



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN
SUELO MEDIANTE EL MÉTODO WEEKS EN LA FALLA
PALLATANGA EN EL SECTOR DE CAJABAMBA**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORAS: EVELIN LILIANA GUILLCA GUAMÁN

KATHYA MILENA NARANJO BUENAÑO

DIRECTOR: Dr. MIGUEL TASAMBAY SALAZAR PhD.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Evelin Liliana Guilca Guamán & Kathya Milena Naranjo Buenaño

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

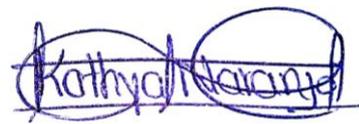
Nosotras, EVELIN LILIANA GUILLCA GUAMAN y KATHYA MILENA NARANJO BUENAÑO, declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autoras asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 26 de mayo de 2022



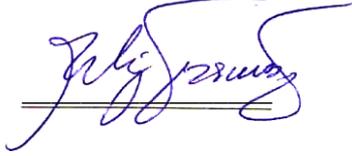
Evelin Liliana Guillca Guamán
0605503846



Kathya Milena Naranjo Buenaño
0604676239

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN SUELO MEDIANTE EL MÉTODO WEEKS EN LA FALLA PALLATANGA EN EL SECTOR DE CAJAMBAMBA**, realizado por las señoritas: **EVELIN LILIANA GUILLCA GUAMÁN y KATHYA MILENA NARANJO BUENAÑO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Juan Carlos González García MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-05-26
Dr. Miguel Tasambay Salazar PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-05-26
Dra. Jhenny del Carmen Orbe Ordoñez PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-05-26

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios por dotarme de sabiduría y fuerza para culminar mis estudios.

A mis padres, Carmelina Guamán y Segundo Guillca, por su apoyo incondicional en el ámbito moral y económico; gracias por los consejos, por haber confiado en mí y permitirme cumplir mis objetivos.

A mi hermana Lis por ser mi guía, soporte, por alentarme a luchar por mis sueños y enseñarme que todo esfuerzo tiene una recompensa.

Evelin

En primer lugar, a mis padres, Carlos Naranjo y Bertha Buenaño, por ser mi apoyo incondicional en esta etapa de mi vida; gracias por los consejos, fuerza y motivación para cumplir cada uno de mis objetivos.

Kathya

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, nuestro profundo agradecimiento a Dios, por ser nuestra guía y fortaleza en cada momento. Igualmente, a nuestros padres por su apoyo incondicional en esta y todas las etapas de mi vida.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, principalmente a los docentes de la carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, por haber sido parte fundamental en nuestra formación profesional; de igual forma a nuestros amigos, quienes han sido un gran apoyo.

Nuestro más sincero agradecimiento al Grupo de Investigación, Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático, especialmente a la Dr. Miguel Tasambay, al Ing. José Luis Herrera, por su paciencia, motivación, orientación y tiempo invertido en el presente proyecto de investigación.

Evelin & Kathya

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	2

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Marco Conceptual.....	5
1.2.1. <i>Falla geológica</i>	5
1.2.2. <i>Fallas geológicas en Ecuador</i>	5
1.2.2.1. <i>Falla geológica Pallatanga</i>	6
1.2.3. Radioactividad	7
1.2.3.1. <i>Radiactividad artificial</i>	7
1.2.3.2. <i>Radioactividad natural</i>	8
1.2.4. <i>Radioactividad de elementos químicos</i>	8
1.2.5. <i>Gas radón</i>	9
1.2.6. <i>Fuente</i>	10
1.2.7. <i>Propiedades fisicoquímicas</i>	12
1.2.7.1. <i>Propiedades físicas</i>	12
1.2.7.2. <i>Propiedades Químicas</i>	12
1.2.8. <i>Transporte</i>	13
1.2.8.1. <i>Difusión</i>	14
1.2.8.2. <i>Flujo en canales</i>	14
1.2.9. <i>Sistema de detección de gas radón en suelo</i>	15
1.2.9.1. <i>Detector RAD 7</i>	15
1.2.9.2. <i>Sonda de acero inoxidable para detección de gas</i>	16
1.2.9.3. <i>Unidad de secado</i>	17

1.2.9.4.	<i>Medición de gas radón</i>	18
1.2.10.	<i>Efectos en la salud por exposición a gas radón</i>	20
1.2.11.	Gas radón: El suelo	20
1.2.12.	Características fisicoquímicas del suelo	21
1.2.12.1.	<i>Estructura</i>	21
1.2.12.2.	<i>Textura</i>	22
1.2.12.3.	<i>Densidad aparente</i>	23
1.2.12.4.	<i>Humedad</i>	23
1.2.12.5.	<i>pH</i>	24
1.2.12.6.	<i>Conductividad eléctrica</i>	25
1.2.12.7.	<i>Materia orgánica</i>	25
1.3.	Base legal	26

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	29
2.1.	Área de Estudio	29
2.2.	Población y Muestra	30
2.2.1.	<i>Población</i>	30
2.2.2.	<i>Muestra</i>	30
2.3.	Tipo y diseño de la Investigación	30
2.3.1.	<i>Tipo de Investigación</i>	30
2.3.2.	<i>Variables</i>	30
2.3.2.1.	<i>Variable dependiente</i>	30
2.3.2.2.	<i>Variable independiente</i>	30
2.3.3.	<i>Diseño de la Investigación</i>	30
2.3.3.1.	<i>Selección de la Muestra</i>	30
2.4.	Metodología	31
2.4.1.	Fase de campo	31
2.4.1.1.	<i>Metodología de medición de gas radón-222 en el suelo</i>	33
2.4.1.2.	<i>Metodología de muestreo de suelo para análisis físico-químico</i>	35
2.4.1.3.	<i>Metodología para recolección de muestras de suelo para densidad aparente</i>	36
2.4.1.4.	<i>Variables meteorológicas</i>	37
2.4.2.	Fase de laboratorio	38
2.4.2.1.	<i>Densidad aparente</i>	38
2.4.2.2.	<i>pH y conductividad</i>	39
2.4.2.3.	<i>Estructura</i>	41

2.4.2.4.	<i>Textura</i>	43
2.4.2.5.	<i>Materia Orgánica</i>	45
2.4.2.6.	<i>Análisis Estadístico Inferencial</i>	48

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1.	Fase de campo	50
3.1.1.	<i>Variaciones meteorológicas</i>	52
3.2.	Fase de laboratorio	53
3.2.1.	<i>Densidad aparente</i>	53
3.2.2.	<i>pH y conductividad eléctrica</i>	55
3.2.3.	<i>Estructura</i>	56
3.2.4.	<i>Textura</i>	57
3.2.5.	<i>Materia orgánica</i>	58

	CONCLUSIONES	71
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	72
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Propiedades físicas del gas radón.....	12
Tabla 2-1:	Propiedades químicas del gas radón.....	13
Tabla 3-1:	Valores de pH en el suelo	24
Tabla 4-2:	Coordenadas de los puntos de muestreo.....	31
Tabla 5-2:	Clases de tamaño para los tipos de estructura del suelo	42
Tabla 6-3:	Datos obtenidos de las variables meteorológicas del equipo <i>Pocket Weather Meter</i>	52
Tabla 7-3:	Datos para cálculos y resultados de densidad aparente y humedad del suelo	53
Tabla 8-3:	Resultados de densidad aparente del suelo.....	54
Tabla 9-3:	Resultados de pH y conductividad eléctrica del suelo.....	55
Tabla 10-3:	Resultados de la estructura del suelo.....	56
Tabla 11-3:	Resultados de la textura del suelo	57
Tabla 12-3:	Datos para cálculo de materia orgánica del suelo.....	58
Tabla 13-3:	Resultados del análisis de materia orgánica en el suelo	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Fallas geológicas en Ecuador	6
Figura 2-1:	Cadena de desintegración radioactiva de Uranio-238 (^{238}U).....	10
Figura 3-1:	Factores que rigen el balance de radón en un subterráneo	11
Figura 4-1:	Sistema de detección de gas radón	15
Figura 5-1:	Detector RAD 7.....	15
Figura 6-1:	Detección de gas radón por la sonda de acero inoxidable.....	16
Figura 7-1:	Componentes de la sonda de acero inoxidable	17
Figura 8-1:	Tubos de secado y desecante	18
Figura 9-1:	Configuración normal del detector	18
Figura 10-1:	Acoplamiento de los componentes del sistema de detección de gas radón y torón.	19
Figura 11-1:	Tipos de estructura de suelo A: prismática, B: columnar, C: bloques angulares, D: bloques subangulares, E: laminar y F: granular	22
Figura 12-1:	Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla	22
Figura 13-1:	Diagrama triangular para la determinación de textura	23
Figura 14-1:	Formación de materia orgánica en el suelo.....	26
Figura 15-2:	Área de estudio en la Falla Pallatanga en el sector Cajabamba.....	29
Figura 16-2:	Puntos de muestreo en el sector Cajabamba.....	31
Figura 17-2:	Coordenadas en <i>GPS Essentials</i>	33
Figura 18-2:	Purga del detector RAD 7.....	33
Figura 19-2:	Perforación del suelo	34
Figura 20-2:	Colocación de yeso alrededor de la sonda	34
Figura 21-2:	Sistema de detección de gas radón en el suelo usando el detector Rad 7	35
Figura 22-2:	Medición de gas radón-222	35
Figura 23-2:	Recolección de la muestra de suelo	36
Figura 24-2:	Perforación del suelo con la ahoyadora	36
Figura 25-2:	Toma de muestras de cilindro.....	37
Figura 26-2:	Medidor de condiciones ambientales.....	38
Figura 27-2:	Muestras colocadas en la estufa.....	39
Figura 28-2:	Medición de pH.....	40
Figura 29-2:	Medición de conductividad	41
Figura 30-2:	Muestras de suelo húmedo	41
Figura 31-2:	Tipo de estructura de suelo y su formación	42

Figura 32-2:	Procedimiento de determinación de textura por el método de sensibilidad del tacto	44
Figura 33-2:	Trituración de las muestras.....	45
Figura 34-2:	Tamizado de muestras de suelo	45
Figura 35-2:	Muestras de suelo en fundas plásticas	46
Figura 36-2:	Crisoles en el horno mufla.....	46
Figura 37-2:	Pesaje de las muestras de suelo en crisoles.....	47
Figura 38-2:	Muestras de suelo en crisoles ubicados en la mufla.....	47
Figura 39-2:	Muestras de suelo en crisoles colocados en el desecador	48

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m^3) en el transecto 1.....	50
Gráfico 2-3:	Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m^3) en el transecto 2.....	51
Gráfico 3-3:	Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m^3) en el transecto 3.....	51
Gráfico 4-3:	Anomalías de concentración de radón en transectos (KBq/m^3).....	61
Gráfico 5-3:	Promedio de anomalías de concentración de radón en el área de estudio (KBq/m^3)	62
Gráfico 6-3:	Correlaciones entre las concentraciones de radón de los tres transectos	63
Gráfico 7-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y la presión barométrica de los tres transectos	64
Gráfico 8-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y humedad relativa de los tres transectos.....	65
Gráfico 9-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y pH de suelo de los tres transectos	66
Gráfico 10-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y conductividad eléctrica de los tres transectos	67
Gráfico 11-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y humedad de los tres transectos	68
Gráfico 12-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y densidad aparente de los tres transectos.....	69
Gráfico 13-3:	Correlaciones entre concentraciones de radón y materia orgánica de suelo de los tres transectos	70

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1:	pH	24
Ecuación 2-1:	Ionización de H ₂ O	24
Ecuación 3-2:	Densidad aparente	39
Ecuación 4-2:	Porcentaje de humedad.....	39
Ecuación 5-2:	Porcentaje de materia orgánica.....	48

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANOMALÍAS Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

ANEXO B: INTERFAZ DE CAPTURE

ANEXO C: AVAL DE LA INVESTIGACIÓN

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue estimar la concentración de gas radón en suelo mediante el método de Weeks en la falla Pallatanga sector de Cajabamba, para lo cual se establecieron treinta puntos de muestreo perpendiculares a la falla Pallatanga y se estableció la correlación entre las características fisicoquímicas del suelo (variable dependiente) y la concentración del gas (variable independiente). La investigación se realizó en una fase de campo y otra de laboratorio; en la primera se muestreo el suelo para su análisis fisicoquímico y se determinó la concentración de radón-222 en suelo mediante un sistema de detección conformado por el detector RAD 7, en el cual se establece el método weeks; una unidad de secado y una sonda de acero inoxidable, por un periodo de 2 horas en cada punto de muestreo. En la segunda fase, se calculó las características fisicoquímicas del suelo como pH húmedo, humedad, conductividad eléctrica, densidad aparente y materia orgánica, mediante métodos gravimétricos. Estadísticamente se determinó anomalías entre los resultados de la concentración de radón-222 y mediante el coeficiente de correlación de Pearson se determinó la correlación entre las variables. Se obtuvieron valores de concentración desde 2510 +/- 123 hasta 42000 +/- 503 Bq/m³, según al análisis estadístico, la concentración de radón-222 es mayor en puntos de mayor altitud y no muestra correlaciones significativas con las características fisicoquímicas del suelo. Por lo que se concluye que a menor altitud existe mayor concentración de gas y que esta no influye significativamente a las características fisicoquímicas del suelo. Se recomienda realizar otro estudio donde se correlacione parámetros gravimétricos que no han sido objeto de estudio de la presente investigación para complementar la información obtenida y determinar la concentración de radón-222 en invierno para determinar variaciones, ya el presente estudio se realizó en verano.

Palabras clave: <RADÓN>, <MÉTODO WEEKS>, <FALLA PALLATANGA>, <CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS>, <ANOMALÍAS>, <COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON>.



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**



1202-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The aim of this study was to estimate the concentration of radon gas present in the soil, using the Weeks method in the Pallatanga fault, Cajabamba area. Thirty sampling points whose location is perpendicular to the Pallatanga fault were established as well as the correlation between the physicochemical characteristics of the soil (dependent variable) and the concentration of the gas (independent variable). The research was carried out in two phases which were the field phase and the laboratory phase. During the first phase the soil was sampled for its physicochemical analysis and the concentration of radon-222 in soil was determined using a detection system consisting of a RAD 7 detector, in which the weeks method is established. In addition, a drying unit and a stainless-steel probe was used during a 2-hour period for each sampling point. In the second phase, the physicochemical characteristics of the soil, such as wet pH, humidity, electrical conductivity, bulk density and organic matter, were calculated using gravimetric methods. Anomalies were statistically determined among the results of radon-222 concentration and the correlation among variables was determined with the use of Pearson's correlation coefficient. Concentration values of 2510 +/- 123 to 42000 +/- 503 Bq/m³ were also obtained. According to the statistical analysis, radon-222 concentration increased at higher altitudes and does not show significant correlations with the physicochemical characteristics of the soil. Therefore, it is concluded that the lower the altitude, the higher the gas concentration and it does not influence on the physicochemical characteristics of the soil. It is recommended to carry out another study where gravimetric parameters which have not been studied in this research are correlated in order to integrate the information obtained and determine the concentration of radon-222 during winter. This will allow determining some variations, since the present study was carried out during summer.

Keywords: <RADON>, <WEEKS METHOD>, <PALLATANGA FAULT>, <PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS>, <ANOMALIES>, <PEARSON CORRELATION COEFFICIENT>.



Lic. Paul Armas Pesantes Ms.

060328987-7

INTRODUCCIÓN

El radón (^{222}Rn) es un gas noble incoloro e inerte, que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, se produce en rocas y suelos que contienen uranio el mismo que se desintegra formando radio y este a su vez se descompone emitiendo partículas alfa, dando origen al gas radón. La presencia de radón en los suelos varía de acuerdo a los niveles de mineralización de uranio por lo que la concentración de radón varía de un lugar a otro (Kulali, Akkurt y Özgür, 2017, p. 1).

El radón tiende a liberarse del suelo y concentrarse en lugares cerrados como minas subterráneas o viviendas convirtiéndose así en una forma de emisión de radiación ionizante recibida por la población en general. La Organización Mundial de la Salud en su Manual sobre Radón en Interiores afirma que la desintegración de radón, forma pequeñas partículas sólidas radiactivas que pueden irradiar a los tejidos en el tracto respiratorio, favoreciendo el desarrollo de enfermedades muy severas (Organización Mundial de la Salud, 2015, p. 17).

El lecho rocoso, la litología, deformación, discontinuidades tectónicas y esfuerzos corticales se asocian a las altas cantidades de gas radón en los suelos por lo cual en las zonas sísmicas la mayor concentración de gas radón se atribuye a su escape a través de fallas o fracturas de las rocas de la corteza (Rengifo et al. 2015, p. 58).

Las concentraciones relativamente altas de radón están asociadas con ciertos tipos de rocas y depósitos sedimentarios sueltos, y con la presencia de estructuras geológicas particulares, tales como “fallas activas”, pues estas fracturas en la corteza terrestre permiten una difusión más eficiente del gas radón a la superficie (Mingorance et al., 2018, p. 1).

El principal sistema de fallas activo del Ecuador es el Pallatanga-Chingual, que inicia en el Golfo de Guayaquil, pasa por la Isla Puná, se extiende por la zona de La Troncal, ingresa a la cordillera por Bucay y continúa por Pallatanga, donde su identificación es muy clara (Rivadeneira et al. 2007, p. 22).

En la zona de Cajabamba (provincia de Chimborazo-Ecuador) parte de la población se encuentra en constante contacto con radón por las emisiones provenientes de la falla geológica Pallatanga ya que su lugar de residencia o sus actividades económicas como la agricultura y ganadería están cerca de esta zona. Debido a la falta de información de la población acerca de los riesgos en la salud por el contacto con gas radón, es necesario, estimar los niveles de concentración existentes de este gas en este sector.

La presente investigación tiene el aval del proyecto “EXPLORACIÓN DE LA FALLA PALLATANGA CON TÉCNICAS NUCLEARES Y GEOFÍSICAS (RADÓN, MAGNETOMETRÍA Y GRAVIMETRÍA), ESTUDIO DE CASO DE UN ÁREA SÍSMICAMENTE ACTIVA EN ECUADOR”, además fue supervisado por el “Grupo de Investigación-Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático – GIDAC”

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estimar la concentración de gas radón en suelo mediante el método de Weeks en la falla Pallatanga sector de Cajabamba.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las zonas geográficas sobre las cuales se establecerán los puntos de medición.
- Medir la concentración de gas radón en el suelo utilizando el método de Weeks
- Establecer relaciones entre la concentración de gas radón en suelo con las características fisicoquímicas del suelo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

En el proyecto de investigación denominado “Concentraciones de radón-222 en el suelo de una zona del cantón Riobamba perpendicular a la falla Pallatanga” en donde a través de experimentos independientes en 32 puntos distribuidos en las parroquias San Juan, Calpi y Lizarzaburu del cantón Riobamba, se compararon dos procesos de sellado en la perforación del suelo para medir la concentración de gas radón demostrando que el proceso de sellado con yeso permite mediciones más precisas. Además, se compararon los protocolos Grab y Weeks para la cuantificación de radón con el detector RAD 7, los resultados mostraron que el protocolo Grab reporta incertidumbres mayores al 20% mientras que el protocolo Weeks presenta incertidumbres inferiores al 5%, Por lo que se concluye que el protocolo Weeks proporciona mayor exactitud para la medición de gas radón en el suelo. En cuanto a las concentraciones de radón, en los puntos próximos a la falla Pallatanga se obtuvieron valores altos en comparación con los demás puntos es decir a que cerca a la falla Pallatanga no se presentan altas concentraciones de radón en el suelo (Herrera y Cabascango, 2021, p. 37).

En el estudio denominado “Emisión de radón de los gases del suelo en las zonas de fallas activas de la capital de China y sus efectos ambientales”, se investigó la concentración de radón mediante mediciones *in situ* empleando un detector de radón SARAD RTM 2200, como resultado se identificaron dos especies principales de radón que se emiten del gas del suelo en las zonas de fallas activas, incluido el radón difundido y dispersado desde el suelo permeable y el afloramiento de las fallas (Chen et al. 2018, p. 2-10).

En una investigación realizada por Martín Rengifo, Reina Aranguren, Jaime Laffaille, Carlos Ferrer y Franck Audemard denominada “Mediciones de gas radón en un segmento de la falla de Boconó, Estados Táchira y Mérida”, verificaron la factibilidad de asociar anomalías de gas radón total con la posición de la traza de la falla en sitios planteados como una forma de evaluar que tan eficiente es el método al aplicarlo en los Andes venezolanos. Se utilizó el método activo para la medición de gas radón en suelos, donde se realizó un conjunto de perfiles transversales a la traza de la Falla de Boconó entre las poblaciones de La Grita y Santo Domingo. Se trazaron perfiles cortando escarpas de fallas, ensilladuras, lomos de obturación, trincheras, ciénagas de falla, morrena desplazada, depresiones y deslizamientos. Así, los resultados indican que en un 40% de los casos se detectó débilmente o no se logró detectar la traza de la falla, y que la eficacia del método y la caracterización efectuada, aparte de las condiciones ambientales y climáticas conocidas, puede verse afectada por las condiciones geológico - geomorfológicas de cada sitio.

Los valores relativos de mayor concentración de radón total se encuentran en la zona del Mocotíes y los más bajos en el páramo de Mucuchíes (Rengifo et al., 2015, p. 69-71).

En la investigación de “Anomalías del gas radón del suelo en tres zonas de estudio del centro-norte de Calabria” se utilizó un enfoque geoestadístico para estimar la distribución espacial de las concentraciones de radón en el suelo, mediante kriging ordinario multigaussiano, aquí se han evaluado las relaciones entre la distribución del gas en el suelo y características geoestructurales. Se aprecia que en el sector de Rossanese las concentraciones de radón en el suelo fueron más altas. Las mediciones de radón en el suelo revelan anomalías claramente relacionadas con las estructuras tectónicas. El aumento de las señales se distribuye linealmente a lo largo de las zonas de cizalla regionales con tendencia WNW-ESE de cizalla regionales. Por lo que se atribuye los epicentros de los terremotos históricos ocurridos entre 1184 y 2001 a los sistemas de fallas, además también se encontró que las concentraciones de radón en el suelo aumentan en general, con la disminución de la distancia a las fallas (Meza et al., 2018, p. 107-109).

En el estudio “Estimación mundial de la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible al radón residencial” se estimó la tasa de mortalidad por cáncer de pulmón debido a la concentración de gas radón residencial, para lo cual se utilizó un enfoque de fracción atribuible, mediante tres modelos para el exceso de riesgo relativo de cáncer de pulmón por radón. Las muertes por cáncer de pulmón atribuibles al radón en los 66 países totalizaron 226.057 en 2012 y representan una mediana del 3,0% del total de muertes por cáncer. Los hallazgos consistentes entre los tres modelos utilizados para estimar el exceso de riesgos relativos de cáncer de pulmón por radón, y entre la metodología de fracción atribuible y el análisis de la tabla de vida, confirman que el radón residencial es responsable de una proporción sustancial de la mortalidad por cáncer de pulmón en todo el mundo (Gaskin et al. 2018, p. 4-7).

En el Trabajo de Titulación denominado “Detección de gas Radón (^{222}Rn) en las unidades educativas de nivel superior del Distrito de Educación 06D01 Chambo-Riobamba con infraestructura antigua de la ciudad de Riobamba” se realizó la detección de radón empleando un detector pasivo ALPHA-E calibrado en Alemania, que posee una cámara de difusión con un diodo de silicio interno, la sensibilidad es de 1 cph equivalente a 100 Bq/m^3 , el rango de medida es de 20 Bq/m^3 a 10 MBq/m^3 , adicional a esto para medir la temperatura del aire, la humedad, la presión, y el software (DATA VIEW) cuenta con un sensor de inmersión el cual permite la descarga y visualización de datos. Para el presente estudio se tomó 23 unidades educativas, con infraestructuras que datan del año 1815 hasta el 2005. Se escogieron las plantas bajas de las unidades educativas para realizar la medición de radón. El tiempo de monitoreo fue de 8 días para las unidades educativas antiguas (1815-1970) y de 4 días para las unidades educativas modernas (1975-2005), todos en intervalos de ciclo de medición de 1 hora.

Las medias aritméticas de concentraciones de radón en las unidades educativas con infraestructura antigua y moderna con excepción de la unidad San Felipe Neri fueron generalmente bajas con un máximo menor a la mitad de los niveles de referencia propuestos por la Unión Europea y EE. UU, excepto en el caso de la unidad educativa San Felipe Neri que supera los niveles de referencia. También se evaluó la dosis equivalente por inhalación de radón en cada una de las unidades educativas en base a las concentraciones promedio de radón respectivas. Por lo cual se puede decir que la media de la concentración de radón en las construcciones modernas es menor que en las antiguas (Meza et al. 2018, p. 40-69).

1.2. Marco Conceptual

1.2.1. Falla geológica

Una falla geológica representa una discontinuidad física en la roca asociada con la deformación, exhibiendo un desplazamiento por corte (paralelo a la pared), las estructuras a pequeña escala se denominan fallas cortantes, mientras que una estructura de menor escala en una zona, junto con una o más superficies de deslizamiento principales se conoce como falla completamente desarrollada (Fossen, 2020, p. 119).

Las fallas son dislocaciones dentro de una unidad geológica, o unidades, a través de las cuales se ha producido un movimiento relativo. Las fallas se pueden reconocer ya que producen discontinuidades en color o textura. Estas discontinuidades se manifiestan como segmentos lineales o curvilíneos relativamente abruptos y las discontinuidades de color o textura son causadas por variaciones en uno, o una combinación, de la litología, vegetación, humedad, topografía y erosión del suelo (Glass, 2013, p. 69).

1.2.2. Fallas geológicas en Ecuador

Se define como una fractura en las rocas que por acción de las grandes fuerzas a la que está sometida, se mueve, provocando sismos. En Ecuador, producto de la interacción de las placas Nazca y Sudamericana se producen fuerzas importantes sobre los bordes de estas placas, dando lugar a fisuras en el interior de ellas, designándose fallas geológicas (Rivadeneira et al. 2007, p. 22).

El principal sistema de fallas activo del Ecuador es el Pallatanga-Chingual, que inicia en el Golfo de Guayaquil, pasa por la Isla Puná, se extiende por la zona de La Troncal, ingresa a la cordillera por Bucay y continúa por Pallatanga, donde su identificación es muy clara, hacia el norte se interna en el Callejón Interandino y continua hasta empatarse con la falla Chingual ubicada en el extremo nor oriental del volcán Cayambe (Rivadeneira et al. 2007, p. 22).

En el borde subandino de la Cordillera Oriental de los Andes, nace la falla Chingual y se dirige al sur pasando por el lado occidental del volcán El Reventador y continua hacia Baeza, hacia el oriente del borde subandino se identifica además el sistema de fallas inversas, es decir de

desplazamiento vertical, que limitan la parte este de los Andes de la llanura amazónica, y se extiende desde Colombia, pasando por el Ecuador y continuando hacia el Perú. Un sistema de fallas menos extensas corresponde a el sistema de fallas Quito, el sistema Pastocalle-Poaló-Saquisilí y el sistema de fallas El Ángel-San Gabriel (Rivadeneira et al. 2007, p. 23).

1.2.2.1. Falla geológica Pallatanga

Ecuador se encuentra dividido en zonas que se extienden paralelamente a la Cordillera Norte de los Andes, una de los terrenos oceánicos de la región costera y la Cordillera Occidental del Cretácico Superior y otra que es el sistema dinámico de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná como se muestra en la *Figura 1-1*, que también es el límite tectónico oriental de la "Franja Andina del Norte" y está relacionado con la subducción oblicua de la placa de Nazca (Carrión Mero et al., 2021, p. 3).

La falla Pallatanga tiene 200 km de largo extendiéndose por el valle encajonado del río Pangor y por la Cordillera Occidental hasta el pie del volcán Chimborazo. Hacia el norte la falla Pallatanga es interna y cruza la Cordillera Occidental, en el segmento Río Chimbo-Bucay de unos 20 km de largo, gran parte de la falla esta oculta debido a deslizamientos de tierra y laderas del lugar. Luego, el segmento Rumipamba-Pallatanga llega hasta la ciudad de Pallatanga y posteriormente sigue su curso hasta el río Pangor, donde debido a la elevación se observa un rastro definido de la falla. En la ciudad de Riobamba se observa como un grupo de segmentos subparalelos y finalmente al norte, hacia los volcanes Igualata y Chimborazo, en la topografía no se observa mayor perturbación por la falla (Baize et al., 2020, p. 5).

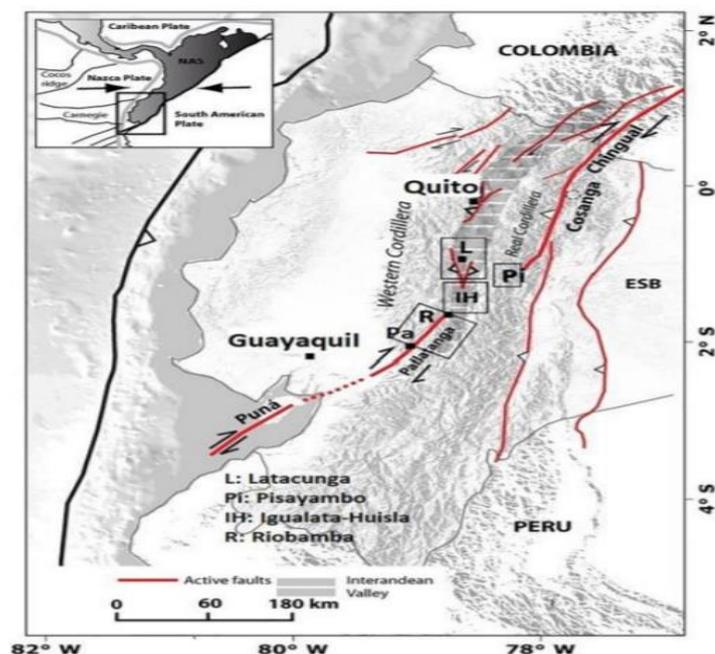


Figura 1-1: Fallas geológicas en Ecuador

Realizado por: Baize et al., 2020.

1.2.3. Radioactividad

La radioactividad es la propiedad que tienen algunos elementos para disociarse con el paso del tiempo dando lugar a nuevos átomos que pueden ser radioactivos o no (García-Chávez, 2015, p. 13). Se considera un fenómeno físico que estudia los procesos de desintegración espontánea de núcleos atómicos mediante la emisión de diferentes partículas subatómicas. Sus primeras observaciones son gracias al físico francés Antoine Henri Becquerel por el uso de sales de uranio para develar fotografías, demostrando que este elemento emitía una radiación muy penetrante. Aunque este término fue acuñado por Marie Sklodowska-Curie finales en 1903, la radioactividad ha estado siempre presente en la naturaleza y actualmente se la cataloga como una de las fuentes de energía más poderosa conocida (Vazquez Stanescu, Luna Cardozo y Sánchez Barboza, 2019, p. 2).

1.2.3.1. Radiactividad artificial

La radiación artificial es aquella proveniente de las actividades humanas, pues se ha utilizado para una gran variedad de propósitos, aunque se deben controlar la aplicación de medidas de protección, en ciertos casos se puede recibir una dosis relativamente pequeña de radiación (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 32).

En medicina se ha utilizado radiación para el diagnóstico y tratamiento de algunas enfermedades, por lo que representa el 98% de la exposición por fuentes artificiales, sin embargo el mayor rango de exposición implica la administración de dosis altas a los pacientes que si se aplica de forma incorrecta puede causar daños graves o la muerte (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 33).

Los reactores nucleares funcionan básicamente por una reacción en cadena donde ciertos isotopos de uranio o plutonio son golpeados por neutrones liberando dos núcleos más pequeños liberando energía y dos o más neutrones que pueden volver a golpear a núcleos de uranio y plutonio repitiendo la reacción, con el fin de aprovechar la energía liberada se utilizan centrales nucleares para producir electricidad (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 39). Se considera que la mayor exposición de radiación en centrales nucleares es por minería y tratamiento de uranio que producen una gran cantidad de residuos que contienen radionucleidos naturales (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 41).

Para la medición de la radioactividad, en el Sistema Internacional de Medidas (SI), se encuentra la unidad becquerel (Bq) que es equivalente a la desintegración de un núcleo radiactivo, de forma espontánea o provocada, por segundo. El curie (Ci), en el Sistema Inglés y equivale a 37000 millones de Bq (Vazquez Stanescu, Luna Cardozo y Sánchez Barboza, 2019, p. 60).

1.2.3.2. Radioactividad natural

Se denomina radiación natural a aquella proveniente del espacio exterior, así como del material radiactivo de la corteza y núcleo de la Tierra, este tipo de radiación es la causa de mayor parte de la exposición radiactiva de la población mundial, por ejemplo, en los edificios se puede retener gas radón o los materiales de construcción pueden tener radionucleidos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 28).

Los rayos cósmicos son una fuente de radiación natural, se originan principalmente en el espacio generalmente en erupciones volcánicas, al irradiar en la Tierra interactúan con elementos de la atmósfera produciendo radiación, sin embargo se sabe que debido al campo magnético del planeta se recibe mayor radiación cósmica en los polos en comparación con las regiones ecuatoriales, así mismo las zonas pobladas de mayor altitud están expuestas a mayor radiación debido a la menor presencia de aire que pueda actuar como protección (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 29).

La corteza terrestre está conformada principalmente por radionucleidos primigenios (como el potasio-40, uranio-238 y torio-232), que son elementos de vida extremadamente larga que junto a radionucleidos en los que estos decaen (como el radio-226 y el radón-222) emiten radiación al desintegrarse en el suelo, por ejemplo el gas radón es un elemento radioactivo proveniente de yacimientos de uranio-238, que al ser liberado de la corteza terrestre son retenidos por los pulmones e irradian las células del tracto respiratorio. Ciertos alimentos y bebidas podrían contener radionucleidos primigenios ya que se pueden transferir del suelo o agua a plantas y posteriormente a animales, por ejemplo los peces y moluscos presentan concentraciones relativamente altas de plomo-210 y polonio-210 (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016, p. 30).

1.2.4. Radioactividad de elementos químicos

En 1869, el ruso Dmitri Ivánovich Mendeléyev presenta por primera vez su sistema de ordenación de los elementos de la naturaleza, incluso los que estaban por descubrirse, en función de su peso atómico y relacionado con el peso molecular, recogiendo 63 elementos químicos. Actualmente, se incluyen 118 elementos químicos dentro de la tabla periódica convirtiéndose en una herramienta para predecir la apariencia y propiedades de la materia (Vazquez Stanescu, Luna Cardozo y Sánchez Barboza, 2019, p. 57).

La radiactividad natural la tienen los isótopos de los elementos con número atómico igual o mayor a 84. Los isótopos son variaciones de los elementos que tienen similar número atómico, pero diferente masa atómica, es decir el número de neutrones es diferente pero el de protones es el mismo (Vazquez Stanescu, Luna Cardozo y Sánchez Barboza, 2019, p. 58).

Además, existen isótopos inestables denominados también radioisótopos que al pasar por un proceso de desintegración nuclear emiten radiaciones ionizantes (García Moreno, 2018, p. 3).

La radiación ionizante es aquella que tiene la capacidad de sustraer electrones desde los átomos de la materia, inicialmente neutros, con los que interactúan produciendo pares electrón/ion (Morales-Aramburo y Puerta, 2020, p. 35).

En 1906, Norman Cambell y A. Wood descubrieron radiactividad β de baja intensidad en el potasio y el rubidio, posteriormente en 1932, George Hevesy y M. Pahl reportaron radiactividad en samario y posteriormente fueron encontrados varios otros elementos radiactivos presentes en la naturaleza. En la naturaleza solo se encuentran 15 radionucleidos radioactivos que son ^{40}K , ^{50}V , ^{87}Rb , ^{113}Cd , ^{115}In , ^{142}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{148}Sm , ^{149}Sm , ^{204}Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U (Iturbe García, 2001, p. 263).

1.2.5. Gas radón

El Radón (^{222}Rn) es un gas radioactivo e inerte o noble, es decir resistente a reaccionar químicamente, incoloro e inodoro de origen natural que se forma durante la desintegración de isótopos de uranio-238 (Ferrer 2012, p. 17).

Tiene una vida media de 3,8 días, es decir que al cabo de este intervalo de tiempo el número de átomos del mismo existentes en una muestra específica se reduce a la mitad por desintegración radiactiva, emanando radiación alfa, originando así elementos radioactivos no gaseosos que emiten radiaciones alfa, beta y gamma, al final de la cadena se forma un elemento estable denominado plomo (Quindós Poncela, Arteché García y Fuente Merino, 2006, p. 1).

Como ya se mencionó anteriormente la desintegración de gas radón emite radiación, esta a su vez puede interactuar con otros átomos y ionizarlos, es decir los átomos pasan a estar cargados negativa o positivamente debido a la ganancia o pérdida de electrones, la cadena de desintegración de radón se muestra en la *Figura 2-1*. La radiación ionizante tiene suficiente energía para desplazar a los electrones fuera de su órbita dando lugar a átomos cargados denominados iones. Cuando se emiten dos protones y dos neutrones se denomina desintegración α , en el caso de emisión de electrones se denomina desintegración β y cuando el nucleido no se estabiliza con la emisión de partículas se genera una intensa emisión de energía en forma de radiación electromagnética, constituida por fotones, que se denomina rayos γ (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente 2016, p. 5).

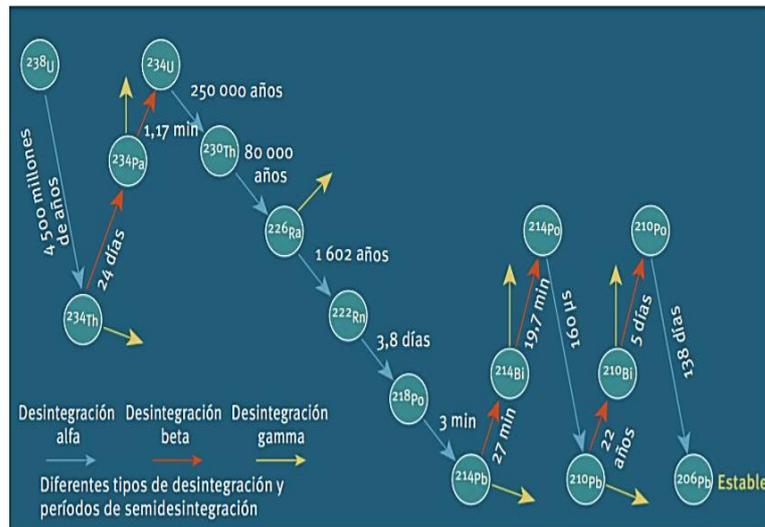


Figura 2-1: Cadena de desintegración radioactiva de Uranio-238 (^{238}U)

Realizado por: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016.

El uranio es capaz de asociarse con otros elementos y desplazarse con ellos, debido a que es un elemento químicamente muy activo y abundante en el planeta, su periodo de semidesintegración es de 4500 millones de años. El radio, es el eslabón en la cadena de decaimiento del uranio del cual proviene directamente el radón, tiene un periodo de 1602 años. Por esta razón, el radón se genera constantemente a pesar de su corto periodo de vida y ser un producto de la desintegración del uranio (García-Chávez, 2015, p. 6).

1.2.6. Fuente

Los repositorios de materiales radiactivos de ocurrencia natural (NORM, por sus siglas en inglés) albergan un contenido significativo de uranio o radio que pueden ser una fuente potencial de gas radón local, generando depósitos de este gas en el suelo que posteriormente será liberado a la atmosfera (Gutiérrez-Álvarez et al., 2021, p. 1).

Las concentraciones de gas radón en los poros y capilares de suelo por debajo de la superficie pueden alcanzar niveles de 55000 Bq/m^3 , sin embargo, esto también dependerá del lugar debido al grado de desintegración de uranio-238 y radio-226. Existe especial interés en cuevas, túneles y minas ya que en ciertas zonas se puede encontrar concentraciones cercanas a las del suelo, sin embargo, se puede propiciar la disminución de la concentración de radón dependiendo de los gradientes de temperatura favorables para el transporte convectivo vertical a través de aberturas relativamente grandes, movimientos del aire por fisuras o aberturas hacia el exterior y la concentración de uranio o radio, en la *Figura 3-1* se visualiza los factores que rigen el balance de radón en suelos subterráneos (Wilkening, 1990, p. 97).

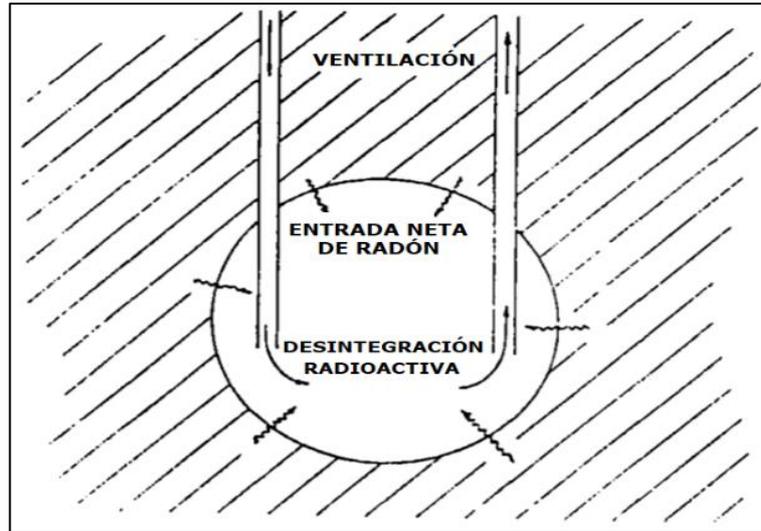


Figura 3-1: Factores que rigen el balance de radón en un subterráneo

Realizado por: Wilkening, 1990.

Las fallas y fracturas geológicas se consideran vías de migración del gas radón desde las capas profundas de la corteza hacia la superficie, debido a su mayor permeabilidad y porosidad en comparación con la roca circundante, lo que permite que los gases fluyan es decir migran con facilidad hacia la superficie, además se considera que la concentración de gas radón en fallas puede aumentar con la actividad de fallas y terremotos (Chen et al., 2018, p. 1).

Aunque se cree que los cambios en la concentración de radón del suelo pueden ser precursores de terremotos, la mejora o el agotamiento del radón de gas del suelo relacionados con el clima pueden causar una mala interpretación de los datos del gas en el suelo. Sin embargo, el monitoreo continuo y a largo plazo del gas radón en lugares cercanos o sobre fallas geológicas, junto con los datos meteorológicos y sismológicos, es importante para evaluar las relaciones con la actividad sísmica (Kulali, Akkurt y Özgür, 2017, p. 1).

En el ciclo del agua durante la condensación, se incluyen pequeñas cantidades de gas radón del air, por lo que el agua lluvia contiene alrededor de 50 Bq/m^3 , las aguas superficiales aproximadamente menos de 2000 Bq/m^3 y en los acuíferos subterráneos debido al contacto con uranio y radio se tienen una concentración aproximada de 20 y 44000 Bq/m^3 (Wilkening, 1990, p. 109).

En el agua de mar se encuentran niveles de radio y radón de aproximadamente 4 Bq/m^3 , cerca de la superficie del océano se encuentran bajos niveles de gas radón debido a que suele escapar hacia la atmosfera por la formación de burbujas y evaporación, mientras que en las profundidades existe mayor cantidad de radón debido a que los minerales del océano liberan una pequeña cantidad del gas. Rn se encuentra cerca de la superficie del océano debido al escape a través de la formación de burbujas y la evaporación, mientras que un exceso de ^{222}Rn sobre su padre ^{226}Ra existe cerca

del fondo del océano donde los minerales en el fondo del océano agregan un pequeño componente adicional. Dado que los átomos de radón no pueden escapar fácilmente de la superficie del agua en comparación con el suelo y rocas de las áreas continentales, las masas de aire marino contienen solo alrededor del 1% o menos de radón por unidad de volumen (Wilkening, 1990, p. 110).

En el agua se encuentran distribuidos los elementos radio, torio y uranio, por ende existe cantidades pequeñas de gas radón en los suelos, aguas y en la atmósfera. Se ha calculado que existen 374 L de radón en toda la atmósfera terrestre. Sobre la superficie de los océanos es en promedio de $2,0 \times 10^{-17}$ g/mL y en el aire sobre la superficie del suelo en promedio el contenido de radón es de $7,0 \times 10^{-16}$ g/mL (Garzon, 2009, p. 15).

1.2.7. Propiedades fisicoquímicas

1.2.7.1. Propiedades físicas

El radón es un gas que no tiene sabor, color, ni olor y, cuando se encuentra a temperaturas por debajo de su punto de congelación, muestra una brillantez fosforescente con tonos entre rojo-anaranjado y amarillo. Se disuelve muy poco en el agua y muy bien en disolventes orgánicos, por lo que la capacidad de disolución del radón es inversamente proporcional a la temperatura. Se disuelve en hidrocarburos y especialmente en ácidos grasos, donde su capacidad de disolución aumenta a medida que aumenta la masa molecular del ácido, algunas propiedades físicas del gas radón se tienen en la *Tabla 1-1* (Garzon 2009, p. 15).

Tabla 1-1: Propiedades físicas del gas radón

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (a 0 °C, $1,013 \times 10^5$ Pa) (kg/m ³)	9,730
Punto de fusión (°K)	202,000
Punto de ebullición (°K)	208,200
Entalpía de fusión (kJ/mol)	3,247
Entalpía de vaporización (kJ/mol)	18,000

Fuente: Baskaran, 2016.

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

1.2.7.2. Propiedades Químicas

Han sido reportados algunos compuestos del radón con elementos muy activos como el fluoruro y el cloruro, a pesar de que ha sido clasificado como un gas noble. La inhalación de los productos sólidos de la desintegración de este gas puede afectar fuertemente los alvéolos pulmonares, es por ello que debe ser manipulada solo por expertos. Su contenido en los suelos está íntimamente relacionado con su composición mineralógica, aunque también presenta en algunas fuentes termales. En las minas de uranio se acumulan grandes cantidades de radón algunas propiedades físicas del gas radón se tienen en la *Tabla 2-1* (Garzon, 2009, p. 16).

Tabla 2-1: Propiedades químicas del gas radón

PROPIEDAD	VALOR
Fórmula molecular	Rn
Número atómico	86
Peso molecular	222
Configuración electrónica	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
Niveles electrónica	2,8,18,32,18,8
Orbital extremo	6p ⁶
Número de valencia	Se postulan: +4,+6,+8
Primer potencial de ionización	10,75 eV
Temperatura de fusión	-71,00 °C
Temperatura de ebullición	-61,00°C
Densidad en estado gaseoso	9,73 g/L
Gravedad específica en estado líquido	4,40 (-62°C)
Gravedad específica en estado sólido	4,00
Compuestos complejos	Rn•6H ₂ O Rn•2C ₆ H ₅ OH, Rn•2C ₆ H ₅ CH ₃
Compuestos inorgánicos	RnF ₂ RnF ₄ RnCl ₄
Propiedades organolépticas	incoloro, inodoro, insaboro

Fuente: Garzon, 2009.

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

1.2.8. Transporte

Al desintegrarse el radio se forma gas radón que se libera dentro de los poros, las fisuras y orificios del suelo que permiten que este gas ascienda a la superficie y se pueda liberar en el aire (García-Chávez, 2015, p. 9), es necesario conocer los procesos involucrados en el transporte de radón para determinar los niveles de radón en casa, exploración de uranio, predicción de terremotos y una mejor comprensión de la radiación natural en el entorno (Wilkening, 1990, p. 43).

El transporte de radón desde el suelo hasta superficie se relaciona con el tamaño y configuración de los espacios ocupados por el gas del suelo, pues los espacios pueden variar desde intersticios moleculares hasta grandes cavernas subterráneas, las aberturas pueden estar aisladas, interconectadas o sin salida y el volumen de los poros puede ser una fracción pequeña o no (Wilkening, 1990, p. 43).

El transporte de gas radón hacia la superficie se puede dividir en dos categorías:

1.2.8.1. Difusión

Es un proceso microscópico donde el gas radón del suelo fluye en dirección opuesta a la del gradiente de concentración creciente, es decir se mueve en dirección a concentraciones bajas, teniendo en cuenta que la longitud de propagación del gas radón es hasta aproximadamente 5 m de profundidad, la difusión molecular solo se limita a los primeros metros de la superficie del suelo (Wilkening, 1990, p. 44).

Para tener un mejor entendimiento del transporte de radón, a los poros interconectados del suelo se los trata como tubos o capilares cilíndricos, debido a la complejidad y diversidad de la estructura del suelo que da lugar a diversas estructuras de los medios porosos. La difusión de Knudsen en capilares finos se da cuando los capilares tienen diámetros pequeños en comparación con la trayectoria libre media de las moléculas de gas, aunque este tipo de difusión no es usual en el transporte de radón en profundidades cercanas a la superficie ya que los espacios de los poros en la mayoría de los suelos son demasiados gruesos, se sabe que predomina en la superficie lunar ya que los átomos de ^{222}Rn chocan exclusivamente con el material sólido del regolito lunar (Wilkening, 1990, p. 46).

La difusión molecular es el mecanismo de transporte usual de gas radón del suelo, el ^{222}Rn tiene una longitud de difusión de 2,2 m en aire, 1,55 m en poros de granos y 0,02 m en agua. La evolución de la concentración de radón a través de una superficie estará determinada por parámetros relacionados con el material (porosidad ϵ , densidad ρ , coeficiente de difusión efectiva D_e) y con la fracción de emanación (f), concentración de actividad del ^{226}Ra y constante de desintegración del ^{222}Rn ($2,1 \times 10^6$) s^{-1} (Ramírez et al., 2011, p. 4).

Además, el transporte de radón se da de acuerdo a el flujo de Poiseuille en largos capilares de sección transversal, en general este tipo de flujo es responsable del transporte ascendente del gas radón desde las profundidades del suelo hacia la superficie (Wilkening, 1990, p. 48).

1.2.8.2. Flujo en canales

Es un proceso macroscópico que se produce en grietas, fisuras y canales subterráneos, dependiendo del gradiente de presión, este tipo de movimiento se produce por el movimiento del aire. En otros casos el transporte requiere diferencias de temperatura favorables al transporte convectivo vertical a través de aberturas relativamente grandes, es decir a temperaturas altas la cantidad de radón se eleva en el aire y se liberan niveles ligeramente altos de radón a la atmosfera, se ha encontrado que los volcanes pueden liberar gas radón a través de fumarolas y penachos, sin embargo, la contribución general de radón a la atmosfera es insignificante (Wilkening, 1990, p. 49).

1.2.9. Sistema de detección de gas radón en suelo

El sistema de detección de gas radón en suelos consta de un detector RAD 7 y una sonda de acero inoxidable para detección de gas en suelo, unidos por tubos de vinilo a través de una unidad de secado, tal como se indica en la *Figura 4-1*.



Figura 4-1: Sistema de detección de gas radón

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2014.

1.2.9.1. Detector RAD 7

El detector RAD 7 (*Figura 5-1*) es un instrumento portátil que mide concentraciones de radón-222 y radón-230 (torón) en agua, suelo y aire, detecta la desintegración alfa de una hija del radón y torón, sin interferencias de otras radiaciones (DURRIDGE Company Inc., 2014, p. 10).

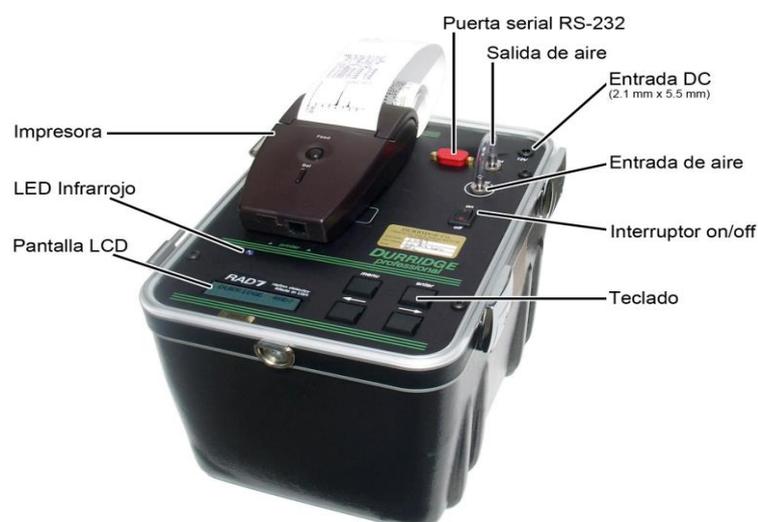


Figura 5-1: Detector RAD 7

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2014.

El sistema funciona a través de un detector en estado sólido con una celda de muestreo hemisférica de 0,7 litros, un detector de silicio está implantado en el centro de la celda de muestreo y convierte la radiación alfa directamente en señal eléctrica. Se aplica un alto potencial electrostático de alrededor de 2000 a 2500 V entre la pared interna de la celda de muestreo y el detector, para crear un campo eléctrico alto en todo el volumen de la celda de muestreo. El campo eléctrico permite que las partículas con radiación alfa (carga positiva) sean atraídas hacia la superficie activa del detector (Esan et al. 2020, p. 2).

Además del RAD 7 se pueden utilizar otros detectores para mediciones de radón por ejemplo el detector Geiger Müller que consiste en un tubo metálico sellado relleno de un gas que contiene en el centro un hilo muy fino con un alto voltaje entre el alambre y el cilindro (Martínez, 2017, p. 21). Otro detector utilizado es el EDA-200 que consiste principalmente en la detección de partículas α producidas por el decaimiento del gas radón (Martínez 2017, p. 22).

1.2.9.2. Sonda de acero inoxidable para detección de gas

La sonda de acero inoxidable es utilizada principalmente para detección de gas en suelos irregulares, el gas del suelo es atraído hacia la punta de la sonda a una velocidad baja, sube por el tubo de acero hasta el detector pasando por el tubo de secado para evitar el ingreso de humedad al equipo (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 5) como se indica en la *Figura 6-1*.

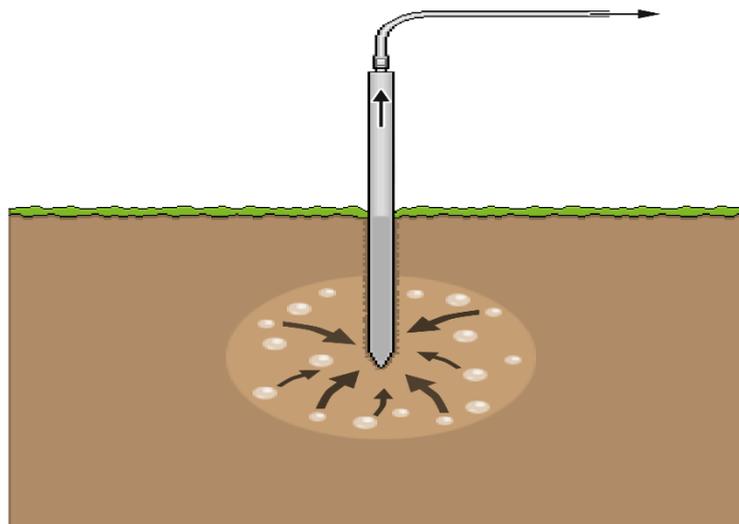


Figura 6-1: Detección de gas radón por la sonda de acero inoxidable

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2015.

De acuerdo al Manual de sondas de gas de DURRIDGE, la sonda de acero inoxidable consta de:

- A. Tubo de acero inoxidable de 91,44 cm de largo con varilla interna
- B. Tope de agua con medidor al vacío y válvula de cierre de agua
- C. Adaptador de manguera
- D. Adaptador de tubo
- E. Punta de la sonda de 35,56 cm de largo con varilla interna
- F. Cinta de teflón
- G. Mango en T con empuñaduras
- H. Acoplador para mango en T
- I. Juego de tubos de 0,32 cm de diámetro interior.

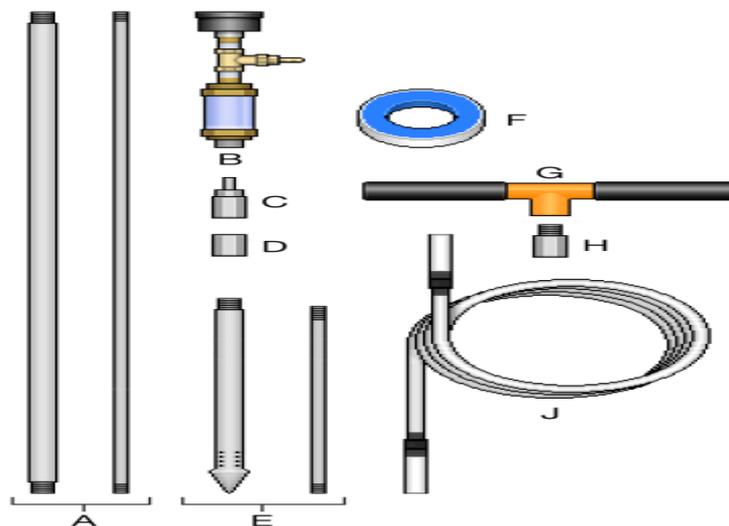


Figura 7-1: Componentes de la sonda de acero inoxidable

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2015.

1.2.9.3. Unidad de secado

La sonda se conecta al detector RAD 7, mediante tubos de secado donde se coloca el desecante Drierite, 8 mesh como se indica en la *Figura 8-1*, que es sulfato de calcio anhidro y mineral que tiene la capacidad de absorber el 14% de su propio peso en agua, se usa principalmente para secar el aire y gases a su nivel de humedad residual mas bajo (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 5).

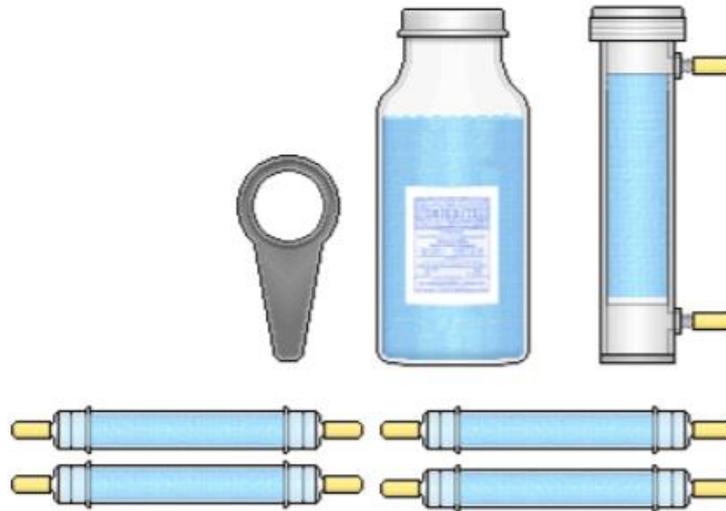


Figura 8-1: Tubos de secado y desecante

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2014.

En la *Figura 9-1* se indica como se conecta el detector RAD 7 a la unidad de secado, originalmente el desecante es de color azul, sin embargo a medida que se usa su coloración cambia a rosado, lo que indica su nivel de consumo.

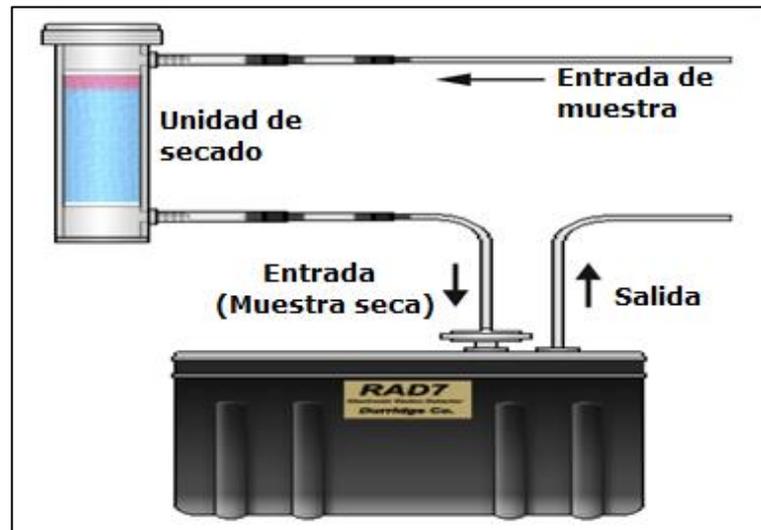


Figura 9-1: Configuración normal del detector

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2014.

1.2.9.4. Medición de gas radón

La medición se puede hacer por medio de tres métodos utilizando la sonda de acero inoxidable para detección de gas en suelo. Uno, por el método GRAB, otro mediante el método WEEKS y otro configurando el detector RAD 7 en modo THORON (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 9). En cualquiera de los tres métodos, los componentes externos del sistema de detección se acoplan como se indica en la *Figura 10-1*.

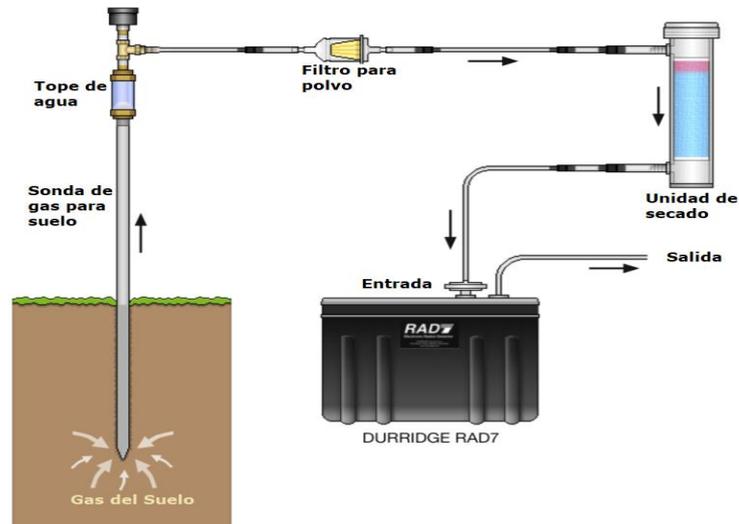


Figura 10-1: Acoplamiento de los componentes del sistema de detección de gas radón y torón

Realizado por: DURRIDGE Company Inc., 2015.

Antes de conectar el detector a la sonda se debe verificar el porcentaje de humedad relativa del equipo en la pantalla del RAD 7 (Menu → Status), si el valor no es el adecuado se conecta la unidad de secado y se inicia la purga (Test → Purge → [ENTER]) por 10 minutos o más con aire seco y fresco; para detener la purga se presiona [Menu] (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 9).

El método GRAB consiste en una lectura rápida y utiliza la menor cantidad de gas del suelo, en el RAD 7 se selecciona el método GRAB (Setup → Protocol → Grab → [ENTER]). La bomba del RAD 7 funciona durante 5 minutos por 4 ciclos, es decir el periodo de medición será de 20 minutos, al final imprimirá un resumen de la medición, incluido el promedio de gas radón. La precisión dependerá de la concentración de radón, y normalmente es mejor que $\pm 10\%$. Para el funcionamiento correcto del detector, la humedad relativa debe ser menor al 6% (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 9).

El método WEEKS es un método simple para medir concentración de radón, en este caso la humedad relativa del equipo debe ser menor al 10%, en el detector se selecciona el método Weeks (Setup → Protocol → Weeks → [ENTER]). El RAD 7 bombea gas los primeros 5 minutos de un periodo de dos horas y luego solo 1 minuto cada 5. Al finalizar el periodo, una lectura se imprime y se almacena en la memoria RAD 7. La precisión de las lecturas es de $\pm 5\%$ (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 10).

En el método THORON se utiliza ciclos de 5 minutos e imprime concentraciones de radón y torón al final de cada ciclo, sin embargo, el torón tiene una vida media corta (un minuto), por lo que la bomba tiene que funcionar continuamente. El formato de impresión debe establecerse en [CORTO] para ahorrar papel (DURRIDGE Company Inc. 2015, p. 11).

1.2.10. Efectos en la salud por exposición a gas radón

Las radiaciones ionizantes están presentes con gran frecuencia alrededor de los seres humanos pues están se encuentran en todos los lugares de la tierra. El radón y sus productos de descomposición están presentes el cualquier sitio donde exista radio y torio. En el medio terrestre, los isótopos de radón inhalados y sus productos secundarios constituyen casi dos tercios de la dosis total de tejido vivo. La radiación del radón y sus productos de desintegración se encuentra en formas adheridas y no adheridas en los tejidos sensibles del sistema respiratorio humano propagándose lentamente generando una amplia gama de problemas biológicos (Wilkening, 1990, p. 125).

Se sabe que aproximadamente el aire interior contiene 50 Bq/m^3 de gas radón, por lo tanto, aproximadamente 40 Bq/min se toman por los pulmones de los seres humanos, por lo general en las paredes superficiales de los bronquios, que conducen a los pulmones, se produce el mayor daño por la radiación de las partículas alfa de productos de descomposición. La capa mucosa en la superficie de los bronquios no es lo suficientemente apta como para absorber partículas alfa que pueden dañar las células basales. Para determinar la afección pulmonar se tiene en cuenta la vida media de los productos de desintegración de gas radón, la probabilidad de afección por otras actividades, fracción depositada en la región traqueobronquial y la tolerancia natural de los tejidos superficiales (Wilkening, 1990, p. 127). El grado de exposición de radón también está definido por el contacto en balnearios o aguas subterráneas, ya que existe bajas concentraciones de gas radón en aguas subterráneas y acuíferos por ejemplo en aguas termales se ha encontrado concentraciones de $1,5 \text{ Bq/m}^3$ en 1000 m^3 de agua (Wilkening 1990, p. 130).

El radón al ser radioactivo representa un riesgo biológico dado que se descompone en otros elementos libera energía, estos elementos son altamente radioactivos capaces de incrementar la probabilidad de generar un cáncer, de irradiar células basales sensibles. Las progenies metálicas del radón (polonio, plomo, talio, mercurio, radio y bismuto,) también se adhieren al aire y se inhalan, sedimentándose dentro de los pulmones. El radón ingresa al cuerpo humano por dos vías; ingestión e inhalación. Los efectos biológicos inician con el paso de partículas alfa individuales con una transferencia lineal de energía (LET) muy alta. Las partículas alfa ionizan múltiples sitios de ADN, de produciendo remociones y reordenamientos de regiones cromosómicas lo que conduce a inestabilidades genéticas implicadas en la creación y progresión de tumores (Guapizaca, 2018, p. 22).

1.2.11. Gas radón: El suelo

El suelo es el producto de la alteración, restructuración y organización de las capas superiores de la corteza terrestre, es el resultado de la interacción del clima, la roca madre, tiempo, relieve, seres vivos y a veces agua libre dentro de las capas freáticas (Barrios, 1985, p. 94).

El suelo es una estructura cuatridimensional donde persisten residuos y productos de la alteración de la capa mineral superficial de la corteza terrestre, materia orgánica de la biomasa asociada a esta capa superficial y los elementos que provienen de la atmósfera. La organización y evolución de esta estructura es el resultado de variaciones de formas de energía de toda clase que se manifiestan en la superficie de la tierra. Estas son permanentes (el peso), cíclicas (calor), acumulativas (seres vivos al comienzo de la evolución del suelo) y accidentales (acción del hombre) (Barrios, 1985, p. 94).

El lecho rocoso, la litología, deformación, discontinuidades tectónicas y esfuerzos corticales se asocian a las altas cantidades de gas radón en los suelos por lo cual en las zonas sísmicas la mayor concentración de gas radón se atribuye a su escape a través de fallas o fracturas de las rocas de la corteza (Rengifo et al. 2015, p. 58).

1.2.12. Características fisicoquímicas del suelo

Las propiedades físicas de los suelos determinan por ejemplo la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de raíces, aireación, capacidad de drenaje y almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes (Rucks et al., 2004, p. 2).

Las propiedades químicas del suelo se estudian para determinar sus componentes orgánicos e inorgánicos, y los fenómenos que dan lugar a la mezcla de dichos componentes (Cajas, 2018, p. 2).

1.2.12.1. Estructura

La estructura se define como el arreglo de las partículas del suelo que involucran arena, arcilla, limo (partículas primarias) y elementos estructurales que se forman por la agregación de las fracciones granulométricas (partículas secundarias). La estructura determina el espacio entre las partículas del suelo, depende del nivel de observación se puede clasificar en macroestructura y microestructura. La macroestructura es el arreglo de las partículas secundarias y primarias visibles y la microestructura es el arreglo de las partículas primarias para formar secundarias, los tipos de estructura del suelo se visualiza en la *Figura 11-1* (Rucks et al., 2004, p. 13).



Figura 11-1: Tipos de estructura de suelo A: prismática, B: columnar, C: bloques angulares, D: bloques subangulares, E: laminar y F: granular

Realizado por: Rucks et al., 2004.

1.2.12.2. Textura

La textura es la propiedad que representa las cantidades relativas en que se encuentran los elementos que componen el suelo, en la *Figura 12-1* se indica la relación de tamaño de partículas del suelo, arena (2-0,02 mm), limo (0,02-0,002 mm) y arcilla (0,002 mm). La textura influye en la velocidad de infiltración del agua, la facilidad del preparación o laboreo del suelo y el drenaje (Ramírez Carvajal, 1997, p. 10).

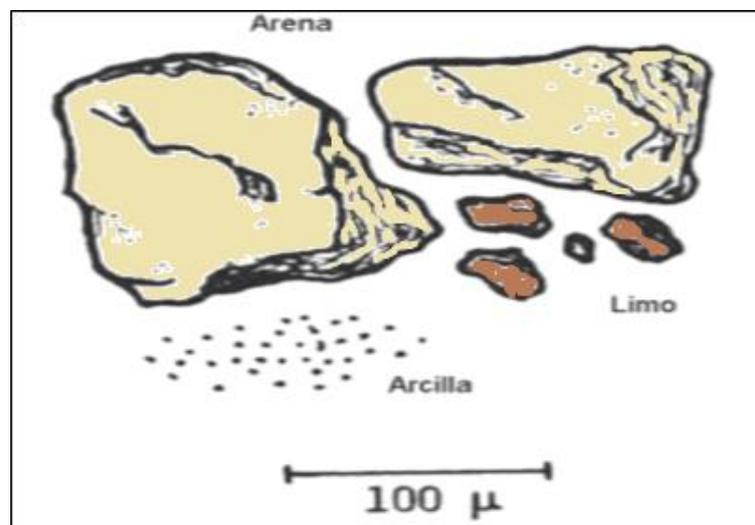


Figura 12-1: Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla

Realizado por: Rucks et al., 2004.

Para determinar la clase textural de un suelo, se recurre a varios métodos. Es más común el uso de diagramas triangulares usando como referencia un triángulo equilátero. Cada uno de los ejes del triángulo está graduado de 10 en 10, de 0 a 100 y cada eje representa arcilla, limo y arena. El interior del triángulo está dividido en casillas y cada una de ellas representa una clase estructural de suelo caracterizado por las porciones de suelo dominante (arenosos, limosos, arcillosos, arcillo arenosos, etc.) como se muestra en la *Figura 13-1* (Rucks et al., 2004, p. 8).

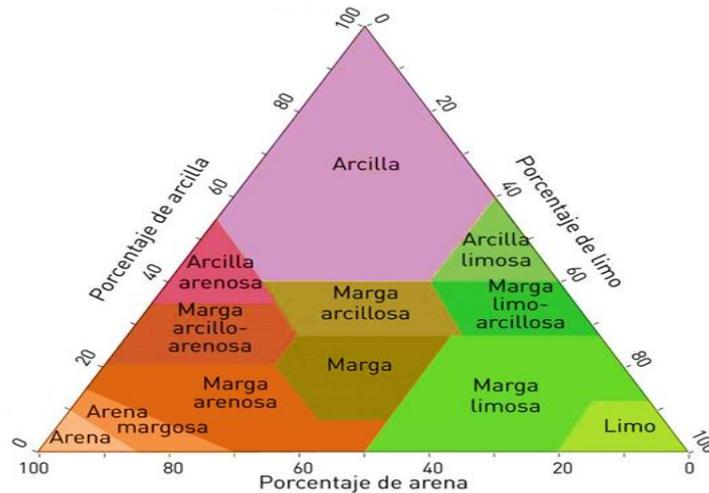


Figura 13-1: Diagrama triangular para la determinación de textura

Realizado por: Rucks et al., 2004.

1.2.12.3. Densidad aparente

La densidad aparente es la relación que existe entre la masa y el volumen de suelo incluso está considerado todo el espacio poroso existente, además es una característica que permite conocer las condiciones en las que se encuentra el suelo con respecto a la compactación, porosidad y la disponibilidad de agua y oxígeno (Ramírez Carvajal, 1997, p. 9).

La densidad se refiere al peso de las partículas del suelo por unidad de volumen, el uso principal de la determinación de la porosidad total del suelo y deducir los tipos de minerales predominantes en los diferentes suelos con base en los valores de densidad (Zambrano, 2020, p. 28).

1.2.12.4. Humedad

La humedad en el suelo se refiere a la cantidad de agua almacenada en los poros entre las partículas de suelo en la zona no saturada o zona vadosa, la humedad del suelo superficial se refiere al contenido de agua en los primeros 5 cm de suelo, mientras que la humedad en zona de raíces indica la disponibilidad de agua para las plantas que se considera a aproximadamente 200 cm de la superficie del suelo (Liang y Wang, 2020, p. 486).

La humedad es una variable clave para el entendimiento del intercambio de agua y energía térmica entre la superficie de la tierra y la atmósfera a través de la evaporación y transpiración vegetal.

Además, la humedad del suelo tiene efectos sobre los procesos climáticos, en particular sobre la temperatura del aire, la estabilidad de la capa límite y, en algunos casos, precipitación. La medición de la humedad del suelo es necesaria para recabar información acerca del clima, escorrentía y control de inundaciones, erosión del suelo, manejo de embalses, alerta de sequías, programación de riego, rendimiento de cultivos y calidad del agua por ejemplo para controlar el estrés hídrico de las plantas dependiendo del contenido de humedad se puede realizar un programa de riego (Liang y Wang 2020, p. 486).

1.2.12.5. pH

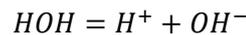
El pH mide el nivel de acidez o alcalinidad del suelo. Se define al pH como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno, tal como se muestra en la *Ecuación 1-1* (Pepper y Brusseau, 2019, p. 17).

Ecuación 1-1: pH

$$pH = -\log[H^+]$$

Usualmente, el agua ioniza H^+ y OH^- como indica la *Ecuación 2-1* (Pepper y Brusseau, 2019, p. 17).

Ecuación 2-1: Ionización de H₂O



Un valor de pH <7 indica acidez y un valor de pH >7 indica alcalinidad o basicidad. En áreas con alto grado de precipitación, los cationes tienden a filtrarse fuera del perfil del suelo, además estas áreas contienen mayor cantidad de materia orgánica que aporta con componentes ácidos y residuos lo que hace que los valores de pH sean bajos haciéndolos de naturaleza acida. En zonas áridas donde existe bajo grado de precipitación, la concentración de materia orgánica es baja y el agua tiende a evaporarse lo que hace que el suelo tienda a acumular sales, haciéndolo alcalino. En la *Tabla 3-1* se muestran los valores de acidez y basicidad en el suelo. El pH influye en la solubilidad de productos químicos al afectar el grado de ionización de los compuestos, por lo tanto el pH del suelo es crítico ya que afecta el transporte de contaminantes potenciales por el suelo y la zona insaturada (Pepper y Brusseau, 2019, p. 17).

Tabla 3-1: Valores de pH en el suelo

SUELO	VALOR PH
Acido	>5,5
Neutral	6–8
Alcalino	>8,5

Fuente: Pepper y Brusseau, 2019.

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

1.2.12.6. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en el suelo se refiere a la medida de salinidad en donde el contenido de sal en la suspensión de agua del suelo está determinado por la capacidad de esta suspensión para conducir electricidad entre dos electrodos, entonces mientras más concentración de sales exista mayor será la capacidad del suelo de conducir electricidad (Corwin y Yemoto, 2020, p. 1444).

Para determinar la conductividad eléctrica de una solución de suelo, en una celda que contiene electrodos de geometría constante y se impone un potencial eléctrico a través de los electrodos con lo cual se mide la resistencia de la solución entre los electrodos. La conductancia medida es una consecuencia de la concentración de sal de la solución y la geometría del electrodo, cuyos efectos se encarnan en una constante de celda (Corwin y Yemoto, 2020, p. 1444).

1.2.12.7. Materia orgánica

Constituye la fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales como hojas o material herbáceo, residuos animales y microorganismos, que son degradados por los microorganismos del suelo. En general los compuestos orgánicos solubles se metabolizan y descomponen rápidamente. sin embargo, otros son resistentes a la descomposición por ejemplo la lignina de los residuos vegetales. Con la descomposición microbiana se liberan nutrientes necesarios para el metabolismo microbiano o vegetal, además ciertos residuos se incorporan a grandes moléculas que forman la base estable de la materia orgánica (Pepper y Brusseau, 2019, p. 18).

Una vez formada la matriz orgánica estable se metaboliza lentamente por organismos autóctonos del suelo, aproximadamente se descompone un 2% de los materiales complejos anualmente. Debido a la lenta descomposición de la matriz orgánica y las adiciones nuevas, se mantiene un equilibrio donde la cantidad de materia orgánica del suelo es constante como se muestra en la *Figura 14-1*. En áreas húmedas con un alto nivel de precipitaciones, se puede llegar a tener un valor de materia organiza del 5% sobre la base de peso seco y en zonas áridas los valores suelen ser <1% (Pepper y Brusseau, 2019, p. 18).

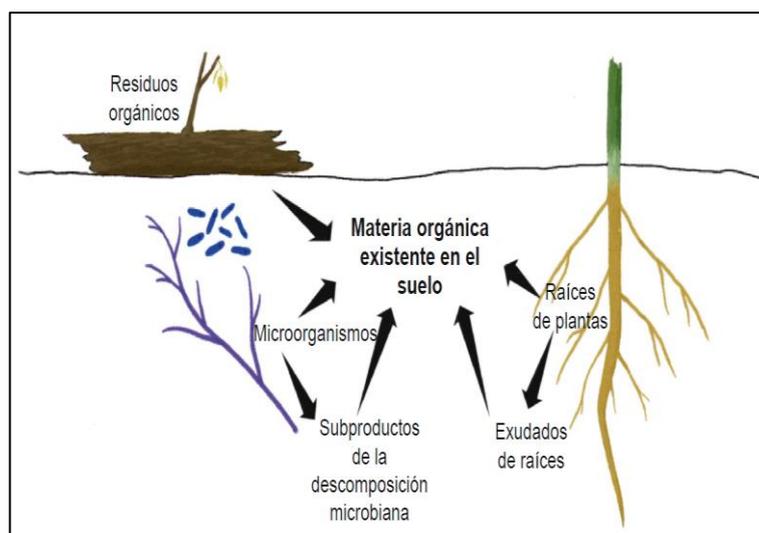


Figura 14-1: Formación de materia orgánica en el suelo

Realizado por: Pepper y Brusseau, 2019.

El contenido de materia orgánica se puede determinar a través del método de pérdida por ignición mediante el cual se oxida la materia orgánica a CO_2 a una temperatura elevada en un horno de mufla y mide la pérdida de peso. La temperatura de calentamiento es crítica porque la pérdida de peso también puede verse afectada por la pérdida de agua y minerales. Se impone una temperatura inicial de 150°C para asegurar la pérdida completa de agua higroscópica en yeso y para obtener un peso inicial sin agua en el suelo. El suelo se expone a una temperatura final de 360°C que oxida y elimina la materia orgánica antes de obtener un peso final. La temperatura final de 360°C es lo suficientemente baja como para evitar la pérdida de la mayoría de los minerales carbonatados con bajas temperaturas de descomposición térmica. Este método es una buena alternativa al método Walkley-Black que genera residuos peligrosos y al método de combustión térmica que es costoso para la instrumentación y los suministros (Crouse et al., 2014, p. 155).

El método Walkley-Black (WB) determina principalmente el carbono orgánico del suelo que se calcula a partir de la diferencia entre el dicromato total agregado y la cantidad de dicromato después de la oxidación total de carbono orgánico. al oxidar el carbono con dicromato ácido, sin embargo, por mucho tiempo fue el considerado el método estándar para determinar materia orgánica a partir de la fracción de carbono orgánico que reacciona con dicromato (Crouse et al., 2014, p. 157).

1.3. Base legal

Aunque las emisiones de radón son de origen natural, generan impacto ambiental y social por lo que se han promulgado reglamentos nacionales e internacionales que garanticen el derecho a vivir en un ambiente sano.

La (Organización Mundial de la Salud, 2015, p. 97) en su Manual de la OMS sobre el Radón en Interiores para establecer un nivel de referencia de gas radón en interiores se debe tomar en cuenta diversos factores nacionales, como la distribución del radón, el número de viviendas existentes con altas concentraciones de radón, la media aritmética de la concentración de radón en interiores y la prevalencia del tabaquismo. De acuerdo con estudios realizados, la OMS propone un nivel de referencia de 100 Bq/m³ para minimizar los riesgos para la salud derivados a la exposición al radón en interiores, si dicho nivel no pudiera alcanzarse, el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los 300 Bq/m³, anuales según cálculos recientes de la Comisión Internacional de Protección Radiológica.

La (Asamblea Nacional del Ecuador 2008, p. 12-189) en la Constitución de la República del Ecuador garantiza estos derechos en los siguientes artículos:

Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (Art 14).

El Estado ecuatoriano garantiza el derecho a la integridad de las personas que abarca el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza (Art. 66 numeral 27).

En caso de existir daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Para garantizar tanto el derecho individual como colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el estado se compromete a implementar mecanismos efectivos de prevención y control de contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales (Art. 397 numeral 2).

De igual manera el (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015, p. 13-228) en la Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente, LIBRO VI se estipulan los siguientes artículos:

Los objetivos del Ministerio del Ambiente son prevenir la contaminación, mantener y recuperar la calidad ambiental (Art. 3 numeral 2).

Para realizar una adecuada caracterización del suelo en los estudios ambientales, así como un adecuado control, se deberán realizar muestreos y monitoreos siguiendo las metodologías establecidas en la normativa correspondiente. La Autoridad Ambiental Competente y las entidades del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental, en el marco de sus competencias, realizarán el control de la calidad del suelo de conformidad con las normas técnicas expedidas para el efecto. Constituyen normas de calidad del suelo, características físico-químicas y biológicas que establecen la composición del suelo y lo hacen aceptable para garantizar el

equilibrio ecológico, la salud y el bienestar de la población (Art. 212, PARAGRAFO II, DEL SUELO).

Corresponde a características del aire ambiente como el tipo de sustancias que lo componen, la concentración y el periodo en el que se presentan en un lugar y tiempo determinado; estas características deben garantizar el equilibrio ecológico, la salud y el bienestar de la población (Artículo 219, PARÁGRAFO IV).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Área de Estudio

La presente investigación se desarrolló en dos lugares, el análisis de las muestras se desarrolló en el laboratorio del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la Panamericana Sur km 1 ½ en la ciudad de Riobamba.

La parte experimental se llevó a cabo en las parroquias urbanas Cajabamba y Sicalpa ubicadas en el cantón Colta en la provincia de Chimborazo como se puede ver en la *Figura 15-2*, el cantón Colta se encuentra al noroccidente de la provincia de Chimborazo, a 18 km de la ciudad de Riobamba, su superficie es irregular y posee alturas hasta de 3.100 msnm (Jeklin, 2016, p. 73 -74). Cajabamba cuenta con una población menor a 3.000 habitantes (GADPCH, 2020, p. 397). En este lugar ocurrieron procesos importantes que con el devenir del tiempo han sido parte fundamental para el desarrollo histórico, cultural y científico del país.

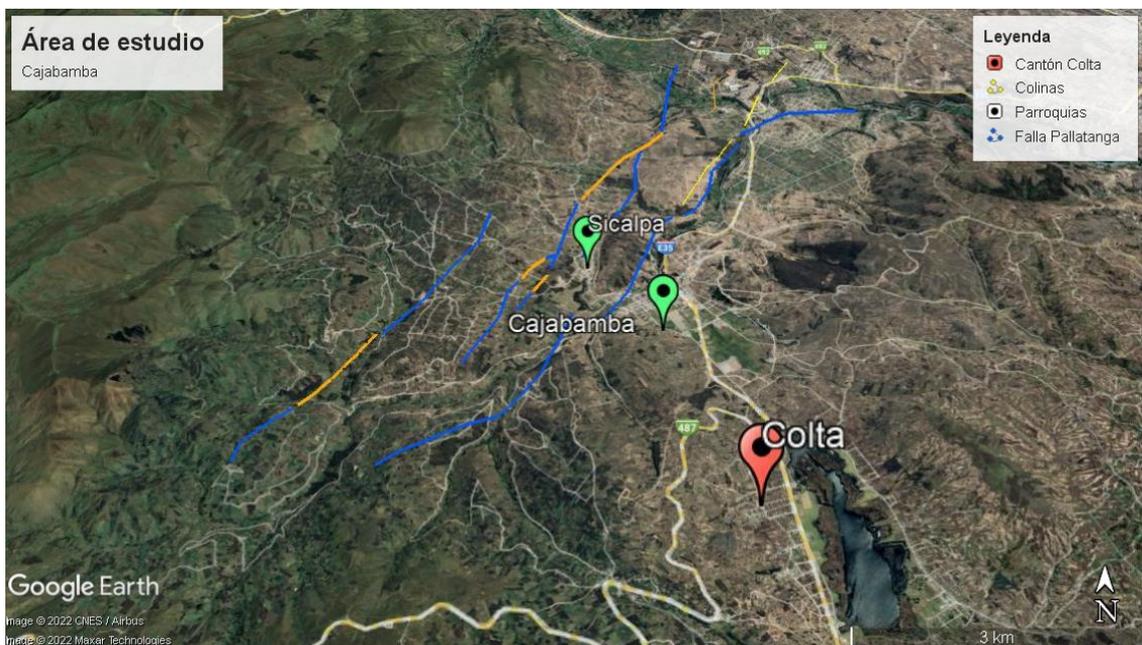


Figura 15-2: Área de estudio en la Falla Pallatanga en el sector Cajabamba

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.2. Población y Muestra

2.2.1. Población

Suelo del área transversal a la falla Pallatanga en el sector de Cajabamba.

Se realizó en el sector Cajabamba debido a que esta área presenta varias estructuras de desplazamiento de deformación por la actividad de la falla Pallatanga.

2.2.2. Muestra

Se tomaron 30 muestras a lo largo de 8 km² de área, es decir con una densidad de 3,75 puntos por kilómetro cuadrado de área, de acuerdo a trabajos similares como (Iovine et al., 2018, p. 15).

2.3. Tipo y diseño de la Investigación

2.3.1. Tipo de Investigación

Este proyecto de investigación es de tipo experimental debido a que se contrasta una hipótesis en función a las variables dependientes e independientes, para lo cual se realizó un muestreo discreto basado en una cuadrícula de puntos equidistantes (puntos de muestreo) en el área transversal a la falla Pallatanga sector de Cajabamba.

La hipótesis de investigación es, la concentración de gas radón en la falla Pallatanga en el sector de Cajabamba tiene una correlación significativa con ciertas características físico-químicas del suelo.

2.3.2. Variables

2.3.2.1. Variable dependiente

Características fisicoquímicas del suelo

2.3.2.2. Variable independiente

Concentración de gas radón-222 del suelo

2.3.3. Diseño de la Investigación

2.3.3.1. Selección de la Muestra

Para realizar la medición se utilizó un muestreo discreto basado en una cuadrícula de puntos equidistantes (puntos de muestreo) en el área transversal a la falla, con una distancia aproximada de 500 m entre cada punto, sin embargo, de acuerdo con las características locales como usos de

suelo, predios privados, pendientes, etc., los puntos de muestreo se modificaron ligeramente.

2.4. Metodología

2.4.1. Fase de campo

Como primer paso se revisó los puntos de muestreo ubicados en el sector Cajabamba en la aplicación *Google Earth Pro* como se puede observar en la *Figura 16-2*.

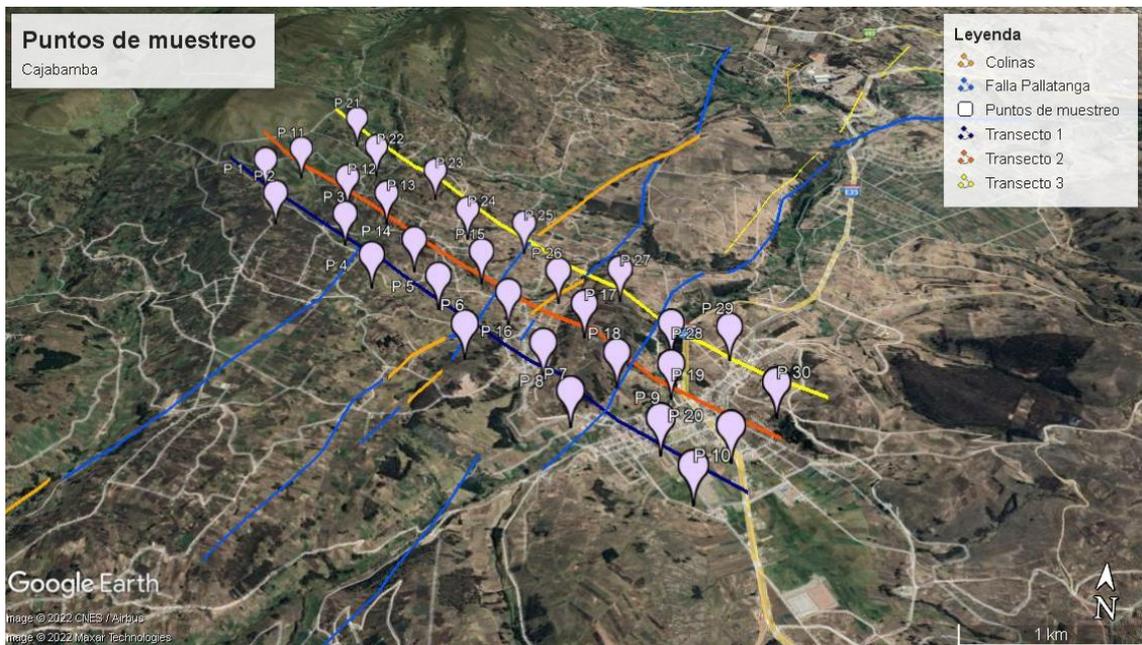


Figura 16-2: Puntos de muestreo en el sector Cajabamba

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

En la *Tabla 4-2* se muestra las coordenadas de cada punto.

Tabla 4-2: Coordenadas de los puntos de muestreo

PUNTO DE MUESTREO	UTM WGS84	
	X-COORD	Y-COORD
P 1	744345	9813758
P 2	744572	9813294
P 3	745160	9813170
P 4	745472	9812728
P 5	746004	9812604
P 6	746287	9812093
P 7	746859	9812019
P 8	747083	9811653
P 9	747707	9811456

P 10	747920	9811038
P 11	744580	9813988
P 12	745059	9813657
P 13	745411	9813530
P 14	745744	9812996
P 15	746273	9812990
P 16	746542	9812544
P 17	747127	9812392
P 18	747386	9812040
P 19	747777	9812005
P 20	748176	9811421
P 21	744912	9814591
P 22	745205	9814099
P 23	745736	9813954
P 24	746077	9813524
P 25	746558	9813437
P 26	746891	9812861
P 27	747369	9812895
P 28	747776	9812458
P 29	748207	9812418
P 30	748501	9811806

Fuente: GIDAC, 2021.

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

Para llegar con mayor facilidad y precisión a los puntos de muestreo del area de estudio se ubicaron las coordenadas (*Tabla 4- 2*) en la aplicación de *GPS Essentials* como se puede ver en la *Figura 17-2*.

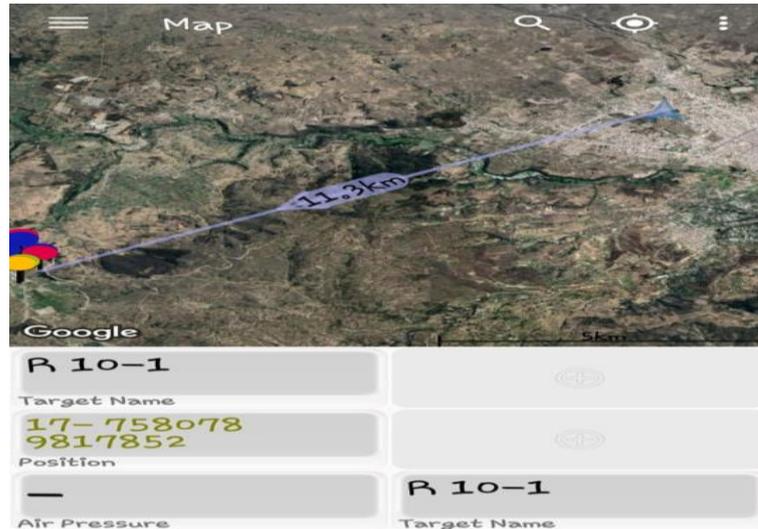


Figura 17-2: Coordenadas en *GPS Essentials*

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.1.1. Metodología de medición de gas radón-222 en el suelo

Una vez en el sitio de muestreo, se procedió a realizar lo siguiente:

- a) Se verificó el porcentaje de humedad utilizando los pasos descritos en la sección 1.2.9.4 del CAPÍTULO I y en función de esto se realizó la purga del equipo de 10 a 20 minutos utilizando la unidad de secado que esta conectada al detector RAD 7 mediante un sistema cerrado de tubos tal como se observa en la *Figura 18-2*. Una vez verificada la humedad óptima (*inferior al 10% según la sección 1.2.9.4 del CAPÍTULO I*) se detuvo el proceso de purgado.



Figura 18-2: Purga del detector RAD 7

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- b) Con la ayuda de un flexómetro, se marcó una medida de 1 m en el barreno de tipo holandés, posteriormente se lo ubicó sobre la superficie para perforar el suelo hasta la marca del barreno,

como se indica en la *Figura 19-2*.



Figura 19-2: Perforación del suelo

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- c) Una vez realizada la perforación en el suelo, se introdujo la sonda de acero inoxidable y se selló el orificio con el suelo del lugar asegurándose de que se compacte bien y al final se cubrió su alrededor con yeso para evitar cualquier escape del gas, como se puede apreciar en la *Figura 20-2*.



Figura 20-2: Colocación de yeso alrededor de la sonda

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- d) Se conectó la sonda de acero inoxidable al detector y a la unidad de secado de acuerdo a lo que se indica en la *Figura 10-1* del CAPÍTULO I, con el objetivo de conseguir la configuración experimental que se muestra en la *Figura 21-2*. Se selecciona el método Weeks a través del panel frontal del detector RAD 7 y se inició el test durante 2 horas como se visualiza en la

Figura 21-2. Al finalizar este ciclo el detector imprime el valor de la concentración de radón-222 en el suelo. Este valor también es almacenado en la memoria interna y se puede descargar a una PC usando el Software Capture.

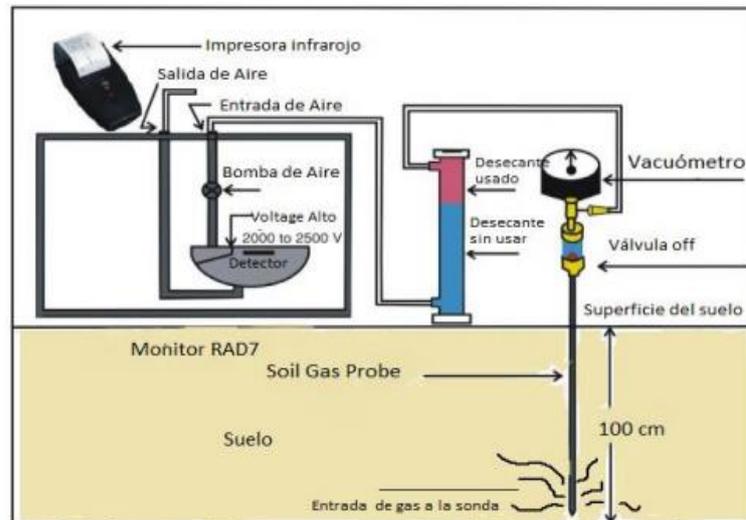


Figura 21-2: Sistema de detección de gas radón en el suelo usando el detector Rad 7

Realizado por: Cabascango, Jefferson; Herrera, Darwin, 2021.



Figura 22-2: Medición de gas radón-222

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.1.2. Metodología de muestreo de suelo para análisis físico-químico

- Limpeza de la superficie del suelo, eliminando restos de plantas u otros organismos que puedan dificultar la recolección de las muestras.
- Se ubicó el barreno de tipo holandés sobre la superficie y se procedió a perforar el suelo a una profundidad de 1 m, como se puede ver en la Figura 23-2.

- c) Una vez llegada a esta profundidad se realizó la respectiva toma de muestra del suelo en una funda de ziploc que se encontraba debidamente etiquetada, cuando la muestra estuvo en la funda se procedió a eliminar el aire para sellarla.



Figura 23-2: Recolección de la muestra de suelo

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.1.3. Metodología para recolección de muestras de suelo para densidad aparente

- a) Para obtener las muestras, se realizó una perforación con una ahoyadora hasta llegar a 1 m de profundidad como muestra la *Figura 24-2*.



Figura 24-2: Perforación del suelo con la ahoyadora

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- b) Al llegar a esta profundidad se introdujo un cilindro de metal en el fondo del agujero y una vez que se garantizó que este completamente lleno de la muestra se extrajo hacia la superficie

con mucho cuidado, con una espátula se retiró el exceso tratando de que la muestra quede al ras del cilindro, finalmente la muestra se cubrió herméticamente con plástico para evitar la pérdida de humedad, esto se puede apreciar en la *Figura 25-2*, finalmente se etiquetó con el nombre del punto de muestreo y fue llevado al laboratorio para su análisis respectivo.



Figura 25-2: Toma de muestras de cilindro

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.1.4. Variables meteorológicas

El muestreo inició el 29 de julio hasta el 23 de septiembre del 2021, es decir en temporada de verano, con una frecuencia de dos a tres veces por semana debido a los análisis en el laboratorio. Se usó el medidor meteorológico Kestrel 3500 Pocket *Weather Meter* que se encuentra en la *Figura 26-2*, este tiene la capacidad de medir variables ambientales como velocidad media y máxima del viento, humedad relativa, temperatura, presión barométrica y altitud (Paul y Limited, 2008, p. 1), cabe mencionar que este dispositivo debe estar ubicado en función de la dirección del viento y se debe esperar hasta que los valores se estabilicen para ser tomados. Además, se tomaron las coordenadas UTM con ayuda de un GPS.



Figura 26-2: Medidor de condiciones ambientales

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.2. Fase de laboratorio

En el laboratorio se realizó la determinación de las características físico-químicas del suelo que fueron: pH húmedo, conductividad eléctrica, densidad aparente, materia orgánica, textura y estructura.

2.4.2.1. Densidad aparente

Para realizar el análisis de densidad aparente se utilizó el método del cilindro de volumen conocido, que consiste en:

- a) En una balanza analítica se midió el peso de la muestra contenida en el cilindro en húmedo.
- b) Estas muestras se colocaron en envases de aluminio a 105 °C en la estufa durante 24 horas como se ve en la *Figura 27-2*.



Figura 27-2: Muestras colocadas en la estufa

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

c) Después del tiempo transcurrido, se pesó las muestras de cilindro en seco, los datos obtenidos del cilindro tanto húmedo como en seco, se colocaron en la base de datos.

Para obtener la densidad aparente de las muestras de suelo se ocupó la siguiente ecuación:

Ecuación 3-2: Densidad aparente

$$Da \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_s}{V}$$

Dónde:

Da = Densidad aparente

Ms = Masa de suelo en seco (g)

V= Volumen del cilindro conocido

También se calculó el porcentaje de humedad del cilindro mediante la siguiente *Ecuación 4-2*:

Ecuación 4-2: Porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{(M_{shumedo} - M_{seco\ estufa\ 105^{\circ}C})}{M_{shumedo}} \times 100$$

Donde

%H = Porcentaje de humedad

Mshumedo = Masa de suelo húmedo (g)

Mseco estufa 105°C = Masa de suelo seco estufa 105 °C (g)

2.4.2.2. pH y conductividad

Los análisis de pH y conductividad se encuentran entre los primeros en ser realizados después de

la toma de muestra.

Para medir el pH de las muestras se realizó lo siguiente:

- a) En una balanza analítica, se pesó 20 gramos de la muestra de suelo en un envase de plástico, posterior a esto se agregó 80 ml de agua destilada.
- b) Se agitó la mezcla con una varilla de manera constante por 10 minutos aproximadamente, y se dejó reposar 5 minutos.
- c) Con el potenciómetro de mesa se midieron los valores de pH en cada una de las muestras como se puede ver en la *Figura 28-2*, los valores obtenidos fueron ingresados en una base de datos.



Figura 28-2: Medición de pH

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

Para medir la conductividad:

- a) Se usaron las muestras de suelo previamente preparadas para medir el pH y se las dejó reposar durante 24 horas, antes de su medición.
- b) Se utilizó un conductímetro para realizar las mediciones, esto se puede apreciar en la *Figura 29-2*, los valores de conductividad obtenidos fueron ingresados en una base de datos uS/m.



Figura 29-2: Medición de conductividad

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- c) Después de realizar los análisis antes mencionados, las muestras residuales de las fundas ziploc fueron esparcidas sobre papel de empaque como lo indica la *Figura 30-2*, donde se dejó secar a temperatura ambiente durante 5 o 7 días hasta que eliminen la humedad contenida para análisis posteriores.



Figura 30-2: Muestras de suelo húmedo

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

2.4.2.3. Estructura

La estructura de suelo hace referencia a la organización natural de las partículas del suelo en unidades de suelo discretas agregados como resultantes de procesos patogenéticos (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, 2009, p. 45 - 48).

Los tipos básicos naturales de estructura de suelo se definen en la *Figura 31-2*:

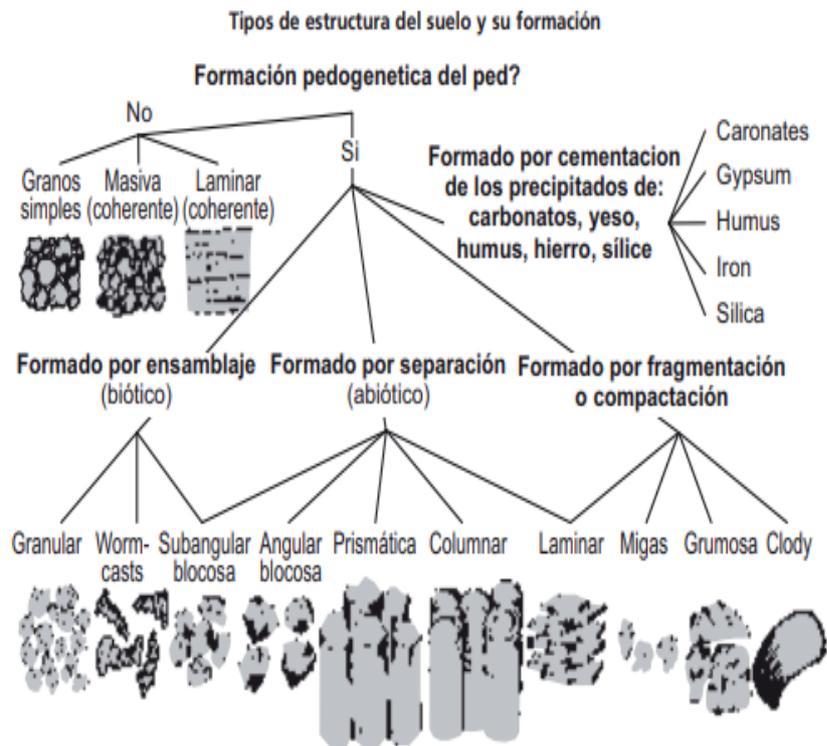


Figura 31-2: Tipo de estructura de suelo y su formación

Fuente: FAO, 2009.

Tabla 5-2: Clases de tamaño para los tipos de estructura del suelo

	<i>Granular/laminar (mm)</i>	<i>Prismática/columna/ forma de cuña (mm)</i>	<i>Blocosa/terrones/desmenizable/grumos (mm)</i>
<i>VF Muy Fino delgado</i>	<1	<10	<5
<i>FI Fino/delgado</i>	1-2	10-20	5-10
<i>ME Medio</i>	2-5	20-50	10-20
<i>CO Grueso/espeso</i>	5-10	50-100	20-50
<i>VC Muy grueso/espeso</i>	>10	100-500	>50
<i>EC Extremadamente grueso</i>	-	>500	-

Fuente: FAO, 2009.

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

Para determinar la estructura del suelo en el laboratorio se procedió a lo siguiente:

- a) Observar cada una de las muestras una vez que se encuentren esparcidas en el papel empaque
- b) Se escogió las estructuras de suelo más representativas de toda la muestra.
- c) Según la *Figura 31-2*, se verificó si se formó por ensamblaje, por separación o por

fragmentación, posterior a esto según la forma del suelo se ubicó en la respectiva subdivisión.

- d) Para el tamaño se hizo uso de una regla y de la *Tabla 5-2*.
- e) Cada una de las estructuras de suelo que se obtuvieron al momento de realizar el procedimiento de estructura, se colocaron en una base de datos en Excel.

2.4.2.4. Textura

Es la proporción relativa de las variedades de tamaño de partícula (fracciones o separación de suelo) en un volumen de suelo dado y es descrita como una clase de textura de suelo (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, 2009, p. 26).

La *Figura 32-2* indica el procedimiento para la determinación de la textura por el método de sensibilidad del tacto.

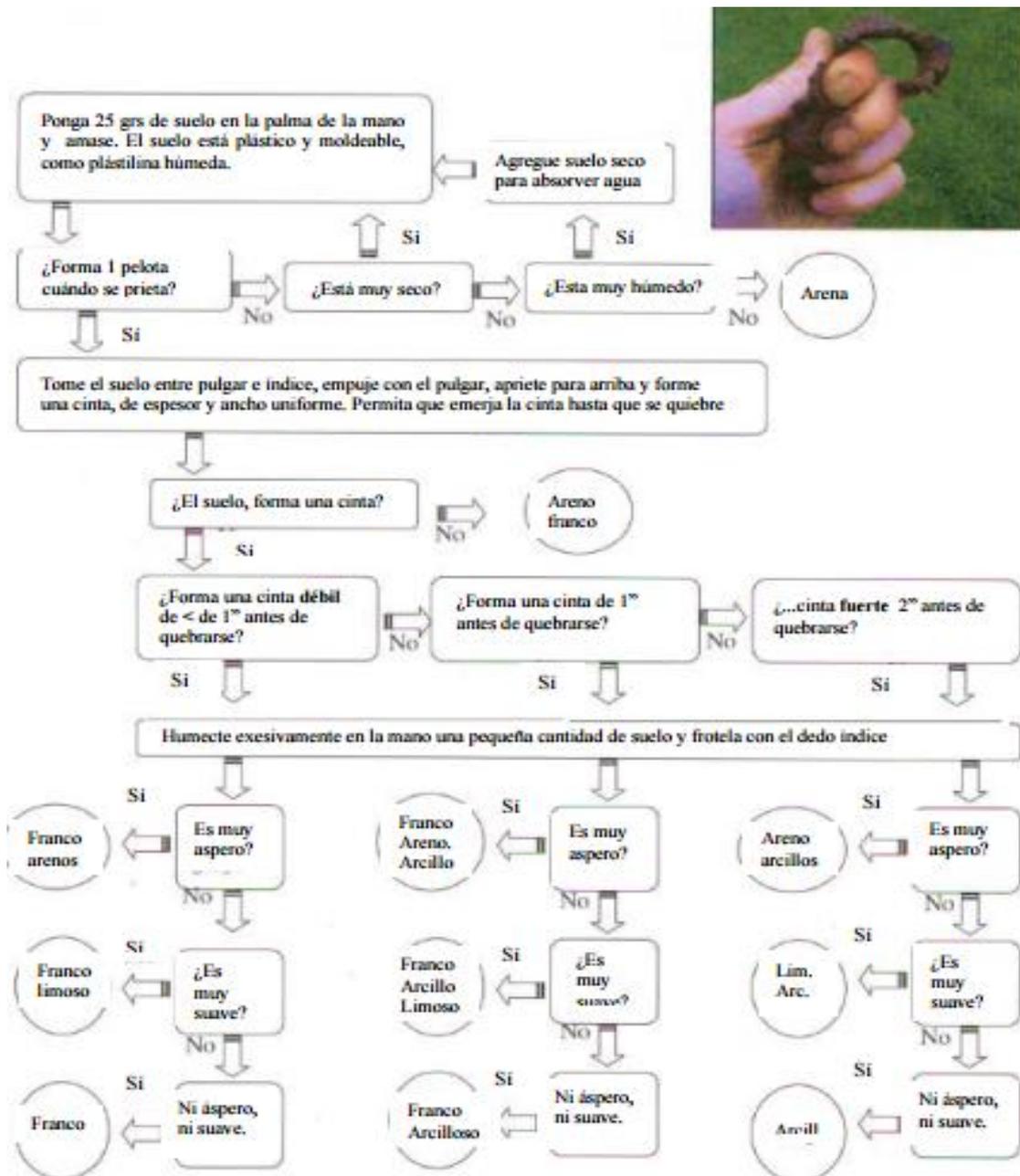


Figura 32-2: Procedimiento de determinación de textura por el método de sensibilidad del tacto

Fuente: FAO, 2009.

Para determinar la textura del suelo en el laboratorio se usó la *Figura 32-2*, realizándose lo siguiente:

- Se tomó una muestra pequeña de suelo, esta se colocó en la palma de la mano, se agregó una pequeña cantidad de agua hasta que se formó una masa moldeable.
- Se realizó una bola del suelo la misma que se ubicó entre los dedos índice y pulgar.
- Se ejerció una pequeña presión tratando de formar una cinta la cual tenía el espesor y tamaño uniforme.
- Se sigue el diagrama de flujo explicado en la *Figura 32-2*.

2.4.2.5. Materia Orgánica

Para el análisis de la materia orgánica del suelo se utilizó el método de pérdida de ignición (LOI) o también denominado método de calcinación que consiste en cuantificar el contenido de MO a partir de diferencias gravimétricas, después de que la muestra haya sido sometida a elevadas temperaturas durante un tiempo determinado (Dabadie et al., 2018, p. 2).

a) Una vez que las muestras se encontraban secas se procedió con su trituration debido a que existían grumos de suelo, esto se puede visualizar en la *Figura 33-2*.



Figura 33-2: Trituración de las muestras

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

b) Luego de que las muestras estén completamente trituradas se procedió a realizar el tamizado en un tamiz de 250 μm , esto se puede visualizar en la *Figura 34-2*.



Figura 34-2: Tamizado de muestras de suelo

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- c) Cada muestra obtenida del tamiz se colocó en una funda plástica, la cual debe estar debidamente etiquetada como se puede ver en la *Figura 35-2*.



Figura 35-2: Muestras de suelo en fundas plásticas

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- d) En el laboratorio se procedió a tarar los crisoles de 30ml correctamente lavados, estos fueron llevados a un horno mufla a 800 °C durante un tiempo de 2 horas; una vez transcurrido este tiempo se sacaron los crisoles de la mufla como se puede ver en la *Figura 36-2*, y fueron colocados en el desecador con silica gel, en donde permanecieron hasta alcanzar una temperatura ambiente; después los crisoles fueron pesados uno por uno en la balanza analítica, los datos obtenidos fueron registrados en una base de datos como Masa 1.



Figura 36-2: Crisoles en el horno mufla

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- e) En la balanza analítica, se pesaron 5 gramos de la muestra de suelo, previamente tamizada ($250\ \mu\text{m}$), en los crisoles tarados anteriormente como se puede observar en la *Figura 37-2*, los datos obtenidos se registraron en una base de datos como Masa 2.



Figura 37-2: Pesaje de las muestras de suelo en crisoles

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

- f) Los crisoles con las muestras de suelo fueron trasladados a la estufa a $105\ ^\circ\text{C}$, durante 24 horas, esto se puede ver en la *Figura 38-2*, una vez pasado este tiempo se colocaron las muestras en un desecador hasta conseguir que tengan una temperatura ambiente para después pesarlos en la balanza analítica, donde los datos obtenidos se registraron en una base de datos como Masa 3.



Figura 38-2: Muestras de suelo en crisoles ubicados en la mufla

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

g) Posterior a esto, los crisoles con las muestras se colocaron en un horno mufla por un periodo de 2 horas a una temperatura de 360 °C, pasado este tiempo los crisoles con las muestras fueron colocados en un desecador hasta que obtengan una temperatura ambiente como se puede ver en la *Figura 39-2*, a continuación, en una balanza analítica se pesaron estos crisoles con las muestras y los datos obtenidos se registraron como Masa 4.



Figura 39-2: Muestras de suelo en crisoles colocados en el desecador

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

Para obtener el estimado de materia orgánica de suelo se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 5-2: Porcentaje de materia orgánica

$$\%MO = \frac{(Masa\ 3 - Masa\ 4)}{(Masa\ 3 - Masa\ 1)} \times 100$$

Donde

$\% MO$ = Porcentaje de materia orgánica

$Masa\ 1$ = Peso del crisol tarado (g)

$Masa\ 3$ = Peso del crisol + muestras despues de 24 horas, estufa (g)

$Masa\ 4$ = Peso del crisol + muestra luego de 2 horas a 360 °C en la mufla (g).

2.4.2.6. Análisis Estadístico Inferencial

Estadísticamente se procedió a determinar las anomalías en la concentración de gas radón- 222 y las demás variables involucradas, posteriormente se procedió a calcular las correlaciones entre los valores de concentración de gas radón en la zona de estudio y los valores de las variables

meteorológicas y fisicoquímicas del suelo mediante el coeficiente de correlación de Pearson en los transectos establecidos.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Fase de campo

La *Grafica 1-3*, indica la variabilidad de la concentración de radón-222 en función de los puntos de muestreo en el transecto 1.

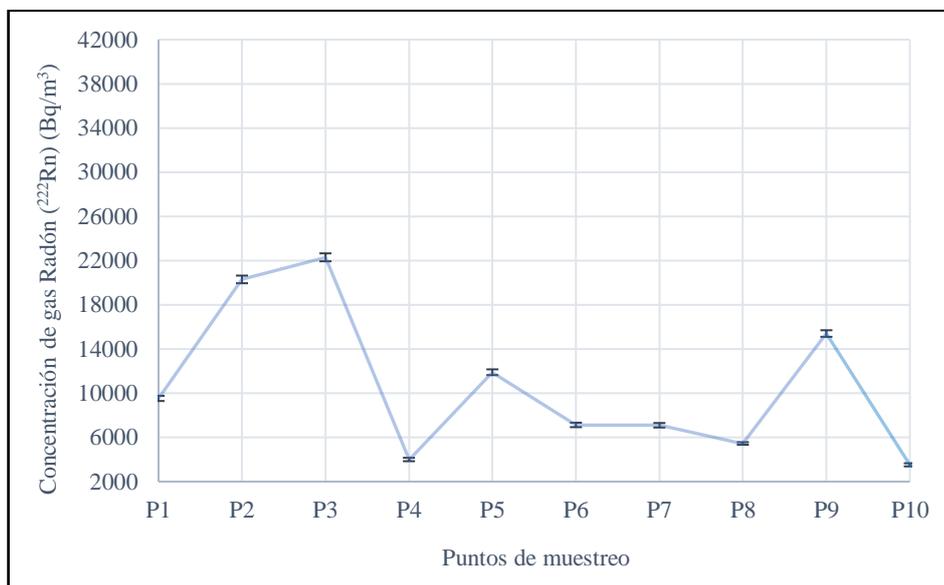


Gráfico 1-3: Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m³) en el transecto 1

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

La *Grafica 2-3*, indica la variabilidad de la concentración de radón-222 en función de los puntos de muestreo en el transecto 2.

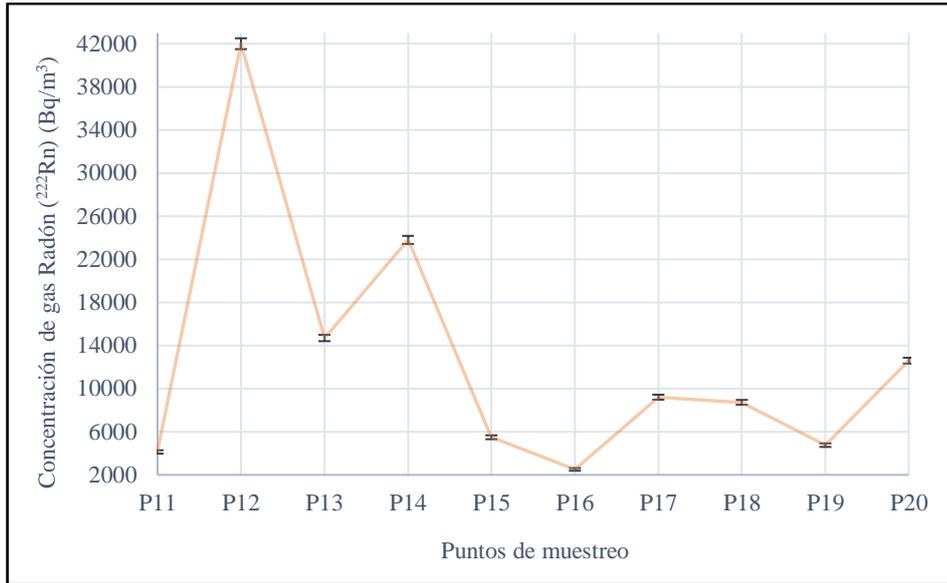


Gráfico 2-3: Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m³) en el transecto 2

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

La *Grafica 3-3*, indica la variabilidad de la concentración de radón-222 en función de los puntos de muestreo en el transecto 2.

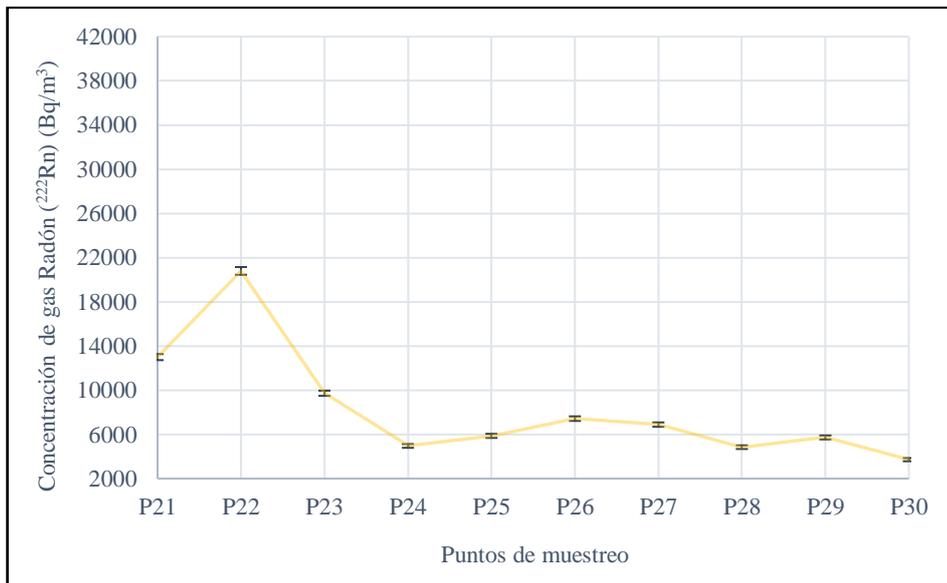


Gráfico 3-3: Concentraciones de gas radón-222 (Bq/m³) en el transecto 3

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

3.1.1. Variaciones meteorológicas

En la *Tabla 7-3* se indican los datos de variables ambientales, las coordenadas geográficas UTM, altitud, temperatura, velocidad del viento (máxima y promedio), humedad relativa y presión barométrica, medidas de acuerdo a la metodología de la sección 2.4.1.4 del CAPÍTULO II.

Tabla 6-3: Datos obtenidos de las variables meteorológicas del equipo *Pocket Weather Meter*

PUNTO	Coordenadas UTM WGS84 (17M)	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Velocidad de viento (m/s)		Humedad Relativa (%)	Presión Barométrica (hP)
				Promedio	Máxima		
P 1	744345-9813758	3700	7,00	0,50	1,80	86,20	659,70
P 2	744572-9813294	3684	10,90	1,30	2,50	65,20	660,80
P 3	745160-9813170	3592	10,80	1,90	3,60	71,20	669,70
P 4	745472-9812728	3522	12,30	2,20	4,30	61,10	673,30
P 5	746004-9812604	3478	14,30	4,10	5,60	58,50	679,70
P 6	746287-9812093	3439	13,60	0,70	1,60	51,10	683,70
P 7	746859-9812019	3357	18,20	0,60	1,50	51,60	687,30
P 8	747083-9811653	3238	11,20	1,20	2,30	70,70	698,00
P 9	747707-9811456	3224	15,00	1,80	2,90	55,60	698,10
P 10	747920-9811038	3228	16,90	0,50	1,30	67,80	699,70
P 11	744580-9813988	3688	9,00	1,00	3,60	77,70	661,70
P 12	745059-9813657	3635	12,80	1,40	3,10	65,40	665,80
P 13	745411-9813530	3547	16,70	0,70	2,00	59,10	669,00
P 14	745744-9812996	3478	16,20	1,70	2,30	52,70	676,90
P 15	746273-9812990	3404	11,90	2,70	3,60	67,50	685,40
P 16	746542-9812544	3390	14,80	0,80	1,30	64,30	684,20
P 17	747127-9812392	3428	21,50	0,60	1,50	48,40	682,20
P 18	747386-9812040	3267	13,50	1,30	3,80	65,10	694,10
P 19	747777-9812005	3210	14,20	0,90	2,00	54,40	700,80
P 20	748176-9811421	3219	17,10	1,80	4,30	61,70	698,40
P 21	744912-9814591	3655	9,80	0,40	2,40	89,80	664,10
P 22	745205-9814099	3677	13,00	0,40	2,20	71,20	659,50
P 23	745736-9813954	3537	9,50	0,40	1,40	89,50	673,60
P 24	746077-9813524	3449	11,70	1,70	3,10	72,10	680,10
P 25	746558-9813437	3384	15,00	0,40	1,40	59,40	685,20
P 26	746891-9812861	3350	11,90	2,30	4,20	76,60	688,60

P 27	747369-9812895	3383	15,50	0,60	1,50	54,20	686,00
P 28	747776-9812458	3198	15,70	0,70	1,80	56,70	702,00
P 29	748207-9812418	3244	12,10	1,30	3,60	65,40	697,80
P 30	748501-9811806	3283	10,10	0,60	2,10	71,80	696,00

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

3.2. Fase de laboratorio

3.2.1. Densidad aparente

En la *Tabla 8-3* se indican los datos obtenidos en el laboratorio, después de aplicar el método del cilindro.

Tabla 7-3: Datos para cálculos y resultados de densidad aparente y humedad del suelo

PUNTO	DATOS PARA CÁLCULOS		
	<i>Peso de la canasta (g)</i>	<i>Peso suelo húmedo (g)</i>	<i>Peso de la canasta + suelo seco (g)</i>
P 1	6,4003	172,4884	141,5810
P 2	6,1936	156,3576	134,8399
P 3	6,1910	145,9072	116,4017
P 4	7,8148	140,8715	94,1898
P 5	6,7459	133,3380	113,4164
P 6	6,0479	120,1228	103,6831
P 7	5,8558	132,9973	115,7847
P 8	6,3001	132,4043	115,2595
P 9	6,1906	132,1437	98,5636
P 10	5,9268	167,2559	129,1876
P 11	5,9483	150,0671	150,0671
P 12	6,1426	128,8735	100,3729
P 13	7,8055	124,0309	103,9309
P 14	7,7135	141,6563	115,5542
P 15	7,8508	144,5922	120,6460
P 16	6,1435	146,9726	132,2055
P 17	7,9274	124,3432	103,5104
P 18	5,9458	107,6730	96,5149
P 19	6,1143	99,8483	89,3629

P 20	6,0545	119,0411	116,9941
P 21	5,3017	137,6044	107,4259
P 22	6,1371	136,5113	105,4337
P 23	6,0811	159,8686	132,7224
P 24	6,0973	150,1776	134,9980
P 25	6,1552	153,5285	137,0083
P 26	7,8054	131,1290	119,7164
P 27	5,3074	115,6278	97,8719
P 28	5,3324	133,7058	121,0400
P 29	7,8008	136,9467	121,5636
P 30	7,7185	125,1031	96,4595

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

Con los datos de la tabla anterior, se aplica la *Ecuación 3-2* y *4-2* del CAPÍTULO II y los resultados de humedad y densidad aparente se indican en la *Tabla 9-3*.

Tabla 8-3: Resultados de densidad aparente del suelo

PUNTO	RESULTADOS				
	<i>P. Suelo húmedo (g)</i>	<i>P. Suelo seco est. 105 °C (g)</i>	<i>V. Cilindro (cm³)</i>	HUMEDAD (%)	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)
P 1	172,4884	135,1807	96,4000	21,6291	1,4023
P 2	156,3576	128,6463	90,3700	17,7230	1,4236
P 3	145,9072	110,2107	91,2200	24,4652	1,2082
P 4	140,8715	86,3750	89,4100	38,6853	0,9661
P 5	133,3380	106,6705	90,3700	19,9999	1,1804
P 6	120,1228	97,6352	88,0700	18,7205	1,1086
P 7	132,9973	109,9289	90,3700	17,3450	1,2164
P 8	132,4043	108,9594	90,3700	17,7071	1,2057
P 9	132,1437	92,3730	89,9200	30,0966	1,0273
P 10	167,2559	123,2608	96,4000	26,3041	1,2786
P 11	150,0671	144,1188	91,2200	3,9638	1,5799
P 12	128,8735	94,2303	95,4200	26,8816	0,9875
P 13	124,0309	96,1254	88,0700	22,4988	1,0915
P 14	141,6563	107,8407	95,4200	23,8716	1,1302
P 15	144,5922	112,7952	88,0700	21,9908	1,2807
P 16	146,9726	126,0620	96,4000	14,2275	1,3077

P 17	124,3432	95,5830	91,2200	23,1297	1,0478
P 18	107,6730	90,5691	95,4200	15,8850	0,9492
P 19	99,8483	83,2486	88,0700	16,6249	0,9453
P 20	119,0411	110,9396	91,2200	6,8056	1,2162
P 21	137,6044	102,1242	90,7100	25,7842	1,1258
P 22	136,5113	99,2966	88,07	27,2613	1,1275
P 23	159,8686	126,6413	95,4200	20,7841	1,3272
P 24	150,1776	128,9007	87,7500	14,1678	1,4690
P 25	153,5285	130,8531	96,4000	14,7695	1,3574
P 26	131,1290	111,9110	91,2200	14,6558	1,2268
P 27	115,6278	92,5645	91,2200	19,9462	1,0147
P 28	133,7058	115,7076	96,4000	13,4610	1,2003
P 29	136,9467	113,7628	95,4200	16,9291	1,1922
P 30	125,1031	88,7410	91,2200	29,0657	0,9728

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

3.2.2. pH y conductividad eléctrica

En la *Tabla 10-3* se indican los datos obtenidos en el laboratorio, después de aplicar el método del cilindro. El pH medio resultó $9,05 \pm 0,89$ y la conductividad eléctrica media fue $147,51 \pm 128,08$ uS/cm.

Tabla 9-3: Resultados de pH y conductividad eléctrica del suelo

PUNTO	PH_ HÚMEDO	CONDUCTIVIDAD_ HÚMEDO (uS/cm)
P 1	9,57	94,60
P 2	8,09	84,80
P 3	8,07	70,60
P 4	7,32	98,40
P 5	8,59	164,10
P 6	8,84	163,10
P 7	8,35	70,50
P 8	8,20	231,30
P 9	8,32	371,00
P 10	10,05	667,00
P 11	8,72	44,20
P 12	9,86	54,70

P 13	7,24	71,30
P 14	8,24	122,00
P 15	8,03	130,50
P 16	8,66	115,70
P 17	7,80	141,50
P 18	9,74	253,20
P 19	9,78	156,00
P 20	9,86	317,00
P 21	9,53	27,48
P 22	10,17	39,30
P 23	9,73	24,68
P 24	9,44	88,70
P 25	9,93	52,00
P 26	10,49	53,10
P 27	9,05	201,40
P 28	10,21	83,80
P 29	9,59	109,80
P 30	9,78	134,70

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

3.2.3. Estructura

En la *Tabla 11-3* se indican los resultados de estructura del suelo. Según esta tabla se indica que la mayoría de los puntos de muestreo tienen una estructura granular.

Tabla 10-3: Resultados de la estructura del suelo

PUNTO	ESTRUCTURA DEL SUELO	
	<i>Estructura</i>	<i>Tamaño</i>
P 1	Granular	Muy fino / delgado
P 2	Granular	Muy fino / delgado
P 3	Granular	Fino / delgado
P 4	Granular	Fino / delgado
P 5	Granular	Fino / delgado
P 6	Granular	Muy fino / delgado
P 7	Granular	Muy fino / delgado
P 8	Granular	Fino / delgado

P 9	Granular	Fino / delgado
P 10	Granular	Fino / delgado
P 11	Granular	Fino / delgado
P 12	Granular	Fino / delgado
P 13	Granular	Fino / delgado
P 14	Granular	Fino / delgado
P 15	Granular	Muy fino / delgado
P 16	Granular	Muy fino / delgado
P 17	Granular	Fino / delgado
P 18	Granular	Fino / delgado
P 19	Granular	Medio
P 20	Granular	Fino / delgado
P 21	Subangular blocosa	Grueso / espeso
P 22	Subangular	Medio
P 23	Granular	Medio
P 24	Granular	Fino / delgado
P 25	Granular	Muy fino / delgado
P 26	Granular	Muy fino / delgado
P 27	Granular	Muy fino / delgado
P 28	Granular	Muy fino / delgado
P 29	Granular	Muy fino / delgado
P 30	Granular	Fino / delgado

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

3.2.4. *Textura*

En la *Tabla 12-3* se muestran los resultados de textura del suelo. Se indica que la mayoría de los puntos presentan una textura Franco arenosa.

Tabla 11-3: Resultados de la textura del suelo

PUNTO	TEXTURA
P 1	Franco limoso
P 2	Franco
P 3	Areno Franco
P 4	Franco
P 5	Franco arenoso

P 6	Arenoso
P 7	Franco arenoso
P 8	Franco arenoso
P 9	Franco arenoso
P 10	Franco
P 11	Franco limoso
P 12	Franco arenoso
P 13	Franco arenoso
P 14	Franco areno arcillo
P 15	Franco arenoso
P 16	Areno franco
P 17	Areno franco
P 18	Franco arenoso
P 19	Franco
P 20	Franco limoso
P 21	Franco limoso
P 22	Franco arcillo limoso
P 23	Franco arenoso
P 24	Franco limoso
P 25	Franco arcillo limoso
P 26	Franco arenoso
P 27	Franco
P 28	Franco arenoso
P 29	Franco arcilloso
P 30	Arena

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

3.2.5. *Materia orgánica*

En la *Tabla 13-3* se indican los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 12-3: Datos para cálculo de materia orgánica del suelo

PUNTO	DATOS PARA CÁLCULOS			
	<i>Peso suelo tamizado puesto en crisol que ha sido tarado (g)</i>	<i>Peso del crisol tarado (g)</i>	<i>Peso crisol + muestra después de 24 horas, estufa (g)</i>	<i>Peso de crisol + muestra luego de 2h 360° en la mufla (g)</i>
P 1	4,9501	43,1672	47,9324	47,7893

P 2	4,9921	43,1620	47,9512	47,8333
P 3	4,9515	38,1508	42,9052	42,8199
P 4	4,9433	43,1675	47,6955	47,4999
P 5	4,9963	33,7656	38,5787	38,4607
P 6	4,9950	22,8564	27,6954	27,5877
P 7	4,9953	26,5993	31,4578	31,2948
P 8	4,9942	25,5463	30,4433	30,3254
P 9	4,9505	38,0016	42,6931	42,5667
P 10	4,9911	34,9320	39,8090	39,7221
P 11	4,9915	43,1685	47,9054	47,7088
P 12	4,9590	34,9312	39,5363	39,4240
P 13	4,9936	38,4865	43,2621	43,1412
P 14	4,9796	38,1513	42,8610	42,7508
P 15	4,9355	42,0713	46,7959	46,6052
P 16	4,9781	38,0002	42,8587	42,7604
P 17	4,9905	43,1578	47,9404	47,8058
P 18	4,9928	38,4793	43,3074	43,2205
P 19	4,9278	34,9615	39,7660	39,6640
P 20	4,9941	42,0697	46,9594	46,8739
P 21	4,9964	42,8481	47,6171	47,3570
P 22	4,9933	26,8263	31,5302	31,4267
P 23	4,9619	24,0295	28,8474	28,6735
P 24	4,9800	39,6303	44,4782	44,4312
P 25	4,9984	27,9799	32,9038	32,8266
P 26	4,9952	33,7644	38,6644	38,5415
P 27	4,9993	26,3825	31,2435	31,1330
P 28	4,9892	26,6363	31,5249	31,4359
P 29	4,9949	34,9607	39,8384	39,7423
P 30	4,9951	41,3091	46,0312	45,9270

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

Una vez obtenidos los datos de la *Tabla 13-3*, se utiliza la *Ecuación 5-2* del CAPÍTULO II para el cálculo de materia orgánica y porcentaje de materia orgánica respectivamente. Los resultados se muestran en la en la *Tabla 14-3*.

Tabla 13-3: Resultados del análisis de materia orgánica en el suelo

PUNTO	RESULTADOS			
	<i>Peso muestra seca, luego de estufa 24h, 105° ("sin humedad") (g)</i>	<i>Peso muestra calcinada, luego de mufla, 360°, 2h (sin humedad ni materia orgánica) (g)</i>	MATERIA ORGÁNICA (g)	MATERIA ORGÁNICA (%)
P 1	4,7652	4,6221	0,1431	3,0030
P 2	4,7892	4,6713	0,1179	2,4618
P 3	4,7544	4,6691	0,0853	1,7941
P 4	4,5280	4,3324	0,1956	4,3198
P 5	4,8131	4,6951	0,1180	2,4516
P 6	4,8390	4,7313	0,1077	2,2257
P 7	4,8585	4,6955	0,1630	3,3549
P 8	4,8970	4,7791	0,1179	2,4076
P 9	4,6915	4,5651	0,1264	2,6942
P 10	4,8770	4,7901	0,0869	1,7818
P 11	4,7369	4,5403	0,1966	4,1504
P 12	4,6051	4,4928	0,1123	2,4386
P 13	4,7756	4,6547	0,1209	2,5316
P 14	4,7097	4,5995	0,1102	2,3399
P 15	4,7246	4,5339	0,1907	4,0363
P 16	4,8585	4,7602	0,0983	2,0233
P 17	4,7826	4,6480	0,1346	2,8144
P 18	4,8281	4,7412	0,0869	1,7999
P 19	4,8045	4,7025	0,1020	2,1230
P 20	4,8897	4,8042	0,0855	1,7486
P 21	4,7690	4,5089	0,2601	5,4540
P 22	4,7039	4,6004	0,1035	2,2003
P 23	4,8179	4,6440	0,1739	3,6095
P 24	4,8479	4,8009	0,0470	0,9695
P 25	4,9239	4,8467	0,0772	1,5679
P 26	4,9000	4,7771	0,1229	2,5082
P 27	4,8610	4,7505	0,1105	2,2732
P 28	4,8886	4,7996	0,0890	1,8206
P 29	4,8777	4,7816	0,0961	1,9702
P 30	4,7221	4,6179	0,1042	2,2066

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2021.

El *Gráfico 4-3* muestra las anomalías de concentración medidas en campo a lo largo de los puntos de los transectos establecidos. Se puede apreciar la presencia de anomalías positivas a la izquierda del punto 4 mientras anomalías negativas a la derecha.

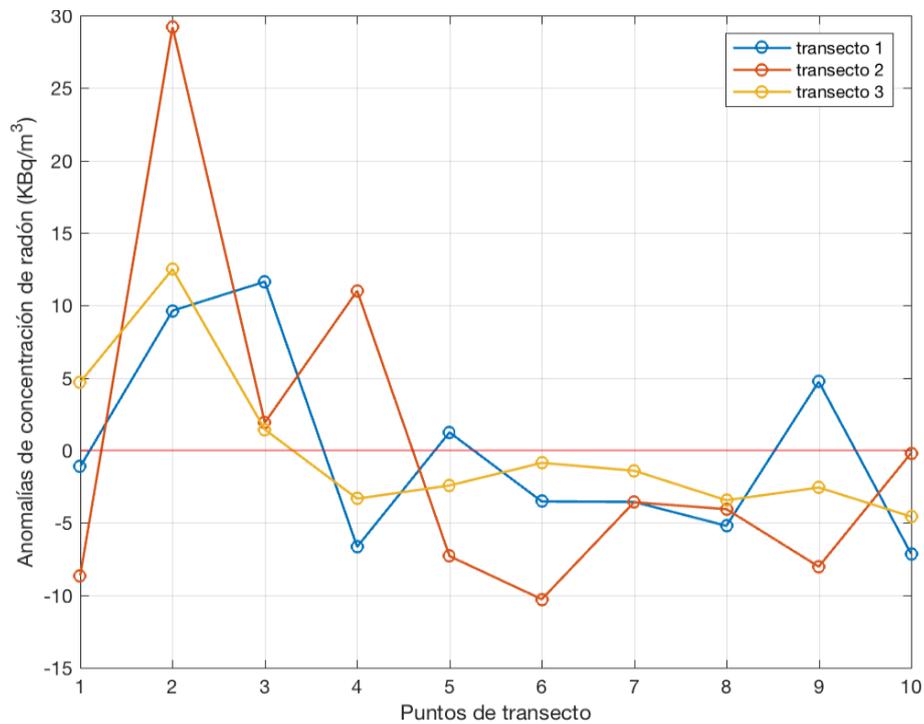


Gráfico 4-3: Anomalías de concentración de radón en transectos (KBq/m³)

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 5-3*, se puede observar el promedio de concentración de radón considerando los tres transectos en el área de estudio. Este dato se puede asociar al hecho de que geográficamente entre los puntos 4 y 5 se encuentra una posible fractura perpendicular de la falla Pallatanga a los transectos considerados en el área de estudio.

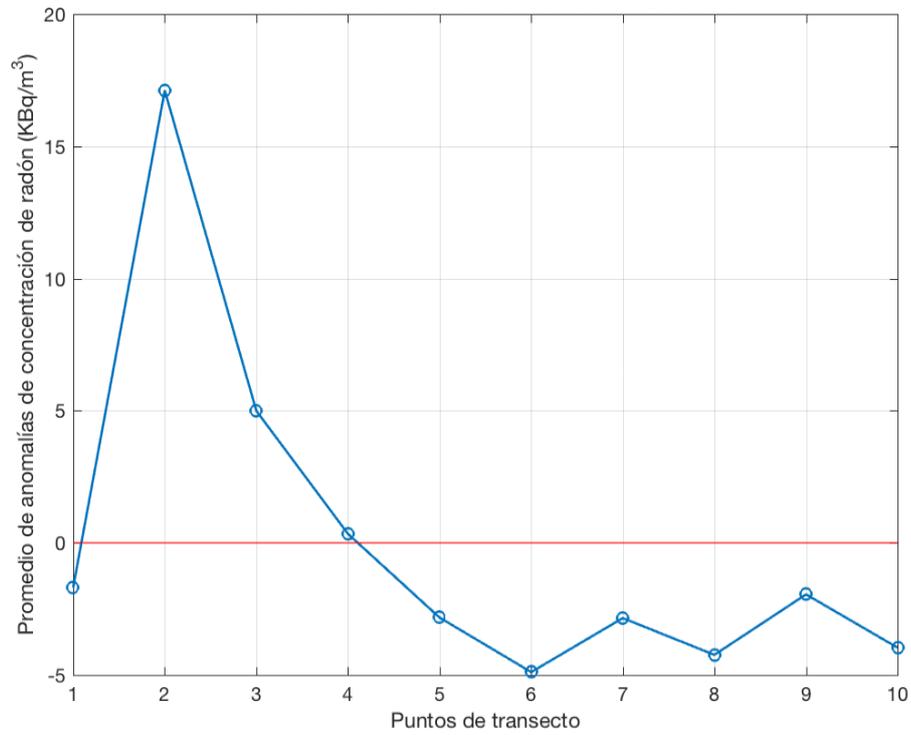


Gráfico 5-3: Promedio de anomalías de concentración de radón en el área de estudio (KBq/m³)

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 6-3* se presenta mediante un mapa de calor la matriz de correlaciones entre las concentraciones de radón de los tres transectos considerados. Se aprecia que existe una correlación significativa entre las concentraciones de radón del segundo y tercer transecto, esto es, 0,64 con p-value de 0,05.

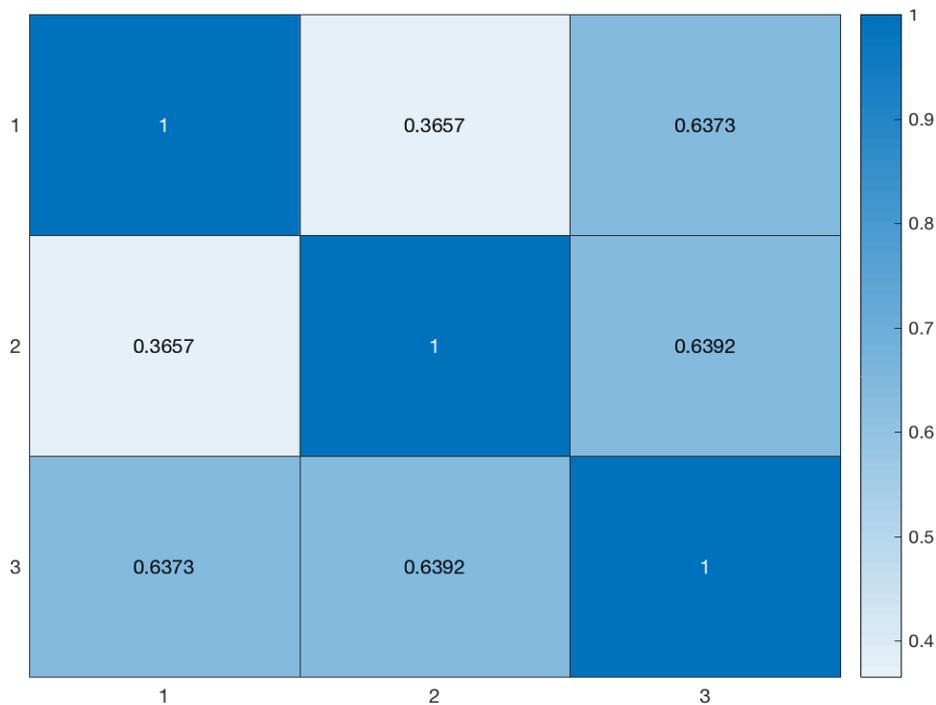


Gráfico 6-3: Correlaciones entre las concentraciones de radón de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 7-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y la presión barométrica medida en los puntos de los transectos del área de estudio. Se determina valores de correlación significativa negativa en los tres transectos, esto es, 0,64, 0,60 y 0,73, que corresponden a p-values de 0,05, 0,07 y 0,02 respectivamente. Además, valores de correlaciones positivas significativas de 0,9 entre los valores de presión barométrica de los transectos 2 y 3.

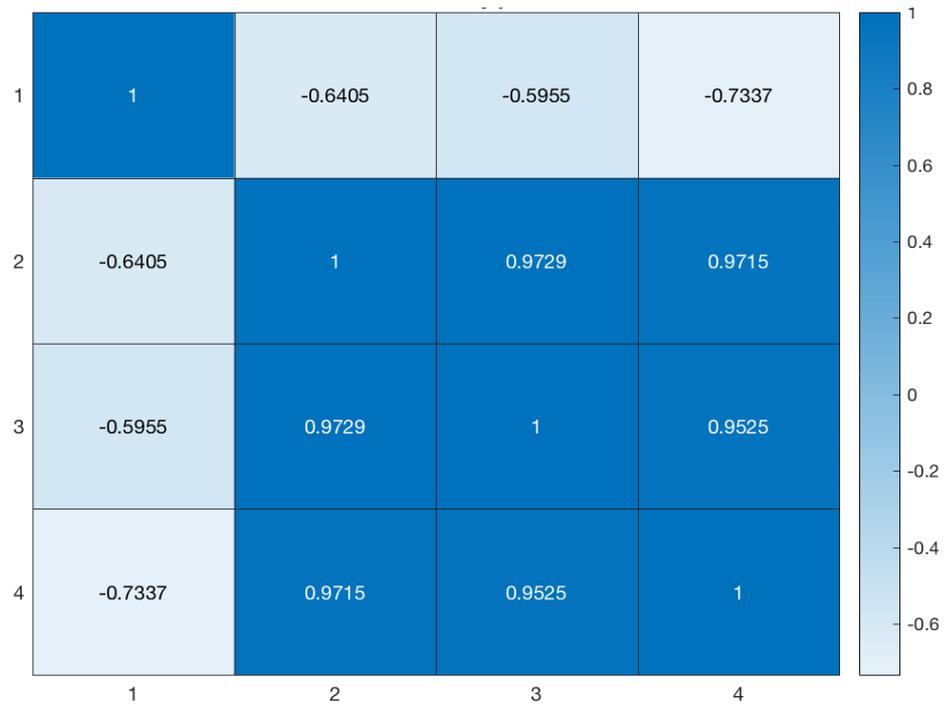


Gráfico 7-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y la presión barométrica de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 8-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y la humedad relativa medida en los puntos de los transectos del área de estudio. Como se puede apreciar no existe ningún valor de correlación significativo que pueda considerarse.

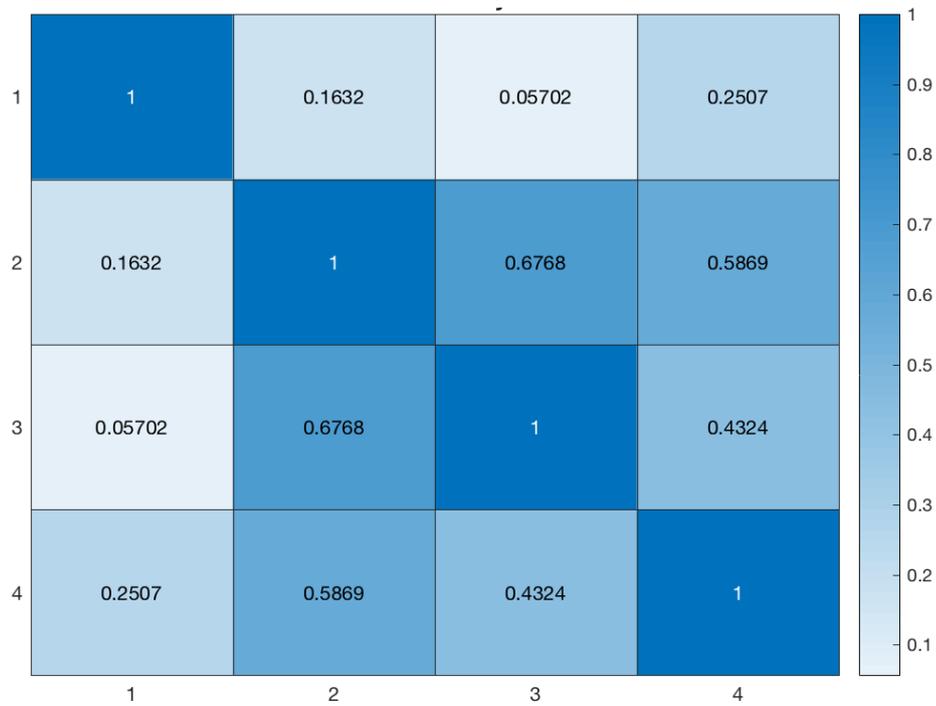


Gráfico 8-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y humedad relativa de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 9-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y el pH húmedo de suelo determinado en los puntos de los transectos del área de estudio. Como se puede apreciar no existe ningún valor de correlación significativo que pueda considerarse.

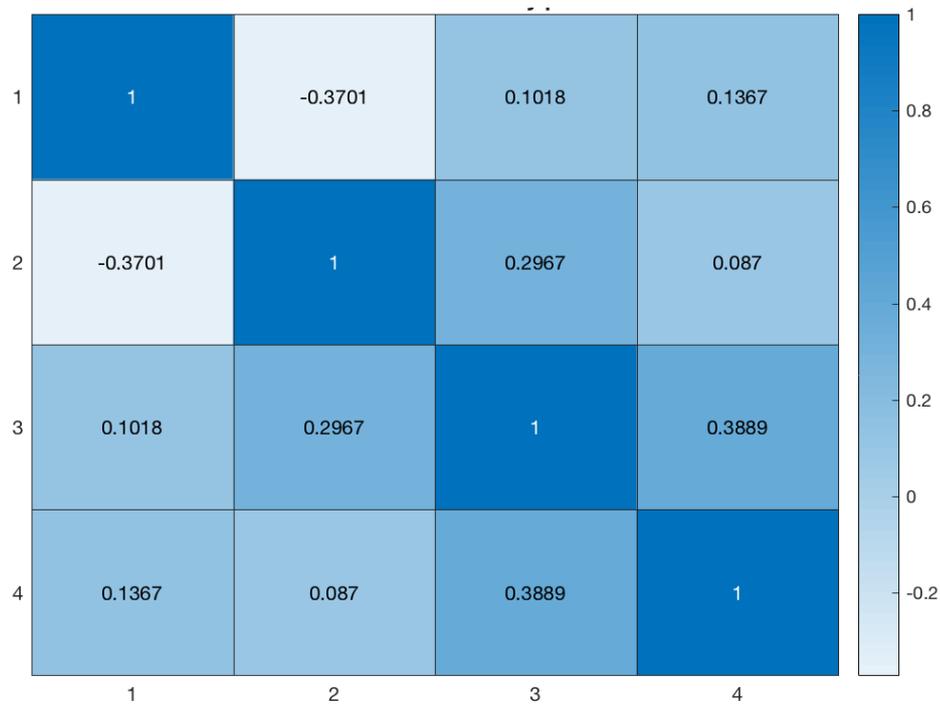


Gráfico 9-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y pH de suelo de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 10-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y la conductividad eléctrica medida en los puntos de los transectos del área de estudio. Existe una correlación negativa de $-0,53$ entre la concentración y la conductividad del segundo transecto, sin embargo, no es significativo porque su p-value es $0,2$.

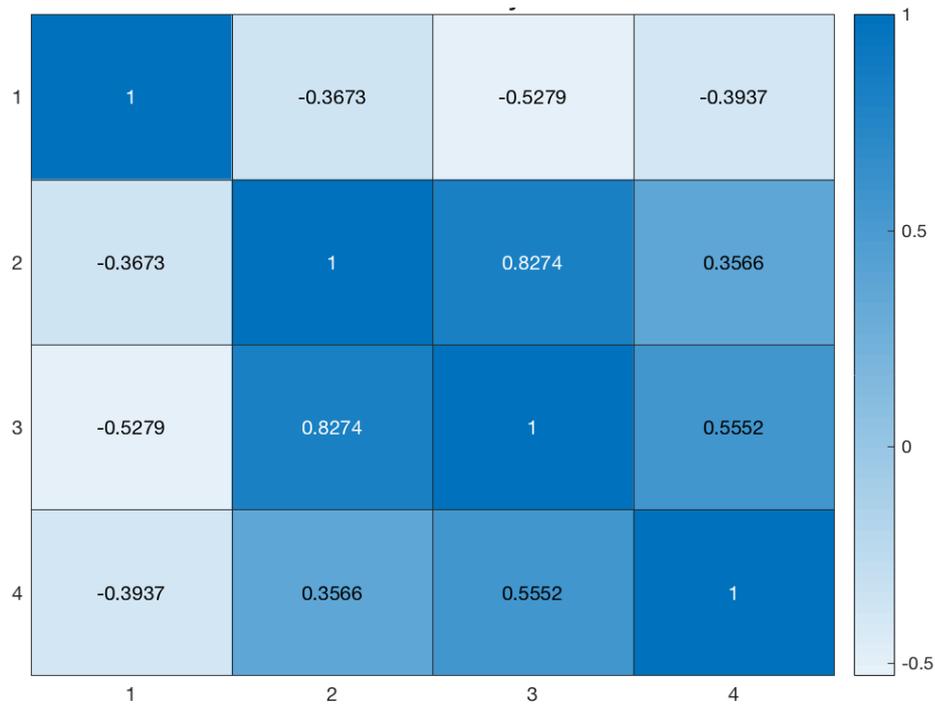


Gráfico 10-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y conductividad eléctrica de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 11-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y la humedad medida en los puntos de los transectos del área de estudio. Existe una correlación positiva de 0,55 entre la concentración y la humedad del segundo transecto, sin embargo, no es significativo porque su p-value es 0,1

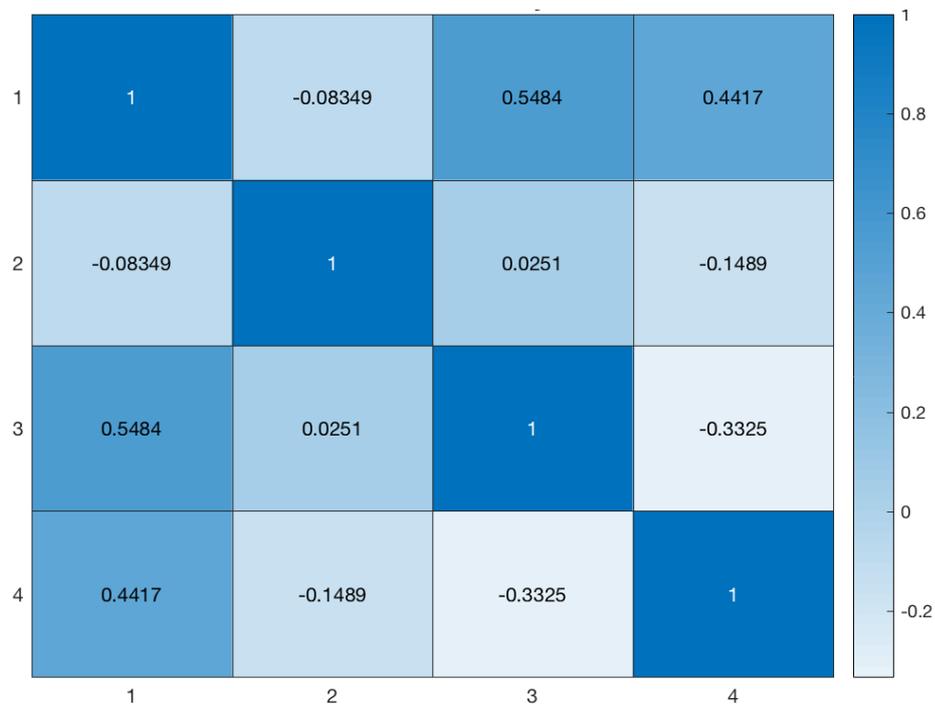


Gráfico 11-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y humedad de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 12-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y la densidad aparente determinado en los puntos de los transectos del área de estudio. Como se puede apreciar no existe ningún valor de correlación significativo que pueda considerarse.

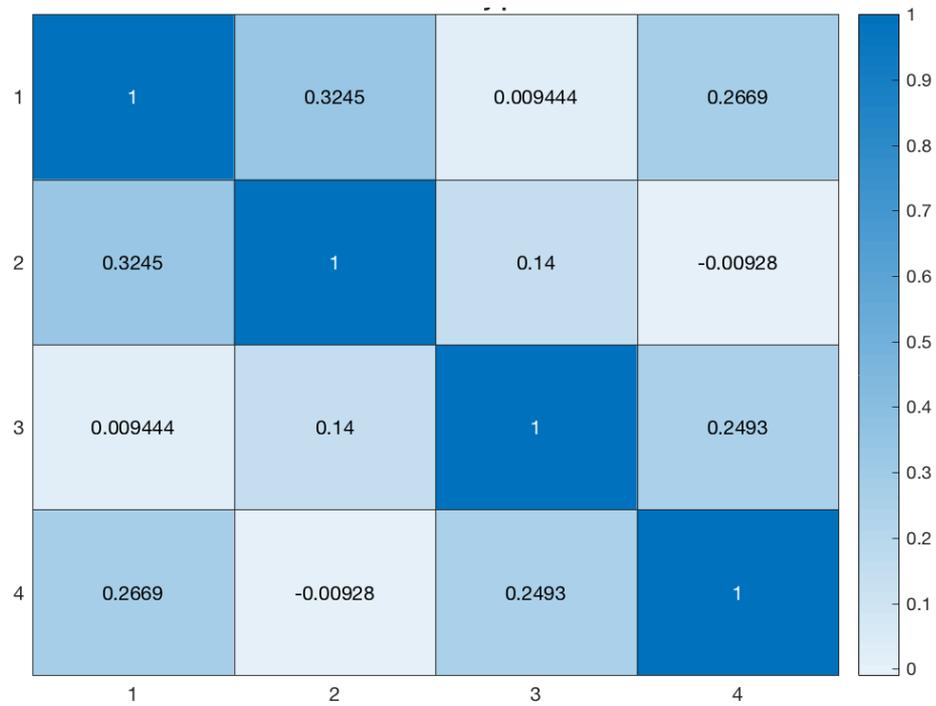


Gráfico 12-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y densidad aparente de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

En el *Gráfico 13-3*, se presenta el mapa de calor de las correlaciones calculadas entre el promedio de las anomalías de la concentración de radón y materia orgánica de suelo determinado en los puntos de los transectos del área de estudio. Como se puede apreciar no existe ningún valor de correlación significativo que pueda considerarse.

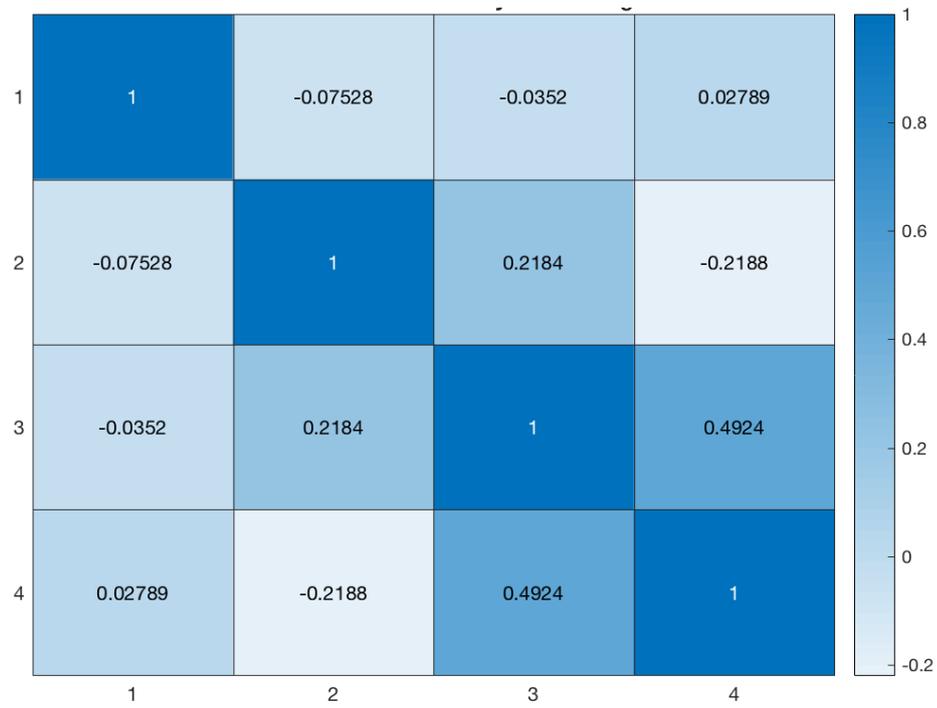


Gráfico 13-3: Correlaciones entre concentraciones de radón y materia orgánica de suelo de los tres transectos

Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

CONCLUSIONES

- La concentración de gas radón en el suelo para la zona y el periodo de estudio determinada mediante un sistema de detección conformado por el detector RAD 7, una unidad de secado y una sonda de acero inoxidable para detección de gas en suelo, utilizando el método Weeks configurado en el detector, corresponde a un intervalo comprendido desde 2510 ± 123 hasta 42000 ± 503 Bq/m³.
- El análisis de correlación entre los datos meteorológicos y concentración de radón determinó que, entre la presión barométrica y concentración de radón existe una correlación negativa significativa lo que indica que en la zona y periodo de estudio a menor presión barométrica existe una mayor concentración de radón.
- Se estableció la correlación entre la concentración de gas radón-222 con características físico-químicas del suelo, como pH húmedo, humedad, conductividad eléctrica, densidad aparente y materia orgánica, resultando que la concentración de radón con el pH húmedo, densidad aparente y materia orgánica no tiene correlación significativa, con la conductividad eléctrica existe una correlación negativa no significativa y con la humedad existe una correlación positiva no significativa, lo que indica que las concentraciones de gas radón no influyen significativamente a las características físico-químicas del suelo.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar un estudio detallado de la zona alrededor del punto P 12 (ubicado en la parroquia de Sicalpa), debido que el resultado de concentración de radón-222 es considerablemente alto, en relación a los demás puntos.
- Realizar estudios geofísicos complementarios (gravimetría) para obtener más información que complemente al presente estudio.
- Se sugiere que se realicen mediciones en invierno para determinar variaciones en las concentraciones del gas radón-222, ya que el presente estudio se realizó en época de verano.
- Se recomienda realizar mediciones de radio-226 en la zona de estudio ya que es el precedente del gas radón-222.

BIBLIOGRAFÍA

ASAMBLEA NACIONAL DEL ECUADOR. *Constitución de la República del Ecuador* [en línea]. 2008. Disponible en: <https://bde.fin.ec/wp-content/uploads/2021/02/Constitucionultimodif25enero2021.pdf>.

BAIZE, S., AUDIN, L., ALVARADO, A., JOMARD, H., BABLON, M., CHAMPENOIS, J., ESPIN, P., SAMANIEGO, P., QUIDELLEUR, X. & LE PENNEC, J.-L. "Active Tectonics and Earthquake Geology Along the Pallatanga Fault, Central Andes of Ecuador". *Frontiers in Earth Science* [en línea], 2020, (Francia) 8(1), pp. 5-13. [Consulta: 21 febrero 2022]. ISBN 2296-6463. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2020.00193>.

BARRIOS, I. "La edafología: origen, desarrollo y conceptos". *Historia-Geografía* [en línea], 1985, (España) 1(5), pp. 87-114. [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN 0212-6397. Disponible en: <http://ojs.eusko-ikaskuntza.eus/index.php/vasconia/article/view/511/498>.

BASKARAN, M. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. [en línea], Estados Unidos: Springer International Publishing, 2016. [Consulta: 14 febrero 2022]. ISBN 9783319213293. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=l2HUDAAAQBAJ>.

CAJAS, E.C. *Propiedades químicas de los suelos* [en línea] (Trabajo de Titulación). (Licenciado) Universidad de las Américas, Quito-Ecuador. 2018. pp. 2-5. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56906439/propiedades_quimicas_de_los_suelos-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642455609&Signature=J6xaoCZIxjE7vyTvYYJlJdPvaDx9GqYfa-RUviXKT5fgk5N1cv3FkBkmF-QY0DMsjbEIcKCYNiNu-fHYzXW3yacP1zjh0fv87Dht3ICRfyOz6FW3F1Zyw44jH.

CARRIÓN MERO, P., BORJA BERNAL, C., HERRERA FRANCO, G., MORANTE CARBALLO, F., JAYA MONTALVO, M., MALDONADO ZAMORA, A., PAZ SALAS, N. & BERREZUETA, E. "Geosites and Geotourism in the Local Development of Communities of the Andes Mountains". *Sustainability* [en línea], 2021, 13(9), pp. 2-23. [Consulta: 07 marzo 2022]. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su13094624. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/4624>.

CHEN, Z., LI, Y., LIU, Z., WANG, J., ZHOU, X. & DU, J. "Radon emission from soil gases in the active fault zones in the Capital of China and its environmental effects". *Scientific Reports* [en línea], 2018, (China) 8(1), pp. 2-10. [Consulta: 10 enero 2022]. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-018-35262-1. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-35262-1.pdf>.

CORWIN, D.L. y YEMOTO, K. "Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids". *Soil Science Society of America Journal* [en línea], 2020, (Estados Unidos) 84(5), pp. 1442-1461. [Consulta: 18 enero 2022]. ISSN 0361-5995. DOI <https://doi.org/10.1002/saj2.20154>. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/saj2.20154>.

CROUSE, K.K., HARDY, D.H., HECKENDORN, S., HULUKA, G., JOINES, D.K., KISSEL, D.E., MILLER, R., MITCHELL, C.C., MOORE, K.P., MYLAVARAPU, R., OLDHAM, J.L., PROVIN, T., SAVOY, H.J., SIKORA, F.J., SONON, L., WANG, J.J., WARNCKE, D.D. & ZHANG, H. *Soil Test Methods From the Southeastern United States* [en línea]. Estados Unidos: Lexington, 2014. [Consulta: 18 enero 2022]. ISBN 9798624955. Disponible en: <https://aesl.ces.uga.edu/sera6/PUB/MethodsManualFinalSERA6.pdf>.

DABADIE, M., PEREZ, C., ARTURI, M., GOYA, J. & SANDOVAL, M. "Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles den NE de entre Ríos". *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* [en línea], 2018, (Argentina) 117 (1), pp. 158. [Consulta: 22 enero 2022]. ISSN 1669-9513. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/7330>.

DURRIDGE COMPANY INC. *Detector de radón Rad 7: Manual del usuario* [en línea]. Boston-USA: DURRIDGE Company Inc, 2014. [Consulta: 18 enero 2022]. Disponible en: <https://durridge.com/documentation/RAD7%20Manual%20Spanish.pdf>.

DURRIDGE COMPANY INC. *Soil gas probe manual*. [en línea]. Boston-USA: DURRIDGE Company Inc, 2015. [Consulta: 1 enero 2022]. Disponible en: <https://durridge.com/documentation/Soil Gas Probe Manual.pdf>.

GARCÍA MORENO, L. *Elementos radiactivos de la tabla periódica: Descubrimiento y nucleosíntesis artificial* [en línea]. Madrid-España: Universidad Complutense, 2018. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/LUIS ENRIQUE GARCIA MORENO CEZAR.pdf>.

ESAN, D.T., SRIDHAR, M.K.C., OBED, R., AJIBOYE, Y., AFOLABI, O., OLUBODUN, B. & ONI, O.M. "Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over the Lithological Units of a Southwestern Nigeria University". *Scientific Reports* [en línea], 2020, (Nigeria), 10(1), pp. 1-10. [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-020-64217-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-64217-8>.

FERRER, G.R. *El radón: Tratamiento jurídico de un enemigo invisible* [en línea]. Alicante-España: Editorial Club Universitario, 2012. [Consulta: 17 enero 2022]. ISBN 9788415591481. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=nYXAnH5kEfsC>

FOSSÉN, H. *Regional Geology and Tectonics* [en línea]. 2ª ed. Oxford-Reino Unido: Elsevier, 2020. [Consulta: 25 enero 2022]. ISBN 978-0-444-64134-2. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444641342000079>.

GADPCH, (2020). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Chimborazo 2019-2023. Recuperado de: <https://chimborazo.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/1.-PDOT-Provincial.pdf>.

GARCÍA CHÁVEZ, J. Riesgo por emisiones de radón en el área metropolitana de San Luis Potosí [en línea] (Trabajo de Titulación). (Maestría) Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México. 2015. pp. 3-13. [Consulta: 10 enero 2022]. Disponible en: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/464/3/TMIPICYTG3R52015.pdf>.

GARZON, G. *El Radón - Manual Teórico Práctico* [en línea]. Colombia: IGEOMINAS, 2009. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265050493_El_Radon_-_Manual_Teorico_Practico.

GASKIN, J., COYLE, D., WHYTE, J. & KREWESI, D. "Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon". *Environmental Health Perspectives* [en línea], 2018, (Canadá) 126(5), pp. 1-8. [Consulta: 10 enero 2022]. ISSN 15529924. DOI 10.1289/EHP2503. Disponible en: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/EHP2503>.

GLASS, C.E. *Interpreting Aerial Photographs to Identify Natural Hazards* [en línea]. Oxford-Reino Unido: Elsevier, 2013. [Consulta: 25 enero 2022]. ISBN 978-0-12-420018-0. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124200180000051>.

GUAPIZACA, C. Implementación de un método de detección del gas ^{222}Rn en agua proveniente de las vertientes naturales del volcán Carihuairazo [en línea] (Trabajo de titulación). (Biofísica) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Física y Matemática, Riobamba-Ecuador. 2018. pp. 2-48. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8357/1/86T00048.pdf>.

GUTIÉRREZ ÁLVAREZ, I., GUERRERO, J.L., MARTÍN, J.E., ADAME, J.A., VARGAS, A. & BOLÍVAR, J.P. "Radon transport events associated with the impact of a NORM repository in the SW of Europe". *Environmental Pollution* [en línea], 2021, (España) 289(15), pp. 1-10 . [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2021.117963 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121015451>.

HERRERA, D.G. & CABASCANGO, J.S. Concentraciones de radón-222 en el suelo de una zona del cantón Riobamba perpendicular a la falla Pallatanga (Trabajo de Titulación). (Biofísico) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Física y Matemática, Riobamba-Ecuador. 2021. pp. 10-35.

IOVINE, G., GUAGLIARDI, I., BRUNO, C., GRECO, R., TALLARICO, A., FALCONE, G., LUCÀ, F. & BUTTAFUOCO, G. "Soil-gas radon anomalies in three study areas of Central-Northern Calabria (Southern Italy)". *Natural Hazards* [en línea], 2018, (Holanda) 91 (91), pp. 193-219. [Consulta: 18 febrero 2022]. ISSN 15730840. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2839-x>.

ITURBE GARCÍA, J.L. *Fundamentos de Radioquímica* [en línea]. Toluca- México: Instituto Literario 1000te, 2001. [Consulta: 17 enero 2022]. ISBN 968-835-566-6. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=FwVKEDCXQFMC&pg=PA263&dq=elementos+radiactivos+naturales&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwimo8jDiqr1AhXSTTABHUHTCsAQ6AF6BAgDEAI#v=onepage&q&f=false>.

JEKLIN, A. Diseño y mejoramiento de la vía existente chanchuan - la esperanza - desvío chiquicaz, y ramal gatazo bellavista, cantón colta - parroquia la matriz (villa la unión) provincia de chimborazo [En línea] (Trabajo de Titulación). (Licenciado) Universidad Internacional del Ecuador, Ingeniería Civil, Ecuador. pp. 1-23. [Consulta: 23 enero 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2153>.

KULALI, F., AKKURT, I. & ÖZGÜR, N. "The effect of meteorological parameters on radon

concentration in soil gas". *Acta Physica Polonica A* [en línea], 2017, (Turquía) 132(3), pp. 999-1001. [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN 1898794X. DOI 10.12693/APhysPolA.132.999. Disponible en: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/132/app132z3-IIp051.pdf>.

LIANG, S. & WANG, J. *Advanced Remote Sensing* [en línea]. 2ª ed. Estados Unidos: Academic Press, 2020. [Consulta: 07 febrero 2022]. ISBN 978-0-12-815826-5. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128158265000180>.

MARTÍNEZ, I.G. Emanaciones de Radón (²²²Rn) en aguas termales del Estado de México: Premonitor Geofísico [en línea] (Trabajo de Titulación). (Licenciado) Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México. 2017. pp. 10-23. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/68452>.

MEZA, L.F., LONDOÑO, J.M., ALPALA, R.L. & NARVÁEZ, A. "Anomalías De Gas Radón Asociadas a La Sismicidad En La Región Volcánica De Los Coconucos (Cauca, Colombia)". *Boletín Geológico* [en línea], 2018, (Colombia) 44(7), pp. 101-114. [Consulta: 10 enero 2022]. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/405/356>.

MINGORANCE, F., IBÁÑEZ, S., ROVIRA, S., CHIRINO, G., QUIROGA, M.C., SEBOK, A., BARBAGELATA, J.M. & ARREGHINI, G. *Sismotectónica – Radón – Ambiente* [en línea], Mendoza-Argentina: Ponencia Mendoza, 2018. [Consulta: 10 enero 2022]. Disponible en: https://planificacion.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/11294/rovira.pdf?fbclid=IwAR00nFFGydI7CIKzdVJ1JRrzF6qt6FMB6JUI4JtUAYnfEM5eiKVq-mwuSAc.

MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR. *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente* [en línea], 2015. Disponible en: www.lexis.com.ec.

MORALES ARAMBURO, J. & PUERTA, J.A. "Physical basis of ionising radiation". *Revista Colombiana de Cardiología* [en línea], 2021, (Colombia) 27(1), pp. 32-40. [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN 01205633. DOI 10.1016/j.rccar.2020.01.007. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-cardiologia-203-pdf-S0120563320300085>.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Manual de la OMS sobre Radón en interiores* [en línea]. Suiza: OMS, 2015. [Consulta: 10 enero 2022]. ISBN 978924354767 1. Disponible en: <http://www.who.int/iris/handle/10665/161913#sthash.2WvJkXnR.dpuf>.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. "Guía para la descripción de suelos". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [en línea], 2009, (Italia) 91 (4), pp. 45-48. [Consulta: 20 diciembre 2021]. ISBN 978-92-5-305521-0. Disponible en: [file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 \(1\).pdf](file:///C:/Users/Alina%20Belen%20Ortiz/Downloads/a0541s00%20(1).pdf).

PAUL, R. & LIMITED, R. (2008). Kestrel ® 3500 pocket weather meter wind speed, temperature, wind chill, humidity, heat index, dew point, wet bulb temperature, barometric pressure, altitude. Recuperado de: https://r-p-r.co.uk/downloads/kestrel/K3500_data_sheet.pdf.

PEPPER, I L & BRUSSEAU, M . *Environmental and Pollution Science* [en línea]. 3ª ed. Reino Unido.: Academic Press, 2019. [Consulta: 18 enero 2022]. ISBN 978-0-12-814719-1. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128147191000021>.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. *Radiación efectos y fuentes* [en línea]. (Argentina): PNUMA, 2016. [Consulta: 10 enero 2022]. ISBN 9789280735994. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources.pdg.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

QUINDÓS PONCELA, L.S., ARTECHE GARCÍA, J.L. & FUENTE MERINO, I. "Radón y Meteorología". Publicaciones en Ciencias y Tecnología [en línea], 2006, (España) 4(1), pp. 1-8. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/5190/1/Co1-trabajo Quindos y Artech.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/5190/1/Co1-trabajo%20Quindos%20y%20Arteche.pdf).

RAMÍREZ CARVAJAL, R. *Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelos* [en línea]. Bogotá-Colombia: Produmedios, 1997. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>.

RAMÍREZ, P., MORÓN, C., GARCÍA, A. & CORREA, E. "Estudio de las concentraciones y mecanismos de desplazamiento de Radón y descendientes en recintos cerrados". Congreso de Innovación Tecnológica en la Edificación [en línea], 2011, (España) 1(3), pp. 1-5. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: http://oa.upm.es/13446/1/INVE_MEM_2011_112672.pdf.

RENGIFO, M., ARANGUREN, R., LAFFAILLE, J., FERRER, C. & AUDEMARD, F. "Mediciones de gas radón en un segmento de la falla de boconó, estados táchira y mérida". Boletín de Geología [en línea], 2015 (Colombia) 37(2), pp. 57-74. [Consulta: 17 enero 2022]. ISSN

21458553. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v37n2/v37n2a06.pdf>.

RIVADENEIRA, F., SEGOVIA, M., ALVARADO, A., EGRED, J., TRONCOSO, L., VACA, S. & YEPES, H. *Breves fundamentos terremotos Ecuador* [en línea]. Quito-Ecuador: Corporación Editora Nacional, 2007. [Consulta: 17 enero 2022]. ISBN 978-9978-84-460-1. Disponible en: [https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/35-breves-fundamentos-sobre-los-terremotos-en-el-ecuador/file#:~:text=Una falla geológica es una,%2C se mueve%2C provocando sismos.](https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/35-breves-fundamentos-sobre-los-terremotos-en-el-ecuador/file#:~:text=Una%20falla%20geol%C3%B3gica%20es%20una,%20se%20mueve%20provocando%20sismos.)

RUCKS, L., GARCÍA, F., KAPLÁN, A. & HILL, M. *Propiedades Físicas del Suelo* [en línea]. Montevideo-Uruguay: Universidad de la República, 2004. [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <https://institutopichanaki.edu.pe/pichanaki/agropecuria/Propiedades Físicas del Suelo.pdf>.

VAZQUEZ STANESCU, C.L., LUNA CARDOZO, M. & SÁNCHEZ BARBOZA, L. "Marie Sklodowska-Curie: apasionada por la investigación en radioactividad". *Publicaciones en Ciencias y Tecnología* [en línea], 2019, (Venezuela) 13(2), pp. 54-68. [Consulta: 10 enero 2022]. ISSN 2477-9660. Disponible en: <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt/article/view/2703/1688>.

WILKENING, M. *Radon in the Environment* [en línea]. Nuevo México-Estados Unidos: Elsevier, 1990. [Consulta: 17 enero 2022]. ISBN 0166-1116. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166111608700153>.

ZAMBRANO, A. Análisis físico y químico de los suelos agrícolas del Sur de Manabí y su relación con los cultivos [en línea] (Trabajo de Titulación). (Ingeniería) Universidad Estatal del sur de Manabí, Facultad de Ciencias Naturales y de la Agroicultura, Jipijapa, Ecuador, 2020. pp. 10-30 [Consulta: 17 enero 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2929/1/TESIS%20ANGELICA%20ZAMBRANO%20REVISION%20FINAL%20TRIBUNAL%2026%20%20DE%20MARZO%202021.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: ANOMALÍAS Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Anomalías

Se define anomalías cuando un determinado comportamiento o característica es relevante para un porcentaje bajo de la población.

Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es un indicador usado para describir cuantitativamente la fuerza y dirección de la relación entre dos variables cuantitativas de distribución normal y ayuda a determinar la tendencia de dos variables a ir juntas.

Características del coeficiente r de Pearson:

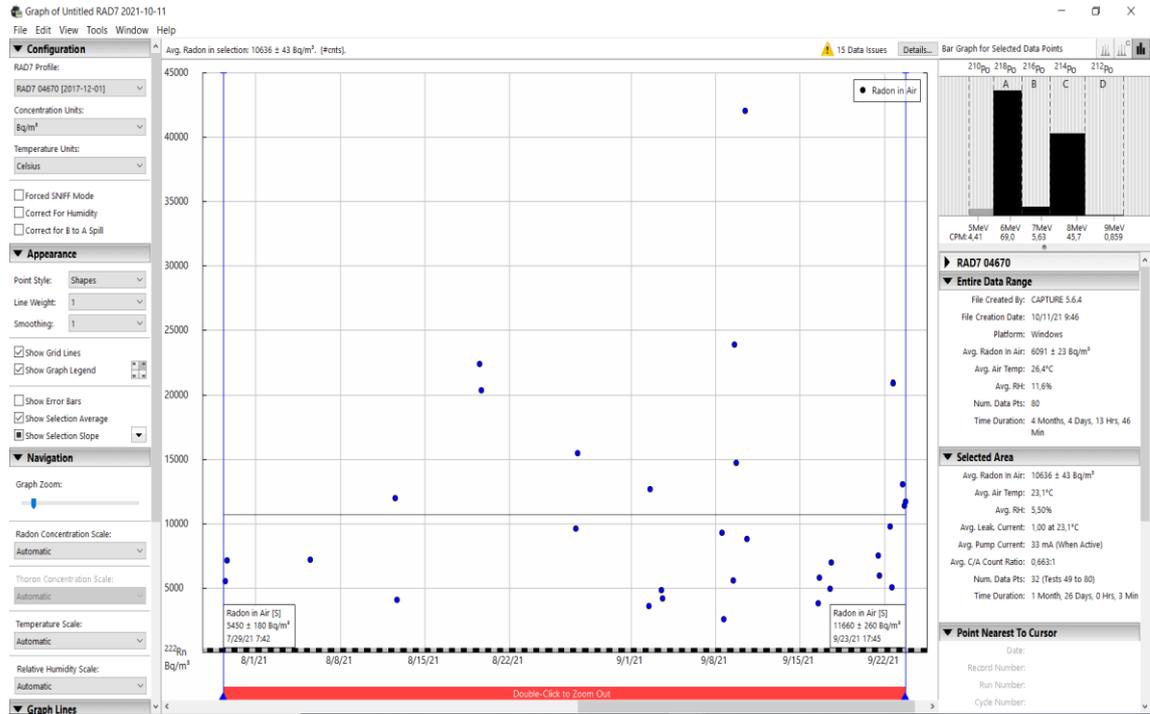
- 1) Indica si dos variables están correlacionadas o no,
- 2) El coeficiente r de Pearson indica la fuerza de la aparente relación
- 3) El coeficiente r de Pearson indica si la aparente relación es positiva o negativa.
- 4) El signo del coeficiente r de Pearson indica la naturaleza de la correlación entre las variables
- 5) El valor del coeficiente r de Pearson denota la fuerza o intensidad la correlación entre las variables
- 6) Si el signo de la correlación es positivo, significa que la relación es directa
- 7) Si el signo de la correlación es negativo, significa una relación inversa o indirecta.
- 8) El valor del coeficiente r Pearson está entre (-1) y (+1)
- 9) El valor del coeficiente r Pearson denota la fuerza de la asociación como se ilustra en el siguiente diagrama.

Si:

- a) $r = \text{cero}$ significa que no hay asociación o correlación entre las dos variables.
- b) 2. Si $0 < r < 0.25 =$ débil correlación.
- c) 3. Si $0.25 \leq r < 0.75 =$ intermedia correlación.
- d) 4. Si $0.75 \leq r < 1 =$ fuerte correlación.

ANEXO B: INTERFAZ DE CAPTURE

Aplicación utilizada para descargar los datos del detector RAD7



Realizado por: Guillca, Evelin; Naranjo, Kathya, 2022.

ANEXO C: AVAL DE LA INVESTIGACIÓN



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA EL
AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO



CERTIFICADO

A QUIÉN INTERESE:

El Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático GIDAC – ESPOCH, Certifica Que: Evelin Liliana Guillca Guaman con CI: 0605503846 y Kathy Milena Naranjo Buenaño con CI: 0604676239 estudiantes de la carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, desarrollará el Trabajo de Titulación denominado: “**Estimación de la concentración de gas radón en suelo mediante el método weeks en la falla Pallatanga en el sector de Cajambamba**”, mismo que forma parte del Proyecto de Investigación: “Exploración de la falla Pallatanga con técnicas nucleares y geofísicas (radón, magnetometría y gravimetría), estudio de caso de un área sísmicamente activa en Ecuador”

Este trabajo es de interés, tanto investigativo como aplicativo y contribuirá a la consecución de los objetivos propuestos en el mencionado proyecto de investigación, razón por la cual se otorga el **AVAL DE APROBACIÓN** para la realización de las diferentes actividades y el apoyo técnico necesario y disponible que así lo requieran las estudiantes.

Cabe mencionar que el patrimonio intelectual de los resultados que se obtengan del trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de noviembre de 2021

Atentamente,



Firmado digitalmente por:
MAGDY MILENI
ECHEVERRIA
GUADALUPE

Dra. Magdy Echeverría., PhD

DIRECTORA GIDAC-ESPOCH



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

*UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 16 / 06 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Evelin Liliana Guillca Guamán Kathya Milena Naranjo Buenaño
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería en Biotecnología Ambiental
Título a optar: Ingeniera en Biotecnología Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**



1202-DBRA-UTP-2022