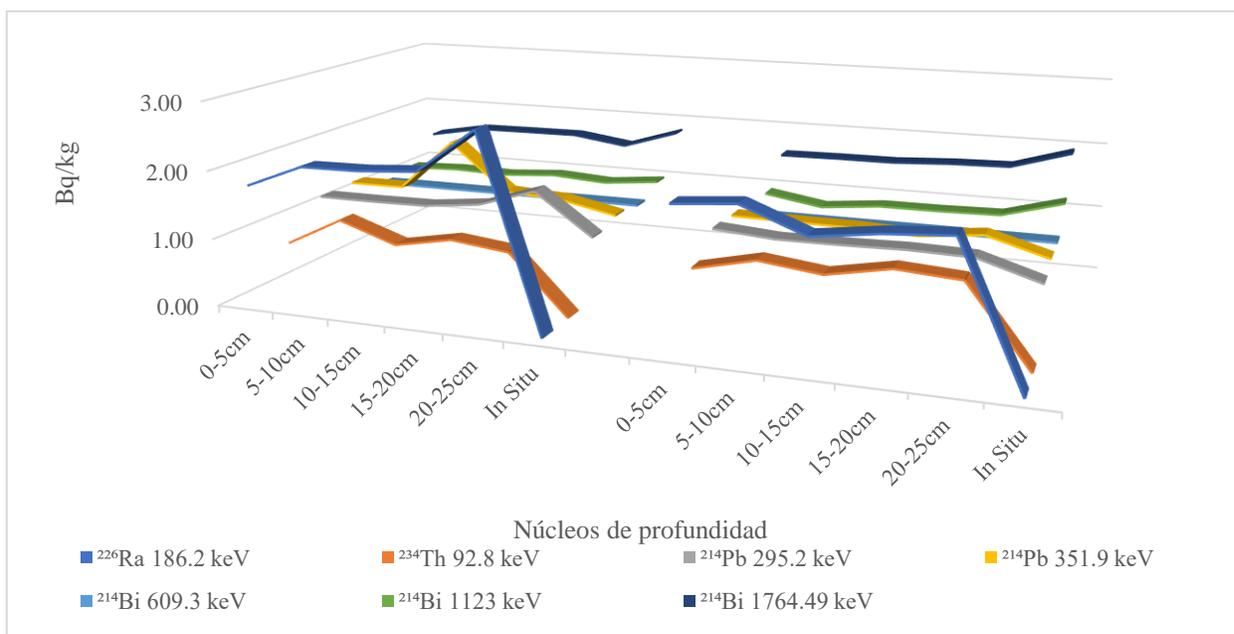


Figura. 37 Correlación de las razones de actividad del Obraje en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs *In Situ* de la serie 4n+2.

Tabla 17 Correlación de las razones de actividad de la serie 4n+2 del Hancón en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs *In situ*

Núcleos	²²⁶ Ra	²³⁴ Th	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi	²¹⁴ Bi
	186.2 keV	92.8 keV	295.2 keV	351.9 keV	609.3 keV	1123 keV	1764.49 keV
0-5cm	1.77	1.08	1.09	1.16	1.00	1.19	1.56
5-10cm	1.20	0.97	1.21	1.22	1.00	1.02	1.62
10-15cm	1.40	1.25	1.19	1.23	1.00	1.13	1.63
15-20cm	1.95	0.99	1.16	1.22	1.00	1.03	1.64
20-25cm	1.25	1.11	1.18	1.20	1.00	1.07	1.53
<i>In Situ</i>	0.00	0.00	0.85	1.07	1.00	1.06	1.70
Punto 2							
0-5cm	2.03	0.93	1.18	1.19	1.00	1.03	1.65
5-10cm	1.93	1.08	1.18	1.20	1.00	1.02	1.50
10-15cm	2.15	1.04	1.20	1.27	1.00	1.10	1.72
15-20cm	2.20	1.06	1.12	1.18	1.00	1.08	1.48
20-25cm	1.56	0.90	1.15	1.22	1.00	0.97	1.49
<i>In Situ</i>	0.00	0.00	0.94	1.00	1.00	1.18	1.64

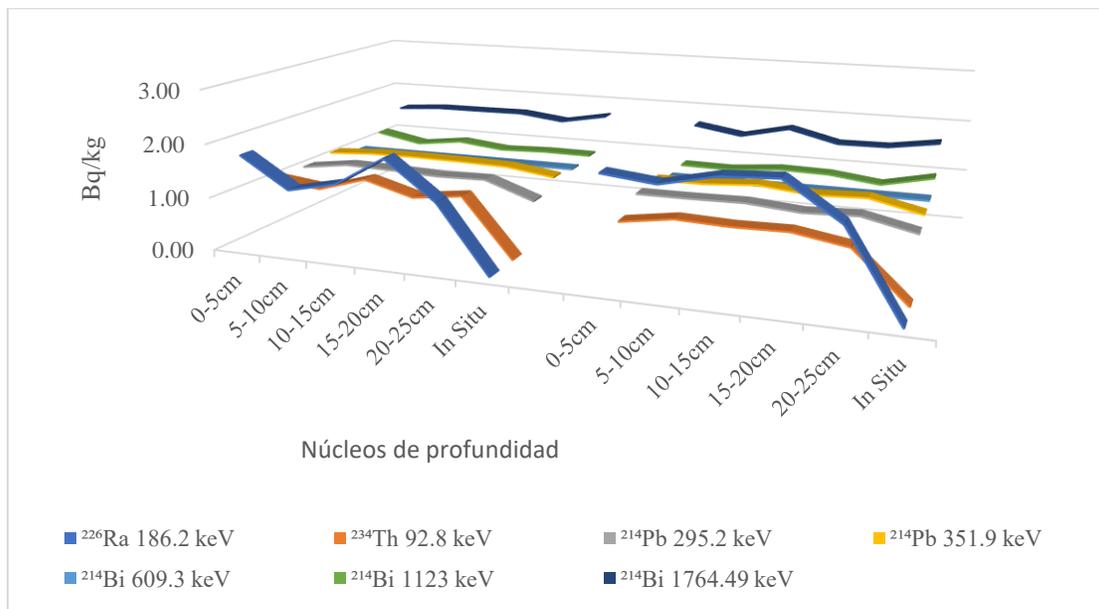


Figura. 38 Correlación de Laboratorio vs *In Situ* del Hancón 1,2 de la serie 4n+2.

Los desequilibrios que se presentan en algunas de las mediciones que se realizaron *In situ* se debe a que no son un sistema cerrado y existe escape del gas ^{226}Rn donde algunos de los miembros de la serie pueden lixivarse o bien quedar fijos en algún estrato o componente del suelo.

El desequilibrio radioactivo generalmente se desarrolla en sistemas químicamente abiertos donde las diferentes propiedades fisicoquímicas de cada núclido permiten su fraccionamiento; la serie de ^{238}U es particularmente susceptible al desarrollo de desequilibrios ya que contiene varios radionúclidos químicamente distintos con vidas medias muy grandes, Hernández Benítez, (1993).

El ^{238}U , ^{230}Th y ^{226}Ra pueden separarse durante un sistema abierto y otros procesos de alteración por ejemplo en el obraje las profundidades de 15 a 20 cm se observa un desequilibrio a toda esa serie por la remoción de la tierra por la construcción de bordos para acumulación de agua.

Tabla 18 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg - Bq/m^2) de la serie 4n del Chique en los puntos 1 y 2 de Laboratorio vs *In Situ*.

Núcleos	^{212}Pb	^{228}Ac	^{208}Tl	^{212}Bi	^{228}Ac
	239 keV	338.3 keV	583 keV	727.2 keV	911.2 keV
0-5cm	1.17	1.11	1.00	1.01	1.02
5-10cm	1.21	1.36	1.00	1.41	1.08
10-15cm	1.27	1.14	1.00	1.32	1.10
15-20cm	1.11	1.10	1.00	1.13	1.06
20-25cm	1.09	1.27	1.00	1.39	1.11
<i>In Situ</i>	0.81	1.13	1.00	1.38	1.06
Punto 2					
0-5cm	1.28	1.23	1.00	1.25	1.11
5-10cm	1.19	1.25	1.00	1.25	1.13
10-15cm	1.37	1.19	1.00	1.34	1.16
15-20cm	1.16	1.35	1.00	1.31	1.16
20-25cm	1.17	1.28	1.00	1.26	1.15
<i>In Situ</i>	0.90	0.98	1.00	1.11	1.04

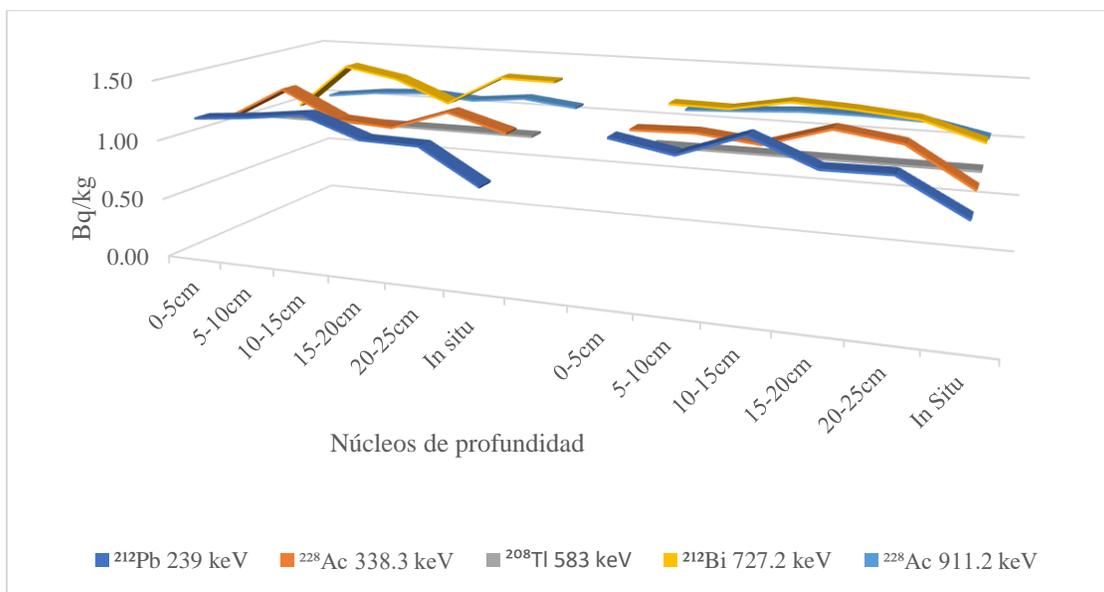


Figura. 39 Correlación de laboratorio vs *In Situ* del Chique 1 y 2 de la serie 4n.

En el caso de la serie 4n de ambos sitios de medición de la región del Chique 1, 2, que se muestra en la tabla 18 y en la Figura 39 se presenta un equilibrio más cercano a la unidad considerando sus razones de actividad que presentan un equilibrio secular para ambos sitios, así como para muestras de laboratorio y como mediciones realizadas en el sitio de interés.

Tabla 19 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg-Bq/m²) de la serie 4n de Loreto en los puntos 1 y 2 de laboratorio vs *In Situ*.

Núcleos	212Pb	228Ac	208Tl	212Bi	228Ac
	239 keV	338.3 keV	583 keV	727.2 keV	911.2 keV
0-5cm	1.06	1.19	1.00	1.33	1.20
5-10cm	1.08	1.29	1.00	1.21	1.21
10-15cm	1.11	1.24	1.00	1.16	1.14
15-20cm	1.07	1.24	1.00	1.24	1.19
20-25cm	1.04	1.35	1.00	1.38	1.20
<i>In Situ</i>	0.86	0.9	1.00	1.20	1.13
Punto 2					
0-5cm	1.00	1.20	1.00	1.25	1.18
5-10cm	1.06	1.23	1.00	1.14	1.15

10-15cm	1.09	1.24	1.00	1.20	1.10
15-20cm	1.18	1.32	1.00	1.43	1.18
20-25cm	1.09	1.23	1.00	1.29	1.13
<i>In Situ</i>					

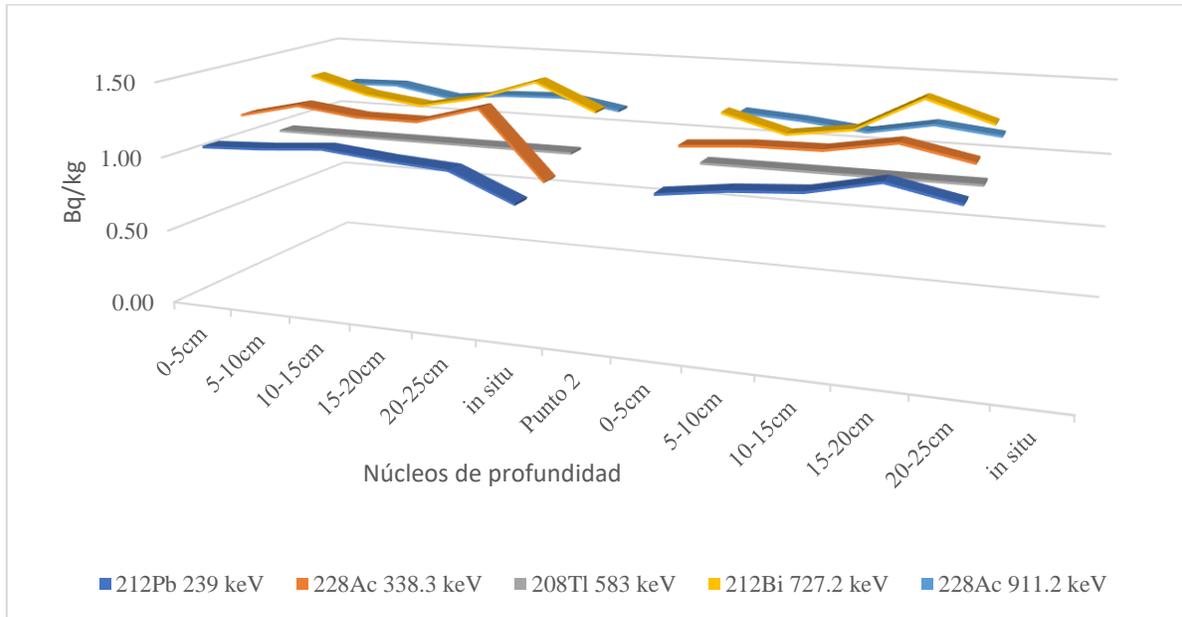


Figura. 40 Correlación de las razones de actividad de Loreto del punto 1 y 2 de la serie 4n correlación de los núcleos vs *In Situ*.

Para la distribución de las correlaciones de las razones de actividad en cuanto al análisis de las energías que alcanza equilibrio secular se puede observar en la tabla 19 y la Figura 40 como en las diversas profundidades que presenta el grafico de la figura de la región de Loreto de la serie 4n, las muestras que se analizan en Laboratorio presentan un equilibrio y lo que es el caso de *In Situ* su correlación es constante y similar a las muestras de laboratorio.

Para el análisis del punto dos no se puede realizar la correlación debido a que falto hacer la medición *In Situ*, pero en cuanto a muestras de laboratorio se puede observar un comportamiento constante en las mediciones de laboratorio en el cual presentan un equilibrio secular.

Tabla 20 Correlación de las razones de actividad (Bq/kg) de la serie 4n del Obraje en el punto 1 y 2 de laboratorio vs *In Situ*.

Núcleos	²¹² Pb	²²⁸ Ac	²⁰⁸ Tl	²¹² Bi	²²⁸ Ac
	239 keV	338.3 keV	583 keV	727.2 keV	911.2 keV
0-5cm	1.09	1.25	1.00	1.23	1.15
5-10cm	1.25	1.30	1.00	1.22	1.14
10-15cm	1.07	1.28	1.00	1.45	1.14
15-20cm	1.11	1.31	1.00	1.30	1.20
20-25cm	1.10	1.66	1.00	1.93	1.14
<i>In Situ</i>	0.85	1.01	1.00	1.20	1.06
Punto 2					
0-5cm	1.11	1.14	1.00	1.37	1.20
5-10cm	1.13	1.21	1.00	1.29	1.16
10-15cm	1.14	1.25	1.00	1.17	1.17
15-20cm	1.12	1.35	1.00	1.24	1.15
20-25cm	1.69	1.29	1.00	1.36	1.17
<i>In Situ</i>	0.91	1.00	1.00	1.09	1.04

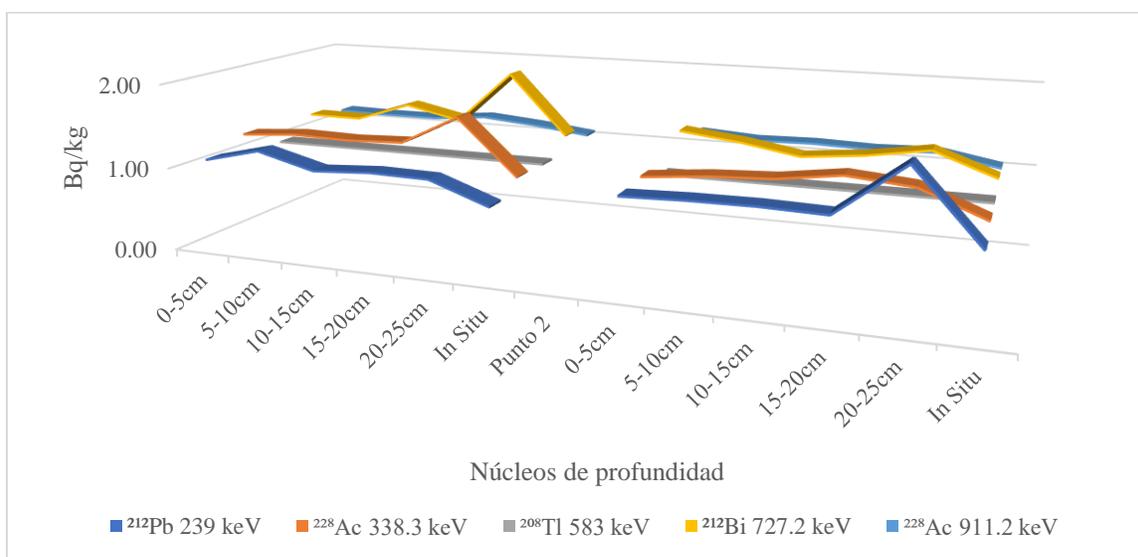


Figura. 41 Correlación de la razón de actividad de los núcleos vs *In Situ* del Obraje del punto 1 y 2 de la serie 4n.

En el análisis de la Figura 41 y la tabla 20 se muestran los estados de desequilibrio del punto 1 en el núcleo de 20 a 25 cm la energía del ^{228}Ac con energía de 338.3 keV y en caso del punto 2 se presenta también un desequilibrio para el núcleo de 20 a 25 cm perteneciente al radionúclido de ^{212}Pb con la energía de 239 keV.

El desequilibrio en este sitio se debe a que el área de medición es un sitio perturbado por la elaboración de un bordo para recolectar agua de lluvia.

Tabla 21 Correlación de las razones de Actividad la serie 4n del Hancón de los puntos 1 y2 correlación de laboratorio vs *In Situ*.

Núcleos	^{212}Pb	^{228}Ac	^{208}Tl	^{212}Bi	^{228}Ac
	239 keV	338.3 keV	583 keV	727.2 keV	911.2 keV
0-5cm	1.11	1.28	1.00	1.17	1.21
5-10cm	1.04	1.23	1.00	1.35	1.14
10-15cm	1.04	1.26	1.00	1.39	1.23
15-20cm	1.06	1.23	1.00	1.19	1.18
20-25cm	1.12	1.38	1.00	1.30	1.25
<i>In Situ</i>	0.80	0.92	1.00	1.02	1.02
Punto 2					
0-5cm	0.88	1.17	1.00	1.37	1.13
5-10cm	0.95	1.35	1.00	1.33	1.29
10-15cm	0.88	1.32	1.00	1.21	1.17
15-20cm	0.94	1.31	1.00	1.36	1.22
20-25cm	1.00	1.30	1.00	1.42	1.17
<i>In Situ</i>	0.65	0.82	1.00	0.95	0.96

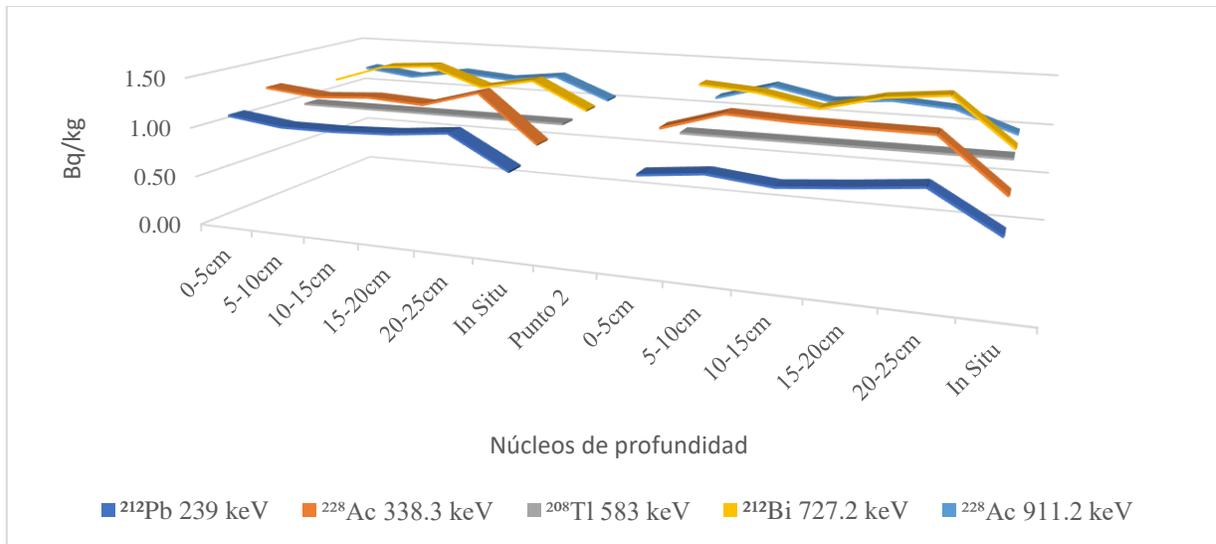


Figura. 42 Correlación de las razones de actividad de la serie 4n del Hancón en el punto 1 y 2 de la serie 4n.

Finalmente, en la Figura 42 que representa los valores de las razones de actividad de la tabla 21, se presenta un comportamiento similar en cada una de las mediciones de laboratorio como de los sitios de interés de las mediciones en sitio del Hancón.

En las relaciones de torio por ser un elemento con muy baja movilidad geoquímica en el agua en contacto directo con estas rocas puede presentar valores muy bajos para la relación por ser un agente de poca solubilización, es por esto mismo que es muy difícil encontrar un desequilibrio en esta serie.

5 Conclusiones

Los resultados de este trabajo (Espectrometría gamma *In Situ* y de Laboratorio) confirman la presencia de los radionúclidos primordiales en los sitios de Santiago el Chique Tabasco, Loreto, El Obraje Pinos y Lázaro Cárdenas (Rancho Grande) “El Hancón”.

Se observa que las condiciones de equilibrio entre los emisores gamma de la serie $(4n+2)$ está perturbada; además de que las mediciones *In Situ* permiten apreciar este desequilibrio tanto como lo hacen las mediciones de Laboratorio. Por otra parte, no se observaron actividades anormales de emisores gamma.

En las condiciones de equilibrio entre los emisores gamma de la serie $(4n)$ están en equilibrio secular además permite apreciarlo en *In situ* con las de Laboratorio al momento de correlacionar a excepción del punto 1 de medición de la región del Obraje.

Los desequilibrios que se presentan en las regiones del Chique y Loreto pueden deberse a los procesos de absorción y desorción, ésto por estar cerca de las presas y por el tipo de suelo que lo compone; en caso del sitio del Hancón sus desequilibrios se deben a que son tierras de labor y a la alteración de estos suelos por el uso del arado entre otras herramientas de trabajo, además en el caso del Obraje se debe a la remoción de la tierra por la elaboración de un bordo.

En el caso de la metodología del cálculo, se afinó, es decir, se incorporaron los factores propios de conversión en cuanto a calibraciones sugeridas en la literatura, son más adecuados y es por esto por lo que los resultados son más precisos.

6 REFERENCIAS

- Juan Pablo Bernal., Laura E. Beramendi Orosco., Karina C. Lugo-Ibarra., Luis Walter Daesslé., (2010) *Revisión de algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario.*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 62, núm. 3, pp. 305-323.
- Young-Yong Ji., Kun Ho Chung a., Jong-Myoung Lim., Chang-Jong Kim., Mee Jang., Mun Ja Kang., Sang Tae Park, (2015) *Analytical evaluation of natural radionuclides and their radioactive equilibrium in raw materials and by-products.* Journal of Environmental Radioactivity.
- Murray, A.S., Marten, R., Johnston, A., Martin, P., (1987). *Analysis for naturally occurring radionuclides at Environmental concentrations by gamma spectrometry.* J. Radioanal. Nucl. Chem. 115, 263–288.
- UNSCEAR (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* (pp.4-5). Report to the General Assembly, with Scientific Annexes
- Andrew N. Tyler & David Copplestone (2007). *Preliminary results from the first national In Situ gamma spectrometry survey of the United Kingdom.*, Journal of Environmental Radioactivity. Pp4.
- M. Barrera M. L. & Romero F. Valiño (2008) *Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles.*, departamento de medio ambiente. DOE/TIC.4584-R7. Pp 6-7
- S. Landsberger., D. Tamalis. C. Leblanc., M.D. Yoho. (2016). *Disequilibrium in the uranium and actinium series in oil scale samples.*, Journal of Environmental Radioactivity. Pp 2
- R. Margarita Rivera B., Carlos Ríos M., Fernando Mireles G., Sonia Saucedo A., Ignacio Dávila R., José L. Pinedo, Daniel Hernández y Flavio Nava M, (2012) “Mapeo preliminar *In Situ* de emisores gamma en el estado de Zacatecas”, Memorias del XXII Congreso Anual de la SNM y LAS/ANS Symposium, Los Cabos, Baja California Sur, México.
- Flavio Nava Maldonado., Carlos Ríos Martínez., Fernando Mireles García., & J. Ignacio Dávila Rangel (2012). *Mapeo In Situ de emisores Gamma; Fase II: Calibración AREA NETA IN SITU -ACTIVIDAD ESPECIFICA.* Universidad Autónoma de Zacatecas pp. 38-48

- M. F. Attallah., N. S. Awwad., & H. F. Aly. (2012). *Environmental Radioactivity of TE-NORM Waste Produced from Petroleum Industry in Egypt: Review on Characterization and Treatment*. INTECH, pp. 77-80.
- Juan Fernando Lopez Ibarra., Carlos Ríos Martínez., José Luis Pinedo Vega., Fernando Mireles García, & J. Ignacio Dávila Rangel (2017). Análisis Multivariante del desequilibrio Radiactivo en Suelos del Estado de Zacatecas por Espectrometría Gamma *In Situ*. Universidad Autonoma de Zacatecas. Pp 17-20
- F. De Corte, H. Umans, D. Vandenberghe, A. De Wispelaere, P. Van den haute, (2005). *Direct gamma-spectrometric measurement of the 226Ra 186.2 keV line for detecting 238U/226Ra disequilibrium in determining the environmental dose rate for the luminescence dating of sediments*. *Applied Radiation and Isotopes* 63 (2005) 589–598
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008_ing/0_suelos/cap3_1.html (25/11/2017)
- T.C.Feng M.Y.Jia, B.Long, C.Y.Su, R.Wu, J.P.Cheng, *Delaminated method to determine the depth distribution of 152Eu in soil by in-situ HP-Ge γ -spectrometry*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 597, 192–197. China, (2008).
- Tyler A. N., *High accuracy In Situ radiometric mapping*, *Journal of Environmental Radioactivity* 72, 195-202, UK, (2004).
- Tsoufanidis, N., Landsberger, S., *Measurement and Detection of Radiation* 3rd. Ed., Tylor & Francis Group, USA, (2011).
- C.R. Nave 2005. Hyperphysics. Department of Physics and Astronomy. Georgia State University. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>.
- Magill, j. and J. Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation*. 1 ed. 2005, Karlsruhe, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Al-Masri, M. S., & Doubal, A. W. (2013). Validation of in situ and laboratory gamma spectrometry measurements for determination of 226Ra, 40K and 137Cs in soil. *Applied Radiation and Isotopes*, 75, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.01.009>
- Baeza, A., & Corbacho, J. A. (2010). In situ determination of low-level concentrations of 137Cs in soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(4–5), 812–815. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.10.034>
- Fong, S. H., & Alvarez, J. L. (1997). Data Quality Objectives for Surface-Soil Cleanup Operation Using in Situ Gamma Spectrometry for Concentration Measurements. *Health Physics*, 72(2), 286–295. <https://doi.org/10.1097/00004032-199702000-00013>
- Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. (2003). Retrieved from https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf

- Hernández Benítez, A. (1993). CARACTERIZACION DE RELLENOS FISURALES POR DESEQUILIBRIOS ISOTOPICOS DE SERIES RADIOACTIVAS NATURALES. EL CASO DEL BATOLITO GRANITICO DE EL BERROCAL. *Estudios Geol*, 49, 165–174. Retrieved from <http://estudiosgeol.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeol/article/viewFile/347/351>
- Lieser, K. H. (2001). Nuclear and Radiochemistry : fundamentals and applications (p. 460). Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Nuclear+and+Radiochemistry%3A+Fundamentals+and+Applications-p-9783527612574s/Nuclear+and+Radioc>
- National Nuclear Data Center. (n.d.). Retrieved November 16, 2018, from <https://www.nndc.bnl.gov/>
- Nir-El, Y., & Haquin, G. (2001). Minimum detectable activity in in situ γ -ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 55(2), 197–203. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00377-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00377-8)
- Nudat 2. (2018). Retrieved November 16, 2018, from <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp>
- Olguin, M. T., Segovia, N., Carrillo, J., Ordoñez, E., Iturbe, J. L., & Bulbulian, S. (1990). ^{222}Rn content and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwaters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 141(1), 17–23. <https://doi.org/10.1007/BF02060181>
- Perrin, J., Carrier, F., & Guillot, L. (2006). Determination of the vertical distribution of radioelements (K, U, Th, Cs) in soils from portable HP-Ge spectrometer measurements: A tool for soil erosion studies. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(7), 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.01.003>
- Ramírez, P., Morón, C., García, A., & Correa, E. (n.d.). ESTUDIO DE LAS CONCENTRACIONES Y MECANISMOS DE DESPLAZAMIENTO DE RADÓN Y DESCENDIENTES EN RECINTOS CERRADOS. Retrieved from http://oa.upm.es/13446/1/INVE_MEM_2011_112672.pdf

<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

Currie, L. A. (1968). *Limits for qualitative detection and quantitative determination, application to radiochemistry*. Analytical Chem.: 40(3): 586-593.

Kapsimalis, R., Landsberger, S., Reguigui, N., 2009. Measurement of uranium in small quantities in phosphates by use of g-ray spectroscopy and the 1001 keV Peak of ^{234m}Pa . J. Radioanal. Nucl. Chem. 280, 293e298.