UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

Ingeniera Ambiental

Trabajo experimental:

"CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR"

AUTORA:

Karina Montserrat González Mogrovejo

TUTOR:

Tony Jesús Viloria Ávila, PhD.

Cuenca – Ecuador

Febrero - 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Karina Montserrat González Mogrovejo, con documento de identidad N° 0301847984, 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 titulación: "CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR", 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 terminado 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.

Karina Montserrat González Mogrovejo CI: 0301847984

CERTIFICACIÓN

Yo Tony Jesús Viloria Ávila, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR" realizado por Karina Montserrat González Mogrovejo, obteniendo un trabajo experimental que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Febrero del 2018

Dr. Tony Jesús Viloria Ávila. PhD.

CI: 083893634

RESPONSABILIDAD Y AUDITORÍA

Yo Karina Montserrat González Mogrovejo, con documento de identidad N° 0301847984, autora del trabajo de titulación: "CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN-222 EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR" certifico que el total contenido de este trabajo experimental es de mi exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, Febrero del 2018

Karina Montserrat González Mogrovejo CI: 0301847984

DEDICATORIA

El presente trabajo para mí representa un gran logro, debido a que significa que una nueva etapa de mi vida está por venir. Con un gran cariño quiero dedicar a mi familia: a mis padres, hermanos.

A mis padres Vinicio y Cristina, por ser mi apoyo y la base fundamental para que yo cumpla cada una de mis metas y sea la persona que hoy logré ser.

A mi hermano Cristian, por siempre estar pendiente de mí.

De manera especial a mi hermana Doménica, por su apoyo incondicional, por ser mi cómplice y mi mejor amiga, por siempre creer en mí y estar presente en todo momento, por estar en mis malos momentos escuchándome y apoyándome, en los buenos momentos por haber formado parte de ellos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por haberme permitido cumplir esta meta tan anhelada, por ayudarme a superar cada uno de los obstáculos que se presentaron a lo largo de este camino. También quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mis padres, por su apoyo y su paciencia, por no dejarme rendir.

Quiero agradecer a mi tutor de tesis, el Dr. Tony Viloria por guiarme en este trabajo y ayudarme a cumplir mi meta.

De manera muy especial agradecer a mi mejor amiga Dany, por brindarme ánimos y no dejarme rendir para lograr hoy cumplir mis sueños, gracias por formar parte de mi vida y estar a mi lado en los momentos más importantes.

Mis más sinceros agradecimientos para la Universidad Pontificia Católica de Perú, de manera especial para la Msc. Patrizia Pereyra y Dr. Daniel Palacios por dejarme ser parte de su equipo de trabajo. Además al Msc. Jhonny Rojas y Msc. Rafael Liza por brindarme toda su ayuda en el laboratorio de la universidad y compartir sus conocimientos.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es correlacionar las variables meteorológicas y propiedades físicas del suelo con la concentración de Radón-222 en el mismo, en ocho puntos de la periferia de la ciudad Cuenca – Ecuador. Se mide la concentración de Radón-222 en las estaciones meteorológicas con un método pasivo en conjunto con detectores sólidos de trazas nucleares (LR-115), los cuales se colocaron en cámaras de difusión de Radón-222 con membrana y sin membrana, estas cámaras se ubicaron en el suelo a 60 cm de profundidad en cada estación meteorológica durante periodos de 30 días. Culminado el tiempo de exposición los detectores se trataron químicamente con hidróxido de sodio 2.5N, a 60°C durante 90 minutos. Para la cámara de difusión sin membrana la mayor concentración de Radón-222 [4926 Bq/m³] presenta la estación meteorológica Baños y la menor concentración [75 Bq/m³] tiene la estación meteorológica Sayausí. Para la cámara de difusión con membrana la estación meteorológica Tixán tiene la mayor concentración de Radón-222 [2610Bq/m³], y la menor concentración 10 [Bq/m³] presenta la estación meteorológica Santa Ana. Estos resultados ratifican que la concentración de Radón-222 en el suelo está directamente relacionada con las variables meteorológicas.

ABSTRACT

The main objective of this work is to correlate the meteorological variables and physical properties of the soil to the concentration of Radón-222 in the same, in eight points in the outskirts of the city Cuenca - Ecuador. The concentration of Radón-222 in the weather stations with a passive method in conjunction with solid nuclear track detectors (LR-115), which were placed in diffusion chambers of Radón-222 with membrane and without membrane, these cameras were placed in the soil to a depth of 60 cm in each weather station for periods of 30 days. Completed the exposure time of the detectors are treated chemically with sodium hydroxide 2.5N, at 60°C for 90 minutesFor the chamber of dissemination without membrane the largest concentration of Radón-222 [4926 Bq/m3] presents the weather station bathrooms and the lowest concentration [75 Bq/m3] Sayausi has the weather station. For the chamber of dissemination with membrane The Tixan weather station has the highest concentration of Radón-222 [2610 Bq/m3], and the lowest concentration [10 Bq/m3] presents the weather station of Radón-222 in soil is directly related to the meteorological variables.

Contenido

1	. Intr	oduc	ción 1	1
	1.1.	Pro	blemática 1	l
	1.2.	Del	imitación2	2
	1.2.	1.	Delimitación espacial2	2
	1.3.	Exp	olicación del problema	3
	1.4.	Obj	etivos general y específico	3
	1.4.	1.	Objetivo General	3
	1.4.	2.	Objetivos Específicos	3
2	. Fur	ıdam	entación teórica5	5
2.1. Radiaciones Ionizantes			ciones Ionizantes5	5
	2.1.	1.	Tipos de radiación ionizante5	5
	2.2.	Rad	lón-222, generalidades	5
	2.3.	Fue	ntes de Radón-222	7
	2.4.	Dec	caimiento de Radón-222 –222 8	3
2.5. (2.5.1		Cua	untificación de concentraciones de Radón-222 en el suelo9)
		1.	Monitores Integrados de Radón-222 10)
	2.5.	2.	Monitores Continuos 11	l
	2.5.	.3.	Análisis de gas Radón-222 - 222 usando su serie de decaimiento 12	2
	2.6.	Dif	usión del gas Radón-222 13	3
	2.7.	Dif	usión de Radón-222 a través del suelo 16	5

2.8. Factores que afectan la difusión y energía de activación 18
2.9. Implicaciones de la actividad del gas Radón-222 en la gestión ambiental del
medio subterráneo18
2.10. El gas Radón-222 como trazador de procesos geodinámicos en ambientes
subterráneos19
2.11. Relación de propiedades físicas del suelo con el gas Radón-222 20
2.12. Relación de las variables meteorológicas en la concentración del gas Radón-
222 22
2.13. Efectos de la actividad del gas Radón-222 sobre la salud humana 23
2.14. Límites permisibles de exposición a la radiación ionizante en Ecuador 24
2.15. Formación de las trazas o huellas nucleares
3. Materiales y métodos
3.1. Toma de muestras
3.2. Construcción de las cámaras de difusión
3.3. Proceso de grabado
3.4. Lectura de trazas por el POLITRACK 31
3.5. Cuantificación de la concentración de Radón-222 32
3.6. Determinación de las propiedades físicas del suelo
3.6.1. Determinación de la humedad 33
3.6.2. Determinación de la porosidad
3.6.3. Determinación de la permeabilidad
3.7. Análisis de varianza ANOVA de un factor

3.8. Modelo de regresión lineal múltiple		
4. Resultados y discusión 40		
4.1. Estimación de la concentración de Radón-222 en el suelo 40		
4.2. Estimación de las propiedades físicas del suelo		
Las propiedades físicas del suelo estudiadas fueron: i) humedad, ii) porosidad y iii		
permeabilidad. Se seleccionaron estos elementos debido a que la literatura indica que		
estas características determinan el aumento o reducción de la difusión de Radón-222		
(Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanguán, 2011). La cantidad de Radón-222		
presente del suelo depende principalmente de la concentración de Radio-226 en e		
subsuelo y de su permeabilidad (Tabla 9). Además se observa el tipo de suelo de cada		
estación meteorológica: i) franco arenoso (tipo 1), ii) franco arcillo (tipo 2), iii) arenoso		
(tipo 3), iiii) arcillo limoso (tipo 4)		
4.3. Análisis de las variables meteorológicas (ANOVA de un factor) 44		
4.4. Modelo de regresión lineal múltiple		
4.5. Discusión		
5. Conclusiones		
6. Referencias		
7. Anexos		
Anexo 1		
Codificación de los detectores		
Anexo 2 64		
Fichas de las estaciones meteorológicas64		
Anexo 3		

losario

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1Ubicación Geográfica de las Estaciones Meteorológicas de Cuenca Monitoreadas.
Tabla 2 Valores para las longitudes de difusión y constante de difusión para Rn 222 y Rn
220
Tabla 3 Concentración típica de Rn 222. 15
Tabla 4 Límites permisibles de exposición a la radiación en Ecuador
Tabla 5 Número de detectores colocados en los ocho puntos de muestreo 29
Tabla 6 Variación de la permeabilidad según la textura del suelo
Tabla 7 Permeabilidad media para diferentes texturas de suelo (cm/hora)
Tabla 8 Concentración de Radón-222 en el suelo de las estaciones meteorológicas 41
Tabla 9 Propiedades físicas del suelo 42
Tabla 10. Concentraciones medias de Rn-222 para cada tipo de suelo
Tabla 11. Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor para la comparación
de las medias de la concentración de Rn-222 para cámara sin membrana 44
Tabla 12. Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor para la comparación
de las medias de la concentración de Rn-222 para cámara con membrana 44
Tabla 13 Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor de presión 45
Tabla 14 Comparaciones múltiples Tukey del procedimiento ANOVA de un factor de
presión 45
Tabla 15 Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor de precipitación 46
Tabla 16 Comparaciones múltiples Tukey del procedimiento ANOVA de un factor de
precipitación

Tabla 17 Base de datos profundidad con cámara de difusión a 60 cm sin membrana 47
Tabla 18 Base de datos a 60cm de profundidad con cámara de difusión con membrana
Tabla 19 Lugar de medida, código y significado de las variables
Tabla 20 Matriz de correlaciones entre las variables para Suelo Tipo 1 con cámara de
difusión sin membrana
Tabla 21 Estimación de la concentración de Radón-222 por tipo de suelo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cadena de desintegración del 238 Uranio
Figura 2 Crecimiento de la actividad de las hijas de 222 Radón-222 hasta lograr el
equilibrio secular
Figura 3 Detector de partículas alfa, generalmente se los mantienen 40cm debajo de la
superficie
Figura 4 Esquema de liberación de Radón-222 222 en el subsuelo16
Figura 5 Puntos de muestreo. Elaborado por: Autor
Figura 6 Técnica de medición cámara de difusión de Radón-222
Figura 7 Detectores preparados para el proceso de revelado 30
Figura 8 Baño térmico al cual se sometió los detectores para su grabado
Figura 9 Lectura de los detectores en el POLITRACK. Ubicación de los detectores en el
vidrio
Figura 10 Huellas de desintegración de Radón-222 222, dejadas por las partículas alfa.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Problemática

El Radón-222 (Rn-222) es un gas noble, originario de la serie de decaimiento de uranio-238, un mineral radiactivo natural presente en la corteza terrestre. Este uranio se encuentra repartido naturalmente en diferentes concentraciones por toda la tierra, además que los niveles varían en función del tipo de roca y el tipo de suelo; siendo el granito, las rocas fosfatadas, y lutitas los minerales que contienen mayores concentraciones de Uranio que otros (Muikku, Heikkinen, Puhakainen, Rahola, & Salonen, 2007). Además se conoce que los residuos hospitalarios, residuos peligrosos, tratamientos médicos, plantas nucleares, parqueaderos, materiales de construcción, bodegas y parqueaderos subterráneos aportan con emisiones de Radón-222 (Estrada, 2009) (Mustafa & Krewski, January 2009.) (Appleton, 2007).

El proceso de liberación de Radón-222, cuyo tiempo de vida media es 3.8 días en forma continua, está influenciado principalmente por tres características que incluyen; la cantidad de Radón-222 presente en el elemento, la porosidad y permeabilidad del medio y el grado de saturación del agua (Ishimori, Lange, Martin, Mayya, & Phaneuf, 2013). Sin embargo, al hablar de la liberación de 222Ra desde el suelo, es poco probable que los átomos de este gas ubicados en granos sólidos estén disponibles para liberarse hacia la atmósfera ya que su coeficiente de difusión disminuye en elementos sólidos; por lo que la liberación está en función de los espacios intersticial entre dichos granos. Por lo que el aporte de Radón-222 a la atmósfera se puede describir en tres etapas: (Moed, Nazaroff, & Sextro, 1988).

- Emanación: Proceso de escape de átomos de Radón-222 desde el grano hacia el espacio intersticial presente entre granos.
- Transporte: La difusión y el flujo advectivo mueven los átomos de Radón-222 hasta que alcanzan la superficie del suelo
- Exhalación: Los átomos transportados a la superficie del suelo se exhalan a la atmósfera.

Para cuantificar las concentraciones de Radón-222 se debe seleccionar un método que depende principalmente de la cantidad de Radón-222 en la fuente, y la precisión necesaria. Las técnicas para medir Radón-222 se pueden clasificar a través de tres rasgos:

- Si la técnica mide Radón-222 o los productos secundarios
- La resolución de tiempo
- Del tipo de emisión, ya sean partículas alfa o beta, radiación de desintegración o radiación radiactiva.

Existen factores externos e internos que influyen en la concentración de Radón-222 en espacios internos. Dentro de los factores externos intervienen parámetros meteorológicos como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad y dirección del viento, presentando una mayor influencia la presión atmosférica y la precipitación (Singh, Jaishi, Tiwari, & Tiwari, 2017), puede incluirse también la inestabilidad atmosférica o los movimientos sísmicos que provocan un aumento inusual del nivel de Radón-222 (Yakovleva, Nagorsky, Kondratyeva, & Mishina, 2016).

1.2. Delimitación

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación se desarrolló en ocho estaciones meteorológicas de la UPS ubicados en:

- Provincia: Azuay

- Cantón: Cuenca
- Parroquias Rurales:

Fuente: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables			
NOMBRE	Х	Y	Elevación
Tixán	723017	9686678	2725
Llacao	730418	9685180	2542
Santa Ana	730085	9672006	2651
Quingeo	729055	9664593	2895
Turi	721103	9674971	2768
Baños	712899	9672817	3062
Nulti	729704	9682466	2623
Sayausí	715974	9681200	2727

Tabla 1Ubicación Geográfica de las Estaciones Meteorológicas de Cuenca Monitoreadas. Fuente: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables

1.3. Explicación del problema

La causa del problema a investigar nos lleva a determinar:

¿Cuál es la variación de la concentración de Radón-222 presente en el suelo con respecto a las variables meteorológicas y físicas del mismo en ochos puntos de la periferia de la ciudad Cuenca, Ecuador?

1.4. Objetivos general y específico

1.4.1. Objetivo General

 Correlacionar las variables meteorológicas y físicas del suelo, con la concentración de Radón-222 en el mismo, en ocho puntos de la periferia de la ciudad de Cuenca, Ecuador.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Calcular la concentración de Radón-222 en el suelo, en los ocho puntos de

muestreo.

- Medir las variables físicas del suelo en los puntos de muestreo.
- Analizar las distintas variables meteorológicas obtenidas de las estaciones de la

UPS/INER en los puntos de muestreo.

Capítulo 2

2. Fundamentación teórica

2.1. Radiaciones Ionizantes

Las radiaciones ionizantes residen en todas las partículas, en estas se encuentran además los fotones. Los fotones causan la disociación de electrones de moléculas y átomos. La luz ultravioleta sólo se origina en algunas circunstancias debido a que posee una radiación baja. Se establece un límite energético inferior para la radiación ionizante, siendo 10 kiloelectronvoltios (keV), el cual permite distinguir los tipos de radiación (Cherry, 2001). Las radiaciones ionizantes se encuentran constituidas por: i) rayos X, ii) rayos gamma, iii) partículas alfa, iv) beta, v) neutrones.

2.1.1. Tipos de radiación ionizante

- Partícula alfa (α): Partículas alfa compuestas de dos protones y dos neutrones, cada uno por lo que tienen carga positiva doble, su masa y carga son relativamente grandes lo que les da una capacidad limitada de penetrar la materia. (Castillo, 2016)
- Partícula beta (β): Consisten en partículas cargadas que son expulsadas del núcleo de un átomo, físicamente idénticos a los electrones, con carga negativa. (Castillo, 2016). La partícula β es unas 7 mil veces más pequeña que una partícula α, tiene una masa de 9.11x10-²⁸ g. (Rodríguez, 2013).
- **Partículas gamma** (γ): Las partículas γ es un tipo de radiación electromagnética, constituida por fotones. El núcleo no cambia su número atómico ni el de neutrones, simplemente reduce su energía. Los rayos gamma no tienen carga ni masa, interaccionan con la materia colisionando con las capas electrónicas de los átomos provocando la pérdida de una determinada cantidad de energía radiante

con lo cual pueden atravesar grandes distancias, su energía es variable, pueden atravesar cientos de metros en el aire y solo son detenidas por capas grandes de hormigón, plomo o agua (Rodríguez, 2013).

Neutrones: La fisión espontánea es la única fuente natural de neutrones, un reactor nuclear es una fuente común neutrones, en el que la división de un núcleo de uranio o plutonio se acompaña de la emisión de neutrones. Los neutrones emitidos desde un evento de fisión puede atacar el núcleo de un átomo adyacente y causar otro evento de fisión, la inducción de una reacción en cadena, la producción de energía nuclear se basa en este principio. (Castillo, 2016). Las fuentes de neutrones dependen de reacciones entre un núcleo bombardeado con radiación de fotones o radiación alfa.

2.2. Radón-222, generalidades

El Radón-222 (Radón-222) es un gas inerte de tipo radiactivo, incoloro, inodoro e insípido, es el isótopo radiactivo más estable y abundante del elemento químico Radón-222, con número atómico 86, descubierto en el año de 1908 y acuñado como un nuevo elemento en el año de 1923 (López, 2003). Su peso atómico medio es 222 u.m.a, lo que implica que contiene 136 neutrones, además cuenta con un periodo de vida media de 3.8 días (Kumar et al, 2014). Este gas Radón-222 se origina de forma natural producto de la desintegración radiactiva del radio- 226 (226Ra) perteneciente a la secuencia de desintegración del uranio-238 (238U) (CSN, 2014).

Las partículas alfa que componen el Radón-222 son núcleos de Helio (42He) formados por dos protones y dos neutrones. Carecen de electrones teniendo, por tanto, carga positiva (+2qe). Su peso atómico es de 4 u.m.a, y tienen una capacidad de penetración menor que las partículas beta y gamma. Las partículas alfa no son capaces de atravesar el espesor de una hoja de papel. Al ser emitidas son capaces de moverse unos milímetros y, debido a su gran masa y carga, son capaces a su paso de interaccionar fuertemente con otras moléculas del ambiente y generar una gran ionización ambiental (Aicardi-Carrillo, Asmat-Inostrosa, & Barboza-Rangel, 2015).

2.3. Fuentes de Radón-222

Cuenta con fuentes naturales y antropogénicas, entre las fuentes antropogénicas se encuentran residuos peligrosos, tratamientos médicos, ambientes subterráneos (túneles, estacionamientos, bodegas), y plantas nucleares. Las fuentes naturales son rocas y suelos de diferentes ambientes, como minas de uranio y carbón (Estrada, 2009). La tasa de generación de Radón-222 depende del tipo de roca, se conoce que las concentraciones son elevadas en rocas ígneas (granitos) y metamórficas (pizarras y esquistos). El Ra-226 se desintegra emanando gas Radón-222 al sistema de poros de las rocas o suelo (Al-Zoughool & Krewki, 2008) permitiendo una acumulación en los poros de rocas y/o suelos y puede exhalarse mediante un gradiente de concentraciones (de mayor a menor concentración) hacia la atmósfera exterior o hacia ambientes subterráneos confinados de cualquier dimensión. A su vez, la tasa de exhalación de Radón-222 desde el subsuelo tampoco es constante y depende de factores climáticos y ambientales. Además, la exhalación depende de la porosidad y permeabilidad del material por el que circula. (Kowalczk, 2010).

El gas Radón-222 es 8 veces más pesado que el aire favoreciendo la estratificación de los gases que componen el aire en los ambientes confinados. Esta característica tendrá una fuerte influencia en los procesos relacionados con las variaciones de la concentración a nivel diario y/o estacional. Además, el Radón-222 es soluble en agua, lo que propicia la contaminación radioactiva de las aguas en contacto con este gas (Kowalczk, 2010) y de forma destacable, es soluble en hidrocarburos (Cuezva, 2011).

2.4. Decaimiento de Radón-222 –222

Cuando se estudia el decaimiento radiactivo de un elemento se tiene en cuenta el periodo de semidesintegración (t1/2), la vida media (τ) y la constante de desintegración (λ), en el caso del Radón-222 222 sucede que la vida media es aproximadamente 200 veces mayor que cualquiera de sus productos de vida corta (Liza, 2017), como se puede ver en la Figura 1.



Figura 1 Cadena de desintegración del 238 Uranio.

Se indica la nomenclatura, el número atómico, el periodo de semidesintegración y el tipo de radiación que emite cada isótopo radioactivo. Fuente: (Liza, 2017)

Para tratar de entender lo que ocurre con los productos de decaimiento del Radón-222 es necesario revisar las ecuaciones de Bateman, las cuales permiten conocer el número de átomos de cada elemento en una muestra a un tiempo dado. A partir del sistema de ecuaciones diferenciales en el que Rutherford demostró que las cantidades de sustancia de un elemento radioactivo y sus descendientes se relacionan por:

$$\frac{\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_1 N_A}{\frac{dN_B}{dt} = \lambda_1 N_A - \lambda_2 N_B} \begin{cases} \frac{dN_B}{dt} = \lambda_2 N_B - \lambda_3 N_C \end{cases}$$

Donde N_A es el número de átomos radioactivos del elemento inicial y N_B , N_C sus productos sucesivos que están presentes a un tiempo t (Liza, 2017).

En el caso del Radón-222 y su progenie, el equilibrio radiactivo se alcanza después de aproximadamente 3 horas (Liza, 2017), tiempo después del cual, la relación de las actividades de los descendientes del Radón-222 y él son aproximadamente 1, lo cual indica que después de ese tiempo se alcanza el equilibrio secular.

Por ejemplo para una fuente de Radón-222 de actividad constante (ARn222) la relación del crecimiento de la actividad de los productos de decaimiento de corta vida respecto a la actividad de la fuente se puede observar en la Figura 2:



Figura 2 Crecimiento de la actividad de las hijas de 222 Radón-222 hasta lograr el equilibrio secular. Fuente: (Liza, 2017)

2.5. Cuantificación de concentraciones de Radón-222 en el suelo

El presente trabajo de titulación busca determinar el patrón espacio-temporal de los niveles de Radón-222 en relación a las propiedades físicas de un ambiente subterráneo, conocer su origen y determinar los factores ambientales que controlan las variables meteorológicas (Nagaraja et al., 2006), para lograr este objetivo es necesario conocer los

métodos cuantifican la concentración de Radón-222 y de sus descendientes emanadas desde la superficie. El método que se seleccione estará en función de la disponibilidad de instrumentos, costos, y la duración de la medida. Todos los métodos de cuantificación que se han reportado se basan en el recuento de partículas emitidas por el material como por los descendientes de vida corta (Ishimori, Lange, Martin, Mayya, & Phaneuf, 2013). Es posible distinguir, en función del tiempo y procedimiento de muestreo, las siguientes metodologías:

2.5.1. Monitores Integrados de Radón-222

Este monitoreo se lo realiza por periodos, ya que la concentración existente de Radón-222 se evaluará en función del tiempo, el tiempo generalmente abarca meses o pocos días. La eficiencia de este método consiste en que cada partícula de Rn222 genere un registro para luego evaluarlo, y que este registro se mantenga hasta que se lo trabaje en el laboratorio (Reif & Abbady, 2013). Para esta actividad son necesario los detectores de pistas nucleares de estado sólido SSNTD (por sus siglas en inglés solid-state nuclear track detectors) estos detectores se componen de materiales celulósicos como el nitrato de celulosa y el acetato butirato de celulosa, sin embargo el material que por su sensibilidad resulta óptimo y altamente aceptado en seguimiento del Radón-222 ambiental es el material de policarbonato conocido como CR-39, aunque en la actualidad los estudios para concentraciones de Radón-222 en interiores o ambientes cerrados emplean un detector de trazas denominado LR-115 (Fleischer, 1998) (Eappen & Mayya, 2004).

Como ventajas de esta técnica se tiene su fácil manejo y su inversión relativamente económica. El muestreo puede llevarse a cabo en varias semanas y máximo un año; luego de la exposición de los detectores nucleares se debe revelar el SSNTD con hidróxido de Sodio o Potasio (NaOH, KOH) de manera que las pistas nucleares aumenten de tamaño y se pueda determinar el número de trazas ya sea de manera óptica o con elementos de contabilización automática (Ramola, Mandwinder, Surinder, & Virk, 1987). Este método no es recomendable cuando se desea conocer concentraciones inmediatas, solamente en casos de encontrar las exhalaciones medias en un periodo de tiempo (Figura 3).



Figura 3 Detector de partículas alfa, generalmente se los mantienen 40cm debajo de la superficie. Fuente: Fleischer,1980

Si en los detectores sólidos de trazas nucleares se desea excluir el registro de partículas, debe de excluirse a través del grosor de la membrana. Se puede evitar el registro de partículas alfa como 219-Rn, mientras que no se altera el registro de partícuas como el Rn-222, Po-218, y Po-214 (Fleischer, 1998).

2.5.2. Monitores Continuos

Se conocen como detectores integradores pasivos, se usan frecuentemente en la detección y monitoreo de Radón-222 en interiores, ambientes residenciales, subterráneos y confinados. La lectura de las concentraciones viene dada en tiempo real y facilita la toma de decisiones para el control de la exposición de Radón-222 en el ambiente (EPA., May, 1993.). A través del tiempo se ha incentivado el desarrollo de estos monitores continuos, llegando a tener entre los más comunes: RAD7 con procedencia de Boston, Estados Unidos, Radon Scout Plus, Alemania, RTM 2000, Alemania y CRM desde la India (Ashokumar, Raman, & Mayya, 2014). Para estas mediciones es importante considerar la humedad ambiental ya que la humedad no permite que todas las partículas puedan

llegar hasta el detector, dando lecturas por debajo a la concentración real de Radón-222 (Jamadi, Hosseini, & Abbaslou, 2015.).

2.5.3. Análisis de gas Radón-222 - 222 usando su serie de decaimiento

Como se habló con anterioridad, la progenie del Radón-222 o decaimiento forma una serie de partículas hijas con un tiempo de vida para cada elemento. La serie de decaimiento es: 210Pb: \rightarrow Rn-222 (3.82 d) \rightarrow 218Po (3.10 min) \rightarrow 214Pb (26.8 min) \rightarrow 214Bi (19.7 min) \rightarrow 214Po (<0.2 ms) \rightarrow 210Pb (22.3 yr) \rightarrow 210Bi (5.0 d) \rightarrow 210Po (138.4 d) \rightarrow (Appleton, 2007).

Los productos secundarios del gas Radón-222 son considerados como metales (exceptuando el Polonio ya que suele clasificárselo como un metaloide). Las actividades de los elementos como Rn-222, 218 Po, 214Pb, 214Bi y 214 Po pueden ser estimadas en un lapso de tres (3) horas. Por lo que las concentraciones de Radón-222 pueden ser determinadas a través de las mediciones de los productos secundarios (Aicardi-Carrillo, Asmat-Inostrosa, & Barboza-Rangel, 2015).

- a. Determinación de Radón-222 usando su progenie en un sólido.- La progenie emisora de alfa Radón-222 se puede cuantificar mediante espectrometría alfa, para ello se necesita un volumen de aire conocida a través de un sistema cilíndrico equipado con dos filtros en línea, el primero de ellos retiene el material particulado y la progenie de Radón-222, la progenie de Radón-222 se recoge en el segundo filtro que tiene salida a un detector de barrera.
- b. Determinación de Radón-222 con Electret.- Se trata de detectores pasivos, ligeros, integrados y con costes relativamente bajos. El electret es un disco fabricado de teflón y cargado eléctricamente, su finalidad es que el disco funcione como un campo eléctrico y sensor. Se usan para cuantificar el Radón-222 a través de la ionización del aire y la caída de voltaje durante el periodo de medición.

- c. Determinación de Radón-222 usando contador beta.- Se estima las concentraciones de Radón-222 con la actividad de 214Pb y 214Bi recogida en papeles filtro, este método se emplea la definición de equilibrio secular¹ entre Radón-222 y sus hijas. Esta actividad puede registrarse en centelladores plásticos, o con el papel filtro de forma directa con un contador beta con el correcto uso de una película absorbente (Yousif, y otros, 2017).
- d. Mediciones de Radón-222 mediante espectrometría de rayos gamma.-Consiste en medir la concentración de Rn-222 con la medición de Pb-214 y Bi-214 con espectrometría gamma. Se lo emplea en casos donde la temperatura no permite una conducción adecuada de masas de aire. En este método es importante controlar la humedad relativa del ambiente (Lappetito, 2016).
- e. Mediciones de Radón-222 basadas en la supervisión directa de progenie técnica. En la actualidad se cuenta con sensores de progenie directa de Radón-222 y Torón (Mishra, BR, & Mayya, 2009). Se denominan sensores directos de progenie de Radón-222 y sensor directo de progenie de torón; se montan sobre un detector sólido de trazas nucleares (Mayya, y otros, 2012).

2.6. Difusión del gas Radón-222

El Radón-222 se mueve por difusión y convección. Por ejemplo la velocidad de difusión entre aire y agua son bastante diferentes y esto se caracteriza por el coeficiente de difusión D, cuando el Radón-222 222 se mueve hay una distancia promedio de difusión antes que el núcleo desaparezca como tal, esa distancia está dada por $\sqrt{D_{\tau}}$, donde τ es la vida media del isotopo, de esta forma para suelos secos esa distancia es aproximadamente 1,6m

¹Equilibrio radiactivo en que los nucleídos de una cadena de desintegración es igual a la unidad. Para que exista es necesario que el periodo de semidesintegración del primer miembro de la cadena (precursor) sea muy grande.

mientras que para suelos húmedos con altas concentraciones de agua dicha distancia es aproximadamente 1,6cm (Rojas, 2016) (Tabla 2).

Medio	$\sqrt{D_{T_{Rn-222}}}$ (cm)	$\sqrt{D_{T_{Rn-220}}}$ (cm)	Constante de difusión D (<i>cm</i> ² <i>s</i> ⁻¹
Aire	220	2.85	10 ⁻¹
Suelo poroso	115	2.0	$5x10^{-2}$
Agua	2.2	0.0285	10 ⁻⁵
Suelo poroso	1.55	0.020	$5x10^{-6}$
saturado			

Tabla 2 Valores para las longitudes de difusión y constante de difusión para Rn 222 y Rn 220. Fuente: (Rojas, 2016)

Existen diferentes tipos de rocas que contienen concentraciones de uranio que varían, y estas están relacionadas a pequeñas cantidades de ciertos minerales presentes en las rocas que a menudo no se toman en cuenta, por ejemplo el Circonio, Apatito, Esfeno etc. En un estudio que se hizo analizando una roca de meteorito se encontró que el circonio puede grabar las huellas que dejan las partículas pesadas que se producen por fisión espontánea y de radiación cósmica, encontrándose mediante este método concentraciones de uranio que varían bastante dependiendo que tipo de circonio se encontró en el meteorito, las diferencias de distribución de uranio influye mucho en la liberación del Radón-222 (Rojas, 2016).

El Radón-222 producido por la desintegración del Uranio 238 casi nunca escapa del lugar donde se crea, es usual que se de en el subsuelo donde está bastante comprimido y por supuesto que puede escapar una pequeña fracción inmediatamente después de formase o antes de que decaiga. Una muestra de esto es la Tabla 3.

Localización	Concentración átomos (cm^{-3})
Aire sobre los océanos	0.004
Aire cerca de la superficie de la tierra	4
Concentración Típica en las casas de	20
U.S	
Gases del suelo	20000
En el interior de los minerales	500000
comunes	

Tabla 3 Concentración típica de Rn 222. Fuente: (Rojas, 2016)

El mecanismo de liberación del gas Radón-222 se da a través de un efecto llamado efecto retroceso, que sufre el Radón-222 debido al decaimiento alfa del radio. Esto es por conservación de momento, así pues el Radón-222 222 tiene una energía cinética de alrededor de 86 keV el cual es suficiente para desplazar el Radón-222 en promedio 26 nm en tridimita SiO2, entonces podemos observar dos casos, el primero de ellos muestra el proceso de retroceso que sufre el Radón-222 logrando salir del grano sólido que contiene el Radio, dado que el espacio entre granos contiene agua el Radón-222 es frenado por este, luego el Radón-222 se difundirá o será trasportado por el agua.

El segundo caso si el espacio entre granos es seco solo hay gas entre granos, entonces el Radón-222 al sufrir el proceso de retroceso el gas entre granos no lo frena conllevando al Radón-222 a entrar dentro del grano vecino, dejando una huella por el que entró al otro grano, huella que podrá ser degrada si es que el suelo se humedece antes que decaiga el Radón-222 permitiendo escapar al Radón-222.

El proceso de transporte del Radón-222 se lleva a cabo por difusión y por diferencias de presión. Mediante difusión dependerá de las condiciones donde sucede, puede ser fácilmente limitada sin embargo por diferencias de presión el Radón-222 y sus isotopos podrá llegar a recorrer grandes distancias pero no se conoce aún muy bien estas diferencias de presión solo en casos especiales entonces podríamos decir ambos procesos se superponen en el proceso de transporte del Radón-222 (Figura 4) (Rojas, 2016).



Figura 4 Esquema de liberación de Radón-222 222 en el subsuelo. Fuente: (Rojas, 2016)

2.7. Difusión de Radón-222 a través del suelo

De manera general se puede decir que la difusión del Radón-222 es la migración o movimiento de átomos desde zonas de alta concentración hasta donde la concentración es menor, este movimiento es espontaneo y aleatorio (Borja, 2009). Sin embargo no se puede generalizar la difusión del Radón-222 a la fuente emisora ya que existen

características como el tamaño y forma de soluto, viscosidad de aire, aireación del medio, temperatura y porosidad de materiales que determinan el aumento o reducción de la difusión de Radón-222 (Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanguán, 2011). Por estas razones se vuelve complicado reducir la difusión de Radón-222 a través del suelo a una sola ecuación, sin embargo Según Prasad, et Al. (2012) un modelo de difusión de Radón-222 unidimensional sin convección es útil, y vienen dado por tres procesos básicos: generación, decaimiento, y difusión (la convección no se la consideraría ya que se establece que es un modelo unidimensional), la ecuación que expresa este transporte del Radón-222 es:

$$\frac{\partial C_{(z,t)}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{(z,t)}}{\partial z^2} - \lambda C_{(z,t)}$$
(1)

Donde C _(z, t) es la concentración de Radón-222 en los poros expresada en Bq/m³, D es el coeficiente de difusión en masa (m²/s), z es la profundidad desde la superficie del suelo (m), t es el tiempo transcurrido (segundos), y λ^2 es la constante de decaimiento. Para reducir la ecuación (1) es necesario determinar las condiciones iniciales de difusión:

$$C_{(z,t)} = 0, t < 0, 0 < z < l$$
⁽²⁾

Se considera l el espesor de la muestra, y puede expresarse de las siguientes maneras:

$$C_{(z,t)} = C_0, z = 0, t > 0$$
 (3a)

$$\partial C/\partial t_{(z,t)} = 0, z = L, t > 0$$
 (3b)

 $^{^2}$ La constante de decaimiento λ viene dada por la relación λ =

 $[\]frac{1}{r}$, donde T es el tiempo de vida media, para el radón 3.82 días.

Para resolver la ecuación (1) se puede escoger dos supuestos, uno estacionario que nos indica que la concentración de Radón-222 tiende a 0 (∂ C (z, t) / ∂ t = 0)), y la otra transitoria que indica que el resultado de la concentración de Radón-222 es diferente de 0 (∂ C (z, t) / ∂ t> 0). La aplicación del segundo supuesto en conjunto con aplicaciones informáticas y las condiciones del suelo a estudiar se aproxima de manera satisfactoria al índice real de difusión de Radón-222 en suelos (Prasad, y otros, 2012) (Suaro, 2014) (Swakon, y otros, 2004).

2.8. Factores que afectan la difusión y energía de activación

Como se mencionó la difusión depende de una cantidad de energía llamada energía de difusión, la cantidad requerida está en función del tipo de mecanismo de difusión así como de los elementos en contactos. El mecanismo que mayor energía demanda es el de vacantes.

Por otro lado los elementos que presentan estructuras abiertas requieren menos energía para dar lugar a la difusión, así como los átomos de menor tamaño. La difusión requiere tiempo para formar el flujo responsable del intercambio de átomos, el tiempo depende de la temperatura, a mayor temperatura menor periodo. (Carpio, 2016)

2.9. Implicaciones de la actividad del gas Radón-222 en la gestión ambiental del medio subterráneo

El nivel medio de concentración de Radón-222 en una atmósfera abierta ronda los 10 Bq/m³ (Sesana et al., 2003). Sin embargo, los ambientes subterráneos confinados como cuevas, minas, túneles o catacumbas, pueden acumular altas concentraciones de Radón-222 debido a las bajas tasas de ventilación y renovación de aire (Gunn, 2003)Debido a ello, los turistas, espeleólogos y guías en cualquiera de estos ambientes subterráneos están sometidos a un amplio rango de radiación ionizante, proveniente especialmente del gas

Radón-222 y de sus hijos (Field, 2007; Kavasi et al., 2010). En el caso de zonas turísticas subterráneas, es necesario un programa de monitorización ambiental de Radón-222 para poder tomar decisiones a favor de la protección de los trabajadores (guías) y turistas frente al Radón-222 natural existente (IEA, 2003). La gestión estratégica así como la monitorización deben ser discutidas para cada situación ambiental y para cada caso específico en base a las restricciones legales sobre calidad del aire. Estas decisiones relativas a la protección de los trabajadores y turistas frente al Radón-222 natural deben establecerse en función de niveles de referencia de Radón-222, en Bq/m³, y a las dosis efectivas recibidas en términos de Sv·año.

2.10. El gas Radón-222 como trazador de procesos geodinámicos en ambientes subterráneos

El Radón-222 presenta una cualidad específica que radica en su estado gaseoso, característica exclusiva respecto a los demás isótopos radioactivos de toda la cadena de U-238. Debido a esta propiedad el gas Radón-222 se verá influenciado por los principales mecanismos de transporte de gases, advección y difusión, que a su vez dependen de la porosidad y la fracturación de la roca encajante, y de las variables ambientales como la diferencia entre la temperatura exterior e interior, las variaciones de presión atmosférica, la cantidad de agua presente en el sistema, etc. (Halk, 1997)

El Radón-222 presenta un rasgo distintivo que le confiere un gran valor como gas trazador dado que su origen puede considerarse exclusivamente abiótico. Su producción sólo depende del contenido de U-238 en las rocas y sedimentos presentes en el medio. Dado que el periodo de semidesintegración del U-238 es de 4,46·109 años, indica que la fuente de Radón-222 es prácticamente inagotable. Por otra parte, el Radón-222 pertenece a la familia de los gases nobles y tiene una configuración electrónica especialmente estable; esto implica que en condiciones ambientales de baja temperatura y presión es un gas que

19

presenta una reactividad química muy baja o prácticamente nula y la variación de su concentración sea muy poco dependiente de las concentraciones de otros gases. (Porstendorfer, 1994)

Dada su condición gaseosa, el Radón-222 se difunde por los poros y diaclasas y escapa a la atmósfera desde las capas más superficiales del terreno. Su exhalación es prácticamente constante de forma que en cualquier cavidad o recinto cerrado se acaba estableciendo una concentración de equilibrio que dependerá de la relación superficie/volumen del recinto y de la emisividad de los materiales que lo forman. Cuando dejan de verificarse las condiciones de estanqueidad, se produce un descenso de la concentración de Radón-222 (por dilución en la atmósfera) que es proporcional al ritmo de renovación de aire del recinto (Xie et al., 2015). Todo esto hace que los cambios en su concentración se usen habitualmente como índice cuantitativo de ventilación en ambientes confinados y en general, en todas las cavidades subterráneas y que sean de gran utilidad al compararlos con la evolución de la concentración de otros gases en el mismo ambiente, sirviendo de trazador de los procesos que gobiernan los intercambios de gases entre los ambientes confinados y la atmósfera.

2.11. Relación de propiedades físicas del suelo con el gas Radón-222

La presencia de gas Radón-222 en ambientes subterráneos ha sido ampliamente tratada desde diferentes enfoques, técnicas de medición y teniendo en cuenta diferentes objetos de estudio: caracterización de la dinámica agua-aire en las zonas no saturadas (Kowalczk et al., 2010; Perrier et al., 2010; Choubey et al., 2011; Loisy et al., 2012), emplazamientos geotérmicos (Hyland, 1994), modelización del transporte de Radón-222 - (Nazaroff; Papachristodoulou et al, 2007), evaluación volcánica y las estructuras sismo- tectónicas mediante la vigilancia de la concentración de Radón-222 (Igarashi et al, 1995), o la

evaluación asociada al riesgo radioactivo en la salud (Zahorowski et al., 1998; Misdaq et al., 2011; Somlai et al., 2009 & 2011).

En construcciones aisladas o en las plantas bajas de edificios sin sótano, la fuente más importante de Radón-222 es el radio presente en el terreno. La concentración de radio en el suelo se halla generalmente entre 10 y 50 Bq/kg, aunque puede alcanzar valores muy superiores. El valor promedio es de alrededor de 40 Bq/kg. Las concentraciones de Radón-222 en suelos varían entre 10000 y 50000 Bq/m3. En algunos casos, la presencia de Radón-222 puede venir, además, aumentada por la existencia en la zona de materiales de desecho procedentes de operaciones realizadas en minas de uranio o de fosfatos.

La cantidad de Radón-222 que entra en un interior a partir del suelo depende principalmente de la concentración de radio-226 en el subsuelo y de la permeabilidad de éste. El Radón-222 procedente del terreno y de los materiales pasa al aire interior por difusión molecular. En una fase inicial, por desintegración del radio existente, se forma una fracción de Radón-222 que emana del medio sólido y ocupa los poros existentes pudiendo, a partir de ellos, desplazarse hasta alcanzar la superficie y pasar al aire. Este mecanismo vendrá afectado por la distancia (longitud de difusión) que el Radón-222 puede recorrer antes de desintegrarse y que para un suelo normal es de alrededor de 1 m. Este proceso puede ser acelerado por las diferencias de presión existentes entre el gas del suelo y el interior de la casa. A menudo la existencia de mecanismos extractores de ventilación o intercambiadores de aire para calefacción hace que en las habitaciones se generen corrientes de aire y depresiones que favorecen el paso de Radón-222 desde el suelo y desde la propia estructura a través de los poros y fisuras existentes, pasando al aire en cantidades importantes, lo que explica las elevadas concentraciones que se han encontrado en algunos interiores.

2.12. Relación de las variables meteorológicas en la concentración del gas Radón-222

Existen factores externos e internos que influyen en la concentración de Radón-222 en espacios internos. Dentro de los factores externos intervienen parámetros meteorológicos como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad y dirección del viento, presentando una mayor influencia la presión atmosférica y la precipitación (Singh, Jaishi, Tiwari, & Tiwari, 2017), puede incluirse también la inestabilidad atmosférica o los movimientos sísmicos que provocan un aumento inusual del nivel de Radón-222 (Yakovleva, Nagorsky, Kondratyeva, & Mishina, 2016).

En zonas tropicales se da una variación de presión muy baja de 4 milibares en un rango de horas. Para que la presión influya de una manera significativa sobre la concentración de Radón-222, está debe presentarse en un rango de días. (Espinosa & Gammage, An Indoor Radon Survey in three different Climate Regions in Mexico, and the Influence of Climate in the Obtained values., 2011) Las variaciones de presión del 2% durante varios días, afecta en la concentración de Radón-222.

En suelos secos la presencia de una fuerte lluvia provoca que la concentración de Radón-222 disminuya en la superficie del suelo, gracias a la disolución y transporte del gas Radón-222. Mientras que en ausencia de lluvia por largo tiempo, la humedad del suelo va a producir un aumento de concentración de Radón-222.

A corto plazo, el Radón-222 tiene niveles máximos a primera hora de la mañana mientras que los mínimos se alcanzan por la tarde (Kolarž *et al.*, 2009). A largo plazo, la concentración de Radón-222 suele ser mayor en invierno que en verano (Soler, V, Lario, J, Sanchez - Moral, S, Canaveras, J.C, & Cuezva, S, 2005) (Bu, y otros, 2017).

2.13. Efectos de la actividad del gas Radón-222 sobre la salud humana

El Radón-222 representa aproximadamente la mitad del promedio de radiación que el ser humano recibe por exposición a fuentes radiactivas naturales (UNSCEAR, 2008), siendo la otra mitad rayos gamma procedentes fundamentalmente de la actividad solar.

Actualmente, hay claras evidencias científicas del potencial cancerígeno del gas Radón-222.

Así, en 1998, IARC (Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer) clasificó al Radón-222 y sus hijas como Grupo 1, "cancerígeno para los seres humanos" (International Agency for Research on Cancer, 1988). En este grupo se incluyen aquellos agentes de los que se disponen pruebas suficientes y contundentes que confirman que la exposición de los humanos a éstos puede causar cáncer de pulmón. Posteriormente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) atribuyó al Radón-222 hasta un 14% de los casos diagnosticados de cáncer de pulmón, siendo la segunda causa de este cáncer después del consumo de tabaco (Worl Health Organization, 2009)

La razón principal reside en el estado sólido de los descendientes del gas Radón-222 tras su desintegración. Los descendientes del Radón-222 pueden quedarse depositados en las superficies de techos, suelos y/o paredes (efecto "plate-out") o bien, en aerosoles en suspensión. Los descendientes adheridos a los aerosoles pueden a su vez también depositarse en las superficies o inhalarse durante la respiración (Porstendorfer, 1994) Tales isótopos radioactivos adheridos a aerosoles pueden quedarse depositados en el tracto respiratorio donde seguirán desintegrándose y emitiendo altas dosis de energía que pueden afectar al tejido celular (ICRP, 1994). El carácter probabilístico de las desintegraciones radioactivas imposibilita su prevención y aumenta en ambientes con altas concentraciones de Radón-222. Se ha demostrado que la filtración del aire mediante el uso de mascarillas reduce la dosis total efectiva recibida (Wang et al., 2011). Se

23
denomina "fracción libre" a la proporción de los descendientes de Radón-222 no adheridos a los aerosoles, los cuales también pueden depositarse en el tejido respiratorio si coincide la inhalación con la desintegración del Radón-222.

Una correcta valoración del riesgo que entraña para la salud la inhalación de Radón-222 tiene en cuenta tanto los niveles de tolerancia de los individuos como la intensidad de la exposición y el máximo tiempo de exposición admisible. Cada tejido y cada órgano se ven afectados de manera distinta respecto a la exposición a una fuente de radiación ionizante como el Radón-222. Para valorar el riesgo biológico asociado a dicha exposición la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha diseñado unos modelos dosimétricos que proporcionan una medida física relacionada con el efecto directo o potencial producido en la materia irradiada (ICRP, 1994).

2.14. Límites permisibles de exposición a la radiación ionizante en Ecuador

- Los efectos de la radiación ionizante pueden ser deterministas y estocásticos, inmediatos o tardíos, somáticos o genéticos
- Algunos tejidos son altamente radiosensibles (Ver anexo 3)
- Cada tejido tiene su propio factor de riesgo

El registro oficial 891 del gobierno del Ecuador del año 1979 habla sobre la protección contra la radiación, en donde establece un límite de irradiación interna para personas en función de la ocupación en la que labore (Tabla 4):

Ecuador (1979)

Tabla 4 Límites permisibles de exposición a la radiación en Ecuador. Fuente: Registro oficial sobre el Reglamento de Seguridad Radiológica del Consejo Supremo de Gobierno de

ÓRGANO	DOSIS MÁXIMA PERMISIBLE
Cuerpo Humano, gónadas, médula ósea	5 rem/año – 3 rem/trimestre
Hueso, Piel, tiroides	30 rem/año – 15 rem/trimestre
Manos, antebrazos, pies, tobillos	75 rem/año – 40 rem/trimestre
Resto de órganos	15 rem/año – 8 rem/trimestre

Donde:

- **rem** = Dosis absorbida de un rad de radiación X, gamma ó beta.
- **rad** = Absorción de 100 ergios por gramo de material (100 erg/g).

2.15. Formación de las trazas o huellas nucleares

"El paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de la mayoría de los semiconductores sólidos, crea patrones finos de daño intenso, en la escala atómica" (Espinosa, Trazas Nucleares en Sólidos, 1994). Y éste el origen de la traza nuclear en sólidos.

A pesar de que las trazas se han formado desde el principio de la creación en los materiales, no fue hasta los años 50's y 60's que se tuvo conocimiento científico de ellas. Las trazas que se producen por las partículas son huellas estables que se forman por centros de tensión, que responden al ataque químico. Los centros de tensión están formados por desplazamientos atómicos y no por defectos electrónicos. En materiales que son buenos conductores no hay presencia de trazas. (Espinosa, Trazas Nucleares en Sólidos, 1994).

Capítulo 3

3. Materiales y métodos

3.1. Toma de muestras

La toma de muestras para medir la concentración de Radón-222 en grandes grupos de suelos, deben tener significancia (Kumar & Chauhan, 2014), en este caso el muestreo se realizó en forma aleatoria en ocho estaciones meteorológicas de la Universidad Politécnica Salesiana/INER (Figura 5).



Figura 5 Puntos de muestreo. Elaborado por: Autor

3.2. Construcción de las cámaras de difusión

Para la medición de Radón-222 se empleó una técnica pasiva en conjunto con detectores de trazas nucleares. Esta técnica tiene como objetivo determinar la variación de la concentración del Radón-222 en el suelo al correlacionarlo con las variables meteorológicas, consiste en la perforación de 2 huecos de 60 cm de profundidad con un diámetro de 70 cm aproximadamente en los cuales se introdujeron tubos PVC de 70 cm de diámetro y 60 cm de largo, los mismos que funcionaron como guía y protección para la cámara de difusión de Radón-222. Las cámaras de difusión se componen de un envase

de aluminio con volumen 355 ml y 60 cm de diámetro en las que se introdujeron un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor en cada cámara, en donde se colocó una lámina del Detector Sólido de Trazas Nucleares (DSTN), de dimensiones 1.5 cm x 1.5m, debido a que es un detector de bajo costo y eficiente para el registro de partículas alfa por su superficie sensible al contacto de partículas alfa. (Mohamed, 2012). El extremo abierto del primer envase fue cubierto con una membrana plástica semi-permeable, la cual permite la detección, sólo del Radón-222, ya que los otros dos isótopos del Radón-222 tienen una vida media demasiado corta para penetrar esta membrana. Mientras que el segundo envase no fue cubierto con la membrana semi-permeable, con el fin de medir la concentración de Radón-222, y Thorón. (Viloria, Palacios, Sajo, Núñez, & Fernández, 2004). Los detectores se expusieron por un promedio de 30 días y fueron reemplazados por unas nuevas cámaras de difusión. Este método se utilizó en los ocho puntos de muestreo establecidos a la profundidad anteriormente indicada como se muestra en la Figura 6.



Figura 6 Técnica de medición cámara de difusión de Radón-222. Fuente: Autor

Los detectores fueron codificados con la siguiente nomenclatura abcFecha(D/M/A) de acuerdo a la zona, a continuación siendo *a* la estación meteorológica, *b* su ubicación y *c* su número y especificación (Ver Anexo1). En total se procesaron 40 detectores. El

muestreo se dio en 3 periodos de 30 días durante los meses de junio a octubre del 2017, en cada periodo se colocaron por estación meteorológica los detectores como se indica en la Tabla 5.

Con el fin de obtener información se diseñó una ficha, para cada estación meteorológica, donde se indicaban las características geográficas de las mismas, tipo de detector, la metodología de exposición de los detectores y las anomalías que se observaron al momento de cambiar los detectores, en cada periodo. (Ver Anexo2).

Tabla 5 Número de detectores colocados en los ocho puntos de muestreo. Elaborado por el autor

	Número de detectores				
Período de medición	Cámara de difusión de Radón-222 a 0,60 m de				
	profundidad				
Junio - Julio	16				
Julio – Agosto	8				
Septiembre –	16				
Octubre					

3.3. Proceso de grabado

El tratamiento químico de los DSTN (LR-115) y el conteo de las trazas obtenidas en ellos, se llevó a cabo en el Laboratorio de Huellas Nucleares de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), haciendo uso del POLITRACK.

Una vez culminado el tiempo de exposición, se procede a extraer de cada cámara de difusión los detectores sellados dentro de un sobre de papel y pasar por una etapa de revelado químico que permitirá hacer visible, las trazas latentes que se obtuvieron de la interacción con las partículas alfa. Para el proceso de revelado se procedió a codificar cada uno de los detectores; los códigos se imprimieron en etiquetas que fueron adheridas

a cables finos, en cuyos extremos se sostuvieron los detectores. Los cables fungieron como manijas para introducir y extraer los detectores de la solución de hidróxido de sodio como se observa en la Figura 7.



Figura 7 Detectores preparados para el proceso de revelado. Fuente: Autor

El siguiente paso fue determinar las proporciones de agua e NaOH, que fueron colocados en los vasos de precipitación, en un vaso de precipitación de 500 ml, se vierte 200 ml de agua que será el medio termostático y en el vaso de precipitación de 140 ml se vierte un promedio de 110 ml de NaOH con una normalidad de 2,5N, seguidamente se introduce el segundo vaso en el primer vaso, conteniendo así ellos al otro, de esta forma se introduce en cada baño independiente, 6 arreglos del mismo modo. (Pereyra, López, & Pérez, 2014). Luego se enciende el aire acondicionado manteniendo una temperatura de 25 °C, se espera alrededor de 30 minutos para encender el baño, todos los controladores deben estar fijados a una temperatura de 60°C temperatura a la cual se realiza el grabado químico, el tiempo necesario para que llegue a estabilizarse a esa temperatura es de una hora aproximadamente, luego del cual se procede a sumergir cada detector en el baño en promedio 6 detectores por baño, evitando su contacto. El tiempo que dura el baño químico enjuague por 20 minutos en agua y luego al secado, en este caso se dejó por un periodo de 24 horas.



Figura 8 Baño térmico al cual se sometió los detectores para su grabado. Fuente: Autor

3.4. Lectura de trazas por el POLITRACK

Una vez transcurrido el tiempo de secado, se procedió a preparar los detectores para su lectura, en el vidrio del POLITRACK se colocan los detectores de forma ordenada, en una hoja aparte se realiza un esquema de cómo quedan los detectores sobre el vidrio cada uno con su código, para al finalizar guardar los detectores correctamente. Luego se ajusta el POLITRACK para realizar la lectura, 40X (Figura 9).



Figura 9 Lectura de los detectores en el POLITRACK. Ubicación de los detectores en el vidrio. Fuente: Autor

La lectura que se hace es en forma automática mediante una computadora, para realizar la lectura se configura en la computadora todos los parámetros que debe seguir el POLITRACK el cual maneja 180 campos de visión, para nuestro caso fueron 64 campos. Aquí una muestra de las huellas observadas por el POLITRACK, las manchas observadas se deben a que el grabado no siempre es uniforme también tiene que ver con una adecuada calidad de enjuague, pero se puede observar las huellas claramente, son los puntos más claros (color blanco) estos son resultados obtenidos en laboratorio (Figura 10).



Figura 10 Huellas de desintegración de Radón-222 222, dejadas por las partículas alfa. Fuente: Autor.

3.5. Cuantificación de la concentración de Radón-222

Para la cuantificación de la concentración de Radón-222 se utilizaron varias ecuaciones compiladas de trabajos relacionados con el tema, elaborados a lo largo del tiempo. (Mohamed, 2012). Primero se calculó la densidad de trazas existentes en los detectores.

$$\rho\left(\frac{trazas}{cm^2}\right) = \frac{\sum Tr}{n*A} \tag{1}$$

Donde:

- $\sum Tr$, es la sumatoria de todas las trazas del campo de visión del detector
- n, es el número total de campos de visión
- A, es la área de visión $[cm^2]$

Una vez conocida la densidad de trazas se calculó la concentración de Radón-222, dada por:

$$C_{Rn} \left(\frac{Bq}{m^3}\right) = \frac{\rho}{Kt} \tag{2}$$

Donde:

- ρ , es la densidad de trazas [trazas/cm²]
- *K*, es el factor de calibración [(trazas/cm²)/(Bq/m³)/d]
- *t*, es el tiempo de exposición del detector [d]

En nuestro caso se utilizó dos factores de calibración y la literatura nos indica que para la cámara de difusión de Radón-222 que contiene en uno de sus extremos una membrana semipermeable Envoplast su factor es (0.0718)[(trazas/cm²)/(Bq/m³)/d] (Viloria, Palacios, Sajo, Núñez, & Fernández, 2004). Y para la cámara de difusión de Radón-222 que no está cubierto por ninguna membrana es (0.0217) [(trazas/cm²)/(Bq/m³)/d] (Ichedef, Murat, Camgoz, & Bolca , 2013), por la exposición en días, que en nuestro caso fueron 30 para ambas cámaras.

3.6. Determinación de las propiedades físicas del suelo

Como ya se mencionó anteriormente la cantidad de Radón-222 presente en el suelo depende de las propiedades físicas del mismo, siendo las de mayor influencia la porosidad, permeabilidad y humedad (Borja, 2009). Para determinar dichas propiedades se ha aplicado los siguientes métodos.

3.6.1. Determinación de la humedad

La humedad del suelo es dinámica y va a depender del clima, vegetación, profundidad del suelo, además influye en ciertas propiedades físicas, como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión

total de agua y color del suelo (Flores & Alcalá, 2010). Se puede expresar gravimétricamente, con base en la masa, o volumétricamente, con base en el volumen. Los materiales usados fueron; balanza gravimétrica, estufa para secar suelo y recipientes de aluminio. Se procedió a secar la masa del suelo en la estufa a 105°C hasta obtener el peso constante de la muestra que, en la mayoría de los suelos se logra entre 24 y 48 horas, dependiendo del tamaño de la muestra; en nuestro caso se logró en 24 horas, a este estado se le denomina suelo seco y es de naturaleza constante y reproducible bajo varias condiciones ambientales. Varios análisis químicos utilizan como base la masa de suelo secada en estufa. Para obtener esta información sin alterar la naturaleza de la muestra de suelo al colocarla en la estufa, se acostumbra tomar una cantidad de suelo para determinar la humedad de la muestra, adecuadamente mezclada, en su estado de humedad secada al aire. (Flores & Alcalá, 2010). El contenido de humedad está dado por:

$$\omega = \left(\frac{M_g}{M_s}\right) 100\tag{3}$$

Donde:

- ω , representa el contenido de la humedad gravimétrica [%]
- M_g , es la masa de agua [Kg]
- M_s , es la masa de suelo secado en estufa [Kg]

3.6.2. Determinación de la porosidad

La porosidad (% *Poroso*) se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros. O lo que es lo mismo, el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. Para determinar la porosidad total de suelos se hizo a través de la determinación de sus densidades aparente y real (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004).

Densidad aparente

La densidad aparente (Da) es la relación que existe entre el peso seco (105°C) de una muestra de suelo, y el volumen que esa muestra ocupaba en el suelo.

$$Da = \frac{peso \ de \ la \ muestra \ o \ peso \ seco \ (g)}{Vol \ de \ la \ muestra \ (cm^3)}$$
(4)

Densidad real

La densidad real (Dr) normalmente se considera estándar para todos los suelos, y se le asigna un valor medio de 2.65g/cm³ (Ibáñez, Ramón, & Gisbert, 2012).

Las partículas del suelo varían en su composición y en su densidad. La densidad no proporciona información acerca de los procesos físicos del suelo, no obstante es un valor útil en el cálculo de propiedades del suelo como la porosidad y la distribución del tamaño de las partículas (Flores & Alcalá, 2010).

Por tanto:

Volumen de sólidos por ciento =
$$\left(\frac{Da}{Dr}\right)$$
100 (5)

Entonces:

$$\% Poroso = 1 - \left(\frac{Da}{Dr}\right) 100 \tag{6}$$

Donde:

- Da, es la densidad aparente [gr/ cm³]

- Dr, es la densidad real [gr/ cm³]

3.6.3. Determinación de la permeabilidad

La permeabilidad del suelo está directamente relacionada con la textura y estructura del mismo (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006). Además el tamaño de los poros del suelo

está relacionado con la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y con la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). La FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) indica que el suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, organismos vegetales y animales, aire y agua. Según su textura se puede distinguir tres tipos de suelos: arena, arcilla y limo.

Para determinar el tipo de suelo se realizó pruebas caseras según su aspecto físico, se tomó una cantidad significativa de cada muestra la cual se procedió a mojarla y tomando en cuenta los siguientes parámetros se identificó su textura (FAO), sí:

- La muestra es áspera y no mancha la mano, es suelo arenoso
- La muestra es áspera, mancha la mano y no forma figura, es suelo franco arenoso
- La muestra mancha la mano y se puede moldear, es suelo franco arcilloso
- La muestra es fácil de moldear, forma figuras y es pegajosa, es suelo arcillo limoso

Entonces para determinar el coeficiente de permeabilidad se hizo una aproximación en la Tabla 6 y Tabla 7 en función del tipo de suelo determinado en cada estación meteorológica.

Tipo de		Permeabilidad del
Suelo	Textura del Suelo	Suelo
Arcilloso	Fina	
		Muy lenta
	Moderadamente fina	
		a
Limoso	Moderadamente	1
		muy rápida
	gruesa	

Tabla 6 Variación de la permeabilidad según la textura del suelo. Fuente: (FAO)

Arenoso	Gruesa	

Tuchic. (THO)							
Suelos arenosos	5.0						
Suelos franco	2.5						
arenosos							
Suelos francos	1.3						
Suelos franco	0.8						
arcillosos							
Suelos arcilloso	0.25						
limosos							
Suelos arcillosos	0.05						

Tabla 7 Permeabilidad media para diferentes texturas de suelo (cm/hora). Fuente: (FAO)

3.7. Análisis de varianza ANOVA de un factor

Para el análisis de las variables meteorológicas se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor, el cual nos sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa, esta prueba es una generalización del contraste de igualdad de medias para dos muestras independientes. Se aplica para contrastar la igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes y con distribución normal, (Bakieva, González Such, & Jornet, 2013) siendo las hipótesis del contraste las siguientes:

- H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \cdots \mu_k$.

- H_1 : por lo menos dos de las medias poblacionales son distintas.

Si un contraste de hipótesis proporciona p > 0.05 la hipótesis alternativa (H_1) es rechazada, siendo el resultado estadísticamente significativo, mientras que sí p < 0.05 la hipótesis nula (H_0) es rechazada.

Para poner a prueba la hipótesis de igualdad de medias la estrategia consiste en obtener un estadístico, *F*, que refleja el grado de parecido existente entre las medias que se están comparando. Además se utiliza los contrastes llamados comparaciones múltiples posthoc (Tukey) para saber qué media difiere de qué otras, permitiendo controlar la tasa de error al efectuar varios contrastes utilizando las mismas medias (Bakieva, González Such, & Jornet, 2013).

El estadístico ANOVA de varianza de un factor, nos permitió confirmar la hipótesis de que los J promedios comparados son iguales. Si se rechazó esa hipótesis, sabemos que las medias poblaciones comparadas no son iguales, sin embargo no sabemos en qué medias encuentran las diferencias. Para saber dónde en concreto se encuentran las diferencias se utilizó comparaciones múltiples post hoc, las cuales permiten controlar la tasa de error al efectuar varios contrastes utilizando las mismas medias (Linguistica, s.f.).

3.8. Modelo de regresión lineal múltiple

A partir de este método se desea relacionar la concentración de Radón-222 en el suelo, siendo la variable dependiente, con los parámetros meteorológicos que son las variables independientes. Para satisfacer este problema se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple, en el cual se incluyen *n* variables independientes para determinar el valor estimado \hat{y} de la variable dependiente y (Tobar, 2014). Este valor estimado se obtuvo como una combinación lineal de las variables independientes, como se indica en la siguiente expresión:

$$\hat{y} = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 \dots B_n x_n \tag{7}$$

Donde:

- B_0 , es la constante de regresión
- $B_1 \dots B_n$, son los coeficientes de regresión

Estos coeficientes y las técnicas de análisis se han calculado con el programa estadístico SPSS (Ver Anexo 3).

4. Resultados y discusión4.1. Estimación de la concentración de Radón-222 en el suelo

En la Tabla 8 se observa que la mayor concentración de Radón-222 es 4926 Bq/m³ presentada por la estación meteorológica de Baños, y la menor concentración es de 75 Bq/m³ que se encuentra en la estación meteorológica Sayausí; esto es para el caso de la cámara de difusión sin membrana. Mientras que para el caso de la cámara de difusión con membrana la estación meteorológica Tixán ostenta la mayor concentración de Radón-222 2610 Bq/m³ al contrario de la estación meteorológica Santa Ana que solo cuenta con una concentración de 10 Bq/m³.

Esto indica que la presencia de Radón-222 tendrá variaciones significativas en cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. Exceptuando el caso del suelo tipo 3, cuya concentración de Radón-222 no presenta variación comparativa entre las estaciones meteorológicas Santa Ana y Llacao; esto se produce ambos casos de medición: cámara de difusión sin membrana y con membrana.

Tino do quelo	Ectoción	Cámara da	difución cin	Cámara da	difusión con	
ripo de suelo	Meteorológica	Califara de mem	membrana		brana	
	meteorologica	Concentración de Rn-		Concentración de Rn-		
		222 [Bg/m3]		222 [B	a/m3]	
		Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2	
1	Tixán	3619	1075	2610	458	
	Quingeo	1020	1940	65	34	
Máx		3619	1940	2610	458	
Mín		1020	1075	65	34	
Media		2320	1508	1338	246	
Desviación Estándar		1838	612	1800	300	
2	Turi	229	1111	168	1985	
	Nulti	531	339	68	283	
	Baños	4926	152	36	997	
Máx		4926	1111	168	1985	
Mín		229	152	36	283	
Media		1895	534	91	1088	
Desviación Estándar		3718	719	97	1209	
3	Santa Ana	100	1111	10	46	
	Llacao	1118	1074	242	457	
Máx		1118	1111	242	457	
Mín		100	1074	10	46	
Media		609	1093	126	252	
Desviación Estándar		720	26	164	291	
4	Sayausí	531	75	302	39	
Máx		720	75	302	291	
Mín		531	26	164	39	
Media		625	51	233	165	
Desviación Estándar		134	35	98	178	

Tabla 8 Concentración de Radón-222 en el suelo de las estaciones meteorológicas. Elaborado por autor

Profundidad cámara de difusión 60cm

4.2. Estimación de las propiedades físicas del suelo

Estación Meteorológica	Tipo de suelo	Permeabilidad [cm/hora]	Masa de agua	Masa de suelo seco [kg]	Humedad [%]	Dens	idad aparente	e [g/cm3]	Densidad real	Porosidad [%]
			[Kg]			Volumen de la muestra [cm3]	Masa de suelo seco [g]	Densidad aparente [g/cm3]	– [g/cm3]	
Tixán	Franco arenoso	2,50	0,01	0,02	31,11	12,85	18,00	1,40	2,65	47,14
Quingeo	Franco arenoso	2,50	0,01	0,02	31,58	13,54	19,00	1,40	2,65	47,04
Turi	Franco arcilloso	0,80	0,01	0,03	30,00	22,60	25,00	1,11	2,65	58,26
Nulti	Franco arcilloso	0,80	0,01	0,02	29,58	21,59	24,00	1,11	2,65	58,06
Baños	Franco arcilloso	0,80	0,01	0,03	29,64	25,23	28,00	1,11	2,65	58,13
Santa Ana	Arenoso	5,00	0,01	0,04	19,43	22,86	35,00	1,53	2,65	42,21
Llacao	Arenoso	5,00	0,01	0,04	20,00	27,56	42,00	1,52	2,65	42,50
Sayausí	Arcillo limoso	0,25	0,01	0,02	41,25	23,96	24,00	1,00	2,65	62,20

Tabla 9 Propiedades físicas del suelo Elaborado por autor

Las propiedades físicas del suelo estudiadas fueron: i) humedad, ii) porosidad y iii) permeabilidad. Se seleccionaron estos elementos debido a que la literatura indica que estas características determinan el aumento o reducción de la difusión de Radón-222

(Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanguán, 2011). La cantidad de Radón-222 presente del suelo depende principalmente de la concentración de Radio-226 en el subsuelo y de su permeabilidad (Tabla 9). Además se observa el tipo de suelo de cada estación meteorológica: i) franco arenoso (tipo 1), ii) franco arcillo (tipo 2), iii) arenoso (tipo 3), iiii) arcillo limoso (tipo 4).

En la Tabla 10 se observa las concentraciones medias de Radón-222 que se obtuvieron por cada tipo de suelo.

Profundidad cámara de difusión 60cm								
Tipo de suelo	Cámara de meml	difusión sin brana	Cámara de difusión con membrana					
	Concentra de Rn-222	ción media 2 [Bq/m3]	Concentración media de Rn-222 [Bq/m3]					
Tipo de suelo	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2				
Tipo 1	2320	1508	1338	246				
Tipo 2	1895	534	91	1088				
Тіро З	609	1093	126	252				
Tipo 4	625	51	233	165				

Tabla 10. Concentraciones medias de Rn-222 para cada tipo de suelo Elaborado por autor

Se encontró que hay un diferencia importante en la porosidad de los tipos de suelo (Tabla 9). La concentración de Radón-222 es inversamente proporcional a la porosidad (mayor concentración de Radón-222 menor porosidad), como se observa en la Tabla 10 para la cámara de difusión sin membrana, suelo tipo 1 tiene una porosidad de 47% y una concentración de Radón-222 de 1508 [Bq/m3] y el suelo tipo 4 con una porosidad de 62% tiene una concentración de 51 [Bq/m3], y para la cámara de difusión con membrana el suelo

tipo 1 tiene una porosidad de 47% y una concentración de Radón-222 de 1338 [Bq/m3] mientras

que el suelo tipo 2 presenta una concentración de 91 [Bq/m3] con una porosidad de 58%.

Tabla 11. Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor para la comparación de las medias de la concentración de Rn-222 para cámara sin membrana

ANOVA Concentracion_media_de_Radon_Bgm3 Suma de Media cuadrática F Sig. cuadrados ql Entre grupos 2633299,375 3 877766,458 2,283 ,221 Dentro de grupos 1537698,500 384424,625 4 4170997,875 Total 7

Tabla 12. Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor para la comparación de las medias de la concentración de Rn-222 para cámara con membrana Elaborado por autor

	ANOVAª									
		Suma de		Media						
Mod	elo	cuadrados	GI	cuadrática	F	Sig.				
1	Regresión	951683,167	2	475841,583		. ^b				
	Residuo	,000	0							
	Total	951683,167	2							

a. Variable dependiente: CONCENTRACIÓN DE RADÓN (POLITRACK) (Bq/m3)

b. Predictores: (Constante), PRESIÓN (hPa), HUMEDAD (%)

En la Tabla 11 y Tabla 12 se observa que las medias de las concentraciones de Radón-222 no presentan una variación significativa en las medias de las concentraciones de Radón-222 para los diferentes tipos de suelo en los cuales se midieron.

4.3. Análisis de las variables meteorológicas (ANOVA de un factor)

Para resolver la problemática planteada en este estudio se vio la necesidad de aplicar el software SPSS. El procedimiento ANOVA de un factor nos permite confirmar las hipótesis planteadas, lo que nos dio como resultado:

- El ANOVA perteneciente a la variable meteorológica presión nos dio un nivel de significación 0.000, es decir las medias no son iguales (Tabla 13).

Tabla 13 Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor de presión Fuente: SPSS. Elaborado por autor

ANOVA

Presión					
	Suma de cuadrados	GI	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2870,604	7	410,086	5422,629	,000
Dentro de grupos	,605	8	,076		
Total	2871,209	15			

Para conocer cuáles son las medias que difieren utilizamos las comparaciones múltiples

post-hoc (Tabla 14), dándonos como resultado:

HSD Tukeva

- Las medias de las presiones de las estaciones meteorológicas Sayausí y Tixán se consideran estadísticamente iguales (739 hPa).
- La media máxima es la perteneciente a la estación meteorológica Llacao (755.750 hPa) y la media mínima es la perteneciente a la estación meteorológica Baños (710.550 hPa). Como era de esperarse, la variación en las medias de las presiones están influenciada por la altitud, debido a que a medida de que aumenta la altura disminuye la densidad del aire y esto provoca una disminución de presión.

Tabla 14 Comparaciones múltiples Tukey del procedimiento ANOVA de un factor de presión Fuente: SPSS. Elaborado por autor

Presión

			Subconjunto para alfa - 0.05						
				Subconj	unio para ali	a = 0.05			
Estaciones_Meteorológicas	Ν	1	2	3	4	5	6	7	
Baños	2	710,550							
Quingeo	2		723,950						
Turi	2			735,450					
Sayausí	2				739,100				
Tixán	2				739,750				
Santa Ana	2					745,900			

Nulti	2						748,000	
Llacao	2							755,750
Sig.		1,000	1,000	1,000	,364	1,000	1,000	1,000

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

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 2,000.

Dentro de este estudio también se realiza la prueba de comparaciones múltiples post-hoc

a las variables: humedad, radiación solar, viento y temperatura, debido a que su nivel de

significación es menor a 0.05.

Drocinitación

Caso contrario ocurre con la precipitación en donde su nivel de significación es de 0.490

(Tabla 15), es decir, que sus medias son iguales (Tabla 16).

Tabla 15 Tabla resumen del procedimiento ANOVA de un factor de precipitación Fuente: SPSS. Elaborado por autor

ANOVA

Песірішсіон					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	718,130	7	102,590	1,006	,490
Dentro de grupos	816,100	8	102,013		
Total	1534,230	15			

Tabla 16 Comparaciones múltiples Tukey del procedimiento ANOVA de un factor de precipitación
Fuente: SPSS. Elaborado por autor

Precipitación

HSD Tukey ^a						
		Subconjunto				
Estaciones Meteorologicas	Ν	1				
		1				
Llacao	2	,000				
Nulti	2	,000				
Tixán	2	,050				
Santa Ana	2	,050				
Quingeo	2	,050				
Baños	2	,050				
Turi	2	,100				
Sayausí	2	20,300				
Sig.		,527				

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

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 2,000.

4.4. Modelo de regresión lineal múltiple

Para ejecutar el modelo de regresión lineal múltiple se procedió a generar las bases de datos, agrupando las estaciones meteorológicas en función de sus propiedades físicas del suelo, para lo cual la literatura nos indica que si al menos tres de las propiedades físicas son aproximadamente iguales o idénticas se puede agrupar. Entonces para obtener las bases de datos se procedió a sacar las medias de la variable dependiente y de las variables independientes de las estaciones agrupadas respectivamente, obteniendo así las bases de datos, como se indica en las Tablas 17 y 18. Se procede a descartar aquellas que tengan colinealidad y multicolinealidad, a cada variable se le asigna un código (Tabla 19).

A COme de maña dide de en exemple de diferción de Dedón 222 sin membrane							
A 6	ucm de pro	rundidad con	camara de c	litusion de	Radon-222 s	in membra	na
TIPO DE SUELO	ONCENTRACIÓN DE Rn-222 [Bq/m3]	I PRESIÓN [hPa]	HUMEDAD [%]	VIENTO [°]	TEMPERATUR A [°C]	RADIACIÓN SOLAR	PRECIPITACIÓN [mm]
Tipo 1	2319,5	731,8	82,2	150	12,3	92	0,1
Tipo 1	1507,5	731,9	75,9	135	12	136,7	0,1
Tipo 2	1895,3	731,4	79,6	102,3	13,3	125	0,07
Tipo 2	200,6	731,2	74,7	56,5	13,7	159,7	0,03
Tipo 3	609	750,8	72,9	154,9	15,1	148	0,05
Tipo 3	1093	745,9	77,6	172,1	12,4	71,9	0
Tipo 4	531	739,5	80,0	139,3	13,0	127,3	40,5
Tipo 4	75	738,7	75,9	146,7	13,4	114,9	0,1

Tabla 17 Base de datos profundidad con cámara de difusión a 60 cm sin membrana Elaborado por autor

Tabla 18 Base de datos a 60cm de profundidad con cámara de difusión con membrana Elaborado por autor

A 60cm de profundidad con cámara de difusión de Radón-222 con membrana							
TIPO DE SUELO	CONCENTRACIÓN DE Rn-222 [Bq/m3]	PRESIÓN [hPa]	HUMEDAD [%]	VIENTO [°]	TEMPERATURA [°C]	RADIACIÓN SOLAR	PRECIPITACIÓN [mm]
Tipo 1	1337,5	731,8	82,2	150	12,3	92	0,1
Tipo 1	246	731,9	75,9	135	12	136,7	0,1
Tipo 2	248	731,4	79,6	102,3	13,3	125	0,07
Tipo 2	1088,3	731,2	74,7	56,5	13,7	159,7	0,03
Tipo 3	126,1	750,8	72,9	154,9	15,1	148	0,05
Tipo 3	252	745,9	77,6	172,1	12,4	71,9	0
Tipo 4	302	739,5	80	139,3	13	127,3	40,5
Tipo 4	39	738,7	75,9	146,7	13,4	114,9	0,1

Tipo de suelo	Lugar de Medida (Estación	Código	Significado
	wieteorologica)		
1	Tixán		
	Quingeo	P	Presión
	Turi	V	Viento
2	Nulti	P	Precipitación
	Baños	RS	Radiación
3	Santa Ana	- T	Solar
	Llacao	- H	Temperatura
4	Sayausí	_	Humedad

Tabla 19 Lugar de medida, código y significado de las variables. Elaborado por autor

La matriz de correlaciones que se muestra en la Tabla 20 corresponde al suelo tipo 1 con cámara de difusión sin membrana, en donde se han destacado en negrita aquellas correlaciones más altas (R > 0.6). Claramente, hay colinealidad entre la presión y la radiación solar, precipitación y temperatura debida que tienen una correlación alta. Esto también ocurre con las variables de humedad, viento, temperatura, radiación solar y precipitación. Se obtuvieron resultados similares en el resto de tipos de suelo.

Tabla 20 Matriz de correlaciones entre las variables para Suelo Tipo 1 con cámara de difusión sin membrana. Fuente: SPSS. Elaborado por autor

			Correlacio	lies				
		CONCENTRA CIÓN DE RADÓN-222						
		(POLITRACK) (Bq/m3)	PRESIÓN (hPa)	HUMEDAD (%)	VIENTO (°)	TEMPERATU RA (°C)	RADIACIÓN SOLAR	PRECIPITACI ÓN (mm)
CONCENTRACIÓN DE	Correlación de Pearson	1	,931	,085	,752	-,934	,403	,935
RADÓN-222 (POLITRACK) (Bg/m3)	Sig. (bilateral)		,237	,946	,459	,232	,736	,231
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
PRESIÓN (hPa)	Correlación de Pearson	,931	1	-,284	,459	-1,000**	,709	1,000**
	Sig. (bilateral)	,237		,817	,696	,005	,499	,007
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
HUMEDAD (%)	Correlación de Pearson	,085	-,284	1	,721	,276	-,878	-,273
	Sig. (bilateral)	,946	,817		,487	,822	,318	,824
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
VIENTO (°)	Correlación de Pearson	,752	,459	,721	1	-,467	-,301	,469
	Sig. (bilateral)	,459	,696	,487		,691	,805	,689
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
TEMPERATURA (°C)	Correlación de Pearson	-,934	-1,000**	,276	-,467	1	-,703	-1,000**
	Sig. (bilateral)	,232	,005	,822	,691		,504	,002
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
RADIACIÓN SOLAR	Correlación de Pearson	,403	,709	-,878	-,301	-,703	1	,701
	Sig. (bilateral)	,736	,499	,318	,805	,504		,505
	Ν	3	3	3	3	3	3	3
PRECIPITACIÓN (mm)	Correlación de Pearson	,935	1,000**	-,273	,469	-1,000**	,701	1
	Sig. (bilateral)	,231	,007	,824	,689	,002	,505	
	Ν	3	3	3	3	3	3	3

Correlaciones

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

En base a las correlaciones de la Tabla 20 y después de calcular los análisis descriptivos y VIF de las variables en diversos modelos, se ha seleccionado un modelo de regresión lineal múltiple por las variables presión (p), humedad (h), viento (v), temperatura (t), radiación solar (rs) precipitación (P). En varios estudios se han encontrado relación entre la variabilidad del Radón-222 y la diferencia de presión, temperatura y humedad (Tobar, 2014). En este estudio no se ha observado tal relación con las variables presión, temperatura y radiación solar. La correlación entre el Radón-222 y las variables de presión, temperatura y radiación solar es menor.

A continuación, se muestra las expresiones obtenidas para estimar la concentración de Radón-222 en cada tipo de suelo (Tabla 21).

Tabla 21 Estimación de la concentración de Radón-222 por tipo de suelo Fuente: SPSS. Elaborado por autor

Tipo		
de	Cámara de difusión sin membrana	Cámara de difusión con membrana
Suelo		
Tipo 1	$C_{RnTh} = -10331.44 + 128.88H + 20562.778P$	$C_{Rn} = -13903.270 + 173.254H + 9992.93P$
Tipo 2	$C_{RnTh} = -43336.054 + 595.081 \text{H} - 30529.924 \text{P}$	$C_{Rn} = 14025.413 - 173.275H + 218.742P$
Tipo 3	$C_{RnTh} = -22518.066 + 137.194\text{V} + 37514.694\text{P}$	$C_{Rn} = -14635.528 + 86.505 \text{V} + 27239.755 \text{P}$
Tipo 4	$C_{RnTh} = 74.436 + 11.273P$	$C_{Rn} = 38.675 + 6.502 P$

Al considerar todas las variables meteorológicas con el fin de obtener un modelo lineal, encontramos que la variación de la concentración de Radón-222 depende del cambio lineal de la precipitación y humedad con un coeficiente de determinación de 1, es decir, que tienen un ajuste perfecto.

4.5. Discusión

(Álvarez, 2015) en su estudio: "VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN-222 COMO GAS TRAZADOR DE PROCESOS GEODINÁMICOS EN AMBIENTES SUBTERRÁNEOS", muestrea y analiza 8 cavidades subterráneas diferentes (Castañar de Ibor, Altamira, El Sidrón, El Pindal, Rull, Ardales, Ojo Guareña y la cueva Pintada de Gáldar). Este enclave subterráneo es idóneo para el seguimiento del gas Radón-222 ya que presenta las mayores concentraciones de Radón-222 descritas hasta la fecha en España (> 30 kBq/m3), así como una marcada estacionalidad. El periodo de estudio está centrado entre los años 2011 a 2013, aunque se incluyen series de datos obtenidos hasta el 2015. En el mismo orden de ideas, se analizan las distintas variables meteorológicas asociadas a la desgasificación (difusión versus advección) mediante el de series temporales y mapas espacio-temporales de las condiciones uso termohigrométricas y de las concentraciones de CO2 en los 3 subsistemas (atmósfera exterior-suelo-cavidad). Asimismo, se incluye un estudio acerca del comportamiento de las cavidades subterráneas como sumideros de metano (CH4) asociado a un alto grado de ionización del aire subterráneo en todas las cavidades muestreadas y su posible relación con la acumulación de gas Radón-222 en dichos ambientes subterráneos. Finalmente, en la cueva de Castañar de Ibor, se lleva un exhaustivo control y seguimiento de la concentración de Radón-222 y su evolución espacial y temporal con el fin de determinar las dosis efectivas que están recibiendo los trabajadores (guías e investigadores) y visitantes ocasionales (turistas), detectando así posibles desviaciones de los valores de referencia que no se ajusten a las recomendaciones y legislación en la materia. Como resultado se determina los tiempos máximos, dosis efectivas recibidas y recorridos óptimos en la cueva en cada momento del año.

Adicionalmente es de vital importancia la investigación: "INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS SOBRE EL NIVEL DE RADÓN-222 A CORTO PLAZO EN UN LABORATORIO SUBTERRÁNEO" realizado por (Tobar, 2014). El objetivo de dicha investigación es determinar la influencia de la meteorología en el nivel de Radón-222 a corto plazo en un laboratorio subterráneo. La concentración de Radón-222 y los parámetros ambientales se midieron cada hora en la misma época

52

del año entre 2011 y 2013. Simultáneamente determinar las variables meteorológicas sobre el tamaño y tiempo de exposición del gas Radón-222. Los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana. Dicha importancia radica en que se calcularon los coeficientes de Pearson entre el Radón-222 y el resto de variables. Los resultados muestran que hay una correlación lineal débil entre la concentración de Radón-222 y variables individuales como la presión, temperatura y humedad.

Finalmente, el estudio realizado por (Viloria, Palacios, Sajo, Núñez, & Fernández, 2004): CONCENTRACIONES DE RADÓN-222 EN LA ZONA URBANA DE LA PARROQUIA CRISTO DE ARANZA, ESTADO ZULIA, VENEZUELA, determina la concentración de Radón-222, a la que se exponen los habitantes de la parroquia de estudio en la ocurrencia de cánceres: i) pulmón, ii) estomacal. Se mide la concentración de Radón-222 en el suelo a 0,60 m en los puntos vulnerables. Los resultados de este estudio están divididos de acuerdo a la época de medición, se tiene un resultado para los meses febrero – marzo y otro para mayo – junio (28.84 KBq/m³ y 10.21 KBq/m³ respectivamente). Los resultados muestran una alta concentración de Radón-222 lo que indica que tiene una gran concurrencia con los casos de cáncer analizados.

Los resultados de este estudio muestran que las concentraciones de Radón-222 están dentro de los rangos promedio que se han obtenido en varios estudios como se indicó anteriormente. La concentración máxima es de 4926 Bq/m³, mientras que la mínima es de 10 Bq/m³.Este resultado es justificado debido a la presencia de las variables meteorológicas de precipitación y humedad las mismas que influyen directamente en la concentración de Radón-222. Además hemos encontrado que en el suelo tipo 1 y en el suelo tipo 4 para la cámara de difusión sin membrana y el suelo tipo 1 y suelo tipo 2 para a cámara de difusión con membrana hay una importante diferencia en la porosidad, siendo así que la concentración de Radón es inversamente proporcional a la porosidad, este

resultado puede explicarse si partimos de la hipótesis de que los poros están débilmente interconectados entre sí, lo que hace que el radón tenga poca difusión en el espacio poroso.

Tal como se mostró en los estudios mencionados anteriormente, las principales variables a considerar en futuros estudios es la precipitación y humedad.

Entre los aportes de este estudio, se confirma lo que menciona la literatura:

- En suelo existe Radio-226, por ende se obtiene concentración de Radón-222 en el mismo.
- Esta concentración de Radón-222 es influenciada por las variables meteorológicas.

El hallazgo de este estudio, es haber obtenido una variación significativa de las concentraciones de Radón-222 en las estaciones meteorológicas, asegurando que estos datos sirvan a futuro para contrarrestar la vulnerabilidad de la población frente a los efectos negativos que tiene este gas, además los datos obtenidos pueden servir de base para futuras investigaciones, ayudando no solo a la sociedad sino también a las necesidades actuales ambientales.

Capítulo 5

5. Conclusiones

Se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple que estima la variación de la concentración de Radón-222 en los diferentes tipos de suelo (franco arenoso, franco arcilloso, arenoso, arcillo limoso), en los cuales se realizaron las mediciones a 60 cm de profundidad a partir de las variables meteorológicas.

Se encontró una variación significativa de la concentración del Radón-222 en el suelo a 60 cm de profundidad, en todos los periodos para los cuatro tipos de suelo: i) franco arenoso, ii) franco arcilloso, iii) arenoso, iiii) arcillo limoso.

Después de realizar el análisis físico de las propiedades del suelo (humedad, porosidad, permeabilidad), en las ocho estaciones meteorológicas de estudio (Tixán, Llacao, Santa Ana, Quingeo, Turi, Nulti, Baños, Sayausí), se encontró cuatro tipos, los cuales se clasificaron como: i) tipo 1 – franco arenoso, ii) tipo 2 – franco arcilloso, iii) tipo 3 – arenoso, iii) tipo 4 – arcillo limoso.

Al analizar el cambio de las medias de las variables meteorológicas (presión, humedad, temperatura, radiación solar, viento, precipitación) en las diferentes estaciones meteorológicas de estudio, se encontró que la precipitación fue la única variable meteorológica que no tuvo cambio significativo.

El modelo lineal obtenido ratifica la hipótesis inicial la cual, consiste en que la concentración de Radón-222 en el suelo está directamente relacionada con las variables meteorológicas.

Los detectores (LR-115) son muy sensibles a la humedad, lo que hace que cuando el nivel freático llega a los niveles de la cámara de difusión los resultados se alteran notablemente.

- Aicardi-Carrillo, G., Asmat-Inostrosa, M., & Barboza-Rangel, Y. (2015). Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio. *Med Segr Trab (Internet)*, 86-98.
- Al-Zoughool, M., & Krewki, D. (2008). Health effects of radon: A review of the literature. Int. J. Radiat. Biol., 57-69.
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). Permeabilidad de suelos . Rosario.
- Appleton, J. (2007). Radon: Sources, health risks, and hazard mapping. Ambio, 85-89.
- Ashokumar, P., Raman, B., & Mayya, Y. (2014). Development and characterization of a silicon PIN diode array based highly sensitive portable continous radon monitor. *J Radiol Prot.*, 149-160.
- Bakieva, M., González Such, J., & Jornet, J. (2013). SPSS: ANOVA de un Factor. Obtenido de https://www.uv.es/innovamide/spss/
- Borja, V. F. (2009). Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bu, J.-O., Song, J.-M., Kim, W.-H., Kang, C.-H., Song, S.-K., Alastair, G., ... Chambers,
 D. (2017). Temporal Variation of Atmospheric Radon-222 and Gaseous
 Pollutants in Background Area of Korea during 2013-2014. Asian Jpurnal of
 Atmospheric Environment; Vol 11; No 2., 114-121.
- Carpio, S. (Octubre de 2016). Detección de las concentraciones de Radio-226 y exhalación de radón en algunos materiales de construcción de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Trabajo experimental previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental*. Cuenca, Ecuador.

- Castillo, B. (2016). Cálculo del Riesgo Radiológico debido a la Concentración de Radón en los Centros de Educación Inicial de la Zona Urbana y Rural de Cuenca, Ecuador. *Trabajo Experimental Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Ambiental*. Cuenca.
- Cherry, R. (2001). *Radiaciones Ionizantes*. Obtenido de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Encicl opediaOIT/tomo2/48.pdf
- CSN. (2014). Protección radiológica frente a las fuentes naturales de radiación. España: Consejo de Seguridad Nuclear.
- Cuezva, S. (2011). Short-term CO2(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: role of the surface soil layer. Washington: Eviron.
- Eappen, K., & Mayya, Y. (2004). Calibration factors for LR-115 (Type-II) based radonthoron discriminating dosimeter. . *Radiat Meas*, 5-17.
- EPA. (May, 1993.). Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in homes. United States: Environmental Protection Agency. .

Espinosa, G. (1994). Trazas Nucleares en Sólidos. México.

- Espinosa, G., & Gammage, R. (2011). An Indoor Radon Survey in three different Climate Regions in Mexico, and the Influence of Climate in the Obtained values. *Jpurnal* of Environmental Protection, 1143-1148.
- Estrada, A. (2009). Medición de Radón-222 en Ambientes geohidrológicos en la fracción central de México. México: Universidad Autónoma de México.
- FAO. (s.f.). *FAO Training*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x 6706s/x6706s09.htm

- Fleischer, R. (1998). Radon in the environment-opportunities and hazards. . *Geochim Cosmochim Acta*, 421-435.
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. México.
 Gunn. (2003).
- Halk. (1997). Process of radon-22.
- Hyland. (1994). International comparison of cave radon concentra- tions identifying the potential alpha radiation risks to British cave users. . Health Phys.
- Ibáñez, S., Ramón, H., & Gisbert, J. (2012). Técnicas de medida del espacio poroso del suelo. Valencia.
- Ichedef, M., Murat, M., Camgoz, B., & Bolca, M. (2013). Soil gas radon concentrations measurements in terms of great soil groups. *Elsevier*, 1-7.
- ICRP. (1994). Radiation Protection against radon in workplaces other than mines.
- IEA. (2003). Impacto del gas radón -222.
- Igarashi et al. (1995). Evaluación volcánica del radon.
- International Agency for Research on Cancer. (1988).
- Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y., & Phaneuf, M. (2013). Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. *Technical Report Series No. 474*, 54-62.
- Jamadi, F., Hosseini, R. A., & Abbaslou, H. (2015.). Radon Gas diffusion coefficient in moisturized soil sample. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering*, 15-20.
- Kowalczk. (2010). *Cave air ventilation and CO2 outgassing*. Washignton: Earth Planet Sci.
- Kumar, A., & Chauhan, R. (2014). Measurement of indoor radon-thoron concentration and radon soil gas in some North Indian dwelings. *J. Geochem. Explor*, 5-8.

Lappetito, L. (2016). *Alpha Spectroscopy*. AlphaSpec_Eng.

- Linguistica, S. d. (s.f.). *Análisis de varianza de un factor: El procedimeinto ANOVA de un factor*. Obtenido de http://stel.ub.edu/es/el-servei
- Liza, R. (Marzo de 2017). Mapeo de los niveles de Radón-222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima-Perú) en el período 2015-2016. *Tesis para optar el grado de Magíster en Física*. Lima, Perú.
- López, G. M. (2003). Puesta a punto de un espectómetro de Centelleo Líquido para la determinación de Radón en muestras de agua. Madrid, España: Universidad de Extremadura.
- Mayya, Y., Mishra, R., Prajith, R., Gole, A., Bk, S., & Chougaonkar, M. (2012). Deposition based passive monitors for assigning radon, thoron inhalation does for epidemiological studies. *Radiat Prot Dosim*, 18-24.
- Mishra, R., BR, S., & Mayya, Y. (2009). Development of an integrated sampler based on direct 220Rn/220Rn progeny sensors in flow-mode for estimating unnattached/attached progeny concentration. *Nucl Instrum Method Phys Res*, 3574-3579.
- Moed, B., Nazaroff, W., & Sextro, R. (1988). "Soil as a source of indoor radon: Generation, mitigation and entry", Radon and its Decay Products in Indoor Air. New York: John Wiley and Sons.
- Mohamed, A. (2012). An overview on studying 222Rn Exhalation Rates using Pasive Technique Solid State Nuclear Track Detectors. American Journal of Applied Sciencies 9 (10), 1653 - 1659.
- Muikku, M., Heikkinen, T., Puhakainen, M., Rahola, T., & Salonen, L. (2007). Assessment of occupational exposure to uranium by indirect methods needs
information on natural background variation. *Radiation Protection Dosimetry-*125, 492-495.

Mustafa, A.-Z., & Krewski, D. (January 2009.). Health effect of radon: A review of the literature. *Ind J. Radiat. Biol., Vol; No. 1.*, 57-69.

Nazaroff; Papachristodoulou et al. (2007). Variables del Radon.

- Pereyra, P., López, M., & Pérez, B. (2014). Mediciones de la Concnetración de Radón222 en Residencias de Lima-Perú. *ISSSD*.
- Piedecausa, G. B., Chinchón, P. S., Morales, R. M., & Sanguán, B. M. (2011).
 Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón.
 Parte II. Radiación interna: el gas radón. *CEMENTO HORMIGÓN, N°946*, 34-50.

Porstendorfer. (1994). Mediciones de concentración del radón. SW Poland.

- Prasad, G., Ishikawa, T., Hosoda, M., Sorimachi, A., Miroslaw, J., Kumar, S., ... Uchida,
 S. (2012). Estimation of radon diffusion coefficients in soil using an updated experimental system. *Review of Scientific Instruments*, 83-89.
- Ramola, R., Mandwinder, S., Surinder, S., & Virk, H. (1987). Mesearement of indoor radon concentration using LR-115 plastic trac detector. *Indian Journal of Pure* and Applied Physic, 127-129.
- Reif, A. W., & Abbady, A. G. (2013). Measurement of radon concentrations in soil and thoron extent of their impact on the environment from Al-Qassim, Saudi Arabia. *Natural Science*, 93-98.
- Rodríguez, J. (2013). Cuantificación de la Actividad de Radón-222 y Radio-226
 Aplicando la Técnica de Centelleo Líquido en Aguas Termales del Cerro Pacho,
 Lago de Coatepeque, Departamento de Santa Ana. *Para obtener el título de Licenciado en Ciencias Químicas*. Salvador.

- Rojas, J. (Febrerp de 2016). Monitoreo de radón 222 en la zona sur de Lima. *Tesis para optar el grado de Magíster en Física*. Lima, Perú.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. Montevideo.
- Sesana. (2003). RADÓN concentration changes in the air of two caves in Poland.J. Environ. Radioact. 45, 81e94.
- Sharma, Y., Maibam, D., Khardewsaw, A., & Saxena, A. (2017). Spectral Analysis of Indoor Radon Time-Seriesusing Frequency and Time-Frequency Techniques. *International Journal of Engineering Technology Science and Research; IJETSR.*, 358-364.
- Singh, S., Jaishi, H., Tiwari, R., & Tiwari, R. (2017). Time Series Analysis of Soil Radon Data Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Seismic Precursory Studies. *Pure Appl. Geophys*.
- Soler, V, Lario, J, Sanchez Moral, S, Canaveras, J.C, & Cuezva, S. (2005). RADÓN continuous monitoring in Altamira Cave (Northern Spain) to assess user's annual effective dose. J. Environ. Radioact. 80, 161e174.
- Suaro, I. (2014). Modeling of radon diffusion through soil. Odisha, India.: National Institute of Technology, ROURKELA.
- Swakon, J., kozak, K., Paszkowski, M., Gradzinski, R., Loskiewicz, J., Mazur, J., . . . Olko, P. (2004). Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the krakow area. *Journal of environmental radioactivity*, 137-149.
- Tobar, J. G. (2014). Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el nivel de radón a corto plazo en un laboratorio subterráneo. *Nova Scientia*, *6*(2), 78-107.

UNSCEAR. (2008).

Viloria, T., Palacios, D., Sajo, L., Núñez, R., & Fernández, G. (2004). Concentraciones de Radón en la Zona Urbana de la Parroquia Cristo de Aranza, Estado Zulia, Venezuela. Nota Técnica. *Scientific Journal*, 283-289.

Worl Health Organization. (2009).

- Yakovleva, V., Nagorsky, P., Kondratyeva, A., & Mishina, N. (2016). The Influence of Meteorological Parameters and Other Factors on Soil Radon Dynamics. VII International Scientific Practical Conference "Innovative Technologies in Engineering", 1-6.
- Yousif, Z., Nadhala, K., Mohammed, B., Ameen, N., Jabr, Z., & Hammid, S. (2017).
 Measurement of Radon Activity in Soil Gas and the Geogenic Radon Potential
 Mapping Using RAD7 at Al-Tuwaitha Nuclear Site and the Surrounding Areas. *Radiation Science and Technology.*, 29-34.

7. Anexos

Anexo 1

Codificación de los detectores

Estación M	Estación Meteorológica [a]				
1	Tixán				
2	Llacao				
3	Santa Ana				
4	Quingeo				
5	Turi				
6	Baños				
7	Nulti				
8	Sayausí				

Ubica	ción (b)	Númer	o y espe	cificación (c)
S	Suelo 1	2-ene	1	sin membrana
			2	con membrana

Anexo 2

Fichas de las estaciones meteorológicas

CORRELACIÓN DE LAS VARIABLE	S METEOROLÓGICAS	Y FÍSICAS DEL S	SUELO, CON LA CONCEN CUENCA, E	ITRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OC CUADOR	HO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE						
			Profundidad cámara	de difusión 60cm							
			ESTAC	CIÓN							
Nombre	ESTACIÓN METEOROLÓGICA TIXÁN										
Ubicación		Х			Y						
		723017		91	586678						
Altitud				2725							
			DETEC	TOR							
Тіро		LR-115									
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tub PVC de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase d aluminio de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto del primer envase fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que el segundo envase no fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración de radón, torón y su hijas.										
Fecha	•	Hora	Detector	Detector Reemplazado	Otros						
Fecha de colocación	05/06/2017	10:14 AM	1\$105/06/2017								
Fecha de colocación	05/06/2017	10:20 AM	1S205/06/2017								
Fecha de retiro	12/10/2017	11:45AM	1S107/09/2017								
Fecha de retiro	12/10/2017	11:50AM	1S207/09/2017								

CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE									
CUENCA, ECUADOR									
Suelo a 60 cm de protundidad									
Nombre				ESTACIÓN METEOROLÓGICA LL	ACAO				
Ubicación		Х			Y				
		730418			9685180				
Altitud				2542					
	·								
				DETECTOR					
Тіро				LR-115					
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PV de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminir de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la concentración de radón, toró y sus hijas.								
Fecha de reemplazo	18/09/2017	9:20 AM	2S106/07/2017	2S118/09/2017					
Fecha de reemplazo	18/09/2017	9:25 AM	2S206/07/2017	2S218/09/2017					
Fecha de retiro	12/10/2017	10:25 AM	2\$118/09/2017						
Fecha de retiro	12/10/2017	12/10/2017 10:30 AM 2S218/09/2017							

CORRELACIÓN DE LAS VARIABL	ES METEOROLÓGICA	S Y FÍSICAS D	EL SUELO, CON LA	CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN E	L MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE			
CUENCA, ECUADOR								
Profundidad cámara de difusión 60cm								
				ESTACION				
Nombre				ESTACIÓN METEOROLÓGICA SA	ANTA ANA			
Ubicación		Х			Ŷ			
		730085			9672006			
Altitud				2651				
	DETECTOR							
Тіро				LR-115				
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PV de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminic de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la radón, torón y sus hijas.							
Fecha de reemplazo	18/09/2017	10:55 AM	3S106/07/2017	3\$118/09/2017				
Fecha de reemplazo	18/09/2017	11:05 AM	3S206/07/2017	3S218/09/2017				
Fecha de retiro	12/10/207	3:05 PM	3S118/09/2017					
Fecha de retiro	12/10/2017	3:10 PM	3S218/09/2017		El dispositivo que contiene el detector, el que esta con envoplast contenia agua			

CORRELACIÓN DE LAS VA	RIABLES METEOROLÓGICAS	FÍSICAS DEL	SUELO, CON LA CONC	CENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, E	EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR			
			Sue	elo a 60 cm de profundidad				
				ESTACIÓN				
Nombre				ESTACIÓN METEOROLÓGICA Q	JINGEO			
Ubicación		Х			γ			
		729055			9664593			
Altitud				2895				
				DETECTOR				
Тіро				LR-115				
Técnica	Perforación de 2 hu diámetro y 0.60 m de en el que se introc extremo abierto	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PVC de 0.07 m diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminio de 355 ml y 0.06 m de diár en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares extremo abierto del primer envase fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que el segundo envase no fue cubierto co Envoplast el cual mide la concentración de radón, torón y sus hijas.						
Fecha de reemplazo	18/09/2017	11:40 AM	4S106/07/2017	4\$118/09/2017				
Fecha de reemplazo	18/09/2017	11:45 AM	4S206/07/2017	4S218/09/2017				
Fecha de retiro	12/10/2017	1:45 PM	4S118/09/2017					
Fecha de retiro	12/10/2017	1:50 PM	4S218/09/2017					

CORRELACIÓN DE LAS VARIABL	ES METEOROLÓGICAS	S Y FÍSICAS DI	EL SUELO, CON LA C	ONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISN ECUADOR	10, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA,			
			Profund	idad cámara de difusión 60cm				
				ESTACIÓN				
Nombre				ESTACIÓN METEOROLÓGICA	TURI			
		Х			γ			
Obicación		721103			9674971			
Altitud				2768				
				DETECTOR				
Тіро				LR-115				
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PVC de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminio de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la concentración de radón, torón y sus hijas.							
Fecha		Hora	Detector	Detector Reemplazado	Otros			
Fecha de colocación	05/06/2017	1:40 PM	55105/06/2017					
Fecha de colocación	05/06/2017	1:45 PM	55205/06/2017	FC4.0C/07/2017				
Fecha de reemplazo	06/07/2017	4:47 PM	55105/06/2017	55106/07/2017				
Fecha de reemplazo	06/07/2017	4:53 PIVI	55205/06/2017	55206/07/2017				
Fecha de reemplazo	18/09/2017	12:55 PM	55106/07/2017	55118/09/2017				
Fecha de reemplazo	18/09/2017	1:00 PIM	55206/07/2017	55218/09/2017				
Fecha de retiro	12/10/2017	10:00 AM	55118/09/2017					
Fecha de retiro	12/10/2017	12/10/2017 10:10 AM 5S218/09/2017						

CORRELACIÓN DE LAS VARIA	ABLES METEOROLÓGIC	AS Y FÍSICAS	DEL SUELO, CON LA C	CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MIS	MO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA,		
				ECUADOR			
			Profund	lidad cámara de difusión 60cm			
	<u>.</u>			ESTACIÓN			
Nombre				ESTACIÓN METEOROLÓGICA	BAÑOS		
		Х			γ		
Ubicación		712899			9672817		
Altitud				3062			
				DETECTOR			
Тіро				LR-115			
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PVC de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminio de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la concentración y sus hijas.						
Fecha		Hora	Detector	Detector Reemplazado	Otros		
Fecha de colocación	05/06/2017	9:30 AM	6\$105/06/2017				
Fecha de colocación	05/06/2017	9:35 AM	6S205/06/2017				
Fecha de reemplazo	07/09/2017	12:46 PM	6\$105/06/2017	6S107/09/2017			
Fecha de reemplazo	07/09/2017	12:53 PM	6S205/06/2017	6S207/09/2017			
Fecha de retiro	28/09/2017	12:30 PM	6S107/09/2017				
Fecha de retiro	28/09/2017	12:35 PM	65207/09/2017				

CORRELACIÓN DE LAS VARI	IABLES METEOROLÓG	GICAS Y FÍSICA	AS DEL SUELO, CON L	A CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN I	EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA,			
			Profu	undidad cámara de difusión 60cm				
				ESTACIÓN				
Nombre		ESTACIÓN METEOROLÓGICA NULTI						
l lhimeite		Х			γ			
Ubicación		729704			9682466			
Altitud				2623				
	•			DETECTOR				
Тіро				LR-115				
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PVC de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminio de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la concentración de radón, torón y sus hijas.							
Fecha		Hora	Detector	Detector Reemplazado	Otros			
Fecha de colocación	07/06/2017	2:45 PM	7S107/06/2017					
Fecha de colocación	07/06/2017	2:50 PM	7S207/06/2017					
Fecha de reemplazo	07/09/2017	9:22 AM	7S107/06/2017	7S107/09/2017				
Fecha de reemplazo	07/09/2017	9:28 AM	7S207/06/2017	7S207/09/2017				
Fecha de retiro	12/10/2017	4:30 PM	7S107/09/2017					
Fecha de retiro	12/10/2017	4:35 PM	7S207/09/2017					

CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FÍSICAS DEL SUELO, CON LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN EL MISMO, EN OCHO PUNTOS DE LA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR									
Profundidad cámara de difusión 60cm									
ESTACIÓN									
Nombre				ESTACIÓN METE	OROLÓGICA SAYAUSÍ				
liktor at 6 a	X Y								
Ubicación		715974			9681200				
Altitud					2727				
				DETECTOR					
Тіро	LR-115								
Técnica	Perforación de 2 huecos de 0.60 m de profundidad con un diámetro de 0.07 m aproximadamente en los cuales se introdujo en cada hueco un tubo PVC de 0.07 m de diámetro y 0.60 m de largo, el cual valió de protección para la cámara de difusión de radón la cual se compone de un envase de aluminio de 355 ml y 0.06 m de diámetro en el que se introdujo un pedazo de espuma flex del mismo diámetro y 1 cm de espesor, en donde se colocó una lámina del detector sólido de trazas nucleares. El extremo abierto de la primera cámara de difusión fue cubierto con Envoplast el cual mide la concentración solo de radón, mientras que la segunda cámara de difusión no fue cubierta con Envoplast el cual mide la concentración de radón, torón y sus hijas.								
Fecha	1	Hora	Detector	Detector Reemplazado	Otros				
Fecha de colocación	07/06/2017	10:20 AM	8\$107/06/2017						
Fecha de colocación	07/06/2017	10:25 AM	8\$207/06/2017						
Fecha de reemplazo	07/09/2017	10:50 AM	8\$107/06/2017	85107/09/2017	El dispositivo de protección de la camara de difusión sin cubierta de Envoplast contenía agua				
Fecha de reemplazo	07/09/2017	10:55 AM	8S207/06/2017	8S207/09/2017	La cámara de difusión con cubierta de Envoplast contenía agua				
Fecha de retiro	12/10/2017	5:30 PM	8\$107/09/2017		El dispositivo de protección de la cámara de difusión sin cubierta de Envoplast contenía agua				
Fecha de retiro	12/10/2017	5:35 PM	8\$207/09/2017		La cámara de difusión con cubierta de Envoplast contenía agua				

Anexo 3

Glosario

- Correlación de Pearson: Es una prueba estadística que nos permite analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón. Su valor está comprendido entre -1 y 1 cuyo signo coincide con la pendiente de la recta de regresión y cuya magnitud está relacionada con el grado de dependencia lineal entre dos variables.
- Explorar: Este análisis se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución identificando valores atípicos, discontinuidades, concentraciones de valores, forma de la distribución. Este análisis se puede efectuar sobre todos los casos conjuntamente o de forma separada por grupos. Además permite comprobar a partir de gráficas y contrastes no paramétricos, si los datos han sido extraídos de una población con distribución aproximadamente normal.
- Nivel de significación: Permite establecer el nivel de significación con el que se desea llevar a cabo las comparaciones múltiples.
- R²: El coeficiente de determinación se define como la proporción en la variación de la variable respuesta que se explica por factores independientes. Su valor va entre 0 y 1, siendo 1 el valor correspondiente a un ajuste perfecto.
- R²-corregido: El coeficiente de determinación corregido, tiene en cuenta el tamaño de la muestra y los grados de libertad de los factores independientes, con esto asegura que el coeficiente de determinación no esté sobreestimado, es decir, que haya un exceso de variables en el modelo.
- **Radiosensibles:** Órganos o tejidos que contengan células radiosensibles serán más sensibles a las radiaciones ionizantes, es decir, cuyo índice de cariocinesis es

muy elevado, como la médula ósea, bazo, timo, nódulos linfáticos, gónadas, cristalino, linfocitos.

- Tukey: Diferencia significativa de Tukey, equivale a utilizar el método de Student-Newman-Keuls con r = J = n° de medias, es decir, todas las comparaciones son referidas a una misma diferencia mínima. Siendo uno de los métodos de mayor aceptación.
- VIF: El factor de inflación de la varianza sirve para detectar multicolinealidad en el modelo, que consiste en que al menos dos variables independientes tienen una correlación alta entre sí. Si el factor VIF de las variables supera 10 entonces se supone que hay multicolinealidad en el modelo.