# UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA

# CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

**Ingeniera Ambiental** 

Trabajo experimental:

CORRELACIÓN DE LA CANTIDAD DE RADIO QUE SE INTRODUCE EN EL SUELO A TRAVÉS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS, Y LA CANTIDAD DE RADIO ABSORBIDA POR LA LECHUGA (*Lactuca sativa crispa s.p*) EN LA PARROQUIA SAN JOAQUÍN DEL CANTÓN CUENCA

# **AUTORA:**

Duràn Mejía Karla Valeria

# **DIRECTOR:**

Tony Jesús Viloria Ávila, PhD.

CUENCA – ECUADOR

# **CESION DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Karla Valeria Durán Mejía con documento de identificación N° 0106852650, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: "CORRELACIÓN DE LA CANTIDAD DE RADIO QUE SE INTRODUCE EN EL SUELO A TRAVÉS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS, Y LA CANTIDAD DE RADIO ABSORBIDA POR LA LECHUGA (*Lactuca sativa crispa s.p*) EN LA PARROQUIA SAN JOAQUÍN DEL CANTÓN CUENCA", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Ambiental en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Cuenca, 03 de febrero del 2018

HA

Karla Valeria Durán Mejía C.I: 0106852650 AUTORA

# CERTIFICACIÓN

Yo Tony Jesùs Viloria Àvila, declaro que bajo mi supervisión fue desarrollado el trabajo de titulación: 'CORRELACIÓN DE LA CANTIDAD DE RADIO QUE SE INTRODUCE EN EL SUELO A TRAVÉS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS, Y LA CANTIDAD DE RADIO ABSORBIDA POR LA LECHUGA (*Lactuca sativa crispa s.p*) EN LA PARROQUIA SAN JOAQUÍN DEL CANTÓN CUENCA'', realizado por Karla Valeria Durán Mejía, obteniendo el proyecto de titulación que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 03 de febrero del 2018

Tony Jesús Viloria Ávila. PhD

C.I: 083893643

# DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Karla Valeria Durán Mejía, con número de cédula 0106852650, autora del trabajo de titulación 'CORRELACIÓN DE LA CANTIDAD DE RADIO QUE SE INTRODUCE EN EL SUELO A TRAVÉS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS, Y LA CANTIDAD DE RADIO ABSORBIDA POR LA LECHUGA (*Lactuca sativa crispa s.p*) EN LA PARROQUIA SAN JOAQUÍN DEL CANTÓN CUENCA'', certifico que el total contenido del proyecto es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, 03 de febrero del 2018

HA

Karla Valeria Durán Mejía C.I: 0106852650 Autora

# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, porque él ha sido bueno conmigo y me ha mostrado su amor día a día, porque para él todas las cosas tienen un propósito, y solo en su inmensa misericordia ha permitido que culmine una etapa en mi vida.

A mis padres Miriam y Wilson que me han apoyado siempre, me han alentado a seguir adelante y con su ejemplo me han enseñado a ser esforzada y valiente.

Al Dr. Tony Viloria, no solo por su calidad humana, sino también por todas sus enseñanzas, su paciencia y compromiso que ha tenido conmigo en todo este trayecto.

Al grupo de investigación GITHUNU, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en especial a la profesora Patricia Pereyra y a Jhonny Rojas por sus conocimientos compartidos y apertura a tan prestigiosa universidad.

#### RESUMEN

Los fertilizantes fosfatados a menudo contienen cantidades significativas de Radio-226 y sus productos de desintegración. Hoy en día se ha intensificado el uso de este producto por los agricultores para abastecer de alimentos a la población. Los suelos por su contenido mineral son naturalmente radioactivos y por uso excesivo de fertilizante ha causado la redistribución de radionucleidos en el suelo, posteriormente en las planta y por ingesta a los humanos, causando afecciones a la salud a largo plazo. El objetivo de este estudio es determinar si existe transferencia de Radio-226 proveniente de los fertilizantes fosfatados usados en la parroquia San Joaquín, hacia los alimentos que ingerimos en la dieta diaria.

En el presente estudio se determinó la concentración de Radio-222, concentración de Radón-22, exhalación por masa y superficie en muestras de fertilizante, suelo y lechuga, mediante una cámara de difusión conocida como técnica de la lata, usando detectores LR-115 tipo 2.

Las concentraciones de Radio-226 en las muestras de suelo vario de 34,3 a 70 Bq/kg, sobrepasando el valor permisible para Radio-226 por la UNSCEAR, mientras que las concentraciones de Radio-226 en las muestras de fertilizantes y muestras de lechuga (hojas y raíces) y fueron más bajas y se encontraron dentro de los valores recomendado por la UNSCEAR.

#### ABSTRACT

Phosphate fertilizers often contain significant amounts of Radio-226 and its decay products. Nowadays, the use of this product has been intensified for farmers to supply food to the population. Soils due to their naturally radioactive mineral content and excessive use of fertilizer have caused the redistribution of radionuclides in the soil, later in the plants and by ingestion to humans, causing long-term health problems. The objective of this study is to determine if there is a transfer of Radio-226 from the phosphate fertilizers used in the San Joaquín parish, to the foods that they eat in the daily diet.

In the present study, the concentration of Radium-222, concentration of Radon-22, exhalation by mass and surface in samples of fertilizer, soil and lettuce was determined by means of a diffusion chamber known as the can technique, using LR-115 detectors. type 2

The concentrations of Radio-226 in the soil samples varied from 34.3 to 70 Bq / kg, exceeding the allowable value for Radio-226 by the UNSCEAR, while the concentrations of Radio-226 in the samples of fertilizers and samples of lettuce (leaves and roots) and were lower and found within the values recommended by the UNSCEAR.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 PROBLEMA	12
1.2 DELIMITACIÓN	13
1.2.1 Delimitación Espacial	13
1.2.2 Delimitación Temporal	14
1.2.3 Delimitación Sectorial	14
1.3 EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.4 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS	15
1.4.1 Objetivo General	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	15
1.5.1 Antecedentes	15
1.5.2 Aspectos básicos de la Radioactividad	19
1.5.2.1 Radiación Ionizante	19
1.5.2.2 Radionucleidos	19
1.5.2.3 Decaimiento Radiactivo	20
1.5.2.4 Fuentes de Radiación	21
1.5.2.5 Tipos de Radiación Ionizante	23
1.5.2.6 Interacción de la Radiación con la Materia	24
1.5.2.7 Interacción de las partículas alfa con la materia	26
1.5.2.8 Dosimetría	27
1.5.3 Técnicas de detección de las partículas α	29
1.5.3.1 Trazas nucleares en SSNTD	30
1.5.3.2 Geometría de la traza grabada	30
1.5.3.3 Detector LR-115 tipo 2	31
1.5.4 Radio 226 y su progenie	32
1.5.4.1 Transporte de 226- Radio desde el suelo hacia los vegetales	32
1.5.5 Riesgos de la exposición al Radio 226	35
2. MATERIALES Y MÉTODOS	37
2.1 Diseño	37
2.1.1 Lugar de Experimentación	38
2.1.2 Planeación y ejecución del experimento	39
2.2. Preparación de la muestra	41

	2.3 Construcción del contenedor de las muestras	43
	2.4 Grabado de los detectores LR-115 tipo 2	46
	2.5 Análisis estadístico de las trazas.	47
	2.5.1 Conteo de trazas con el POLITRACK y obtención de imágenes	47
3	. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
	3.1 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de fertilizante	55
	3.2 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de suelo	59
	3.3 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en la muestras de lechuga (hoj	as)
		68
	3.4 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga (raí	z)
		71
	3.5 Evaluación de la ingesta promedio diaria de Radio-226	73
4	. CONCLUSIONES	74
5	. BIBLIOGRAFÍA	76

# ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Valores máximos, medios y mínimos y desviación estándar de la concentración	de de
radionucleidos en vegetales más consumidos por la población adulta de Rio de Janeiro	
(mBq kg-1) y datos adicionales en agua y leche	17
Tabla 2. Factores de ponderación de la radiación recomendados	28
Tabla 3. Factores de ponderación de los tejidos recomendados	29
Tabla 4. Concentraciones de 238U, 222Rn y 226Ra entre los casos de cáncer de estóma	go
y el subcohorte (población), con CR e IC 95%	37
Tabla 5. Colocación del rubro en el terreno	39
Tabla 6. Cálculo del volumen efectivo para cada una de las muestras (m3)	53
Tabla 7.Masas de las muestras obtenidas	53
Tabla 8. Comparación entre los fertilizantes NPK-12407 y NPK-0756	56
Tabla 9. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de 226Ra	
contenidas en las soluciones de fertilizante utilizadas en el cultivo	57
Tabla 10. Comparaciones múltiples entre soluciones del fertilizante	58
Tabla 11. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos	59
Tabla 12. Comparación entre las profundidades de suelo con 0g de Fertilizante	60
Tabla 13. Comparación entre las profundidades de suelo con 5g de Fertilizante	61
Tabla 14. Comparación entre las profundidades de suelo con 10g de Fertilizante	62
Tabla 15. Comparación entre las profundidades de suelo con 20g de Fertilizante	63
Tabla 16. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de 226Ra de la	as
muestras de suelo por profundidad y concentración de fertilizante	65
Tabla 17 Comparación entre las profundidades del suelo a 0g de concentración de	
fertilizante Elaborado por: Autor	66
Tabla 18 Comparación entre las profundidades del suelo a 5g de concentración de	
fertilizante	66
Tabla 19. Comparación entre las profundidades del suelo a 10g de concentración de	
fertilizante	67
Tabla 20. Comparación entre las profundidades del suelo a 20g de concentración de	
fertilizante	67
Tabla 21. Comparación de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga	
(hojas)	69
Tabla 22. Tabla 22. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de	
226Ra de las muestras de lechuga (hojas) y concentración de fertilizante	70
Tabla 23.Comparación de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga	
(raíces)	72
Tabla 24. Calculo de las masas de Radio-226 por medio de la concentración de Radio-2	26
obtenido de las muestras. Elaborador por: Autor	74

# ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Diagrama del decaimiento de la serie del 238U	20
Figura 2. Equilibrio Secular	21
Figura 3. Esquema del proceso de Ionización y Excitación	25
Figura 4. Capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación en la materia	25
Figura 5. Desarrollo de la traza por efecto de las velocidades de grabado	31
Figura 6. Relación entre factores de transferencia a frutas y concentraciones de suelo	34
Figura 7. Mapa de la Ubicación de la Parroquia San Joaquín, Área de Estudio	38
Figura 8: Separaciones del terreno	40
Figura 9. Fumigación del rubro, con 20g de concentración de fertilizante NPK-12407	41
Figura 10. Secado al ambiente del rubro	42
Figura 11. Secado del rubro en la estufa a 70C	42
Figura 12. Muestreo Sistemático del suelo en forma de cuadricula	43
Figura 13. Disposición experimental para la medición del contenido de radio en muestra	as
de suelo, lechuga y fertilizante	44
Figura 14.a) Muestra de hojas de lechuga, b) Muestra de raíz de lechuga, c) Muestra de	
fertilizante NPK-0.756, d) Muestra de fertilizante NPK-12402, e) Muestra de suelo	45
Figura 15. Construcción y almacenamiento de las muestras	46
Figura 16. Tapón superior del envase, colocación del detector LR-115 y lámina de meta	ıl.
	46
Figura 17. Sistema de grabado termostatizado del laboratorio de Huellas Nucleares de la	a
PUCP	47
Figura 18. Pantalla que nos indica la eficiencia del grabado	48
Figura 19.Conteo de trazas en el POLITRACK	49
Figura 20. Reconocimiento de un campo y conteo de trazas	50
Figura 21. Captura de un campo con trazas perfectamente visibles	50
Figura 22.Captura de un campo con trazas visibles y una traza que no ha sido contabiliz	ada
por el POLITRACK	51
Figura 23. Concentración de 226Ra en muestras de fertilizante	57
Figura 24: Concentración de 226Ra en diferentes profundidades de suelo a diferentes	
concentraciones de fertilizante	64
Figura 25. Concentración de 226Ra en muestras de lechuga para 0, 5, 10, 20g de	
fertilizante	70
Figura 26: Concentraciones de 226Ra en muestras de raíces de lechuga	73

### 1. INTRODUCCIÓN

#### **1.1 PROBLEMA**

La mecanización de la agricultura y la adición de fertilizantes minerales han sido las respuestas típicas para aumentar los rendimientos de los cultivos y mejorar la fertilidad del suelo. Desafortunadamente, la fertilización intensiva con fosfato ha llevado a la acumulación de radionucleidos en los suelos cultivados (Jiao *et al.*, 2012, y Azzi *et al.*, 2016). Los contaminantes metálicos se transfieren a las tierras de cultivo y posteriormente a lo largo de la cadena alimenticia, lo que representa un problema ambiental crítico (Giuffré *et al.*, 1997; Jiao *et al.*, 2012; Nicholson *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2009).

Después de la inhalación e ingestión de radionucleidos, las partículas alfa altamente ionizantes emitidas por las progenies depositadas de corta duración, interactúan con el tejido biológico de los pulmones, estómago y provocan daños al ADN (Aswood, Jaafar y Bauk, 2014; OMS, 2008).

La importancia de esta investigación radica en el "abuso" por el uso de fertilizantes fosfatados con el fin de alcanzar una alta productividad agrícola y aumentar los nutrientes en el suelo, pero al aplicar estos fertilizantes estamos acumulando elementos radiactivos en los suelos y cultivos que pueden ser perjudicial para la salud de los agricultores y consumidores de los productos. (Tettey-Larbi et al., 2013).

Cabe señalar que la lechuga (*Lactuca sativa crispa s.p*) es una de las hortalizas más intensamente producidas en los países mediterráneos. En el año 2013 se produjeron 3 millones de toneladas de lechuga en la UE, principalmente en países mediterráneos (España, Italia y Francia en este orden) (FAOSTAT, 2014).

Actualmente no existe una cantidad óptima de fertilizantes fosfatados que se debe aplicar a los cultivos de lechuga, lo que deja a discreción o decisión de los agricultores la cantidad a ser usada, en este sentido se debe esclarecer sobre la cantidad óptima de fertilizante, que permita mejorar la calidad de los cultivos sin afectar la fertilidad de los suelos y a la vez minimizar el riesgo de enfermarse por la ingesta de radionucleidos provenientes de los mismos, siendo esta una de las metas que se espera alcanzar en este trabajo.

Desde el punto de vista metodológico, se quiere llegar a determinar la concentración de Radio que se transfiere al suelo y a los vegetales al aplicar fertilizantes en diferentes concentraciones, lo que permitirá obtener una base de datos primaria que nos permita identificar las concentraciones de mayor impacto radiológico.

## **1.2 DELIMITACIÓN**

#### **1.2.1 Delimitación Espacial**

La presente investigación se realizó en dos fases: la primera fase fue de campo, es decir el cultivo de la lechuga en la parroquia San Joaquín y la segunda fase experimental, donde se puso en marcha los protocolos de medición (preparación de las muestras) se realizó en los laboratorios Ciencias de la Vida del campus de la Universidad Politécnica Salesiana, mientras que el revelado de detectores y conteo de trazas se realizó en el grupo de investigación GITHUNU de la escuela de Física en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

La parroquia San Joaquín se encuentra ubicado en la parte norte del cantón Cuenca perteneciente a la Provincia de Azuay, limita al norte con la Parroquia Sayausí (Río Tomebamba), al sur con la Parroquia Baños (Río Yanuncay); al oeste la Parroquia de Chaucha y Molleturo y al este con la Ciudad de Cuenca, específicamente en la comunidad Cristo del Consuelo la cual ocupa el 0.03% del territorio de la parroquia (PDOT de San Joaquín, 2011).

La Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca se encuentra ubicado en la Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, barrio El Vecino.

La Pontificia Universidad Católica del Perú se encuentra ubicada en la ciudad de Lima, en el distrito San Miguel 32, Avenida Universitaria 1801.

#### 1.2.2 Delimitación Temporal

La delimitación temporal abarcara un periodo de 10 meses, es decir de Marzo del 2017 a Enero del 2018, periodo dentro del cual se realizara el cultivo, muestreo de lechuga y suelo y la fase experimental de la investigación.

#### 1.2.3 Delimitación Sectorial

El estudio de la investigación está dirigido a toda la población universitaria de la Universidad Politécnica Salesiana tanto docentes como estudiantes y a la población en general que estén interesados en conocer más sobre el comportamiento del Radio en las plantas, suelo y en los posibles efectos adversos que podrían causar en el ser humano.

# **1.3 EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA**

En este tipo de estudios es esencial comprender cuál es el comportamiento de los radionucleidos en el suelo y plantas tras la aplicación de fertilizantes fosfatados (por ejemplo, movilidad, transferencias), ya que dicha información puede utilizarse como los valores de parámetros asociados para tasas de exposición y evaluación de riesgo. Por ejemplo, una de las formas más comunes de estimar el riesgo radiológico para la población es estudiar la distribución de radionucleidos naturales en el medio ambiente; también, es importante conocer el transporte de radionucleidos a través de la cadena alimentaria en el ser humano.

# **1.4 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS**

### 1.4.1 Objetivo General

Determinar la correlación de la cantidad de radio que se introduce en el suelo a través de fertilizantes fosfatados (porcentaje) y la cantidad de radio absorbida por las plantas (*Lactuca sativa crispa s.p*).

## 1.4.2 Objetivos Específicos

- Medir las concentraciones de Radio-226 en los fertilizantes utilizados.
- Determinar la contribución del Radio-226 en los suelos cultivados, a 5, 10, 15 y 20 cm de profundidad, debido a la fertilización de los mismos.
- Medir las concentraciones de Radio-226 en la hortaliza *Lactuca sativa crispa* cultivada con diferentes concentraciones de fertilizantes fosfatados.
- Evaluar la ingesta promedio diaria de Radio-226 por los habitantes de la Parroquia San Joaquín del Cantón Cuenca debido al consumo de *Lactuca sativa crispa*.

# 1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### **1.5.1 Antecedentes**

Los radionucleidos en el suelo son capturados por el tejido vegetal en la absorción de minerales, directamente transferidos por las raíces, apareciendo posteriormente en la cadena alimentaria a través del consumo de carne de rumiantes (ovinos, bovinos, etc.) o a través del consumo de hortalizas comunes a la dieta humana. La planta comestible representa un componente importante de la dieta diaria, de modo que la captación de radionúclidos en la cadena alimenticia humana representa uno de los principales vectores utilizados en el cálculo de las tasas de exposición y en la evaluación del riesgo (Rosen et al., 1995).

La FAO (2012) proyectó que la demanda de fertilizantes fosfatados aumentará 41.700.000 toneladas en el 2013, a 42.700.000 toneladas en el 2014, con una tasa de crecimiento del 2,4%. Se espera que llegue a 46.600.000 toneladas en 2018 con una tasa de crecimiento del 2,2 % al año. Se estima que el uso de fertilizantes fosfatados ha duplicado la exposición prolongada interna en los seres humanos por la ingestión de alimentos, debido a incrementos en los niveles de concentración de radionucleidos en los alimentos (ICRP, 1999).

Kratz S. (2016) realizó un estudio con distintos tipos de fertilizantes donde el límite que propuso la Comisión Alemana para la Protección de Suelos fue de 50 mg/kg de P2O5 para los fertilizantes que contengan P, este valor fue superado por los valores medios de todos los tipos de fertilizantes analizados. Una gran proporción de las muestras evaluadas en este trabajo contenían oligoelementos esenciales a altas concentraciones, muchas de ellas no declaradas como tales. Además, los oligoelementos suministrados en estos fertilizantes a una tasa de fertilización que nivela la absorción de P, excederán la absorción de oligoelementos por los cultivos.

La FAOSTAT (2014) registró el uso de fertilizantes a nivel mundial según el cultivo en donde las frutas y verduras representaron en conjunto el 15% del mercado mundial, con las frutas consumiendo el 5,8% del total y las verduras el 9,3%. Los otros cultivos, que incluyen pastizales y una amplia gama de cultivos varios, recibieron el 11,7% restante. En un estudio realizado en la ciudad de Rio de Janeiro, se analizaron un total de 88 muestras de 26 hortalizas y productos derivados. La contribución más alta a la ingesta de radionucleidos se deriva del consumo de frijol, flor de trigo, mandioca, zanahoria, arroz, tomate y patata. Las ingestas diarias estimadas de verduras y productos derivados fueron de 1.9mBq de <sup>232</sup>Th, 2.0mBq de <sup>238</sup>U, 19mBq de <sup>228</sup>Ra, 26mBq de <sup>210</sup>Pb y 47mBq de <sup>226</sup>Ra (Godoy, 2001).

La dosis efectiva anual estimada debida a la ingestión de vegetales y sus productos derivados de radionúcleidos naturales de larga vida es de 14,5µSv. Teniendo en cuenta los datos bibliográficos de agua y leche de Río de Janeiro, el valor de la dosis aumenta a 29µSv, con verduras y productos derivados responsables del 50% de la dosis, el <sup>210</sup>Pb(62%) y <sup>228</sup>Ra (24%) resultaron ser las principales fuentes de radiación interna (IBGE, 1998). Las concentraciones de <sup>232</sup>Th, <sup>210</sup>Pb y <sup>226</sup>Ra que se observaron caen en los rangos generales compilados por UNSCEAR (2000). En aproximadamente el 94% de las hortalizas analizadas, las relaciones de concentración de actividad <sup>228</sup>Ra /<sup>226</sup>Ra son superiores a uno, lo que indica que los niveles de <sup>226</sup>Ra son mayores que los de <sup>228</sup>Ra en suelos brasileños, como se puede observar en la siguiente tabla:

 Tabla 1.Valores máximos, medios y mínimos y desviación estándar de la concentración de radionucleidos en vegetales

 más consumidos por la población adulta de Rio de Janeiro (mBq kg-1) y datos adicionales en agua y leche.

Vegetal	Consumo (kg/año)	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra
Calabaza	0.96	(<0.02-1.8)	(<0.01-1.3)	(131-655)	(50-283)
		δ=14	δ=10	δ=2.1	δ=2.3
		4.1 [4]	13 [4]	89 [4]	70 [4]
Lechuga	0.63	(0.3-13)	(3.0-29)	(41-197)	(33-208)
		δ=5.6	δ=2.7	δ=1.9	δ=2.3

Fuente: Santos, E.E., Lauria, D. C., Amaral, E. C. S., Rochedo, E. R., 2002

Pietro P. Falciglia (2015), indica que inconscientemente ingerimos radionúclidos a través de la ingesta diaria de alimentos, agua y también por inhalación, siendo la vía tierraplanta-humano una vía principal para la transferencia de radionucleidos a los seres humanos. La migración y la movilización de los radionucleidos hacia el interior y el medio ambiente se ven influidas por muchos factores, incluidos los que son fisiológicos, biológicos y geoquímicas, con modificaciones de propiedades de suelo, aire, agua y flora, e interacciones específicas de radionúclidos con vegetación y otros organismos dentro de los cuales se acumulan. En Malasia se produce una amplia variedad de verduras contaminadas con radionucleidos, donde el consumo per cápita de hortalizas revela una tendencia creciente de estas en la dieta, pasando de 27,25 kg en 1982 a 40,58 kg en 2001 y 45,9 kg en 2005 (FAMA, 1993).

Debido a su contenido mineral, los suelos son naturalmente radiactivos y una de las fuentes de radiactividad antropogénicas se debe principalmente al uso extensivo de fertilizantes en cultivos (Boukhenfouf, 2011), es por esto que en este trabajo se va a determinar el contenido de radioactividad en el suelo, vegetales (lechuga) y los fertilizantes fosfatados que se van a utilizar en la zona y así estimar su impacto radiológico.

Se realizó un estudio radiológico en una mina en desuso en España, en aquella área se investigó la absorción de varios radionucleidos por la vegetación característica de un ecosistema en suelos impactados por la extracción de uranio. Se descubrió que la textura del suelo influye en la distribución y disponibilidad de <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra y <sup>210</sup>Pb: esos radionucleidos muestran cierta preferencia por la fracción de suelo de grano más pequeña, como la de limo y arcilla. Las muestras de vegetación mostraron mayores concentraciones de <sup>210</sup>Pb que en <sup>238</sup>U. Sin embargo, algunas plantas pueden influir en la absorción de algunos isótopos como <sup>210</sup>Pb y <sup>226</sup>Ra. En muestras de suelo y vegetación, existe un cuasi equilibrio en los suelos para <sup>226</sup>Ra, pero dado el valor de la relación en las diferentes partes de las plantas, la vegetación muestra una preferencia de los radionucleidos naturales en diferentes partes de las plantas nativas (hojas, ramas, ramitas y otros), siendo los correspondientes a <sup>226</sup>Ra y <sup>210</sup>Pb relevantes y superiores en especies de crecimiento lento. También a partir de estos datos, se ha encontrado una correlación entre los factores de transferencia de <sup>226</sup>Ra y <sup>210</sup>Pb de las diferentes partes de las plantas (Charro et al., 2017).

#### 1.5.2 Aspectos básicos de la Radioactividad

En general, los átomos presentan varias combinaciones de neutrones y protones en sus núcleos, por lo cual también son denominados nucleídos. Sin embargo, existe una gran cantidad de nucleídos con combinaciones de protones y neutrones que dan lugar a configuraciones nucleares inestables. Estos núcleos con configuraciones inestables son denominados núcleos radiactivos o radionucleidos y tienden a formar configuraciones estables liberando tanto partículas como energía a través del proceso de decaimiento o desintegración radiactiva (Maphoto, 2004).

#### 1.5.2.1 Radiación Ionizante

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas alfa, beta o neutrones. La desintegración espontánea de los átomos se denomina radiactividad y la energía excedente emitida es una forma de radiación ionizante (OMS, 2012).

#### 1.5.2.2 Radionucleidos

Un nucleido es un tipo de átomo cuyo núcleo tiene un número determinado de protones y de neutrones y un estado energético definido. Debido a la gran cantidad de nucleidos existentes es necesario ordenarlos y clasificarlos a fin de sistematizar el estudio de sus propiedades. Los nucleidos con igual cantidad de protones pero diferente masa se denominan isótopos. Por ejemplo, el carbono presenta 12 isótopos con masa desde 9 hasta 20, de ellos solamente el 12C y el 13C son estables. Los radionucleidos son aquellos nucleidos inestables que se desintegran, emitiendo partículas y/o radiación electromagnética, sólo existen 275 nucleidos estables y todos los demás son radiactivos (Rey, 2004).

Los radionucleidos principales son y <sup>232</sup>Th y sus productos de decaimiento como Radio (<sup>226</sup>Ra) y el gas noble radiactivo Radón (<sup>222</sup>Rn) que son la base de esta investigación. La

radiactividad varía de un tipo de suelo a otro dependiendo de la composición y estructura de los minerales que lo conforman (Salas, 2010).

#### 1.5.2.3 Decaimiento Radiactivo

El cambio de estado que sufre el núcleo atómico se debe a su inestabilidad, por esta razón puede decaer por emisión  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , captura electrónica o fisión espontánea, a fin de hacerse estable. Las partículas alfa emitidas durante el proceso de desintegración radiactiva como ocurre con el <sup>222</sup>Rn, no son más que núcleos de 4He, un conjunto formado por dos protones y dos neutrones.

En este estudio nos enfocamos en partículas alfa emitidas por las hijas radiactivas de la serie de decaimiento del <sup>238</sup>U. Durante una serie de decaimientos radiactivos, el radionucleido original (el padre) decae a otro núcleo radiactivo (hijo) hasta el final de la serie, donde es formado un núcleo estable (<sup>206</sup>Pb en el caso de la serie <sup>238</sup>U) Figura 1.



Figura 1. Diagrama del decaimiento de la serie del 238U. . Fuente: Maphoto, K., 2004.

Después de largo tiempo, si el sistema está cerrado, el equilibrio es alcanzado, donde las tasas de producción y desintegración son las mismas, es decir se produce cuando la relación de las actividades de los nucleidos de una cadena de desintegración es igual a la unidad, es decir la actividad de la madre e hijas son iguales. Entonces, la medición de la concentración de cualquier radionucleido hijo puede ser usada para estimar la concentración de cualquier otro radionucleido presente en la serie de decaimiento. En condiciones donde el hijo de vida corta resulta de un padre de vida muy larga y donde la actividad del padre no disminuye de forma apreciable durante el tiempo de decaimiento de los hijos de menor vida, se establece la condición de equilibrio secular (ver Figura. 2) (IAEA, 2003).



Figura 2. Equilibrio Secular Fuente: www.fisica.unlp.edu.ar/ActividadyLeyesdeDecaimientoRadiactivo

# 1.5.2.4 Fuentes de Radiación

## • Radiactividad Natural

La radiación natural ha estado presente en todas partes y en todo lo que nos rodea, muchos radioisótopos son de origen natural, se originaron durante la formación del sistema solar a través de la interacción de los rayos cósmicos con moléculas en la atmósfera. Algunos radioisótopos que se formaron cuando se creó nuestro sistema solar tienen vidas media de miles de millones de años, y todavía están presentes en nuestro entorno.

La composición de la capas de las tierra es una fuente importante de radiación natural, principalmente los depósitos naturales de uranio, potasio y torio que lanzan pequeñas cantidades de radiación ionizante durante el proceso de descomposición natural, el uranio y torio se encuentra en todas partes.

Resto de los minerales radiactivos se encuentran naturalmente en los alimentos y agua potable; los vegetales son generalmente cultivados con agua y suelo que contienen restos radiactivos, una vez ingeridos, estos restos resultan en la exposición interna a la radiación natural (UNSCEAR, 2010).

#### • Radiactividad Artificial

En 1934 la pareja Joliot-Curie descubrió que la radiactividad no solo podía observarse en algunos átomos de núcleos inestables, también se podía observar que sustancias bombardeadas continuaban emitiendo radiaciones aun después de retirar el elemento radiactivo emisor de partículas.

Es frecuente hablar de la radiactividad artificial en el uso de la medicina y la producción nuclear de energía eléctrica, que se obtiene a partir del proceso de fisión del Uranio al que se bombardea con neutrones, y al romperse originan dos átomos de una masa media (por ejemplo Kriptón y Bario) y liberando a su vez dos o tres neutrones que fusionaran otros átomos de Uranio 235, originándose así una reacción en cadena.

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}U + \text{Energía}$$

Las personas están expuestas a fuentes de radiación artificial: tratamientos médicos, bioquímica, industria manufacturera, agricultura, ensayos nucleares y todas las actividades relacionadas con materiales radiactivos (García, 2000).

#### 1.5.2.5 Tipos de Radiación Ionizante

Según (Canadian Nuclear Safety Commission, 2012) los tipos de radiación ionizante son:

#### • Radiación Alfa (α)

Consiste en iones del elemento helio, He<sup>2</sup> (o partículas alfa) que se mueven a gran velocidad y que no poseen electrones. Las partículas alfa, o núcleos de helio como luego se conocieron, se emiten aproximadamente a una velocidad de un décimo de la de la luz. Las partículas alfa tienen una penetración limitada, pues se pueden detener con un pedazo de papel o con la ropa.

La radiación alfa fuera del cuerpo no presenta peligro ya que puede ser detenida por un trozo de papel o la capa externa de nuestra piel, sin embargo cuando las partículas alfa ingresan al cuerpo mediante ingestión o respiración son absorbidas completamente por los tejidos corporales.

#### • Radiación beta ( $\beta$ )

Consiste en electrones emitidos a grandes velocidades, a menudo cercanas a la luz. Debido a su alta velocidad, éstos tienen mayor energía cinética que los electrones de los rayos catódicos. La radiación beta puede detenerse sólo con placas metálicas delgadas.

#### Radiación gamma (γ) y rayos X

Es una forma de radiación electromagnética similar a los rayos X, pero todavía con mayor energía. Toda la radiación electromagnética, incluyendo la radiación gamma, viaja a través del espacio vacío a la velocidad de la luz, no tiene masa y no tiene carga eléctrica. La radiación gamma penetra mucho más, ya que se necesitan varios centímetros de plomo, o una placa gruesa de concreto para detenerla por completo. Los rayos X son fotones de alta energía que se producen cuando los electrones atómicos cambian de órbita o cuando inciden electrones sobre un material y son frenados.

#### • Radiación de neutrones (n)

Aparte de la radiación cósmica, la emisión espontánea es la única fuente natural de neutrones. Todas las demás fuentes de neutrones dependen de reacciones en las que el núcleo es bombardeado con un cierto tipo de radiación (radiación de fotones o radiación alfa), y en el que el efecto resultante en el núcleo es la emisión de un neutrón. Los neutrones son capaces de penetrar los tejidos y órganos del cuerpo humano cuando la fuente de radiación esta fuera del cuerpo.

## 1.5.2.6 Interacción de la Radiación con la Materia

Toda radiación posee energía, ya sea intrínseca, como en el caso de la radiación electromagnética, o como energía cinética en el caso de las radiaciones de partículas; la adsorción de la radiación es el proceso por el cual se transfiere esta energía a los átomos del absorbedor. El hecho de decir que la radiación interacciona con la materia significa que ha sido absorbida o dispersada (Pedraza, 2007).

El intercambio de energía de la partícula o fotón a los átomos puede ocurrir mediante dos fenómenos elementales (Figura 3):

- Excitación: los electrones corticales son impulsados a un nivel superior.
- Ionización: los electrones son expulsados del átomo o molécula.



Figura 3. Esquema del proceso de Ionización y Excitación Fuente: Segovia, Naturaleza 5, p. 107, 1974.

La atenuación que sufre la radiación a su paso por la materia dependerá fundamentalmente de dos factores:

- Factor geométrico: que hace que con la distancia entre la fuente y el objeto la radiación sea cada vez más débil, generalmente en proporción inversa al cuadrado de la distancia.
- Factor de Material: que dependerá del tipo y energía de la radiación y de la composición del material, lo que afecta a la probabilidad de interacción (Gallego, 2011).



Figura 4. Capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación en la materia.

Fuente: Sollet, 1997

Los mecanismos de adsorción de la radiación son de interés fundamental en el ejercicio de la seguridad radiológica, principalmente por las siguientes razones:

- La absorción en los tejidos del cuerpo puede ocasionar un daño fisiológico.
- La absorción en el principio en el cual se basa la detección.
- El grado de absorción o tipo de interacción es un factor primario para determinar la necesidades de blindaje (Pedraza, 2007).

#### 1.5.2.7 Interacción de las partículas alfa con la materia

Las partículas alfa tienen carga positiva al igual que otros iones pesados; y cuando interactúan con la materia, se produce la formación de pares iónicos debido a la atracción Coulombiana entre la partícula alfa que atraviesa el medio material y los electrones de los átomos dentro del material. La interacción coulombiana de las partículas cargadas con la materia, es el proceso principal al que se debe el decremento energético observado. Se estudiarán seguidamente los principales mecanismos de pérdida de energía:

### • Poder de frenado

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio material, va perdiendo su energía en choques sucesivos, principalmente en procesos de excitación e ionización de los átomos del medio. Si la energía de la partícula es mucho mayor que las energías medias de excitación e ionización del medio, el decremento energético por colisión supone tan sólo una fracción muy pequeña de la energía cinética de la partícula, en especial en el caso de partículas pesadas. Dada la gran densidad electrónica en la materia, se puede considerar como prácticamente continúa la pérdida de energía. En ciertas condiciones, después de recorrer una distancia más o menos grande, la partícula quedará detenida.

El poder de frenado se expresa en unidades de energía por unidad de longitud, en J/m en el Sistema Internacional, o en otras unidades prácticas incoherentes tales como MeV/cm.

#### • Alcance

Se define el alcance de una partícula cargada en interacción con un medio material, como la máxima distancia de penetración en el medio absorbente. En el caso de las partículas pesadas, el alcance coincide con la longitud de la trayectoria, ya que ésta es prácticamente rectilínea. Sin embargo, en el caso de los electrones, la trayectoria es muy sinuosa, por lo que el alcance resulta ser muy inferior a la longitud de la trayectoria.

Como son partículas con bastante masa su trayectoria es prácticamente rectilínea y la penetración en el material coincide con la longitud del recorrido. Las partículas alfa provenientes de una fuente radiactiva tienen todos los mismos alcances, en virtud de que son monoenergéticas.

### 1.5.2.8 Dosimetría

Por todo lo antes mencionado, sabemos que cuando la radiación interacciona con un material, penetra y deposita en el toda o parte de su energía inicial; para lograr determinar los efectos biológicos producidos por radiación se ha tenido que cuantificar la cantidad o dosis recibida en los órganos afectados. "La dosis es la energía depositada en una unidad de masa" (Mercado, 2007). Para los propósitos de la protección contra la radiación, las cantidades de dosis se expresan en tres formas: Absorbida, Equivalente y Efectiva.

#### • Dosis Absorbida (D)

Es el cociente entre la energía media impartida por la radiación ionizante  $d\varepsilon$  por unidad de masa dm.

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Su unidad original fue el rad, actualmente se utiliza el Gray (Gy), que equivale a 100 rads, 1 Gy equivale a 1 J/kg.

La dosis absorbida generalmente se utiliza cuando se van a realizar estudios de los efectos en tejidos y órganos individuales (Hofmann et al., 2012).

#### • Dosis Equivalente (H)

Varias investigaciones en radiobiología han demostrado que existen daños biológicos diferentes para un mismo valor de dosis absorbida, es decir la afección está en función de la radiación incidente.

Andisco, Blanco y Buzzi (2014), define a la dosis equivalente como el producto entre uno de uno de esos factores de peso y la dosis absorbida, la dosis equivalente introduce factores de peso que ponderan efectos biológicos en función de la radiación. Es una ponderación de la dosis absorbida, para tener en cuenta el tipo de radiación, de acuerdo a su potencialidad para producir efectos biológicos.

 $H = DW_R$ 

Tabla 2. Fa	ctores de	ponderación	de la ra	ıdiación	recomendados
F	uente: Fu	ndamentos d	e física r	médica.	2011

Tipo de Radiación	Factor de ponderación de la radiación WR		
Fotones	1		
Electrones y muones	1		
Protones y piones cargados	2		
Partículas alfa, fragmentos de fisión, iones pesados	20		
Neutrón (5,0 MeV)	11		

La dosis equivalente es un indicador primario de protección radiológica, ya que especifican los límites de radiación para trabajadores expuestos. Su unidad es el Sievert (Sv).

#### • Dosis Efectiva (E)

La probabilidad de aparición de efectos en un determinado órgano o tejido depende no solo de la dosis equivalente recibida por dicho órgano o tejido, sino también de la radiosensibilidad del órgano irradiado. Por esto, y a partir de la irradiación que recibirá una persona en todo su cuerpo, la ICRP (International Commission on Radiological Protection) ha adjudicado un factor de peso (WT) a cada órgano (Andisco, Blanco & Buzzi., 2014).

$$E = \sum D * W_R * W_T$$

La unidad utilizada para la dosis efectiva es también el Sievert (Sv)

Tabla 3. Factores de ponderación de los tejidos recomendados
Fuente: Sociedad Argentina de Radioprotección, 2014

Tejido	Wt	EWT
Médula ósea, Pulmón, Estómago, Mama, Resto de tejidos	0,12	2 0,72
Gónodas	0,08	0,08
Vejiga, Esófago, Hígado, Tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, Cerebro, Glándulas salivales, Piel	0,01	0,04

#### 1.5.3 Técnicas de detección de las partículas a

La radiación no es perceptible por los sentidos, por lo que es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectarla, es por esto, que para detectar las partículas alfa hay un tipo de detectores de huellas nucleares de estado sólido (SSNTD). A pesar de que en sus inicios esta metodología tuvo sus detractores pues consideraban que los sistemas de medición electrónicos que se desarrollaban entonces tenían ventaja sobre el uso de

detectores de estado sólido, con el tiempo se ha venido afianzando en diferentes laboratorios los cuales la respaldan como una herramienta confiable, de gran precisión, fácil uso, transporte y bajo costo (Liza, 2017).

#### 1.5.3.1 Trazas nucleares en SSNTD

Al incidir una partícula alfa en un SSNTD crea a lo largo de su trayectoria una zona de daño conocida como huella latente, en el caso de los sólidos ordenados afecta su estructura cristalina, y en el caso de sólidos amorfos como los polímeros rompe sus cadenas poliméricas produciendo además radicales libres. Las huellas latentes fueron estudiadas por diversos investigadores quienes estimaron un diámetro aproximado que oscila entre 25 a 100 Å. Para poder ser contadas y obtener la densidad de huellas (número de huellas por unidad de área) en el detector es necesario realizar el grabado químico que tiene por función agrandar las huellas latentes para ser visibles al conteo por medio del microscopio óptico donde las huellas alcanzan un diámetro de unas cuantas micras [1 a 15  $\mu$ m] (Liza, R., 2017).

### 1.5.3.2 Geometría de la traza grabada

Posterior al registro de la huella latente, se procede al tratamiento químico del detector para aumentar las dimensiones de la huella. En este proceso la sustancia grabadora genera daño en todo el material, tanto en la parte donde se ha registrado el daño por la partícula alfa (sendero) como en la superficie, de esta manera se puede considerar para un tiempo t que se somete al grabado químico, la distancia o espesor reducido vendrá dado aproximadamente por  $V_{T}$  para el camino recorrido por la partícula alfa y  $V_{B}$  para el espesor reducido en la zona no dañada (Nikezic, D., 2004).

Para el desarrollo de la traza por grabado químico, se forma un hemisferio con radio  $h=V_Bt$  alrededor de cada punto de la superficie del detector, excepto a lo largo del sendero dejado por la partícula al atravesar el material donde el grabado avanza con velocidad  $V_T$ .



Figura 5. Desarrollo de la traza por efecto de las velocidades de grabado Fuente: Nikezi, D. and Yu, KN., 2004

#### 1.5.3.3 Detector LR-115 tipo 2

El film LR-115 tipo 2 es un detector sensible a partículas alfa formado por dos películas: una de nitrato de celulosa de espesor 12um y una de poliéster transparente de 100um, en los casos en que las partículas incidentes con una energía mayor a la del rango detectable su poder de frenado se produce en el poliéster, cuando sucede esto la partícula alfa no es visible incluso después del revelado. Este film no se ve afectado por electrones o radiación electromagnética como rayos X, rayos gamma e infrarrojo. Cuando una partícula alfa impacta con el film, causa daño localizado (huella latente) en la estructura molecular de la capa de nitrato de celulosa. Con el propósito de hacer visible la huella, el film se graba en una solución química.

Se recomienda usar NaOH a 2,5N durante un tiempo que puede variar entre 75 a 100 minutos y a una temperatura estable de 60°C con una fluctuación menor a 0,5°C. Con este procesamiento químico las huellas latentes lograr alcanzar un diámetro que varía entre 1 a 15 um que a la vez depende de la energía con la cual incidieron sobre el film detector. Se han realizado diversos estudios para determinar la ventana de energías detectables por el LR-115 tipo 2, los investigadores reportan diferentes valores, mientras que el fabricante establece un rango de energías detectables entre 0,8 a 4,5 MeV (Liza, R., 2017).

#### 1.5.4 Radio 226 y su progenie

El radio es un metal radioactivo blanco-plateado que ocurre naturalmente y que puede existir en varias formas llamadas isótopos. El radio es formado cuando el uranio y el torio se degradan en el ambiente. El uranio y el torio se encuentran en pequeñas cantidades en la mayoría de las rocas, suelo, agua, plantas y en los alimentos. Dos de los principales isótopos del radio que existen en el ambiente son el radio-226 y el radio-228.

El radio sufre decaimiento radioactivo y cuando decae, se divide en dos partes: una parte se llama radiación y la otra se llama progenie. La progenie, al igual que el radio, es inestable, y también se divide en radiación y en otra progenie. La división de las progenies continúa hasta que se forma una progenie estable, no radioactiva. Durante el proceso de decaimiento se liberan radiación, alfa y gamma. Las partículas alfa solamente pueden viajar una distancia corta y no pueden atravesar la piel. La radiación gamma puede atravesar completamente el cuerpo (Espinosa, 1994).

#### 1.5.4.1 Transporte de 226- Radio desde el suelo hacia los vegetales

Los radionucleidos en el suelo son capturados por el tejido vegetal en la absorción de minerales, transferidos a través del sistema de raíces, apareciendo posteriormente en la cadena alimentaria a través del consumo de carne de rumiantes (ovinos, bovinos, etc.) o a través del consumo de hortalizas comunes a la dieta humana. La planta comestible representa un componente importante de la dieta diaria, de modo que la captación de radionúclidos en la cadena alimentaria humana representa uno de los principales vectores utilizados en el cálculo de las tasas de exposición y en la evaluación del riesgo (Rosen et al, 1995).

Se han realizado varias investigaciones en distintas partes del mundo como India (Mahur et al., 2008), China (Chen et al., 2005), Brasil (Fernandes et al., 2001; Santos et al., 2015), Nigeria (Ibrahim et al., 2013), Canadá, Australia o Rusia (Evseeva et al., 2009),

sobre la movilización de radionucleidos naturales en el suelo, las plantas y el agua, así como sobre la transferencia entre ellas. En este tipo de estudios es esencial comprender cuál es el comportamiento de los radionucleidos naturales en el medio ambiente (por ejemplo, movilidad, transferencias, translocación), ya que dicha información puede utilizarse como los valores de parámetros asociados para las evaluaciones radiológicas (Mortvedt, 1994; Vera Tomé et al., 2002). Por ejemplo, una de las formas más comunes de estimar el riesgo radiológico para la población es estudiar la distribución de radionucleidos naturales en el medio ambiente; también, es importante conocer el transporte de radionucleidos a través de la cadena alimenticia en el ser humano.

Las concentraciones de radiactividad de <sup>226</sup>Ra, <sup>234</sup>U y <sup>238</sup>U se midieron por espectrometría alfa en 23 muestras de suelo y 13 tipos de muestras de vegetales recogidas de granjas seleccionadas en Tabuk, Arabia Saudita. Las medias geométricas de las concentraciones <sup>226</sup>Ra, <sup>234</sup>U y <sup>238</sup>U en suelos fueron 20,3 (1,6), 15,8 (1,5) y 15,3 (1,4) Bq/kg, respectivamente, mientras que las concentraciones en muestras de vegetación fueron un orden de magnitud menor que en suelos. Las plantas de cultivo se trataron por tres grupos separados: frutas, partes verdes (tallos y hojas) y raíces. Las concentraciones observadas en las raíces de los cultivos excedieron las de sus frutos en menos de un orden de magnitud. Como se muestra en la Figura 4, el valor de los factores de transferencia (TF) no muestra ninguna correlación particular con la concentración de actividad en el suelo.

También se observaron correlaciones pobres similares para datos de TF de partes verdes y raíces. Estos resultados pueden indicar que la absorción de radionucleidos de origen vegetal por las plantas es independiente de las concentraciones del suelo (Ibrahim et al., 2016).



Figura 6. Relación entre factores de transferencia a frutas y concentraciones de suelo. Fuente: Ibrahim F. Al-Hamarneh, N. Alkhomashi, Fahad I. Almasoud, (2016).

Las aguas residuales industriales y la contaminación urbana asociada con las inapropiadas prácticas agrícolas conducen a aumentos en la acumulación de metales pesados como Cr, Zn, As, Mn, Cu, Ni, Sr, Cd y Pb en las verduras y suelos de Bangladesh. Este estudio reveló que las verduras de hojas tenían una mayor acumulación de metales pesados que las verduras sin hojas, independientemente de su ubicación. También, aunque pocos metales pesados individuales tienen niveles particularmente dañinos en los vegetales estudiados, sus efectos acumulativos pueden causar riesgos de salud para los habitantes, especialmente para los niños. El nivel elevado de acumulación de metales pesados en la porción comestible de los vegetales se correlaciona significativamente con sus fuentes.

Además, valores más altos de las hortalizas cultivadas en el suelo estudiado también indican la acumulación de estos metales pesados a partir de fuentes antropogénicas. El consumo a largo plazo de vegetales contaminados con metales pesados puede causar diferentes enfermedades como arteriosclerosis, esquizofrenia, talasemia, dermatitis y cáncer en el cuerpo humano (Mahfuza et al., 2015).

#### 1.5.5 Riesgos de la exposición al Radio 226

En condiciones ambientales normales, alrededor del 90% de <sup>226</sup>Ra entra en el cuerpo humano a través de la cadena alimenticia (Tettey-Larbi et al., 2013). Una vez que los radionucleidos entran en el sistema humano, por ingestión, inhalación o irradiación externa, la concentración es posible en varias partes del cuerpo, de ahí los largos medios biológicos de muchos radionucleidos, lo que los convierte en una amenaza potencial para la salud humana. En Ontario – Canadá, los estudios sugirieron que una dosis de radiación se administra a la médula ósea a partir del radón inhalado, y la ingestión de agua contaminada con radón puede causar la exposición al revestimiento del estómago (Navaranjan et al., 2016).

Para evaluar la influencia de la radiación ambiental en la salud pública, es importante determinar el nivel de radiación de fondo (Robertson et al., 2012). Se estudió la incidencia de cáncer en Turquía en la ciudad de Van y se investigó la relación entre la incidencia del cáncer y la radioactividad ambiental. Como se indicó en los estudios previos los cánceres del sistema gastrointestinal aún representan la tasa más alta de todos los casos entre hombres y mujeres (Kösem et al., 2001). Sin embargo, la tasa de incidencia de cáncer gastrointestinal disminuyó entre 2006 y 2010. Según los resultados de este estudio, los residentes de la ciudad de Van en Turquía toman una dosis anual promedio de 1,86 mSv/año de dosis gamma al aire libre, la ingestión de radionucleidos en el agua potable y concentraciones de actividad de Rn en interiores (Akan et al., 2014).

Al oeste de Canadá se encuentra la provincia de Saskatchewan que es una región subártica, hogar de varias minas de uranio en funcionamiento y comunidades aborígenes, que dependen del caribú para subsistir. Debido a las preocupaciones sobre los impactos de la minería y la transferencia de radionucleidos a través de la cadena alimenticia liquencaribú-humano, se analizaron los radionucleidos en tejidos de 18 caribús. Se incluyeron los radionucleidos uranio (<sup>238</sup>U), radio (<sup>226</sup>Ra), plomo (<sup>210</sup>Pb) y polonio (<sup>210</sup>Po) de la serie de descomposición de uranio; cesio (<sup>137</sup>Cs); y potasio natural (<sup>40</sup>K). Las dosis de radiación de fondo natural promedian 2 - 4 mSv/año a partir de rayos cósmicos, rayos gamma externos, inhalación de radón e ingestión de alimentos. El ingesta de <sup>210</sup>Pb y <sup>137</sup>Cs cuando se consume caribú se suma a estas dosis de fondo. El incremento de la dosis fue de 0,85 mSv/año para los adultos que consumieron 100 g de carne de caribú por día y hasta 1,7mSv/año si también se consumió 1 hígado y 10 riñones por año. Se detectó el riesgo de cáncer a partir de estas dosis (Thomas et al., 1999).

Se encontraron concentraciones muy elevadas de radionucleidos naturales en las aguas subterráneas y pozos de Finlandia. Se sabe que el radón ingerido a través del agua potable puede causar una considerable radiación al estómago, es por esto que se evaluó el efecto del uranio natural y otros radionucleidos en el agua potable sobre el riesgo de cáncer de estómago. Se obtuvo como resultado que el riesgo de cáncer de estómago no se asoció con el radio o el uranio en el agua potable. El coeficiente de riesgo Bq/l de cáncer de estómago para el Radio fue de 0,69 (95% IC: 0,33 - 1,47) y la del uranio de 0,76 (95% IC: 0,48 a 1,21). Los grupos con los niveles de exposición más altos al radio (≥0,02 Bq/l, promedio 0,88 Bq/l, mediana 0,5 Bq/l) y uranio (>0,02 Bq/l, promedio 1,03 Bq/l, mediana 0,48 Bq/l) no tuvo un mayor riesgo de cáncer de estómago (Tabla 2). En conclusión, los hallazgos no indican un efecto importante del radón natural ingerido, sobre el riesgo de cáncer de estómago (Auvinen et al., 2005).
Concentración (Bq/l)	Subcohort	Cáncer de estómago	Coeficiente de riesgo (CR)	Intervalo de confianza 95% (IC)
<sup>222</sup> Rn				
< 130	139	46	1	Referencia
130 - 299	63	22	0.54	0.25 - 1.18
300 - 15000	72	19	0.48	0.25 - 0.94
<sup>226</sup> Ra				
< 0.008	120	45	1	Referencia
0.009 - 0.019	83	20	0.37	0.19 - 0.73
0.02 - 1.9	71	22	0.54	0.29 - 1.01
<sup>238</sup> U				
$\leq 0.065$	140	43	1	Referencia
0.065 - 0.20	61	23	0.58	0.29 - 1.15
0.21 - 21	73	21	0.69	0.37 - 1.27

Tabla 4. Concentraciones de 238U, 222Rn y 226Ra entre los casos de cáncer de estómago y el subcohorte (población), con CR e IC 95%

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Diseño

Para conocer si el <sup>226</sup>Ra procedente de los fertilizantes fosfatados NPK-0756 y NPK-12407, se acumula en las hojas y raíces de la lechuga (*Lactuca Sativa crispa*), o suelo donde fueron cultivadas, o si existe relación entre las distintas variables, se realizó una investigación experimental.

El diseño experimental se refiere al proceso para planear el experimento, de tal forma que se recaben datos adecuados (Montgomery 2003). La importancia de un diseño experimental es que da validez a la investigación, y permite controlar el error aleatorio, además de que facilita el análisis de datos (Montoya et al, 2011).

## 2.1.1 Lugar de Experimentación

Para la obtención de las muestras, se cultivó la hortaliza *Lactuca Sativa crispa* en la parroquia San Joaquín que se encuentra ubicado en la parte norte del cantón Cuenca perteneciente a la Provincia del Azuay (Mapa 1.); limita al norte con la Parroquia Sayausí (Río Tomebamba), al sur con la Parroquia Baños (Río Yanuncay); al oeste con la Parroquia de Chaucha y Molleturo y al este con la ciudad de Cuenca, específicamente en la comunidad Cristo del Consuelo la cual ocupa el 0,03% de territorio de la parroquia (PDOT de San Joaquín, 2011).



Figura 7. Mapa de la Ubicación de la Parroquia San Joaquín, Área de Estudio. Elaborado por: Autor

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, PDOT, de San Joaquín, una de las potencialidades de esta parroquia es ser gran productora de hortalizas: el 85.71% de las comunidades (parte céntrica) siembra hortalizas y destina su producción prácticamente el 100% para la venta (El Mercurio, 2014), es por esto que se eligió como destino para este estudio.

#### 2.1.2 Planeación y ejecución del experimento

El experimento empezó con el cultivo de 60 lechugas en un terreno de 8m x 1,2m en el cual se hicieron 4 parcelas de 2m x 1,2m cada una, en las cuales se sembraron 15 lechugas en cada parcela con el fin de aplicar fertilizante fosfatado en diferentes concentraciones (0g, 5g, 10g y 20g), es decir a la primera parcela (A) no se le aplicó fertilizante, sirviendo ésta como testigo; en la segunda parcela (B) se le aplicó 5g de fertilizante, en la tercera (C) se le aplicó 10g de fertilizante (esta cantidad es recomendada por los fabricantes del fertilizante), y en la cuarta parcela (D) se le aplicó 20g de fertilizante (Tabla 5).

Tabla 5. Colocación del rubro en el terreno Elaborado por: Autor

Separación del terreno por parcelas	Concentración de fertilizante [g]	Cantidad de rubro (lechugas)
А	0	15
В	5	15
С	10	15
D	20	15

En cada parcela se colocaron separaciones de madera a 25cm de profundidad con el fin de evitar intercambio de nutrientes que proporciona el fertilizante entre parcelas, además se tomó en cuenta la inclinación del terreno, ya que se sembró el rubro en época de lluvia y así evitar que las muestras se contaminen entre sí por la escorrentía.



Figura 8: Separaciones del terreno. Elaborado por: Autor

El fertilizante fosfatado que se aplicó en el terreno viene en 2 soluciones: NPK-0756 y NPK-12407, estas soluciones se aplicaron en el cultivo en 3 etapas: el NPK-12407 se aplicó en la segunda semana de crecimiento del rubro, el NPK-0756 se aplicó en la sexta semana de crecimiento del rubro y a las 11 semanas de crecimiento del rubro, es decir, en la etapa de maduración se colocó las dos soluciones juntas: NPK-0756 + NPK-12407. Como el fertilizante viene en polvo se diluyó en 1 galón de agua, las diferentes concentraciones del fertilizante que se aplicaron en el cultivo, en las diferentes etapas de crecimiento del mismo.



Figura 9. Fumigación del rubro, con 20g de concentración de fertilizante NPK-12407 Elaborado por: Autor

#### 2.2. Preparación de la muestra

Una vez terminada la etapa de crecimiento del rubro se cosecharon, se separaron las hojas de la raíz y se lavaron, luego estas fueron secadas al ambiente, en un recinto cerrado (aislado del polvo proveniente de suelo), por 2 semanas con volteos periódicos para evitar su descomposición (Figura 7). Pasado este tiempo las hojas y raíces de lechuga fueron colocadas en la estufa a 70°C con el fin de terminar de deshidratar la muestra (Figura 8), luego se trituraron las hojas y raíces con un mortero para obtener una consistencia granular más fina, permitiendo que el radón de la muestra exhale con facilidad.



Figura 10. Secado al ambiente del rubro Elaborado por: Autor



Figura 11. Secado del rubro en la estufa a 70C Elaborado por: Autor

El muestreo de suelo fue realizado después de la cosecha del rubro, mediante un muestreo sistemático en forma de cuadrícula (Figura 9), la cuadrícula mide 80x80cm y cada cuadrante 40cm x40cm La toma de muestras consistió en extraer 200g de material a 5, 10, 15 y 20cm de profundidad con la ayuda de una pala, las muestras se colocaron en bolsas plásticas y fueron codificadas según la parcela de donde fueron extraídas y según la profundidad. Las muestras se secaron en la estufa a 70°C con el fin de eliminar la humedad y cualquier contaminación externa ajena a nuestro estudio, luego las muestras

fueron tamizadas con un tamiz con una malla de 200um para obtener muestras homogéneas.



Figura 12. Muestreo Sistemático del suelo en forma de cuadricula. Elaborado por: Autor

El fertilizante no fue procesado porque la presentación comercial de éste es un polvo lo suficientemente fino.

Para todas las muestras de lechuga, raíz, suelo y fertilizante se pesaron 100g, los cuales fueron vertidos en contenedores herméticamente cerrados; esta técnica se conoce como técnica de la lata o en inglés *Can Technique*, que se describe a continuación.

## 2.3 Construcción del contenedor de las muestras

En este trabajo se prestó especial atención a la geometría y hermeticidad de los contenedores de las muestras, conscientes de la relación entre estas características y la precisión de los resultados. Para la construcción del contenedor se basó en la Técnica de la Lata (*Can Technique*) que es una metodología usada para medir la tasa de exhalación del radón para diferentes muestras (Figura 10).



Figura 13. Disposición experimental para la medición del contenido de radio en muestras de suelo, lechuga y fertilizante. Fuente: Mahur A., Shakir M, et al. 2008

Los contenedores de las muestras para esta investigación se construyeron con tubos PVC de 7cm de diámetro los cuales fueron cortados a 10cm de altura con el fin de acercarnos lo más posible a la geometría deseada. Todos los contenedores fueron debidamente identificados, con la siguiente información: concentración de fertilizante, cantidad de la muestra y profundidad del suelo para las muestras de suelo. Para sellar el envase se colocó un tapón del mismo material del contenedor en la parte superior como inferior. El tapón inferior fue pegado para evitar posibles derrames de la muestra, mientras que en el tapón superior, en la cara interna, se colocó el detector LR-115 tipo 2 de tamaño 1,5 x 1,5cm el cual fue cubierto por una lámina metálica, la cual se sostuvo en su lugar debido a un imán en la cara posterior del tapón. El detector se mantuvo cubierto por 30 días, con el fin de alcanzar el equilibrio secular ente el radio-226 y el radón-222. Una vez transcurrido este tiempo, se retiró el imán, permitiendo que el detector fuese descubierto y







Figura 14.a) Muestra de hojas de lechuga, b) Muestra de raíz de lechuga, c) Muestra de fertilizante NPK-0.756, d) Muestra de fertilizante NPK-12402, e) Muestra de suelo Elaborado por: Autor



Figura 15. Construcción y almacenamiento de las muestras Elaborado por: Autor



Figura 16. Tapón superior del envase, colocación del detector LR-115 y lámina de metal. Elaborado por: Autor

### 2.4 Grabado de los detectores LR-115 tipo 2

Finalizado el periodo de medición (60 días) los detectores son recogidos y preparados para el baño químico, el cual se realiza con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 2,5N durante 90 minutos a una temperatura de  $60^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ . Pasado los 90 minutos de ataque

químico los detectores son retirados del sistema térmico y colocados en agua destilada, donde permanecen durante 20 minutos para que se detenga el efecto del hidróxido de sodio. Finalmente se utiliza agua destilada para eliminar posibles partículas producto del desgaste de la nitrocelulosa, que se depositan en la superficie del detector y ocasionan problemas de lectura.



Figura 17. Sistema de grabado termostatizado del laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP Elaborado por: Autor

#### 2.5 Análisis estadístico de las trazas.

#### 2.5.1 Conteo de trazas con el POLITRACK y obtención de imágenes

Después de 24 horas posterior al grabado químico, los detectores están listos para su lectura, para lo cual se empleó el POLITRACKTM que es un sistema de microscopía óptica que permite la detección de trazas en SSNTD del tipo CR-39 y LR-115. El sistema consiste en un plano cartesiano XY anclado en una base "en forma de panal", con un soporte antivibración.

El sistema óptico consiste en un microscopio anclado en un posicionador motorizado, que a su vez se fija a la base de amortiguación de vibraciones por medio de un brazo de aluminio. Para el análisis de radón, el ocular y la lente tienen un aumento total de 100x. El ocular se acopla directamente con una cámara CCD monocromática con una resolución de 1028x768 con un ADC de 8 bits. La cámara tiene una interfaz con una PC a través de una conexión Firewire. La fuente de luz consiste en un diodo LED verde (o ámbar para LR-115, longitud de onda 590nm, para que coincida con la absorbancia espectral).

El sistema está controlado por una PC que gestiona el movimiento de los ejes, los ajustes y la adquisición de imágenes desde la cámara. Además el software, desarrollado con Labview enfoca y determina el plano focal, tiene algoritmos de análisis morfológicos de las trazas, el tamaño del detector y área de lectura establecida por el operador. En la Figura 19 se ve una de las pantallas del software, en la parte inferior se observa una gráfica que nos indica que tan eficiente fue el grabado de los detectores, esta gráfica está dado por la amplitud y escala de grises, mientras más abre la escala de grises quiere decir que el grabado no fue uniforme, en este caso podemos ver que se genera un pico y la gráfica tiende a cerrarse, esto nos indica que el grabado fue uniforme por lo tanto el conteo de POLITRACK va a ser más eficiente (Mi.am, 2017).



Figura 18. Pantalla que nos indica la eficiencia del grabado. Elaborado por: Autor

La lectura de los detectores LR-115 consiste en bloquear el detector entre dos hojas de vidrio a fin de asegurar la planeidad. Se colocaron 76 detectores con un tamaño de 1,5 x 1,5cm en la placa de vidrio. El lente del POLITRACK toma 64 campos de visión en cada detector, por lo que es importante que todos los detectores tengan el mismo tamaño para obtener una lectura más precisa.



Figura 19.Conteo de trazas en el POLITRACK Elaborado por:Autor

El POLITRACK hace un reconocimiento general en cada uno de los detectores, para luego seleccionar un cierto número de campos por detector, y seguidamente procede al conteo de las trazas. El POLITRACK, en la medida que va recorriendo el detector, muestra en una pantalla la imagen del campo de visión en el cual está ubicado. En la medida que va reconociendo las trazas, las identifica con un número, correspondiente al número de la traza contabilizada y la registra en un archivo correspondiente al detector en cuestión (ver Figura 21), generando de esta manera una base de datos.

PolitrackLR_6.vi File Analyzic Objective Action Settings Help	_		- 0 <b>- X</b> -
Page 1 Page 2 Page 3 Page 4 Page 5 Camera control			
Day Politokan, Annu File Analysis Objective Action Settings Help Page 1 Page 2 Page 3 Page 4 Page 5 Camera control		4	Settings summary Objective 4 x √   At an object √ 1213   Attorn √ √   Movement XY √ 153388   X 40,0000 2   V 153388 ×   X 40,0000 2   Y 153388 ×   X 40,0000 2   Step mm 58ep 1
1280x660 1X 8-bit image 43 (1021,372)       Arasg pummay		m 14 Pep. k8q*h/m^3 U(95%)	Image: space
	ene analysis ger frameTacks count Frame counter Scanned area cm <sup>2</sup> 2Runtime Tr/cm <sup>2</sup> 2 0 0 0 NaN	0 17/cm <sup>2</sup> 2 0 N <sup>2</sup> film 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Operators       Image: Comparison of the state of the s

Figura 20. Reconocimiento de un campo y conteo de trazas Elaborado por: Autor



Figura 21. Captura de un campo con trazas perfectamente visibles Elaborado por: Autor

El POLITRACK sólo reconocerá como traza nuclear, aquellas que después del tratamiento químico lograron atravesar el nitrato de celulosa y dejar pasar la pasar la luz a través de éste.



Figura 22.Captura de un campo con trazas visibles y una traza que no ha sido contabilizada por el POLITRACK Elaborado por: Autor

La cantidad, forma y tamaño de las trazas son variadas en cada detector, sin embargo el POLITRACK es un sistema muy confiable, ya que toma criterios como la geometría de la traza (circularidad, diámetro) y las enumera como se puede ver en la Figura 23. Si la traza no cumple con los criterios estandarizados por el POLITRACK simplemente no las contabiliza y así se puede obtener datos más precisos.

### 2.5.2 Cálculos y registro

Para calcular el <sup>226</sup>Ra contenido en las muestras se emplearon diversas ecuaciones recopilados en trabajos relacionados al tema y a la metodología aplicada, se describen a continuación:

La densidad de trazas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T \text{ (trazas/cm2)} = \frac{\Sigma T}{nA}$$

Donde:

 $\sum T$ , representa la suma total del número de trazas en los campos de visión.

n, es la cantidad de campos ópticos analizados.

A, es el área del campo óptico  $(cm^2)$ .

El proceso de emisión radiactiva está regido por el azar, que se ve reflejado en las variaciones de número de partículas  $\propto$  emitidas de una fuente radiactiva en un tiempo dado. La probabilidad que ocurra una desintegración e impacte sobre el detector en un intervalo de tiempo es asintóticamente proporcional a  $\Delta t$ . Bajo esas condiciones si N representa el número medio de partículas alfas emitidas en un tiempo, la probabilidad de detectar n partículas, está dada por la distribución de Poisson (Burcham W., 1974):

$$F(n) = \frac{N^n e^{-N}}{n!}$$

En el caso del conteo de trazas se basa en la estadística de Poisson, a partir de la cual se puede calcular el error en la medición y la cantidad de campos de visión necesarios para que el error en la densidad de trazas no supere el 10 % (Zhukovsky et al. 2010). Para calcular el error en el cálculo de la densidad de trazas bajo la premisa que sigue la distribución de Poisson:

$$\Delta \rho = \frac{\sqrt{N_T}}{A}$$

Donde, N<sub>T</sub> es el número total de trazas observadas, y A es el área del campo de visión. De manera que la densidad de trazas y su error se puede expresar:

$$\rho = \frac{N_T \pm \sqrt{N_T}}{A}$$

-

Y el error relativo como:

$$\varepsilon_{ri} = \frac{\sqrt{N_T}}{N_T} = \frac{1}{\sqrt{N_T}}$$

El presente estudio, se llevó a cabo para medir la concentración de <sup>226</sup>Ra, concentración de <sup>222</sup>Rn y las tasas de exhalación del radón en muestras de suelo, lechuga (hojas y raíz) y de fertilizante recogidas en la parroquia San Joaquín del cantón de Cuenca.

La tasa de exhalación de radón en términos de masa  $(E_m)$  y superficie  $(E_s)$ , fueron determinadas por la siguiente relación:

$$Em (Bq/kg/h) = \frac{CV\lambda}{M} \left[t + \frac{1}{\lambda} \left\{e^{(-\lambda t)} - 1\right\}\right]$$

$$Es (Bq/m2/h) = \frac{CV\lambda}{A} \left[t + \frac{1}{\lambda} \{e^{(-\lambda t)} - 1\}\right]$$

Donde, *V* es el volumen efectivo, el mismo que se calculó para cada una de las muestras ya que se obtuvo diferentes alturas (distancia entre la superficie de la muestra y el detector) (Tabla 6),  $\lambda$  es la constante de decaimiento del radón (7,5 x10<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>), *M* es la masa de las muestras obtenidas, descrita en la tabla 7, *A* es el área de superficie de la muestra (0,031 m<sup>2</sup>), y *t* es el tiempo de exposición (1440 h).

Tabla 6. Cálculo del volumen efectivo para cada unc	a de las muestras (m3)
Elaborado por: Autor	
Volumen efectivo suelo (Vs)	0,000288
Volumen efectivo fertilizante (Vf)	0,000269
Volumen efectivo lechuga (Vl)	0,000192
Volumen efectivo raíz (Vr)	0,00025

Tabla 7.Masas de las muestras obtenidas
Elaborado por: Autor

Muestra	Cantidad (Kg)
Suelo	0,1
Fertilizante	0,1
	0,1
Lashuga	0,09
Lechuga	0,03
	0,07
	0,03
Raíz	0,01
	0,02

También se calculó la exposición integrada de radón (C) y está definida por la siguiente relación:

$$C(Bq/m3.h) = \left[\frac{T}{dK}\right]t$$

Donde *K* es el factor de sensibilidad del detector Lr-115 con una incertidumbre de aproximadamente ±15%. El valor de K dependerá de la altura y el radio de la cámara de difusión. Para un radio de 3,5cm y una altura de 10cm, K es igual a 1/30 (trazas/cm<sup>2</sup> d)  $(Bq/m^3)^{-1}$ . *T* es la densidad de trazas y *d* es el número de exposición en días.

Finalmente la concentración de radio-226 de una muestra en el contenedor fue calculado por la siguiente formula:

$$C_{Ra}(Bq/kg) = \left[\frac{T}{KTe}\right] \left[\frac{hA}{M}\right]$$

Donde h es la distancia entre el detector y la superficie de la muestra en m.

#### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la obtención de las muestras, el cultivo se realizó en época de invierno en los meses de marzo, abril y mayo, que es el tiempo de crecimiento del rubro estudiado (Lechuga), además se analizó el suelo donde fue cultivado, el fertilizante que se aplicó al cultivo y también se analizaron las hojas y raíz de la lechuga. Se realizó un análisis multivariante con los datos obtenidos a través del software SPSS (Producto de Estadística y Solución de Servicio).

A continuación analizaremos cada una de las variables tomadas para este estudio para determinar la contribución de <sup>226</sup>Ra y determinar si existe correlación entre las mismas.

# 3.1 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de fertilizante

Para este estudio se ocupó un fertilizante que viene en 2 soluciones: NPK-0756 y NPK-12407, de los cuales se tomó 3 muestras de cada solución y 3 muestras se combinaron con las dos soluciones con el fin de determinar la concentración de Radio-226. En la Tabla 8 se muestra las variaciones la densidad de trazas, concentración de <sup>226</sup>Ra, concentración de <sup>222</sup>Rn, exhalación por masa y exhalación por superficie de las muestras de fertilizante.

Fertilizante	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2 día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/kg)
NPK-12407	0,1	1	95	220,89				
	·	2	91	211,59	$3975,73 \pm 25\%$	$12661,\!55\pm25\%$	$104,63 \pm 25\%$	$2{,}53\pm25\%$
		3	84	195,31				
		1	165	383,65				
NPK-0756	0,1	2	269	625,47	$10086{,}57 \pm 21{,}2\%$	$32122,82 \pm 21,2\%$	$265,45 \pm 21,2\%$	$6{,}43 \pm 21{,}2\%$
		3	251	583,61				
NPK-12407		1	295	685,92				
+ NPK-	0,1	2	211	490,61	$12383,\!65\pm20,\!8\%$	$39438,\!38 \pm 20,\!8\%$	$325,91 \pm 20,8\%$	$7,\!89\pm20,\!8\%$
0756		3	335	778,92				

Tabla 8. Comparación entre los fertilizantes NPK-12407 y NPK-0756 Elaborado por: Autor

En cuanto a la comparación entre los dos soluciones del fertilizantes: NPK-0756 y NPK-12407, en las concentraciones de <sup>226</sup>Ra se observó una ligera tendencia creciente, siendo la combinación NPK-12407 + NPK-0756 el valor más alto (Figura 23). Sin embargo las muestras de fertilizantes mostraron que los niveles de actividad de <sup>226</sup>Ra fueron inferiores a los niveles de actividad permisibles que es 35Bq/kg para <sup>226</sup>Ra según la UNSCEAR, 2000.



Figura 23. Concentración de 226Ra en muestras de fertilizante Elaborado por: Autora

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), entre las medias de las concentraciones de  $^{226}$ Ra contenidas en las diferentes soluciones del fertilizante aplicado (NPK-0756, NPK-12407 y NPK-0756 + NPK-12407) para cada parcela del cultivo, sobre las cuales se vertió diferentes concentraciones (0 g, 5 g, 10 g y 20 g), los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de 226Ra contenidas en las soluciones de fertilizante utilizadas en el cultivo Elaborado por: Autora

	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	46,044	2	23,022	12,226	,008
Dentro de grupos	11,299	6	1,883		
Total	57,342	8			

Los resultados mostraron, las medias de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra para las muestras de fertilizante son iguales, decir la significancia fue mayor (p > 0.05). Con la prueba Post Hoc se comparó entre soluciones de fertilizante para determinar en qué medias de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra son iguales (Tabla 10), mediante la prueba de Tukey.

					95% de in	tervalo de
					conf	ianza
(I) Tipo de		Diferencia de	Error		Límite	Límite
Fertilizante	(J) Tipo de Fertilizante	medias (I-J)	estándar	Sig.	inferior	superior
NPK-12407	NPK-0756	-3,895333*	1,120445	,031	-7,33317	-,45750
	NPK-12407+ NPK-0756	-5,359667*	1,120445	,007	-8,79750	-1,92183
NPK-0756	NPK-12407	3,895333*	1,120445	,031	,45750	7,33317
	NPK-12407+ NPK-0756	-1,464333	1,120445	,442	-4,90217	1,97350
NPK-12407+	NPK-12407	5,359667*	1,120445	,007	1,92183	8,79750
NPK-0756	NPK-0756	1,464333	1,120445	,442	-1,97350	4,90217

Tabla 10. Comparaciones múltiples entre soluciones del fertilizante Elaborado por: Autora

Variable dependiente: Concentración de 226Ra en Fertilizante (Bq/kg)

Se pudo observar que el NPK-12407 combinado con el NPK-0756 y con NPK-12407 + NPK-0756 las medias de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra fueron iguales, es decir la significancia fue menor (p < 0.05), esto se debe a las bajas concentraciones de <sup>226</sup>Ra en el fertilizante NPK-12407; caso contrario sucedió en la combinación del NPK-0756 con el NPK-12407 + NPK-0756, donde la significancia fue mayor (p > 0.05).

Tipo de		Subconjunto para alfa 0.05			
Fertilizante	Ν	1	2		
NPK-12407	3	2,53467			
NPK-0756	3		6,43000		
NPK-12407+	2		7 80 422		
NPK-0756	3		7,89433		
Sig.		1,000	,442		

Tabla 11. Medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos	5
Elaborado por:: Autor	

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos. HSD Tukey<sup>a</sup>

#### 3.2 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de suelo

Para determinar la concentración de Radio-226 en el suelo se tomaron 3 muestras a diferentes profundidades: 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm, en cada parcela.

En las Tablas 12, 13, 14, 15 se pueden observar los cálculos obtenidos de las densidades de trazas, concentraciones de <sup>226</sup>Ra, concentraciones de <sup>222</sup>Rn, exhalación por masa y exhalación superficie para cada profundidad del suelo y de las diferentes concentraciones de fertilizante (0, 5, 10, 20g) a las que fue expuesta cada parcela.

Profundidades (cm)	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2.día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/Kg)
		1	1135	2639,04				
0-5	0,1	2	1126	2618,12	$64984,2 \pm 17,63\%$	$206956{,}05 \pm 17{,}62\%$	$1596,21 \pm 17,38\%$	$41,43 \pm 17,62\%$
		3	1858	4320,13				
		1	2162	5026,97				
5-10	0,1	2	2387	5550,13	$95575,20 \pm 17,16\%$	304379,64 ± 17,16%	$2347,62 \pm 17,15\%$	$60,\!93 \pm 17,\!16\%$
		3	1509	3508,65				
		1	873	2029,85				
10-15	0,1	2	1080	2511,16	$56859,20 \pm 17,80\%$	$181080,\!26\pm17,\!80\%$	$1396,64 \pm 17,80\%$	$36,25 \pm 17,80\%$
		3	1651	3838,82				
		1	1818	4227,12				
15-20	0,1	2	3332	7747,4	$120234, 17 \pm 16,94\%$	382911,39 ± 16,94%	$2953,32 \pm 16,94\%$	$76,65 \pm 16,93\%$
		3	2471	5745,44				

Tabla 12. Comparación entre las profundidades de suelo con 0g de Fertilizante Elaborado: Autora

El estudio ha demostrado que la concentración de  $^{2226}$ Ra varía de acuerdo a la profundidad del suelo a 0g de concentración de fertilizante (Figura 24). Además los datos muestran que de 5-10 cm y de 15-20 cm las concentraciones de  $^{226}$ Ra aumenta significativamente ya que sobrepasa los rangos medios permisibles para el suelo (10-50 Bq / kg) para  $^{226}$ Ra según la UNSCEAR, 2000.

Profundidades	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2.día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/kg)
			1154	2683,222				
0-5	0,1	2	1277	2969,215	$49018,\!19 \pm 18,\!01\%$	$156108{,}87 \pm 18{,}01\%$	$1204{,}04 \pm 18{,}04\%$	$31,25 \pm 18,01\%$
		3	676	1571,801				
		1	571	1327,66				
5-10	0,1	2	2343	5447,824	$62712,35 \pm 17,56\%$	$199720{,}87 \pm 17{,}56\%$	$1540{,}41 \pm 17{,}56\%$	$39,98 \pm 17,55\%$
		3	1061	2466,983				
		1	351	816,127				
10-15	0,1	2	927	2155,413	$38368,92 \pm 18,36\%$	$122194{,}00\pm18{,}36\%$	$942,\!46 \pm 18,\!36\%$	$24,46 \pm 18,35\%$
		3	1154	2683,222				
		1	947	2201,916				
15-20	0,1	2	2238	5203,683	$65236,63 \pm 17,60\%$	$207759,\!95 \pm 17,\!60\%$	$1602,\!42 \pm 17,\!60\%$	$41,\!59 \pm 17,\!60\%$
		3	950	2208,891				

Tabla 13. Comparación entre las profundidades de suelo con 5g de Fertilizante Elaborado por: Autora

El estudio ha demostrado que la concentración de  $^{2226}$ Ra varía de acuerdo a la profundidad del suelo a 5g de concentración de fertilizante a la que fue expuesta esa parcela (Figura 24). Además los datos muestran que la concentración de  $^{226}$ Ra en todas las profundidades se encontraron dentro de los rangos medios permisible para  $^{226}$ Ra (10-50 Bq / kg) en el suelo según la UNSCEAR, 2000.

Profundidades	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2 día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/kg)
		1	1542	3585,38				
0-5	0,1	2	1161	2699,5	$93524{,}24 \pm 17{,}14\%$	$297847,\!88 \pm 17,\!14\%$	$2297,\!25 \pm 17,\!14\%$	$59,62 \pm 17,14\%$
		3	3225	7498,6				
		1	2819	6554,59				
5-10	0,1	2	927	2155,41	$94234,19 \pm 17,12~\%$	$300108,\!88 \pm 17,\!12\%$	$2314{,}69 \pm 17{,}12\%$	$60,\!07 \pm 17,\!13\%$
		3	2227	5178,11				
		1	2673	6215,12				
10-15	0,1	2	3785	8800,69	$136689,\!27 \pm 16,\!81\%$	$435316{,}14 \pm 16{,}81\%$	$3357,51 \pm 16,81\%$	$87,\!14\pm16,\!82$
		3	2206	5129,28				
		1	690	1604,35				
15-20	0,1	2	1419	3299,39	$43938{,}09 \pm 18{,}18\%$	$139930{,}22\pm18{,}18\%$	$1079,\!26 \pm 18,\!18\%$	$28,01 \pm 18,17\%$
		3	676	1571,8				

#### Tabla 14. Comparación entre las profundidades de suelo con 10g de Fertilizante Elaborado por: Autor

El estudio ha demostrado que la concentración de <sup>2226</sup>Ra varía de acuerdo a la profundidad del suelo a 10g de concentración de fertilizante a la que fue expuesta esa parcela (Figura 24). Además los datos muestran que de 5-10 cm y de 10-15 cm de profundidad, la concentración de <sup>226</sup>Ra sobrepasa los valores medios permisibles de <sup>226</sup>Ra (10-50 Bq/kg) para el suelo según la UNSCEAR, 2000.

Profundidades	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2 día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/kg)
		1	1221	2839,01				
0-5	0,1	2	1823	4238,75	$69449 \pm 17,56\%$	$221175,\!17\pm17,\!56\%$	$1705,\!88 \pm 17,\!56\%$	$44,\!27 \pm 17,\!56\%$
		3	1358	3157,55				
		1	643	1495,07				
05-oct	0,1	2	685	1592,73	$49712,\!36 \pm 17,\!95\%$	$158319,\!62 \pm 17,\!95\%$	$1221,\!09 \pm 17,\!95\%$	$31,\!69 \pm 17,\!95\%$
		3	1823	4238,75				
		1	908	2111,24				
oct-15	0,1	2	671	1560,17	$30985,\!43 \pm 18,\!80\%$	$98679{,}70 \pm 18{,}80\%$	$761,\!10 \pm 18,\!80\%$	$19,\!75 \pm 18,\!78\%$
		3	385	895,18				
		1	1240	2883,18				
15-20	0,1	2	1742	4050,41	81628,61 ± 17,77%	$259963,72 \pm 17,77\%$	$2005{,}05 \pm 17{,}77\%$	$52,04 \pm 17,33\%$
		3	2192	5096,73				

Tabla 15. Comparación entre las profundidades de suelo con 20g de Fertilizante Elaborado por:

El estudio ha demostrado que la concentración de <sup>2226</sup>Ra varía de acuerdo a la profundidad del suelo a 20g de concentración de fertilizante a la que fue expuesta esa parcela (Figura 24). Además los datos muestran que de 15-20 cm de profundidad, la concentración de <sup>226</sup>Ra sobrepasa los valores medios permisibles de <sup>226</sup>Ra (10-50 Bq/kg) para el suelo según la UNSCEAR, 2000.



Figura 24: Concentración de 226Ra en diferentes profundidades de suelo a diferentes concentraciones de fertilizante. Elaborado por: Autor

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), entre las medias de las concentraciones de Ra-226 contenidas a diferentes profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm y 15-20 cm) en el suelo, para cada parcela de cultivo, sobre las cuales se vertió diferentes concentraciones de fertilizantes (0 gr, 5 gr, 10 gr y 20 gr), los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 16.

		Suma de		Media		
		cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Concentración de	Entre grupos	3101,934	3	1033,978	4,044	,051
226Ra a 0g (Bq/kg)	Dentro de grupos	2045,219	8	255,652		
	Total	5147,152	11			
Concentración de	Entre grupos	574,340	3	191,447	,506	,689
226Ra a 5g (Bq/m3)	Dentro de grupos	3029,269	8	378,659		
	Total	3603,609	11			
Concentración de	Entre grupos	5259,775	3	1753,258	2,584	,126
226Ra a 10g (Bq/m3	Dentro de grupos	5428,705	8	678,588		
	Total	10688,480	11			
Concentración de	Entre grupos	1813,403	3	604,468	3,150	,086
226Ra a 20g (Bq/m3)	Dentro de grupos	1535,055	8	191,882		
	Total	3348,458	11			

Tabla 16. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de 226Ra de las muestras de suelo por profundidad y concentración de fertilizante Elaborado por: Autor

Dando como resultado, diferencias entre las medias de las concentraciones, a diferentes profundidades, en todas las parcelas. El valor de las medias de la concentraciones de <sup>226</sup>Ra de las muestras de suelo resultaron diferentes para las concentraciones del fertilizante aplicados en las parcelas, de la profundidad del suelo de la que fue tomada la muestra, es decir la significancia fue mayor (p > 0.05), Para comprobar si por lo menos 2 medias de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra son diferentes, se realizó una prueba Post Hoc, mediante la prueba de Tukey.

Profundidad		Subconjunto para alfa = 0.05
Suelo	Ν	1
15	3	36,2467
5	3	41,4267
10	3	60,9267
20	3	76,6467
Sig.		,058

Tabla 17.. Comparación entre las profundidades del suelo a Og de concentración de fertilizante Elaborado por: Autor

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Tabla 18 Comparación ent	las profundidades del suelo a 5g de concentración de fertilizant	е
	Elaborado por: Autor	

Profundidad		Subconjunto para alfa = 0.05
Suelo	Ν	1
15	3	24,4600
5	3	31,2500
10	3	39,9767
20	3	41,5867
Sig.		,712

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Profundidad		Subconjunto para alfa = 0.05
Suelo	Ν	1
20	3	28,0100
5	3	59,6233
10	3	60,0733
15	3	87,1367
Sig.		,091

Tabla 19. Comparación entre las profundidades del suelo a 10g de concentración de fertilizante Elaborado por: Autor

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

		Subconjunto para
Profundidad		alfa = 0.05
Suelo	Ν	1
15	3	19,7567
10	3	31,6900
5	3	44,2700
20	3	52,0367
Sig.		.082

Tabla 20. Comparación entre las profundidades del suelo a 20g de concentración de fertilizante Elaborado por: Autor

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Con la prueba de Tukey se comprobó que existen diferencias significativas entre los valores medios de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra, a diferentes profundidades, para 0, 5, 10 y 20g de fertilizante.

## 3.3 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en la muestras de lechuga (hojas)

Del cultivo de lechuga se lograron obtener 2 muestras de cada parcela, en las cuales de aplicó 0, 5, 10, 15 y 20g de fertilizante en este orden, solamente la parcela a la que se le aplicó 10g de fertilizante, se obtuvieron datos de un solo detector, ya que al momento de realizar el grabado químico uno de los detectores se dañó, siendo imposible la lectura del mismo.

Pese a esto en la Tabla 21 se muestra los cálculos realizados para obtener la densidad de trazas, concentración de <sup>226</sup>Ra, concentración de <sup>222</sup>Rn, exhalación por masa y exhalación por superficie de las muestras de las hojas de lechuga.

Concentración de Fertilizante (g)	Masa muestra (kg)	# Muestras	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm2 día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m2/h)	Concentración de Radón (Bq/m3)	Concentración de Radio (Bq/kg)
0	0,09	1	14	32,55	$490,\!83 \pm 201,\!24$	$1406,83 \pm 576,80$	$16{,}28\pm6{,}67$	$0,31 \pm 0,13$
U	0,1	2	2	4,65	$63,11 \pm 53,64$	$200,97 \pm 170,83$	$2,\!33 \pm 1,\!98$	$0,\!04\pm0,\!03$
5	0,03	1	7	16,28	$760,32 \pm 395,37$	$703,\!41 \pm 365,\!78$	$8,\!14 \pm 4,\!23$	$0{,}48 \pm 0{,}22$
5	0,1	2	7	16,28	$220,\!87 \pm 114,\!85$	$703,\!41 \pm 365,\!78$	$8,\!14 \pm 4,\!23$	$0,\!14\pm0,\!07$
10	0,079	1	7	16,28	$279,59 \pm 145,39$	$703,\!41 \pm 365,\!78$	$8,\!14 \pm 4,\!23$	$0,\!17\pm0,\!09$
20	0,074	1	12	27,9	$511,\!68 \pm 220,\!02$	$1205,86 \pm 518,52$	$13,95 \pm 6$	$0,\!32\pm0,\!14$
20	0,1	2	14	32,55	$441,\!75 \pm 181,\!12$	$1406,83 \pm 576,80$	$16{,}28\pm6{,}67$	$0{,}28\pm0{,}12$

Tabla 21. Comparación de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga (hojas) Elaborado por: Autor

Las concentraciones de <sup>226</sup>Ra obtenidas en las hojas de lechuga son variadas, y según la UNSCEAR (2000) el valor recomendado para vegetales de hojas es 0,05 Bq/kg para el <sup>226</sup>Ra, podemos notar que para todas las concentraciones de <sup>226</sup>Ra los valores superan a los recomendados.



Elaborado por: Autor

Para las muestras de hojas de lechuga, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), entre las medias de las concentraciones de  $^{226}$ Ra contenidas en las mismas, sobre las cuales se vertió diferentes concentraciones de fertilizantes (0 g, 5 g, 10 g y 20 g), los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 22.

	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,000	3	,000	,344	,798
Dentro de grupos	,000	3	,000		
Total	,000	6			

Tabla 22. Tabla 22. Análisis de la varianza para las medias de las concentraciones de 226Ra de las muestras de lechuga (hojas) y concentración de fertilizante

Fla	borad	lo nor:	Autor
LIU	DUIUU		Autor

Dando como resultado, diferencias entre las medias de las concentraciones de  $^{226}$ Ra en las muestras de lechuga, es decir, la significancia fue mayor (p > 0.05).

# 3.4 Análisis estadístico de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga (raíz)

Del cultivo de lechuga se logró obtener 1 muestra de raíz de cada parcela, en las cuales de aplicó 0, 5, 10, 15 y 20 g de fertilizante en este orden. En la Tabla 23 se muestra los cálculos realizados para obtener la densidad de trazas, concentración de <sup>226</sup>Ra, concentración de <sup>222</sup>Rn, exhalación por masa y exhalación por superficie de las muestras de raíces de las lechugas.

Concentración de Fertilizante (g)	Cantidad (kg)	# huellas nucleares	Densidad de trazas (trazas/cm².día)	Exhalación por masa (Bq/kg/h)	Exhalación por superficie (Bq/m²/h)	Concentración de Radón (Bq/m <sup>3</sup> )	Concentración de Radio (Bq/kg)
0	0.034	39	90.68	4705 17 + 1458 60	5004 77 + 1570 38	45 34 + 14 06	3 + 0.93
5	0.0181	21	48.83	$4703,17 \pm 1438,00$ $4759,16 \pm 1713,30$	$2743.34 \pm 987.60$	$43,34 \pm 14,00$ 24.41 ± 8.79	$3.03 \pm 1.09$
10	0,0244	26	60,45	$4370,92 \pm 1486,11$	$3396,51 \pm 1154,81$	$30,23 \pm 10,38$	$2,79 \pm 0.95$
20	0,025	33	76,73	5414,56 ± 1732,66	4310,96 ± 1379,51	38,36 ± 12,38	$3,45 \pm 1,10$

Tabla 23.Comparación de la concentración de Radio-226 en las muestras de lechuga (raíces) Elaborado por: Autora

Las concentraciones de  $^{226}$ Ra en las raíces de lechuga no se diferencian como se puede notar en la Figura 27, esto quiere decir que sea cual sea la cantidad de fertilizante que apliquemos en el cultivo el  $^{226}$ Ra no se va alojar en las raíces de la lechuga sino se va a quedar en el suelo la mayor parte y la otra parte se va a transferir a las hojas.


Figura 26: Concentraciones de 226Ra en muestras de raíces de lechuga Elaborador por: Autor

## 3.5 Evaluación de la ingesta promedio diaria de Radio-226

Para estimar los niveles de ingestión de <sup>226</sup>Ra se ha evaluado la cantidad en g/Kg presente en esa concentración de <sup>226</sup>Ra, y se ha estimado la actividad diaria del <sup>226</sup>Ra al consumir lechuga (Tabla 24), donde la ingesta diaria para la población de la parroquia San Joaquín no supera los límites recomendados por la UNSCEAR (2000), donde ha evaluado la ingesta diaria de radionucleidos naturales en dietas poblacionales donde la actividad del <sup>226</sup>Ra permisible de 24 a 109mBq.

Concentración de Fertilizante (g)	Concentración de Radio (mBq/Kg)	Masa de Radio (g/Kg)	Actividad al consumir lechuga
0	313	8,56E-09	0,40
-	40	1,09E-09	0,05
5	480	1,31E-08	0,62
	140	3,83E-09	0,18
10	180	4,92E-09	0,234
20	330	9,03E-09	0,429
20	280	7,66E-09	0,364

Tabla 24. Calculo de las masas de Radio-226 por medio de la concentración de Radio-226 obtenido de las muestras. Elaborador por: Autor

## 4. CONCLUSIONES

Con los datos experimentales obtenidos, se determinó que no hay una contribución significativa a la concentración de radio-226 del suelo dado por la aplicación del fertilizante, ya que las concentraciones de Radio-226 en la parcela que no se aplicó fertilizante no se diferencia de las concentraciones de Radio-226 de las parcelas a las que si fue aplicado fertilizante.

Las aplicaciones constantes de fertilizantes hacen que los radionucleidos se acumulen en los suelos de los cultivos, sin embargo la mediciones de Radio-226 en los fertilizantes utilizados, resultaron ser bajas en comparación con los valores recomendados por la UNSCEAR (2000), pero puede ser que el uso a largo plazo de fertilizantes fosfatados pueden contribuir al aumento de radionucleidos en el suelo y plantas. La concentración de Radio-226 en el suelo a profundidades entre 0-20 cm resultaron relativamente altos, en comparación con los valores permisibles por la UNSCEAR, lo que puede causar un efecto de acumulación de radioactividad en suelos, que puede ser perjudicial para la salud de los agricultores y consumidores de los productos.

La concentración de Radio-226 determinado en la lechuga, resulto tener el valor más bajo en la raíz y más alto en las hojas, es decir el Radio-226 no se acumula en la raíz, si no este es transferido a las hojas. Sin embargo sugerimos que se incremente el número de muestras, para obtener datos más precisos.

Se evaluó la ingesta diaria de lechuga para la población de la parroquia San Joaquín, donde las concentraciones de Radio-226 que se ingiere resultaron estar por debajo de las concentraciones recomendados por la UNSCEAR (2000), esto no quiere decir que no exista un riesgo radiológico al ingerir alimentos contaminados con Radio-226, ya que depende de la frecuencia con la que se consuma esta verdura y de su lugar de procedencia.

Para finalizar se notó que no existe una transferencia significativa de las concentraciones de Radio-226 del suelo hacia las hojas de lechuga, creemos que fue porque el cultivo del rubro se realizó en época de lluvia y esto permitió que el Radio-226 se movilice con facilidad a lo largo del terreno y no sea captado por el rubro. Es por esto que recomendamos que el cultivo se realice en invernaderos.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Andisco, D., Blanco, S., & Buzzi, A.(2014). Dosimetría en radiología. Revista Argentina de Radiología, 4.

Akan, Z., Busranur, B., Asliyuksek, H., Kam, E., Yilmaz, A., Bilgehan, M., Biyik, R., Esen, R., & Koca, D. (2014). Environmental Radioactivity and High Incidence Rates of Stomach and Esophagus Cancer in the Van Lake Region: ACausalRelationship? *AsianPac J CancerPrev*, *15*(1), 375-380.

Auvinen, A., Salonen, L., Pekkanen, J., Pukkala, E., Ilus, T., & Kurttio, P. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in Finland. *Int. J. Cancer*, *114*, 109-113.

Antonio Brosed and Sociedad Española de Física Medica. (2011). Fundamentos de física médica. Sociedad Española de Física Médica.

Aswood, M. S., Jaafar, M. S., & Bauk, S. (2014). Measuring radon concentration levels in fertilizers using CR-39 detector. In Paper presented at the advanced materials research.

Azzi, V., Kazpard, V., Lartiges, B., Kobeissi, A., Kanso, A., El Samrani, A.G. (2016). Trace metals in phosphate fertilizers used in Eastern Mediterranean countries. Submitted to Clean-Soil, Air, Water.

Barbosa, R., Barros, J., Ruano, A. (2017). Radon and stomach cáncer. International Journal of Epidemiology, Vol. 46, No. 2.

Boukhenfouf, W., Boucenna, A. (2011). The radioactivity measurements in soils and fertilizers using gamma spectrometry technique. Journal of Environmental Radioactivity, 102, 336-339.

Burcham, W.E. (1947). Física nuclear. Reverté.

Canadian Nuclear Safety Commission. (2012). Introduction to Radiation. Ontario: Minister of Public Words and Government Servuces Cabada (PWGSC).

Charro, E., Moyano, A. (2017). Soil and vegetation influence in plants natural radionuclides uptake at a uranium mining site. Radiation Physics and Chemistry 141, 200–206.

Chen, W.P., Wu, L.S., Chang, A.C., Jiao, W., Page, A. L. (2012). Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. Environmental Pollution. 168. 44 - 53.

Chen, S., Zhu, Y., & Hu, Q. (2005). Soil to plant transfer of 238U, 226Ra and 232Th on a uranium mining-impacted soil from south-eastern China. *J. Environ. Radioact.*, 82, 223-236.

EL MERCURIO (2014). En San Joaquín el cooperativismo mueve a productores de hortalizas.

Evseeva, T., Majstrenko, T., Geras'kin, S., Brown, J.E., & Belykh, E. (2009). Estimation of ionizing radiation impact on natural Viciacracca populations inhabiting areas contaminated with uranium mill tailings and radium production wastes. *Sci. Total Environ*, 407(20), 5335-5343.

Elementos básicos de física nuclear. (2017). http://www.escritoscienti\_cos.es/trab1a20-/carpetas/nuclear/nu04.htm.

Espinosa, G. (1994). Trazas nucleares en sólidos, instituto de física, universidad nacional autónoma de Mexico. Technical report, ISBN-968-36-4219-5.

FAO (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El estado mundial de la Agricultura y la Alimentación. Roma. www.fao.org/catalog/inters.htm

FAMA (1993). Time Series Data: Vegetables, 1982-1991. Agricultural Marketing Information System. Federal Agricultural Marketing Authority, Malaysia.

FAOSTAT (2014). Food and agriculture organization of the United Nations statistics division. www.faostat3.fao.org.

Fernandes, H.M., & Franklin, M.R. (2001). Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Pocos de Caldas e Brazil. *J. Environ. Radioact.*, 54(1), 5-25.

Gallego Díaz, E. (2011). Radiación Ionizante y Protección Radiológica. Madrid: Foro de la Industria Nuclear Española.

Garcia, M. (2000). Las Fuentes Radiactivas, Ciencia y Tecnología, 14.

Giuffré, L., Ratto, S., Marbán, L. (1997). Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Sci. Total Environ.* 204, 245–250.

Godoy, M. L. D. P., Godoy, J. M., & Roldao, L. A. (2001). Determination of trace elements in coal and ash samples by ICP–MS. Atomic Spectroscopy, 22(1), 235–243.

Hofmann, W., Arvela, N.H., Harley, N.H., Marsh, J.W., McLaughlin, J., Rottger, A., and Tokonami, S. (2012). Preface. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, 12(2):1.

Ibrahim, F., Al-Hamarneh, Alkhomashi, N., Fahad, I., Almasound. (2016). Study on the radioactivity and soil-to-plant transfer factor of 226Ra, 234Uand238U radionuclides in irrigated farms from the northwestern Saudi Arabia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 160, 1-7.

International Atomic Energy Agency. (2003). IAEA guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data.

IBGE (1998). Consumo alimentar per cápita. Pesquisa de orgamentos familiares 1995–1996, (Vol. 2). Rio de Janeiro: IBGE.

ICRP (1999). Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. Oxford: Pergamon Press.

Jiao, W., Chen, W., Chang, A., Page, A. (2012). Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review. Environ. Pollut. 168, 44–53.

Kratz, S., Schick, J., Schnug, E., 2016. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. Science of the Total Environment 542. 1013–1019.

Kösem, M., Ugras, S., Ozen, S., *et al.* (2001). The frequency and distribution of malignancies around Lake Van. *Cukurova Med J*, 26, 30-6.

Liza, R. (2017). Mapeo de los Niveles de Radón 222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima-Perú) en el periodo 2015-2016 (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.

Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., Wei, D., Zhu, Y. (2009). An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *J.Environ. Manage.* 90, 2524–2530.

Maphoto K. (2004). Determination of natural radioactivity concentrations in soil: a comparative study of windows and full spectrum analysis.

Mahur, A.K., Kumar, R., Sonkawade, R.G., Sengupta, D., Prasad, R. (2008). Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of Jaduguda uranium mines and its radiological implications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.Sect. B*, 266 (8), 1591–1597.

Mercado Uribe, H. (2007). La Física de las Radiaciones y la Dosimetría. Cenvestav, 6.

Mi.am, strumentazione e dosimetria radon. (2017). http://www.miam.it/

Montoya, J., Sánchez, L., Torres, P. (2011). Diseños experimentales ¿Qué son y cómo se utilizan en la ciencias acuáticas?. Universidad del Mar, campus Puerto Ángel, 70902, Puerto Ángel, Oaxaca. Ciencia y Mar 2011, XV (43): 61-70

Mortvedt, J.T. (1994). Plant and soil relationships of uranium and thorium decay series radionuclides: a review. J. Environ. Qual., 23, 643-650.

Navaranjan, G., Berriault, C., Do, M., Villeneuve, P., Demers, P. (2016). Cancer incidence and mortality from exposure to radon progeny among Ontario uranium miners. Occup Environ Med. 73, 838–845. doi:10.1136/oemed-2016-103836.

Nicholson, F.A., Smith, S.r., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Total Environ.* 311 (1–3), 205–219.

Nikezic, D. and Yu, KN. (2004). Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Materials Science and Engineering: R: Reports, 46(3):51{123.

OMS (2014). Organización Mundial de la Salud. Informe anual sobre salud pública mundial y datos estadísticos clave. <u>www.oms.who.int/cancer/prevention/es</u>

Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia San Joaquín. (2011). www.gadsanjoaquin.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/PDYOT-San-Joaquin.pdf

Pietro, P., Puccio, V., Romano, S., Vagliasindi, F. (2015). Performance study and in fluence of radiation emission energy and soil contamination level on  $\gamma$ -radiation shielding of stabilised/solidified radionuclide-polluted soils. Journal of Environmental Radioactivity 143. 20 - 28.

Pedraza, J. L. (2007). Introducción a la Seguridad Radiológica. México: Universidad autónoma del Estado de Hidalgo.

Ramola, R., & Choubey, V. (2004). Measurement of radón exhalation rate from soul samples of garhwal himalaya. Ondia J. Radioanal. Nucl. Chem., 219-223.

Robertson, A.G., & Pengilley, A. (2012). Fukushima nuclear incident: the challenges of risk communication. *Asia Pac J Public Health*, 24, 689-96.

Rosen, K., Andersson, I., Lonsjo, H. (1995). Transfer of radiocaesium from soil to vegetation and to grazing o Kambs in a mountain area in Northern Sweden. J. Environ. Radioact. 26 (3), 237-257.

Salas, J. (2010). Aplicación de Técnicas Nucleares sobre Acuíferos contaminados con Gas Natural. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela. Pg. 2-3.

Sollet, J. (1997). Capacidad de penetración en la materia de los distintos tipos de radiación.

Somogyi, G., Hafez Abdel-Fattah, Hunyadi, I., Toth-Szilagyi. (1986). Measurement of exhalation and diffusion parameters of radon in solids by plastic track detectors. Nucl. Tracks 12, 701–704.

Tettey-Larbi, L., Darko, E.O., Schandorf, C., Appiah, A.A. (2013). Natural radioactivity levels of some medicinal plants commonly used in Ghana. SpringerPlus 2, 157. http://dx.doi.org/10.1186/2193-1801-2-157.

Thomas, P., Gates, T. (1999). Radionuclides in the Lichen-Caribou-Human Food Chain Near Uranium Mining Operations in Northern Saskatchewan, Canada. Envron Health Perspect 107:527-537.

UNSCEAR (2000). Exposures from Natural Radiation Sources. Annex-B, pp. 124e127.

UNSCEAR (2010). Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nation.

Zhukovsky, M., Onischenko, A., and Bastrikov, V. (2010). Radon measurements - discussion of error estimates for selected methods. Applied Radiation and Isotopes, 68(4):816-82.