



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERIA EN BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES DE RADÓN EN
SUELO DEL SECTOR CAJABAMBA-COMUNIDAD
HUACONA, PROVINCIA DE CHIMBORAZO.**

Trabajo de Titulación:

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: CRISTIAN ISMAEL MURILLO PÁSTOR

DIRECTOR: Dr. MIGUEL TASAMBAY SALAZAR, PhD

Riobamba – Ecuador

2023

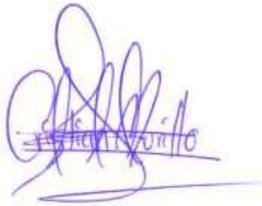
© 2023, Cristian Ismael Murillo Pástor

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

Yo, Cristian Ismael Murillo Pástor, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi auditoria y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo 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,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cristian Ismael Murillo Pástor', with a horizontal line drawn through it.

Cristian Ismael Murillo Pástor

C.I. 160060983-6

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, **EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES DE RADÓN EN SUELO DEL SECTOR CAJABAMBA-COMUNIDAD HUACONA, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, realizado por el señor: **CRISTIAN ISMAEL MURILLO PÁSTOR**, 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
Dr. Luis Elías Guevara Ñíguez, MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-08-09
Dr. Miguel Tasambay Salazar, PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-08-09
Ing. Juan Carlos Gonzáles García, PhD. ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-08-09

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado primeramente a Dios por la vida y salud durante todo este tiempo, a mis padres Margoth Pástor y Pablo Murillo quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento, brindándome paciencia, confianza y sacrificio. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor me permitió alcanzar mis metas. A mis hermanos Pablo y Sebastián que han sido mi motor de vida y las ganas de continuar para no caer y seguir esforzándome para ser una mejor persona. A toda mi familia que de una u otra forma han estado presentes en cada paso de mi carrera. A mis colegas Anthony, Jhosue, Norlly e Itzayana que con su ayuda, consejos, motivación y palabras de aliento han aportado en este logro. A ti Noe que estuviste desde el inicio de este sueño que hoy he logrado cumplirlo, por tu cariño, aprecio, por estar siempre en los buenos y malos momentos y no dejarme solo cuando más necesitaba de alguien. A todos ellos dedico el presente trabajo, quienes han contribuido a la consecución de este logro.

Cristian

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental por darme la oportunidad de formarme de manera íntegra, al grupo de investigación GIDAC por abrirme las puertas y darme la oportunidad de expandir mi conocimiento. Al ingeniero José Luis Herrera por su ayuda al momento de realizar la parte técnica de este proyecto. A mi tutor el Dr. Miguel Tasambay y asesor Ing. Juan Carlos Gonzales por su asesoramiento, paciencia y apoyo en el desarrollo del trabajo realizado.

Cristian

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1.	Planteamiento del problema.....	2
1.2.	Problema general de investigación	2
1.3.	Problemas específicos de investigación	3
1.4.	Objetivos	3
1.4.1.	<i>Objetivo general</i>	3
1.4.2.	<i>Objetivos específicos.....</i>	3
1.5.	Justificación	4
1.5.1.	<i>Justificación teórica</i>	4
1.5.2.	<i>Justificación metodológica</i>	5
1.5.3.	<i>Justificación práctica</i>	5
1.6.	Hipótesis.....	5

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	6
2.1.	Antecedentes de investigación.....	6
2.2.	Bases teóricas.....	7
2.2.1.	<i>Radioactividad</i>	7
2.2.1.1	<i>Radioactividad artificial</i>	7
2.2.1.2.	<i>Radioactividad natural</i>	8
2.2.1.3.	<i>Radioactividad de Riesgo de exposición al radón</i>	9
2.2.2.	Radón.....	9
2.2.2.1.	<i>Radón 222.....</i>	9

2.2.2.2.	<i>Propiedades físicas, químicas y radiológicas del radón</i>	9
2.2.2.3.	<i>Propiedades físicas</i>	10
2.2.2.4.	<i>Propiedades químicas</i>	10
2.2.2.5.	<i>Propiedades radiactivas del ²²²Rn y su descendencia de vida corta</i>	11
2.2.2.6.	<i>Cadena de desintegración del radón</i>	11
2.2.3.	<i>Radón en el ambiente</i>	12
2.2.3.1.	<i>Radón emanación y difusión</i>	13
2.2.4.	<i>Características fisicoquímicas del suelo</i>	14
2.2.4.1.	<i>Humedad</i>	15
2.2.4.2.	<i>Conductividad eléctrica</i>	15
2.2.4.3.	<i>pH (potencial de hidrógeno)</i>	16
2.2.5.	<i>Correlación</i>	17
2.2.5.1.	<i>Correlación de Pearson</i>	17
2.2.5.2.	<i>Regresión Lineal</i>	18
2.2.6.	<i>Sistema de detección de gas radón en suelo</i>	21
2.2.6.1.	<i>Detector RAD 7</i>	21
2.2.6.2.	<i>Sonda de acero inoxidable para detección de gas</i>	22
2.2.6.3.	<i>Unidad de secado</i>	24
2.2.6.4.	<i>Medición de gas radón</i>	25

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA	27
3.1.	Enfoque de Investigación	27
3.2.	Nivel de Investigación	28
3.3.	Diseño de Investigación	28
3.3.1.	<i>Identificación de variables</i>	28
3.3.1.1.	<i>Variable independiente</i>	28
3.3.1.2.	<i>Variable dependiente</i>	28
3.3.1.3.	<i>Variabes intervinientes</i>	28
3.3.2.	<i>Selección de la muestra</i>	28
3.4.	Tipo de estudio	29
3.5.	Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de muestra	29
3.6.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	29
3.6.1.	<i>Fase de campo</i>	31
3.6.1.1.	<i>Metodología de medición de gas radón-222 en el suelo</i>	32

3.6.1.2.	<i>Metodología de muestreo de suelo para análisis fisicoquímico</i>	35
3.6.1.3.	<i>Metodología para recolección de muestras de suelo para cálculo de humedad</i>	36
3.6.1.4.	<i>Variables meteorológicas</i>	37
3.6.2.	<i>Fase de laboratorio</i>	38
3.6.2.1.	<i>Determinación de potencial de hidrógeno (pH)</i>	38
3.6.2.2.	<i>Determinación de la conductividad</i>	39
3.6.2.3.	<i>Medición de humedad de suelo</i>	39

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	41
4.1.	Fase de campo	41
4.1.1.	<i>Concentraciones de Radón-222</i>	41
4.1.2.	<i>Correlación entre las variables de estudio</i>	42
4.1.2.1.	<i>Correlación ente Concentración de Radón y humedad</i>	44
4.1.3.	<i>Correlación ente concentración de radón y pH</i>	45
4.1.4.	<i>Concentraciones de humedad</i>	45
4.1.5.	<i>Concentraciones de conductividad eléctrica</i>	47
4.1.6.	<i>Concentraciones de pH</i>	48
4.1.7.	<i>Variables meteorológicas</i>	49
4.1.7.1.	<i>Mapa de calor con datos meteorológicos obtenidos de temperatura</i>	50
4.1.7.2.	<i>Mapa de calor con datos meteorológicos obtenidos de humedad relativa %</i>	50

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1.	Conclusiones	52
5.2.	Recomendaciones	53

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Propiedades físicas, químicas y radiológicas del radón.....	9
Tabla 2-2:	Propiedades radiactivas del ^{222}Rn y su descendencia de vida corta.....	11
Tabla 2-3:	Valores de pH en el suelo	16
Tabla 3-1:	Coordenadas de los puntos de muestreo	32
Tabla 4-1:	Datos obtenidos de las variables meteorológicas.....	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Cadena de desintegración del radón.....	12
Ilustración 2-2:	Ejemplo de una regresión lineal con una variable dependiente y una variable independiente	19
Ilustración 2-3:	Sistema de detección de gas radón	21
Ilustración 2-4:	Detector RAD 7.....	22
Ilustración 2-5:	Detección de gas radón por la sonda de acero inoxidable.....	23
Ilustración 2-6:	Componentes de la sonda de acero inoxidable.....	23
Ilustración 2-7:	Tubos de secado y desecante.....	24
Ilustración 2-8:	Configuración normal del detector.....	24
Ilustración 2-9:	Acoplamiento de los componentes del sistema de detección de gas radón y torón	25
Ilustración 3-1:	Área de estudio en el sector Cajabamba.....	27
Ilustración 3-2:	Puntos de muestreo en el sector Cajabamba	31
Ilustración 3-3:	Purga del detector RAD 7	33
Ilustración 3-4:	Barreno tipo holandés.....	33
Ilustración 3-5:	Colocación de yeso.....	34
Ilustración 3-6:	Sistema de detección de gas radón en el suelo	34
Ilustración 3-7:	Medición de gas radón-222	35
Ilustración 3-8:	Impresión de los valores.....	35
Ilustración 3-9:	Toma de muestra con el barrero	36
Ilustración 3-10:	Perforación del suelo	36
Ilustración 3-11:	Cilindro para toma.....	37
Ilustración 3-12:	Medidor de condiciones ambientales	37
Ilustración 3-13:	Medición de pH.....	38
Ilustración 3-14:	Conductímetro	39
Ilustración 3-15:	Muestras en la estufa	40
Ilustración 4-1:	Concentraciones de gas radón-222(Bq/m ³).....	41
Ilustración 4-2:	Mapa con las concentraciones de gas radón-222	42
Ilustración 4-3:	Correlación de radón con las variables.....	43
Ilustración 4-4:	Diagrama de correlación entre Concentración de Radón y humedad	44
Ilustración 4-5:	Diagrama de correlación ente Concentración de Radón y pH	45
Ilustración 4-6:	Mapa de concentraciones de humedad.....	46
Ilustración 4-7:	Porcentaje de concentraciones de humedad en suelo	46

Ilustración 4-8:	Mapa con las concentraciones de conductividad eléctrica	47
Ilustración 4-9:	Datos obtenidos de conductividad eléctrica de suelo	48
Ilustración 4-10:	Mapa de concentraciones de pH.....	48
Ilustración 4-11:	Datos obtenidos de pH de suelo	49
Ilustración 4-12:	Mapa de calor de temperatura	50
Ilustración 4-13:	Mapa de color de la humedad relativa.....	51

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1:	pH	16
Ecuación 2-2:	Ionización de H ₂ O	16
Ecuación 2-3:	Formula de correlación de Pearson.....	17
Ecuación 2-4:	Formula de regresión lineal	20
Ecuación 2-5:	Formula de un modelo de no correlación.	20
Ecuación 3-1:	Porcentaje de humedad	40
Ecuación 4-1:	Ecuación lineal de radón con humedad	44
Ecuación 4-2:	Ecuación lineal de radón con pH	45

RESUMEN

En la actualidad no se dispone de información científica y no hay registros de las concentraciones de radón en suelo en la provincia de Chimborazo y en el país. Teniendo en conocimiento estos detalles se desarrolló este proyecto con el fin de obtener información que ayude a desarrollar un mapa geográfico que indique las diferentes concentraciones de radón en suelo, el objetivo de la investigación fue evaluar las concentraciones de radón en el suelo del sector de Cajabamba-comunidad Huacona, provincia de Chimborazo. El estudio se llevó a cabo durante noviembre 2022 - abril 2023. La metodología tuvo un enfoque cuantitativo no experimental con un nivel de profundidad de estudio correlacional. Se realizó un muestreo discreto basado en una cuadrícula de puntos equidistantes en el área transversal del sector de estudio; se utilizó una muestra aleatoria estratificada para comparar las mediciones de radón y parámetros fisicoquímicos de cada uno de los subsectores obteniéndose la medida de la concentración de radón y las respectivas muestras para el análisis en el laboratorio; la población de estudio fue las comunidades de Huacona y Cicalpa, se aplicó los métodos de gravimetría del cilindro, cilindro de volumen conocido y medición WEEKS. Se determinó los resultados obteniendo que la concentración de radón con la humedad del suelo exhibe una correlación significativa de 0.74 con p-valor 0.02 lo que quiere decir que existe una relación directamente proporcional, la concentración del radón con pH y conductividad eléctrica se identificó una correlación negativa de -0.61 con p-valor 0.03, es decir, una relación inversamente proporcional, señalando que a mayor pH y conductividad eléctrica menor será la concentración del radón. Mediante los mapas de calor relacionamos a las variables meteorológicas, entre, temperatura y humedad relativa %, se pudo identificar geográficamente aquellas partes en los que se registra máximos y mínimos valores.

Palabras clave: <RADÓN>, <POTENCIALES RELACIONE>, <PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS>, <HUACONA-CICALPA>, <MÉTODO WEEKS>, <CORRELACIÓN>, <P-VALOR>.



1670-DBRA-UPT-2023

SUMMARY

Currently, no scientific information is available, and there are no records of radon concentrations in soil in the province of Chimborazo and the country. Knowing these details, this project was developed to obtain information that helps to develop a geographical map that indicates the different concentrations of radon in soil. This research aimed to evaluate the concentrations of radon in the soil of the Cajabamba sector, Huacona community, Chimborazo province. The study was carried out from November 2022 to April 2023. The methodology had a non-experimental quantitative approach with a depth of correlational study. A discrete sampling was carried out based on a grid of equidistant points in the cross-sectional area of the study sector. A stratified random sample was used to compare the radon measurements and physicochemical parameters of each one of the subsectors, obtaining the measurement of the radon concentration and the respective samples for analysis in the laboratory. The study population was the communities of Huacona and Cicalpa; the methods of gravimetry of the cylinder, cylinder of known volume and WEEKS measurement were applied. The results were determined by obtaining that the concentration of radon with soil moisture exhibits a significant correlation of 0.74 with a p-value of 0.02, which means that there is a directly proportional relationship between the concentration of radon with pH and electrical conductivity, a negative correlation of -0.61 with p-value 0.03 was identified, that is an inversely proportional relationship, indicating that the higher the pH and electrical conductivity, the lower the radon concentration. Through the heat maps, we relate to the meteorological variables, between temperature and relative humidity %, it was possible to geographically identify those parts in which maximum and minimum values are recorded.

Keywords: <RADON>, <POTENTIAL RELATIONSHIP>,<PHYSIC-CHEMICAL PARAMETERS>, <HUACONA-CICALPA>, <WEEKS METHOD>, <CORRELATION>, <P-VALUE>.



Ing. Angel Paul Obregón Mayorga, Mgs.

C.I. 0601927122

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la escasa difusión de información entre la población ha tenido consecuencias negativas en relación con diversas enfermedades asociadas al gas radón, el cual se posiciona como uno de los principales factores de riesgo de cáncer de pulmón, después del tabaco. Esta investigación se centra en la recolección de información para detectar la zona con mayor concentración de radón en la zona de estudio y mapearlos, de igual forma, para de una manera ayudar a estudios posteriores, ya que no se dispone de información documentada por parte de esas zonas de estudio.

Aunque es sabido que el gas radón carece de olor, color, sabor y no se puede percibir al tacto, debido a ser un gas noble y químicamente inerte, tiene la capacidad de ser transportado a través de acuíferos, así como por procesos de difusión y gradiente de presión. Esto se debe a su alta solubilidad en agua, especialmente a bajas temperaturas y altas concentraciones de salinidad (Lorenzo-González, et al., 2019). En la zona de estudio, se ha identificado una fractura en la corteza terrestre que posiblemente se formó debido a las fuerzas ejercidas por las placas tectónicas.

El estudio consiste en establecer posibles relaciones entre la concentración de radón y las variables medidas en suelo potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y humedad. El trabajo se ha organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo I, se presenta una exposición formal del problema, se describen los antecedentes existentes en el campo de investigación correspondiente y se argumenta la importancia de recopilar información con el fin de implementar mapas que establezcan límites territoriales de concentraciones máximas permitidas para la salud humana. Además, se plantean los objetivos necesarios para el desarrollo completo del estudio.

El Capítulo II se proporciona la fundamentación básica indispensable para llevar a cabo esta investigación, abordando temas como el origen y las propiedades físicas del radón, los métodos de transporte y emisión del gas, así como los diagramas completos de las series de descomposición natural. Además, se exploran los efectos biológicos resultantes de la inhalación y exhalación del gas radón, y se realiza una comparación con las propiedades del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica y la humedad.

Por último, en el Capítulo III se examinan los resultados obtenidos durante la investigación de campo y se identifican las conclusiones más significativas del estudio, junto con las recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El radón es un gas radiactivo de procedencia natural que se emana desde la corteza terrestre. Este gas se forma a partir del uranio 238, un elemento inestable que, en su búsqueda de estabilidad, emite energía y se descompone en radio 226. A su vez, el radio 226, al igual que el uranio, se descompone gradualmente y se transforma en radón 222.

En la actualidad no se dispone de información científica y no hay registros de las concentraciones de radón en suelo en la provincia de Chimborazo y en el país. Teniendo en conocimiento estos detalles se desarrolló este proyecto con el fin de obtener información que ayude a desarrollar un mapa geográfico que indique las diferentes concentraciones elevadas de radón en suelo. Se desconoce también las potenciales relaciones entre las concentraciones de radón y las variables de estudio y ambientales.

Si bien sabemos que el radón es inodoro, invisible, insípido e imperceptible al tacto. Es químicamente inerte al ser un gas noble. Se puede transportar por acuíferos, al igual que procesos difusión y gradiente de presión todo esto debido a que es altamente soluble en agua especialmente a bajas temperaturas y de alta salinidad.

La medición de los niveles de radón en el suelo es necesaria debido a diversas razones, entre las cuales se destaca la salud. Sin embargo, otro factor relevante es que la tasa de exhalación de radón desempeña un papel crucial en la caracterización de los diferentes tipos de suelo. Además de la falta de documentación e información en estudios técnicos, como justificación para realizar esta investigación.

1.2. Problema general de investigación

En la actualidad, no existe información científica ni registros disponibles sobre las concentraciones de radón en el suelo tanto en la provincia de Chimborazo como en el resto del país. Teniendo en conocimiento estos detalles este proyecto pretende obtener información sobre un mapa geográfico que indique las diferentes concentraciones de radón en suelo. Se desconoce

también las potenciales relaciones entre las concentraciones de radón y las variables del sustrato y ambientales.

1.3. Problemas específicos de investigación

La presencia de altos niveles de radón en el suelo puede causar un impacto notable en la población en su conjunto. En promedio, la radiación total a la que los seres humanos están expuestos equivale a una dosis de aproximadamente un miliSievert (mSv) por año, lo que se conoce como "fondo radiactivo". Sin embargo, este valor puede variar de una zona a otra. Las radiaciones cósmicas, originadas en el espacio exterior, aumentan con la altitud y la latitud. Por lo tanto, vivir a una altitud de 1000 metros sobre el nivel del mar puede implicar recibir hasta un 20% más de radiación en comparación con residir a nivel del mar.

Simultáneamente, se observa una mayor radiación en los polos en comparación con el Ecuador. Además, las características geológicas del terreno y la existencia de minerales específicos, como rocas de fosfatos y carbón, pueden afectar el nivel global de radiación. Estos minerales pueden contener trazas de materiales radiactivos como el uranio y el radio.

No existen datos de un monitoreo de radón en la parroquia de Cajabamba, por lo cual no hay conciencia ni conocimiento general sobre los peligros de la radiación y los niveles de exposición al radón en interiores, en el suelo y el agua. El ^{222}Rn está clasificado como carcinógenos humanos de categoría uno. (Mose, et al., 2014) estima que el radón del aire interior de un hogar es la segunda causa principal de cáncer de pulmón en la actualidad. Desde que se identificó este riesgo, se han realizado muchos estudios para determinar los efectos de diferentes parámetros ambientales en las tasas de emanación de radón hacia las viviendas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar las concentraciones de radón en el suelo del sector Cajabamba-comunidad Huacona, provincia de Chimborazo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de radón en suelo presentes en el sector de estudio.

- Relacionar las concentraciones de radón con los parámetros de humedad, conductividad y potencial de hidrógeno (pH).
- Elaborar mapas de distribución de concentraciones de radón y parámetros ambientales existentes en el sector de estudio.

1.5. Justificación

1.5.1. Justificación teórica

Debido a que el radón es un gas radioactivo de procedencia natural que puede encontrarse en concentraciones altas en espacios interiores, como hogares y entornos laborales, se le atribuye ser la principal causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras y la segunda causa en fumadores, según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por esta razón, en este estudio se llevará a cabo la cuantificación del radón en el suelo, con el propósito de contribuir a la gestión de los riesgos asociados a este gas.

La presencia de radón en el suelo se origina a partir de fallas activas que actúan como conductores eficientes en el proceso de desgasificación del terreno (King, et al., 1993, p.2). En nuestra área de estudio, se reconoce la presencia de la falla activa Pallatanga, y es crucial destacar que múltiples investigaciones (Richon et al., 2003, p.7) indican que existe una correlación entre la actividad de las fallas geológicas y la concentración de radón en el gas presente en el suelo. Esta variable se emplea para la creación de mapas de fallas activas (Ioannides et al., 2003, p.4) y como un indicador predictivo de la actividad sísmica. (Lagios, et al., 2000, p.4) o volcánica (Richon et al., 2003, p.2).

La realización de este estudio es factible debido a la disponibilidad de equipos técnicos, herramientas necesarias y el respaldo logístico institucional. Existe el conocimiento suficiente de la física del decaimiento de la serie del uranio, sería un aporte al conocimiento al cuantificar estas concentraciones en este proyecto.

Desde el año 2009, los especialistas del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional han estado investigando esta cuestión. Según sus cálculos, los bloques rocosos experimentan un desplazamiento de aproximadamente ocho milímetros por año, y este fenómeno es la causa de las grietas que surgen de manera abrupta en ciertas residencias edificadas en regiones como Pallatanga, Guamote y Colta, tres municipios situados en la provincia de Chimborazo (Márquez, 2019, p.3).

En el área de estudio, se ha identificado una falla en la corteza terrestre que puede haber surgido debido a la presión ejercida por las placas tectónicas. Esta fractura del terreno resulta en la formación de dos bloques rocosos que se desplazan y se rozan constantemente, lo que da lugar a

la acumulación de energía. Cuando esta energía se libera, se produce un movimiento sísmico (Márquez, 2019, p.9).

1.5.2. Justificación metodológica

La metodología a desarrollarse es de carácter no experimental ya que no se manipulará las variables presentadas, al tratarse un nivel de profundidad de estudio correlacional. Los datos obtenidos serán procesados mediante la estadística descriptiva, los mismos que serán organizados para generar la investigación. La información recolectada en el presente estudio ayudará de guía para posteriores estudios que beneficiaran a la población y comunidad en general ya que no se dispone de información de estudios en esta zona.

1.5.3. Justificación práctica

La obtención de datos nos ayudará a determinar los puntos con mayor concentración de radón en el suelo. De esta manera nos referimos a unos de nuestros objetivos planteados en este estudio de investigación en el cual, vamos a crear mapas de identificación de zonas de alta concentración de radón.

Esto beneficiará a la población para que puedan identificar las zonas peligrosas en donde existe mayor concentración de radón, de tal manera que los proveerá de información adecuada que antes no tenían disponible y se podría decir que corrían riesgo al recorrer esas zonas.

Se utilizará una muestra aleatoria estratificada para comparar las mediciones de radón y parámetros fisicoquímicos de cada uno de los subsectores establecidos. Obteniéndose la medida de la concentración de radón y las respectivas muestras para el análisis en el laboratorio en cada punto.

1.6. Hipótesis

Las concentraciones de radón en suelo son proporcionales con las características físico químicas de éste.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

En Ecuador, aproximadamente el 80% de los casos de cáncer de pulmón se diagnostican en etapas avanzadas. Según datos del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, las causas principales están relacionadas principalmente con el consumo de tabaco, y en menor medida, con la exposición al asbesto y al radón. La radiación del radón tiene un efecto perjudicial en el ADN de las personas cuando es inhalado, lo que puede provocar mutaciones en el tejido pulmonar y aumentar significativamente las probabilidades de desarrollar cáncer en este órgano (Aucapiña y Llanes, 2016, p.5).

Los médicos no suelen dar una puntuación de riesgo de cáncer de pulmón, ni predicen la incidencia o la mortalidad que causa el radón en la residencia. De hecho (Lorenzo et al., 2019, p.2) mencionan que se necesitan más estudios para descubrir las vías moleculares del radón que causan cáncer de pulmón y si este gas radiactivo también está involucrado en el desarrollo de otras enfermedades además del cáncer de pulmón. Para lo cual, existe una clara necesidad de aumentar la concienciación entre los profesionales de la salud y la población en general para tomar las medidas necesarias para reducir esta exposición dañina, particularmente en áreas propensas al radón.

Para el estudio realizado por (Kumar, et al., 2018, p.6) demostraron que los niveles interiores de radón son más altos en las viviendas de barro, mientras que los valores mínimos se encontraron en viviendas de hormigón. Además, mencionan que la variación estacional también influye debido a que los niveles de radón se encontraron más altos en la temporada de invierno y más bajos en la temporada de verano, mostrando que la diferencia del material de construcción y los patrones de flujo de aire se pueden atribuir a la variabilidad observada.

(Cronin, et al., 2020, p.7) muestra que las personas presentan un bajo conocimiento del radón y sus peligros para la salud, y menos probabilidades de actuar para prevenir la exposición al radón. También demuestra que incluso si existe conciencia sobre el radón, se necesitan mejores estrategias de comunicación para que la conciencia sobre el radón se traduzca en medidas de protección de la salud.

Según (Pereyra, 2015, p.3) el Rn puede estar presente en diversos tipos de viviendas, con materiales

de construcción que emiten radón, que ingresan a una casa a través de grietas en los cimientos, grietas en las paredes, espacios alrededor de las tuberías e incluso a través del agua. Para su estudio se utilizó detectores pasivos que emplean la técnica Nuclear Tracks (SSNTD), estos detectores están fabricados en nitrato de celulosa LR115 Tipo 2, de 12 μm de espesor, de alta sensibilidad, capaces de registrar el paso de partículas alfa de baja energía.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Radioactividad

La radiactividad es un fenómeno nuclear. Es la emisión espontánea de radiación del núcleo. Según las investigaciones de Loveland et al. (2006), Stabin (2007) y Best et al. (2013), se establece que la desintegración radiactiva es un proceso estocástico, es decir, aleatorio, a nivel de átomos individuales. De acuerdo con la teoría cuántica, resulta imposible predecir cuándo un átomo específico se desintegrará, sin importar cuánto tiempo haya existido dicho átomo.

El concepto de radiactividad, según (Farinde et al., 2015, p.3), explicaron que la radiactividad es la desintegración espontánea o el decaimiento aleatorio o la ruptura o fragmentación de elementos/muestras/materiales radiactivos con la emisión de partículas alfa, partículas beta y radiación gamma, lo que resulta en la liberación de energía. A nivel avanzado, se ha demostrado que además de estas partículas, en el proceso de radiactividad también se liberan otras partículas como positrones, betatrones, antiprotones, antineutrinos, etc. Explicaron además que la tasa de descomposición depende del material radiactivo y varía ampliamente de un material a otro. Ningún proceso físico o químico puede alterar o afectar la velocidad a la que procede la desintegración de los átomos (Omeodu y Bethel, 2018, p.2).

2.2.1.1 Radioactividad artificial

La radiación artificial se refiere a aquella generada por actividades humanas, las cuales han empleado la radiación para diversos fines. Sin embargo, es fundamental controlar y aplicar medidas de protección adecuadas. En algunos casos, es posible recibir una dosis de radiación relativamente baja (Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, 2016, p. 32).

En el ámbito médico, se ha empleado la radiación tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de diversas enfermedades. De hecho, representa aproximadamente el 98% de la exposición a fuentes artificiales de radiación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la

administración de dosis altas a los pacientes conlleva el mayor riesgo de exposición. En caso de una aplicación incorrecta, esto puede resultar en daños graves e incluso en la muerte (Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, 2016, p. 33).

Los reactores nucleares operan mediante una reacción en cadena en la que ciertos isótopos de uranio o plutonio son bombardeados con neutrones, liberando energía y produciendo dos núcleos más pequeños junto con dos o más neutrones adicionales. Estos neutrones pueden, a su vez, colisionar con otros núcleos de uranio y plutonio, repitiendo así la reacción en cadena. Con el propósito de hacer uso de la energía liberada, las plantas de energía nuclear se emplean para producir electricidad. (Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, 2016, p. 39). Se estima que la principal fuente de exposición a radiación en las centrales nucleares proviene de la minería y el procesamiento de uranio, actividades que generan una considerable cantidad de residuos que contienen radionucleidos naturales (Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, 2016, p. 41).

La medición de la radioactividad se realiza utilizando el Sistema Internacional de Unidades (SI), donde la unidad de medida es el becquerel (Bq). Un becquerel representa la desintegración de un núcleo radiactivo, ya sea de forma espontánea o inducida, por cada segundo. En el Sistema Inglés, se utiliza la unidad curie (Ci), que equivale a 37 mil millones de becquerel (Bq) (Vazquez et al., 2019, p.45).

2.2.1.2. Radioactividad natural

Los seres humanos están expuestos de forma natural a la radiación ionizante proveniente de diferentes fuentes, como los rayos cósmicos y los radionúclidos naturales en los alimentos, el aire y el agua. Se ha informado que los radionucleidos naturales en el agua brindan información a partir de la cual se puede estimar la exposición promedio a la radiación de diferentes fuentes (El Arabi et al., 2006). La contaminación del agua puede deberse a la deposición de materiales de desecho introducidos en la atmósfera, la descarga directa en la superficie o el subsuelo, y debido a los desechos, colocados sobre o en el suelo.

Los contaminantes del suelo pueden ser movilizados eventualmente por las aguas subterráneas o la erosión de las aguas superficiales se acoplan a los acuíferos subterráneos, los suelos y la atmósfera (Almayahi et al., 2012, p.5). Aproximadamente el 20 % del radio se absorbe en el torrente sanguíneo cuando lo ingieren los humanos y luego se distribuye inicialmente en los huesos y los tejidos blandos, pero permanece durante mucho tiempo en los huesos en crecimiento (Ahmad, et al., 2015). Los estudios muestran que diferentes tipos de cánceres fatales debido al radón, una progenie del radio, ingerido del agua potable pueden ser iguales al cáncer de pulmón total debido a la

inhalación de radón (Ahmad et al., 2019, p.6).

2.2.1.3. Radioactividad de Riesgo de exposición al radón

En 1992, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) clasificó al radón como un carcinógeno (Guía del ciudadano de la EPA, 1992, p.8), principalmente debido a la evidencia presentada en el informe del comité BEIR VI. Según el informe, la evidencia epidemiológica de estudios en la población general respaldó los resultados anteriores presentados en el informe BEIR IV que mostró que la exposición al radón se asoció con un mayor riesgo de cáncer de pulmón (Cronin et al., 2020, p.23).

2.2.2. Radón

El radón es un gas noble que carece de color, olor y sabor, y a menudo se le llama "el asesino silencioso" debido a su naturaleza radiactiva. Este gas es responsable de alrededor de la mitad de la radiación natural a la que los seres humanos están expuestos a lo largo de su vida. Aunque existen principalmente tres isótopos naturales de radón, el más común y relevante como amenaza para la salud humana es el Rn-222, que representa el 80 % de todos los isótopos de radón (Lorenzo, et al., 2019, p.5).

2.2.2.1. Radón 222

El radón-222 es un producto de desintegración radiactiva natural del uranio-228 que está presente en la corteza terrestre. Es un producto de descomposición directa del radio-226. El radón-222 tiene una vida media de 3,82 días. Debido a que el radón es un gas, puede salir de la roca hacia el agua y el aire ambiente, donde puede quedar atrapado dentro de las casas y otros edificios, alcanzando niveles que no son seguros (Cronin et al., 2020, p.7).

Aunque el radón es un gas inerte, una gran proporción de la progenie del radón se depositará en los pulmones y no se exhalará. Dos de estos descendientes, el polonio-218 y el polonio-214, emiten partículas alfa, que alteran el ADN celular y pueden conducir al desarrollo de cáncer de pulmón (Harley et al., 2008, p.3).

2.2.2.2. Propiedades físicas, químicas y radiológicas del radón

Tabla 2-1: Propiedades físicas, químicas y radiológicas del radón

Propiedades	Radón	Referencia
Peso molecular	222 (radón), 220 (thoron), 219 (actinon)	Cothorn 1987a

Color	Descolorido	<u>Lewis 2001</u>
Estado físico	Gas a 0 °C y 760 mm Hg	<u>Lewis 2001</u>
Punto de fusión	-71 °C	<u>Lide 2005</u>
Punto de ebullición	-61.8 °C	<u>Lewis 2001</u>
Densidad a -20 °C	9.96×10 ⁻³ g/cm ³	<u>Cothorn 1987a</u>
Olor	Inodoro	<u>O'Neil et al. 2006</u>
Umbral de olor:		
Agua	Inodoro	
Aire	Inodoro	
Solubilidad:		
Agua a 20 °C	230 cm ³ /L	<u>O'Neil et al. 2006</u>
Disolventes orgánicos	Líquido orgánico, ligeramente soluble en alcohol	<u>Weast 1980</u>
Presión de vapor a 25 °Ca	395.2 mm Hg	<u>Cothorn 1987a</u>
Constante de la Ley de Henry	Sin datos	
Temperatura de autoignición	Gas noble; no autoincita	
Punto de inflamabilidad	Gas noble; no autoincita	
Límites de inflamabilidad	Gas noble; no autoincita	
Vida media:		
222Rn	3.8235 días	<u>DOE 2008</u>
220Rn	55.6 segundos	<u>DOE 2008</u>
219Rn	3.96 segundos	<u>DOE 2008</u>
Actividad específica, nI/masa (Ci/g):		
222Rn	1.538×10 ⁵	<u>Based on DOE 2008</u>
220Rn	9.135×10 ⁸	<u>Based on DOE 2008</u>
219Rn	1.301×10 ¹⁰	<u>Based on DOE 2008</u>

Fuente: Sam, et al., 2012.

2.2.2.3. Propiedades físicas

El radón es un gas que carece de sabor, color y olor. No obstante, cuando se encuentra a temperaturas inferiores a su punto de congelación, muestra una fosforescencia luminiscente con colores que varían desde el rojo-anaranjado hasta el amarillo. Muestra una baja solubilidad en el agua, pero se disuelve fácilmente en disolventes orgánicos. La capacidad de solubilidad del radón presenta una relación inversamente proporcional con la temperatura. Se puede disolver en hidrocarburos y, específicamente, en ácidos grasos, donde su capacidad de solubilidad se incrementa conforme aumenta la masa molecular del ácido (Garzón, 2009, p.2).

2.2.2.4. Propiedades químicas

Se han registrado la formación de algunos compuestos de radón con elementos altamente

reactivos, como fluoruro y cloruro, a pesar de que el radón ha sido clasificado como un gas noble. La inhalación de los residuos sólidos resultantes de la descomposición de este gas puede tener consecuencias significativas en los sacos de aire de los pulmones, por lo que su manejo debe ser realizado exclusivamente por profesionales capacitados. La presencia de radón en el suelo está estrechamente relacionada con su composición mineralógica, aunque también puede encontrarse en ciertas fuentes termales. En las minas de uranio, puede acumularse una considerable cantidad de radón (Garzón, 2009, p.7).

2.2.2.5. Propiedades radiactivas del ^{222}Rn y su descendencia de vida corta

Tabla 2-2: Propiedades radiactivas del ^{222}Rn y su descendencia de vida corta

Isótopo	Símbolo histórico	Radiaciones principales	Valor Q del modo de decaimiento principal (MeV)	Media vida	Actividad específica (Ci/g)
^{222}Rn	Rn	α	55.903	3,8235 días	1.54×10^5
$^{218}\text{Po a}$	RaA	α	61.147	3.098 minutos	2.78×10^8
^{218}en	A	α	6.874	1,5 segundos	3.45×10^{10}
^{214}Pb	RaB	β, γ	1.023	26,8 minutos	3.28×10^7
$^{214}\text{Bi}_-$	RaC	β, γ	56.168	19,9 minutos	4.41×10^7
$^{214}\text{Poá}$	RaC'	α	78.335	164,3 μ segundos	3.21×10^{14}
^{210}mil	RaC''	β	5.489	1,30 minutos	6.89×10^8

Fuente: Sam et al., 2012.

2.2.2.6. Cadena de desintegración del radón

La descomposición del radón se encuentra directamente relacionada con la presencia o ausencia de rocas y sedimentos que contienen elementos radiactivos. Estos elementos primarios se encuentran en todas estas rocas y sedimentos y, al descomponerse, se transforman en otros núcleos inestables. Estos núcleos inestables, a través de una cadena de desintegración, finalmente se transforman en núcleos estables, liberando radiactividad en el proceso (Palau et al., 2019, p.8).

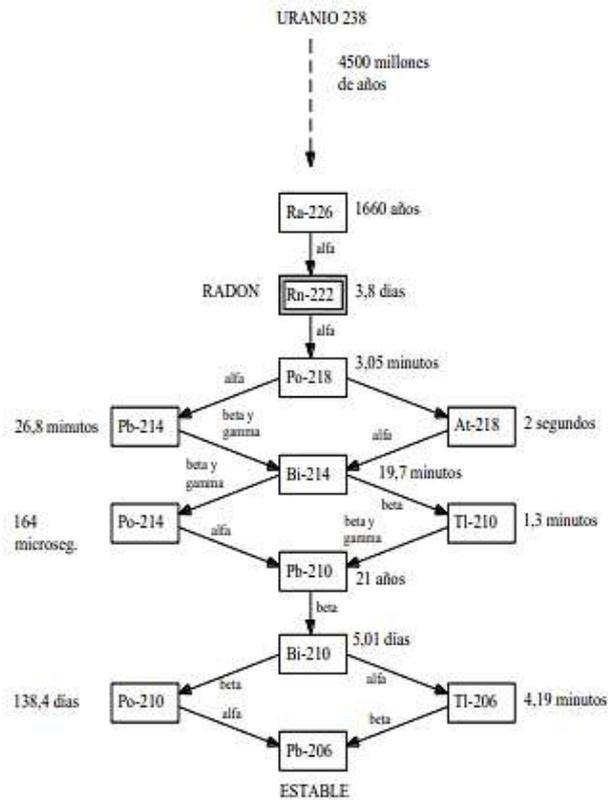


Ilustración 2-1: Cadena de desintegración del radón

Fuente: Vázquez, 2018.

2.2.3. Radón en el ambiente

La verdadera fuente de radón y sus productos de descomposición en el medio ambiente es el radio presente en varios materiales como el suelo, el agua y los materiales de construcción, ya que la cantidad de radio en el aire es insignificante (UNSCEAR, 1988, p.7). Se estima que cada milla cuadrada de suelo a una profundidad de 6 pulgadas contiene aproximadamente un gramo de radio, que libera radón en pequeñas cantidades a la atmósfera (Bushara, 2013, p.6).

El radón gaseoso puede moverse de forma independiente a grandes distancias y mantener una concentración significativa en la atmósfera durante días, incluso cuando se separa de su matriz. Por otro lado, los hijos del radón de vida corta no tienen una existencia independiente en la atmósfera (sus períodos de semidesintegración son considerablemente más breves en comparación con los del radón). Las hijas se acercan al equilibrio con bastante rapidez cuando no hay procesos reparativos activos. Por lo tanto, tendemos a considerar la concentración de radón y su variabilidad como indicadores de la posible dosis de radiación al pulmón de las hijas de vida corta (Bushara, 2013, p.8).

El grado en que cualquier material contribuye a la concentración de radón atmosférico depende del contenido de radio y de la fracción del radón formado en la descomposición que se libera a la atmósfera. Vale la pena recordar que el radón se produce en cualquier material a un ritmo constante que es independiente de cualquier factor externo. Así, en un espacio cerrado, la concentración se acumulará hasta un valor de equilibrio dependiendo de la cantidad de radio presente y el volumen. El volumen de gas del suelo a una profundidad podría considerarse un espacio de este tipo. Dado que la cantidad de radón que emana de la superficie solo disminuye la concentración cerca de la superficie (Bushara, 2013, p.7).

2.2.3.1. Radón emanación y difusión

La emanación de átomos de radón de un material es el proceso por el cual los átomos de radón escapan de una cantidad del material. Los mecanismos de liberación de radón de la roca, el suelo y otros materiales no se comprenden muy bien y probablemente no sean los mismos. Se informó que la tasa de emanación de radón está influenciada por la condición del suelo y su porosidad, contenido de humedad, temperatura y presión atmosférica (UNSCEAR, 1988, p.8).

Si el contenido de humedad es muy bajo, la liberación de radón disminuye por el efecto de la reabsorción de los átomos de radón en las superficies de los poros. Por otro lado, si el contenido de humedad aumenta ligeramente, la liberación de radón aumenta hasta cierto contenido de humedad, por encima del cual la liberación de radón vuelve a disminuir debido a la disminución de la tasa de difusión en los poros llenos de agua (Ahmed, 2016, p.6).

Se encontró que la emanación de radón del suelo depende no solo del ^{238}U y ^{226}Ra la concentración sino también de la naturaleza de la mineralogía huésped y de la permeabilidad de la roca huésped y del suelo. Se encontró que el efecto de la pintura, en general, es reducir la emanación de radón de las superficies de los ladrillos, lo que aumenta la concentración de radón dentro del ladrillo. La emanación de radón aumenta desde la zona sin pintar del ladrillo debido al aumento de la concentración de radón en su interior. También se encontró que la emanación de radón aumenta a partir del ladrillo revestido con yeso y yeso; por lo tanto, el acabado interno puede aumentar la concentración de radón dentro de las casas (Ahmed, 2016, p.4).

La difusión se identifica como el principal método por el cual el radón se transfiere dentro y fuera de los módulos del sótano y parece ser relativamente independiente de los materiales aislantes y retardadores de vapor. Se encontró que la variabilidad del radón y las correlaciones con los gradientes de presión diferencial pueden estar relacionadas con la corriente de aire en las paredes de bloques y el suelo que interrumpió la difusión del radón hacia el interior.

Una vez que el radón ha entrado en el aire o el agua que rodea la partícula que contiene radio que emana, es transportado por difusión, flujo mecánico y convectivo de la tierra, percolación del agua de lluvia y flujo de agua subterránea. Se demostró que no hay evidencia suficiente para aceptar el mecanismo impulsado por presión como el mecanismo dominante de infiltración de radón en los hogares, y el flujo de gas de termo difusión en arcilla y concreto puede exceder en gran medida el flujo impulsado por presión (Ahmed, 2016, p.4).

- **Entrada de radón en el suelo**

La migración del radón en el suelo se produce tanto por difusión como por transporte con el gas del suelo en movimiento. Su transporte a través de suelos naturales exhibe un comportamiento multicapa, donde cada capa tiene su propio coeficiente de difusión (Anon, 2016, p.2).

La presencia de radón en el gas del suelo incrementa a medida que se profundiza. La difusión y advección del radón desde el suelo están influenciadas por diversos factores físicos que afectan su formación y movimiento en el subsuelo, tales como:

- La estructura del suelo (La concentración de uranio en el suelo, la configuración de los poros del suelo, el tamaño de las partículas, la porosidad del suelo, la existencia de gases que transportan radón, la capacidad de la roca anfitriona para permitir su paso, el movimiento del agua subterránea y las condiciones de temperatura.).
- Variables meteorológicas (la humedad del suelo, la presión atmosférica, la velocidad del viento y el gradiente térmico del suelo).
- Características geofísicas (por ejemplo, la presencia de fallas geológicas y la actividad sísmica) y geológicas del área bajo estudio.
- Las altas emisiones de radón se caracterizan por discontinuidades y/o debilidades estructurales, como fallas y sistemas de fracturas, que aumentan la porosidad y la permeabilidad de los suelos y las rocas (Morales et al., 2019, p.7).

2.2.4. Características fisicoquímicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo, al tratarse de un cuerpo poroso compuesto por partículas orgánicas e inorgánicas en distintos grados de desintegración, junto con la presencia de agua y aire en proporciones variables, generan características como textura, estructura, consistencia, porosidad, drenaje y profundidad efectiva. Estas propiedades permiten establecer directrices para su manejo y estimar el rendimiento esperado (Universidad Nacional de la Plata, 2016).

Las propiedades químicas del suelo son objeto de estudio con el fin de comprender los componentes orgánicos e inorgánicos presentes en él, así como los procesos que conducen a la interacción y mezcla de estos componentes (Cajas, 2018, p. 2).

2.2.4.1. Humedad

La humedad del suelo se define como la cantidad de agua retenida en los espacios porosos entre las partículas del suelo en la zona no saturada o zona vadosa. La humedad del suelo superficial se define como la cantidad de agua presente en los primeros 5 cm de profundidad del suelo, mientras que la humedad en la zona de las raíces indica la disponibilidad de agua para las plantas y se refiere a una profundidad aproximada de 200 cm desde la superficie del suelo (Liang y Wang, 2020, p. 486).

La humedad desempeña un papel crucial en la comprensión de la transferencia de agua y energía térmica entre la superficie de la Tierra y la atmósfera mediante los procesos de evaporación y transpiración de las plantas. Adicionalmente, la humedad del suelo afecta los procesos climáticos, tales como la temperatura atmosférica, la estabilidad de la capa límite y, en algunas circunstancias, la precipitación.

La evaluación de la humedad del suelo desempeña un papel crucial en la recolección de datos relacionados con el clima, la escorrentía y el control de inundaciones, la erosión del suelo, la gestión de embalses, la detección de sequías, la programación de riego, el rendimiento de los cultivos y la calidad del agua, entre otros aspectos importantes. Por ejemplo, mediante la evaluación del contenido de humedad del suelo, se puede establecer un programa de riego para evitar el estrés hídrico de las plantas (Liang y Wang, 2020, p. 486).

2.2.4.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo se refiere a la medición de su salinidad, la cual se determina por la capacidad de la suspensión de agua en el suelo para conducir electricidad entre dos electrodos. En otras palabras, cuanto mayor sea la concentración de sales en el suelo, mayor será su capacidad para conducir electricidad (Corwin y Yemoto, 2020, p. 1444).

Para evaluar la conductividad eléctrica de una solución de suelo, se utiliza una celda que incluye electrodos de forma y tamaño específicos. Se aplica un voltaje eléctrico a través de los electrodos y se registra la resistencia de la solución entre ellos. La conductancia medida es el resultado de la

concentración de sales en la solución y la geometría del electrodo, y estos factores se reflejan en una constante específica de la celda (Corwin y Yemoto, 2020, p. 1444).

2.2.4.3. *pH (potencial de hidrógeno)*

El pH del suelo se emplea para evaluar su nivel de acidez o alcalinidad. Se define como el negativo del logaritmo de la concentración de iones hidrógeno, tal como se expresa en la Ecuación 2-1. (Pepper & Brusseau, 2019, p. 17).

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

Ecuación 2-1: pH

En general, el agua tiene la capacidad de ionizarse en iones H⁺ y OH⁻, como se describe en la Ecuación 2-2 (Pepper y Brusseau, 2019, p. 17).



Ecuación 2-2: Ionización de H₂O

Un pH inferior a 7 indica acidez, mientras que un pH superior a 7 indica alcalinidad o basicidad. En regiones con altos niveles de precipitación, los cationes tienen la tendencia de ser lavados fuera del perfil del suelo. Además, estas áreas suelen presentar una mayor cantidad de materia orgánica, la cual contribuye con componentes ácidos y residuos, resultando en valores de pH bajos y un suelo de carácter ácido. Por otro lado, en zonas áridas con baja precipitación, la concentración de materia orgánica es escasa y el agua tiende a evaporarse, lo que lleva a la acumulación de sales en el suelo y su alcalinización. La Tabla 2-3 muestra los niveles de acidez y alcalinidad en el suelo. El pH del suelo desempeña un papel significativo en la solubilidad de sustancias químicas, ya que afecta el grado de ionización de los compuestos. Por lo tanto, el pH del suelo juega un papel crítico al influir en el transporte de posibles contaminantes a través del suelo y la zona no saturada (Pepper y Brusseau, 2019, p. 17).

Tabla 2-3: Valores de pH en el suelo

SUELO	VALOR pH
Acido	<5,5
Neutral	6-8
Alcalino	>8,5

Fuente: (Pepper & Brusseau, 2019)

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

2.2.5. Correlación

La correlación se define como una medida estandarizada que indica la relación o covariación lineal entre dos variables. Es importante tener en cuenta que esta covariación no implica necesariamente causalidad, ya que la correlación puede ser simplemente coincidente. Un coeficiente de correlación cuantifica el grado en que dos variables tienden a cambiar simultáneamente, proporcionando información sobre la fuerza y dirección de la relación (Vinuesa, 2018, pp. 1-3).

2.2.5.1. Correlación de Pearson

La correlación de Pearson se utiliza para analizar la relación entre variables cuantitativas y es un índice que mide el grado de covariación entre ellas cuando existe una relación lineal. Es importante destacar que la correlación de Pearson se aplica específicamente a variables que están relacionadas de manera lineal. Si bien es posible que existan variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en tales casos, la correlación de Pearson no es adecuada para medir esa relación (Berry y Feldman, 1985, p.9)

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil cálculo e interpretación. Por ejemplo, en su forma absoluta, sus valores oscilan entre 0 y 1. Es decir, si tenemos dos variables X e Y y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre ellas como r_{xy} , entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1$$

Una vez que se establecen los términos "valores absolutos", se observa que el signo del coeficiente de correlación de Pearson varía entre -1 y +1. Es importante destacar que la magnitud de la relación está determinada por el valor numérico del coeficiente, mientras que el signo indica la dirección de dicha relación. Por lo tanto, una relación con un coeficiente de +1 es tan fuerte como una relación con un coeficiente de -1. En el primer caso, la relación es perfectamente positiva, mientras que en el segundo caso es perfectamente negativa (Berry y Feldman, 1985, p.45).

La expresión utilizada para calcular la correlación de Pearson es la siguiente fórmula:

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N}$$

Ecuación 2-3: Formula de correlación de Pearson

Donde:

X= es la variable número uno.

Y= pertenece a la variable número dos.

Zx= es la desviación estándar de la variable uno.

Zy= es la desviación estándar de la variable dos.

N= es número de datos.

La base del coeficiente de correlación de Pearson se encuentra en lo siguiente: cuanto más fuerte sea la concordancia (ya sea directa o inversa) de las posiciones relativas de los datos en las dos variables, el producto en el numerador tendrá un valor más alto (en términos absolutos). Si la concordancia es perfecta, el numerador será igual a N (o a -N), y el coeficiente tomará un valor de 1 (o -1) (Cohen y Cohen, 1983, p.9)

Valor-p

El nivel de significancia es la probabilidad mínima establecida por la distribución, que nos permite rechazar la hipótesis nula (H0) sin la necesidad de predefinir el nivel de significación para la prueba de hipótesis (Minitab, 2020)

Nivel de significancia

El nivel de significancia establece el límite para determinar si un resultado es estadísticamente relevante. Cuando el valor de significancia es inferior al nivel establecido, se concluye que el resultado es estadísticamente significativo. El nivel de significancia también se conoce como nivel alfa (IBM, 2022). Normalmente, se elige un nivel de significancia del 5% (o 0,05), aunque en algunos casos se pueden utilizar otros niveles según las características del estudio. Este valor indica la probabilidad de rechazar incorrectamente la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.

2.2.5.2. Regresión Lineal

La regresión lineal se emplea para estimar el valor de una variable en función del valor de otra. La variable que se busca predecir se denomina variable dependiente, mientras que la variable utilizada para pronosticar su valor se conoce como variable independiente.

Este método de análisis calcula los coeficientes de una ecuación lineal que incluye una o más variables independientes, con el propósito de predecir de manera óptima el valor de la variable dependiente. La regresión lineal busca ajustarse a una línea recta o superficie que minimice las diferencias entre los valores predichos y reales de la variable de salida (IBM, 2022, p.3).

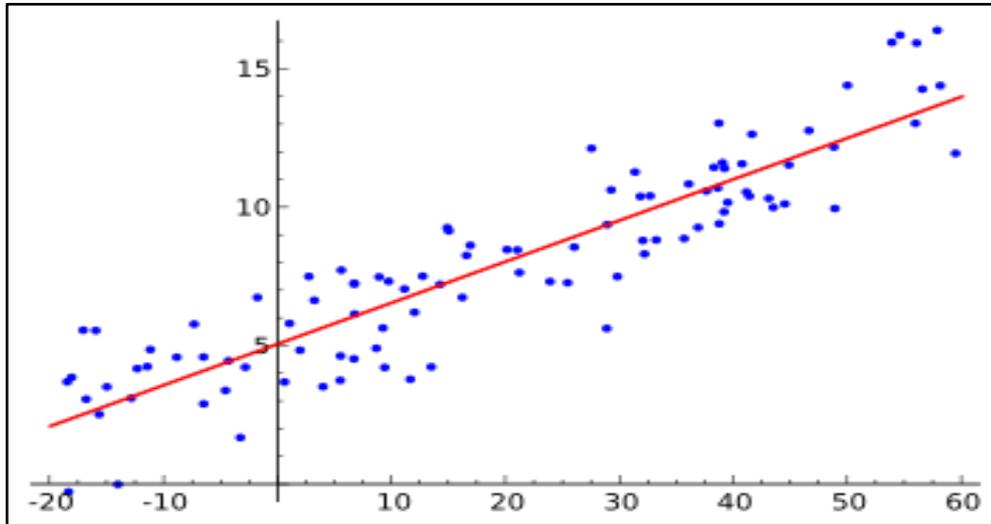


Ilustración 2-2: Ejemplo de una regresión lineal con una variable dependiente y una variable independiente

Fuente: IBM, 2022.

El coeficiente de correlación lineal (r)

El coeficiente de correlación lineal es una medida descriptiva que cuantifica la fuerza de la relación lineal entre dos variables, x e y . Los valores del coeficiente de correlación lineal siempre se encuentran en el rango de -1 a $+1$. Un valor de -1 representa una relación lineal negativa perfecta, mientras que un valor de $+1$ indica una relación lineal positiva perfecta. Los valores cercanos a cero indican que las variables x e y no tienen una relación lineal (Minitab, 2020)

El coeficiente de determinación (r^2)

El coeficiente de determinación en la regresión lineal simple es una medida que indica qué tan bien se ajusta la recta estimada a los datos reales (Minitab, 2020)

Los coeficientes son los valores por los cuales se multiplican las variables en una ecuación. Por ejemplo, en la ecuación $Y = -3.6 + 5.0X_1 - 1.8X_2$, los coeficientes son 5.0 y -1.8 , ya que las variables X_1 y X_2 se multiplican por estos valores, respectivamente. El tamaño y el signo de un coeficiente en una ecuación tienen un impacto en la gráfica correspondiente. En una ecuación

lineal simple (que involucra solo una variable X), el coeficiente representa la pendiente de la línea (IBM, 2022)

La fórmula que define una recta es la siguiente:

$$y = a + bx$$

Ecuación 2-4: Formula de regresión lineal

Donde:

y= Variable dependiente

a= Pendiente

x= Variable independiente

b= Intersección

Cuando no se puede aplicar un modelo de regresión a un estudio, se concluye que no hay una correlación entre las variables analizadas. Esta situación se puede expresar mediante la siguiente formulación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_m X_m + \epsilon$$

Ecuación 2-5: Formula de un modelo de no correlación.

Donde:

Y= es la variable dependiente o variable de respuesta.

X_1, X_2 = son las variables explicativas, independientes o regresoras.

β_0, β_1 = son los parámetros del modelo, miden la influencia que las variables explicativas tienen sobre el regresando.

m= es el número de parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión.

- **Técnicas y equipos para la detección de radón**

Se han desarrollado dos tipos de técnicas analíticas para medir la actividad del radón en el suelo: (i) modo pasivo, en el cual el radón ingresa al dispositivo por difusión natural y (ii) modo activo, en el cual el radón se bombea a un dispositivo de detección de radón (Morales et al., 2019, p.6). De

acuerdo con la duración de la medición (resolución temporal), se pueden distinguir tipos de técnicas de muestreo:

- Técnica instantánea o de toma de muestra (muestras tomadas en un único punto recogidas durante un breve intervalo de tiempo).

Las técnicas de medición de radón también se clasifican según características:

- Si la técnica mide radón o sus productos secundarios (Baskaran, 2016, p.7).

2.2.6. Sistema de detección de gas radón en suelo

El sistema utilizado para detectar el gas radón en el suelo está compuesto por un detector RAD 7 y una sonda de acero inoxidable diseñada específicamente para la detección de gas en el suelo. Estos componentes se conectan mediante tubos de vinilo que pasan a través de una unidad de secado, tal como se ilustra en la Ilustración 2-3.

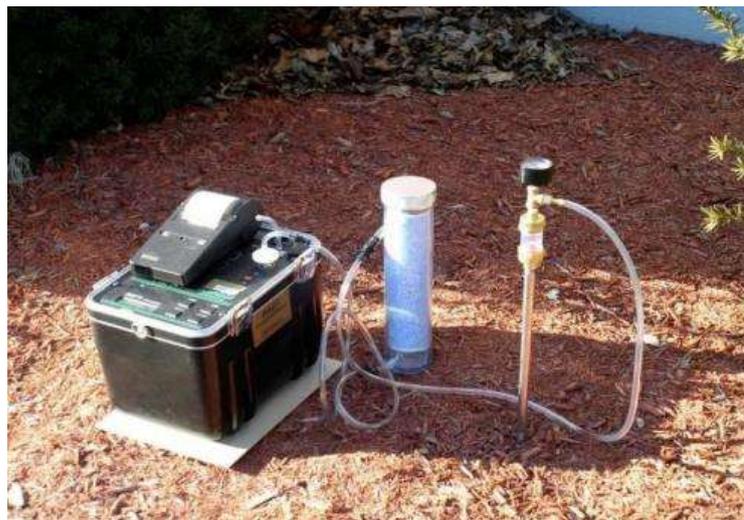


Ilustración 2-3: Sistema de detección de gas radón

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2014.

2.2.6.1. Detector RAD 7

El RAD 7 es un dispositivo portátil utilizado para la medición de las concentraciones de radón-222 y radón-230 (torón) en agua, suelo y aire. Este dispositivo puede detectar la desintegración alfa de un producto radiactivo del radón y el torón, sin ser influenciado por otras radiaciones (Durrige Company Inc, 2014, p.34). Se muestra en la ilustración 2-4 (Durrige Company Inc, 2014, p.23).



Ilustración 2-4: Detector RAD 7

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2014.

El sistema opera mediante el uso de un detector de estado sólido que cuenta con una celda de muestreo hemisférica de 0,7 litros. En el centro de dicha celda de muestreo se encuentra un detector de silicio que transforma directamente la radiación alfa en una señal eléctrica.

Un alto potencial electrostático, aproximadamente de 2000 a 2500 V, se aplica un voltaje entre la pared interna de la celda de muestreo y el detector para crear un campo eléctrico intenso en todo el volumen de la celda. Este campo eléctrico facilita la atracción de las partículas cargadas positivamente, que contienen radiación alfa, hacia la superficie activa del detector (Esan, et al., 2020, p.3).

Además del RAD 7, existen otros detectores que se pueden utilizar para realizar mediciones de radón. Un ejemplo de ello es el detector Geiger Müller, que está compuesto por un tubo metálico sellado relleno de un gas. En el centro del tubo se encuentra un hilo muy fino y se aplica un alto voltaje entre el alambre y el cilindro. Otra opción es el detector EDA-200, que se basa principalmente en la detección de partículas alfa generadas por la desintegración del gas radón (Martínez, 2017, pp. 21-22).

2.2.6.2. Sonda de acero inoxidable para detección de gas

La sonda de acero inoxidable se utiliza principalmente para detectar gas en suelos irregulares. El gas presente en el suelo es atraído hacia la punta de la sonda a una velocidad baja y luego asciende por el tubo de acero hasta llegar al detector. Durante este proceso, pasa a través del tubo de secado para evitar que la humedad ingrese al equipo. Esta configuración se muestra en la Ilustración 2-5 (Durrige Company Inc, 2015, p.3).

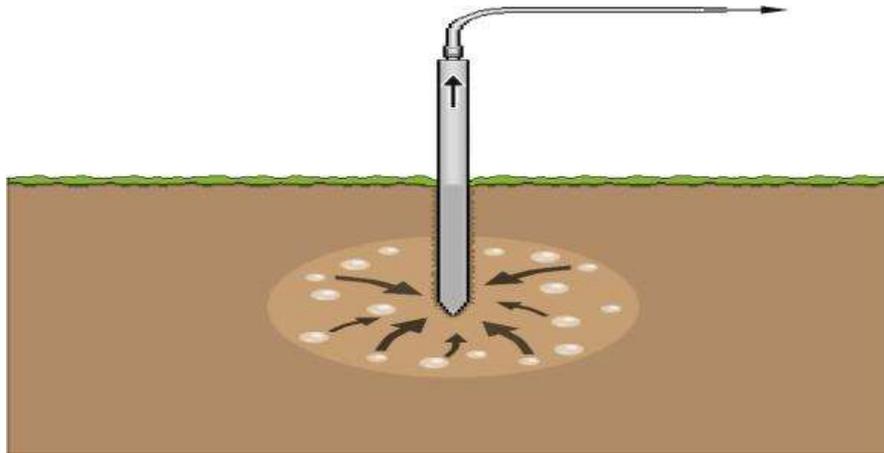


Ilustración 2-5: Detección de gas radón por la sonda de acero inoxidable

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2015.

Según el Manual de sondas de gas de DURRIDGE, la sonda de acero inoxidable está compuesta por los siguientes elementos:

- 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.

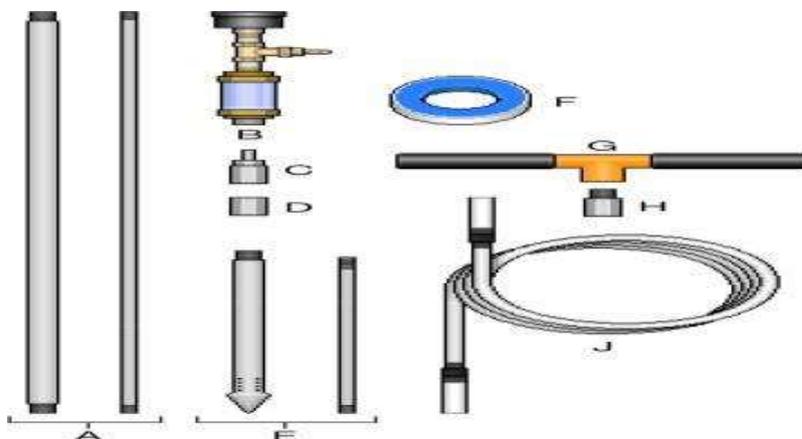


Ilustración 2-6: Componentes de la sonda de acero inoxidable

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2015.

2.2.6.3. Unidad de secado

La sonda se enlaza al detector RAD 7 mediante tubos de secado que contienen el desecante Drierite, con una malla de tamaño 8, tal como se muestra en la ilustración 2-7. El Drierite es un mineral compuesto por sulfato de calcio anhidro que posee la capacidad de absorber hasta el 14% de su peso en agua. Su principal aplicación consiste en el secado del aire y los gases, permitiendo alcanzar niveles muy bajos de humedad residual (DurrIDGE Company Inc, 2015, p. 5).

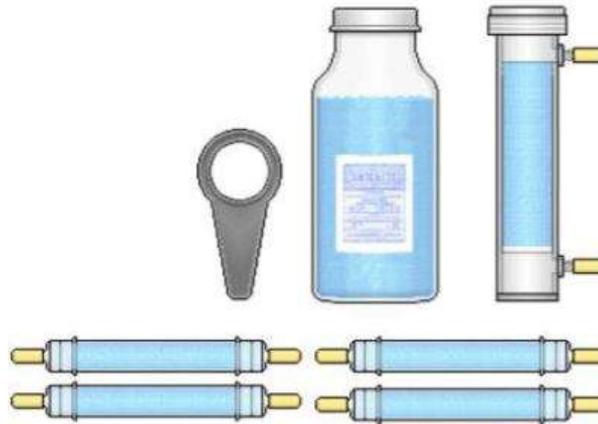


Ilustración 2-7: Tubos de secado y desecante

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2014.

La ilustración 2-8 muestra la conexión del detector RAD 7 a la unidad de secado. A medida que se utiliza, el desecante, que tiene un color inicial azul, va cambiando a un tono rosado, lo cual indica el nivel de consumo del desecante.



Ilustración 2-8: Configuración normal del detector

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2015.

2.2.6.4. Medición de gas radón

La medición de la concentración de gas en el suelo se puede realizar utilizando tres métodos diferentes con la sonda de acero inoxidable. Estos métodos incluyen el método GRAB, el método WEEKS y la configuración del detector RAD 7 en modo THORON (Durrige Company Inc, 2015, p. 9). Independientemente del método utilizado, los componentes externos del sistema de detección se conectan entre sí según se indica en la Figura 2-9.

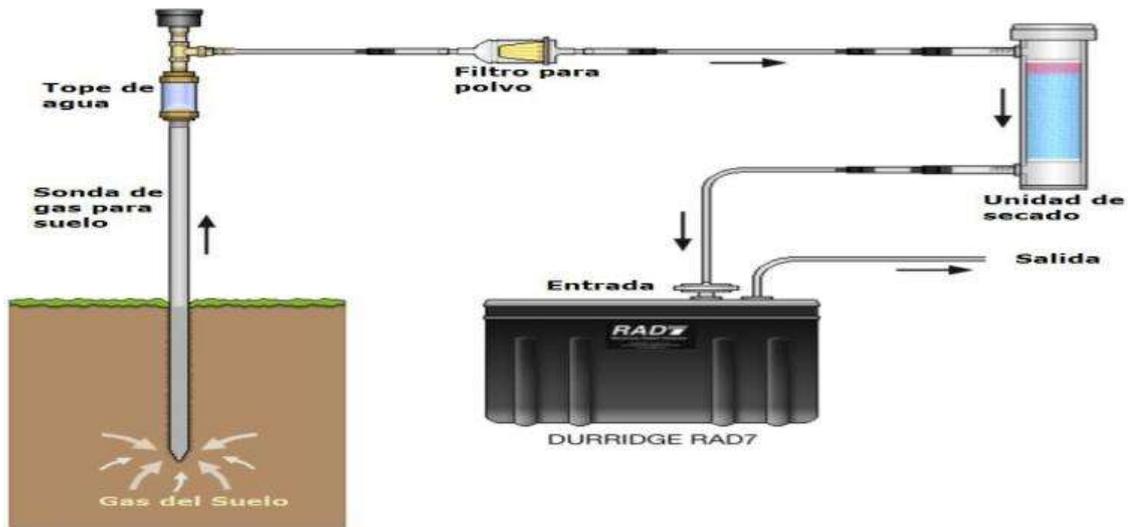


Ilustración 2-9: Acoplamiento de los componentes del sistema de detección de gas radón y torón

Fuente: Manual RAD- DURRIDGE Company Inc., 2015.

Previo a la conexión del detector a la sonda, es esencial comprobar el nivel de humedad relativa del dispositivo en la pantalla del RAD 7 (Menú → Status). En caso de que el valor no sea el adecuado, se debe conectar la unidad de secado y realizar el proceso de purga (Test → Purge → [ENTER]) durante al menos 10 minutos con aire seco y fresco. Para finalizar la purga se presiona [Menú] (Durrige Company Inc, 2015, p. 9).

El método GRAB se caracteriza por ser una lectura rápida y utilizar una menor cantidad de gas del suelo. Para utilizar este método, en el RAD 7 se selecciona la opción GRAB a través del menú de configuración (Setup → Protocol → Grab → [ENTER]). Durante el periodo de medición, la bomba del RAD 7 funciona durante 5 minutos en 4 ciclos, lo que resulta en un tiempo total de medición de 20 minutos. Al finalizar, el RAD 7 imprime un resumen de la medición, incluyendo el promedio de gas radón. La precisión de la medición dependerá de la concentración de radón y generalmente se mantiene dentro de $\pm 10\%$. Es importante destacar que, para un correcto funcionamiento del detector, la humedad relativa debe ser menor al 6% (Durrige Company Inc, 2015, p. 9).

El método WEEKS es una alternativa fácil para medir la concentración de radón. En este caso, es importante que la humedad relativa del equipo sea menor al 10%. Para utilizar este método en el detector RAD 7, se selecciona la opción Weeks a través del menú de configuración (Setup → Protocol → Weeks → [ENTER]). Durante un periodo de dos horas, el RAD 7 bombea gas durante los primeros 5 minutos y luego realiza bombeos de 1 minuto cada 5 minutos. Al finalizar el periodo de medición, se imprime una lectura y se almacena en la memoria del RAD 7. La precisión de las lecturas obtenidas es de $\pm 5\%$ (DurrIDGE Company Inc, 2015, p. 10).

El método THORON involucra ciclos de 5 minutos en los cuales se registran y se imprimen las concentraciones de radón y torón al final de cada ciclo. Dado que el torón tiene una vida media corta de aproximadamente un minuto, es necesario que la bomba del detector funcione de manera continua. Para ahorrar papel, se recomienda configurar el formato de impresión en [CORTO]. Este método es útil para obtener mediciones precisas y actualizadas de la concentración de radón y torón en el ambiente (DurrIDGE Company Inc, 2015, p. 11).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de Investigación

La investigación se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase, se llevó a cabo el trabajo de campo en las parroquias urbanas de Cajabamba, específicamente en las comunidades de Huacona y Cicalpa, que se encuentran en el cantón Colta de la provincia de Chimborazo. Esta ubicación se muestra en la Figura 11-10. El cantón Colta está situado en el noroccidente de la provincia de Chimborazo y se encuentra a 18 km de la ciudad de Riobamba. El terreno en esta zona es irregular y presenta altitudes de hasta 3100 msnm. La población de Cajabamba es inferior a 3.000 habitantes (GADPCH, 2020, p. 397).

En la segunda fase, se procedió a realizar el análisis de las muestras en el laboratorio del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), el cual está ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, específicamente en la Panamericana Sur km 1 ½ en la ciudad de Riobamba. En este laboratorio, se llevaron a cabo los análisis de las variables de estudio para obtener los resultados necesarios.

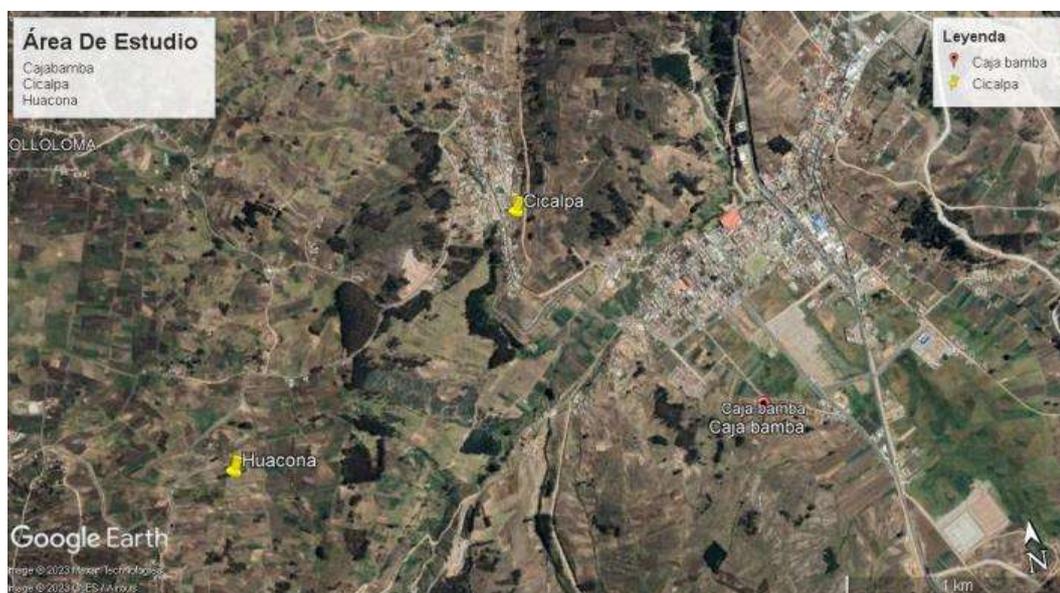


Ilustración 3-1: Área de estudio en el sector Cajabamba

Fuente: Google Earth, 2023.

3.2. Nivel de Investigación

De acuerdo con la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio descriptivo y relacional por tal motivo el estudio se enmarcó dentro de una investigación de carácter descriptivo. A tal efecto, (Dankhe, 1986, p.50) señala que los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. En definitiva, posibilitan medir la información recolectada para para posteriormente describir, examinar e interpretar de manera sistemática las particularidades del fenómeno investigado en función de la realidad del contexto propuesto.

3.3. Diseño de Investigación

3.3.1. Identificación de variables

3.3.1.1. Variable independiente

Características fisicoquímicas del suelo:

- Humedad
- Conductividad
- Potencial de Hidrógeno (pH)

3.3.1.2. Variable dependiente

- Concentración de radón

3.3.1.3. Variables intervinientes

- Condiciones meteorológicas y geológicas.

3.3.2. Selección de la muestra

Para llevar a cabo la medición, se empleó un enfoque de muestreo discreto utilizando una cuadrícula de puntos equidistantes (puntos de muestra) en el área transversal de las comunidades Huacona y Cicalpa. Se estableció una distancia aproximada de 500 metros entre cada punto de

muestra. Sin embargo, se realizaron ajustes menores en la ubicación de los puntos de muestra debido a las condiciones locales, como el uso del suelo, propiedades privadas, pendientes y condiciones climáticas, entre otros factores.

3.4. Tipo de estudio

El enfoque de este estudio es cuantitativo y de naturaleza no experimental, con un nivel de profundidad correlacional según lo indicado por Hernández (2014, p.6). Se llevó a cabo un muestreo discreto utilizando una cuadrícula de 19 puntos equidistantes en el área transversal de la comunidad Huacona, dentro del sector de Cajabamba. La hipótesis de investigación es, la concentración de radón en suelo es proporcional a las características fisicoquímicas de éste.

3.5. Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de muestra

El estudio se llevó a cabo en un área aproximada 5km² en la parroquia Cajabamba, comunidad Huacona y Cicalpa. Se utilizó una muestra aleatoria estratificada para comparar las mediciones de radón y parámetros fisicoquímicos de cada uno de los subsectores establecidos. La disposición de los puntos de muestreo fue con una densidad de 4 puntos por cada km² de área. Obteniéndose la medida de la concentración de radón y las respectivas muestras para el análisis en el laboratorio en cada punto. Se tomo un total de 19 muestras cubriendo 5 km² en toda el área de Cajabamba con una constancia de 2 muestras por día.

3.6. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Métodos:

- Método gravimétrico del cilindro
- Método cilindro de volumen conocido
- Método de medición WEEKS

Materiales:

- Hoyadora
- Barreno tipo holandés
- Palas

Equipos:

- Estufa
- Muflas
- Balanza analítica
- pH metro
- Conductímetro
- Detector electrónico de radón DURRIDGE RAD7

3.6.1. Fase de campo

Como primer paso se revisó los puntos de muestreo para saber la ubicación, una vez con toda la información se procedió a ir a las comunidades que se encontraban dentro de la zona de estudio para dar a conocer a la comunidad de nuestra presencia en días posteriores y para que tengan conocimiento del estudio que se realizó (*Ilustración: 3-2*).

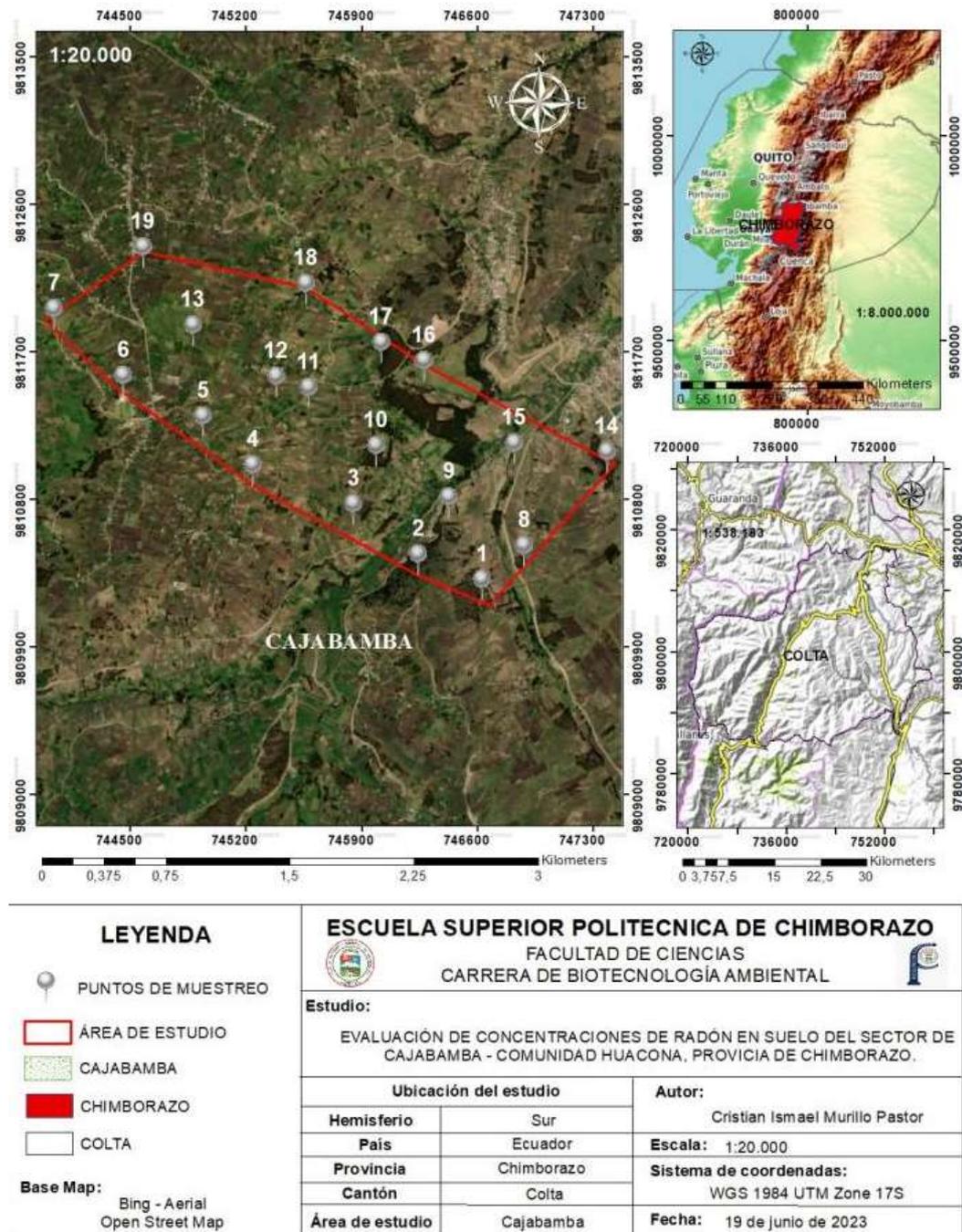


Ilustración 3-2: Puntos de muestreo en el sector Cajabamba

Elaborado por: Murillo, C., 2023

En la tabla 3-1 se muestra las coordenadas geográficas UTM de cada punto.

Tabla 1-1: Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto	Coordenadas UTM WGS84 (17M)
P1	746669-9810155
P2	746220-9810346
P3	745848-9810746
P4	745222-9810896
P5	744937-9811282
P6	744473-9811480
P7	743977-9811889
P8	746878-9810462
P9	746426-9810789
P10	745984-9811102
P11	745579-9811457
P12	745384-9811523
P13	744877-9811834
P14	747427-9811013
P15	746823-9811116
P16	746275-9811620
P17	746018-9811728
P18	745561-9812092
P19	744576-9812310

Fuente: GIDAC, 2023.

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

Para tener mayor facilidad y precisión de llegar a los puntos de muestreo del área de estudio, se los ubicó mediante y ayuda de las coordenadas geográficas UTM (*Tabla 4-4*).

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

Una vez que se llegó al sitio de muestreo se procedió a realizar lo siguiente:

- a) El primer paso consistió en verificar el porcentaje de humedad del equipo y, en función de eso, se procedió a purgar el equipo durante 10 a 20 minutos utilizando la unidad de secado conectada al detector RAD 7 a través de un sistema cerrado de tubos, como se muestra en la Ilustración 3-3. Después de esperar el tiempo necesario, se verificó que la humedad óptima fuera inferior al 10% y, finalmente, se detuvo la purga.

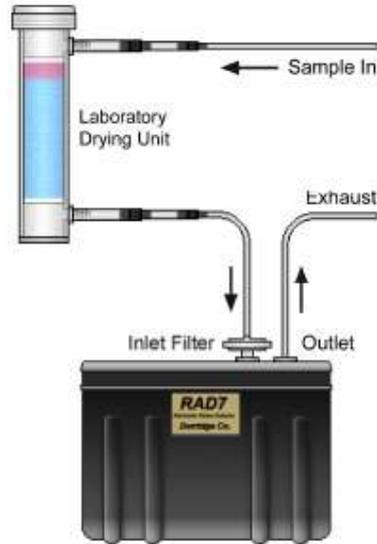


Ilustración 3-3: Purga del detector RAD 7

Fuente: Manual RAD 7; DURRIDGE Company Inc., 2014.

- b) A continuación, utilizando una cinta métrica flexible, se marcó una longitud de 1 m en el barreno tipo holandés. Luego, se procedió a perforar el suelo a esa profundidad, donde se insertará la sonda del RAD 7.



Ilustración 3-4: Barreno tipo holandés

Fuente: LAPACA, 2023.

- c) Una vez que se realizó la perforación se introdujo la sonda de acero inoxidable y se rellenó el orificio con el suelo sobrante de la perforación logrando que se compacte bien sin que exista vacíos, seguido se cubrió la superficie con yeso para evitar cualquier escape del gas como se aprecia en la ilustración 3-5.



Ilustración 3-5: Colocación de yeso

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

- d) En el último paso, se conectó la sonda de acero inoxidable tanto al detector como a la unidad de secado, con el propósito de lograr la Configuración experimental tal como se observa en la *Ilustración 3-6*. En el panel frontal del RAD 7 se seleccionó el método Weeks y se inició la prueba durante 2 horas como se visualiza en la *Ilustración 3-7*. Al finalizar este ciclo el detector imprime el valor de la concentración de radón-222 en el suelo como se observa en la *Ilustración 3-8*.

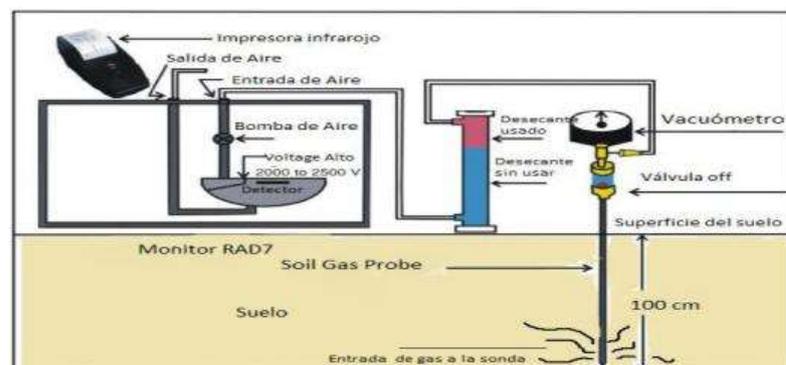


Ilustración 3-6: Sistema de detección de gas radón en el suelo

Fuente: Cabascango, 2021.



Ilustración 3-7: Medición de gas radón-222

Elaborado por: Murillo, C., 2023.



Ilustración 3-8: Impresión de los valores

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

3.6.1.2. Metodología de muestreo de suelo para análisis fisicoquímico

- a) Se procedió a hacer la limpieza de la superficie del suelo para evitar que al momento de perforar caigan restos de plantas u otros objetos que puedan dificultar la recolección de la muestra.
- b) Utilizando el barreno tipo holandés, se perforó el suelo hasta alcanzar una profundidad de 1 metro.
- c) Una vez que se consiguió llegar a la superficie deseada que fue la de 1 metro se realizó la respectiva toma de muestra del suelo como se observa en la ilustración 3-9. La muestra se la guardo en una funda ziploc debidamente etiquetada con el nombre del punto de muestreo, una vez que se puso la muestra en la funda se procedió a sacar todo el aire y se la selló.



Ilustración 3-9: Toma de muestra con el barrero

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

3.6.1.3. Metodología para recolección de muestras de suelo para cálculo de humedad

- a) Se limpio el área a perforar y se realizó el trabajo de perforación con la ayuda de una ahoyadora hasta conseguir la profundidad de 1 metro por medio metro de ancho como se observa en la *Ilustración 20-20*.



Ilustración 1-10: Perforación del suelo

Elaborado por: Murillo, C., 2023

- b) Una vez que se consiguió llegar a la profundidad deseada de 1 metro se introdujo un cilindro de metal (ilustración 3-11) en el fondo del agujero con el fin de rellenar el cilindro de muestra, al constatar que el cilindro está lleno de muestra se lo extrajo con mucho cuidado evitando que se pierda muestra, seguido de esto se eliminó el restante de muestra de los alrededores

del cilindro de igual manera tratando de que la muestra quede al ras del cilindro, se lo sello herméticamente con plástico para evitar pérdida de humedad, finalmente se etiquetó la muestra y se la guardó hasta retornar al laboratorio en donde fue analizada.



Ilustración 3-11: Cilindro para toma

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

3.6.1.4. Variables meteorológicas

Se realizó la medición de variables ambientales como la velocidad media y máxima del viento, la humedad relativa, la temperatura, la presión y la altitud; con la ayuda de un medidor meteorológico de bolsillo Kestrel 3500 (ilustración 3-12). Los muestreos comenzaron del 14 de diciembre del 2022 al 20 de abril del 2023 con una frecuencia de 2-3 salidas por semana y tomando de 2-1 muestras por día. Además, las coordenadas UTM se determinaron mediante GPS con ayuda de una aplicación en el teléfono.



Ilustración 3-12: Medidor de condiciones ambientales

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

3.6.2. Fase de laboratorio

Después de haber obtenido las muestras de campo se procedió a realizar la determinación de las características físico- químicas del suelo que fueron las siguientes: humedad, conductividad y potencial de hidrógeno (pH).

3.6.2.1. Determinación de potencial de hidrógeno (pH)

Para realizar la medición de pH se hizo lo siguiente:

- a) Utilizando una balanza analítica, se pesaron 20 gramos de la muestra de suelo en un vaso plástico. Luego, se agregaron 80 ml de agua destilada a la muestra.
- b) Lo siguiente a realizar fue de agitar con una varilla la mezcla de manera constante por 7 minutos, y se dejó reposar por otros 5 minutos.
- c) Con el pH metro de mesa se midió los valores de pH, dejando la membrana de cristal sensible de pH en la muestra por un período de 10 minutos con cada muestra, esto con el fin de obtener un mejor resultado. Todos los resultados obtenidos se fueron anotando en la base de datos.



Ilustración 3-13: Medición de pH

Elaborado por: Murillo, C., 2023

3.6.2.2. Determinación de la conductividad

- a) Para la determinación de la conductividad se usaron las muestras previamente ocupadas en la medición de pH, a estas muestras se las dejó reposar durante 24 horas antes de su medición.
- b) Se utilizó un conductímetro (Ilustración 3-14) para realizar las mediciones de la muestra en unidades de uS/m los resultados obtenidos fueron anotados en la base de datos.



Ilustración 3-14: Conductímetro

3.6.2.3. Medición de humedad de suelo

Todos los días después de las salidas a muestrear se realizaba los siguientes pasos:

- a) Como primer paso se pesaba una canasta vacía de aluminio en la balanza analítica, el peso se lo anotaba en la base de datos.
- b) Se sacó la muestra del día tomada con el cilindro y se procedió a colocarla en la canasta y pesarla nuevamente, esta vez se anotaba el peso de la canasta vacía más el peso de la muestra.
- c) Una vez pesadas las muestras, se las colocó a secar en una estufa a una temperatura de 105°C por 24 horas (Ilustración 3-15).



Ilustración 3-15: Muestras en la estufa

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

- d) Pasadas las 24 horas se sacó las muestras de la estufa y se las puso en el desecador por 5 minutos.
- e) Finalmente, se volvió a pesar las muestras y los datos se los anotó en la base datos.
- f) Ahora con los datos de los pesos se procedió a sacar el % de humedad aplicando la siguiente ecuación.

$$\%H = \frac{(PS \text{ Humedo} - PS \text{ Seco estufa } 105^{\circ}C)}{PS \text{ Humedo}} \times 100$$

Ecuación 3-1: Porcentaje de humedad

Donde:

$\%H$ = Porcentaje de humedad

$PS \text{ Húmedo}$ = Peso de suelo húmedo (g)

$PS \text{ Seco estufa a } 105^{\circ}C$ =Peso de suelo seco en la estufa a $105^{\circ}C$ (g)

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1. Fase de campo

4.1.1. Concentraciones de Radón-222

La *Ilustración 4-1*, indica la variabilidad de concentraciones de Radón en los 19 puntos de muestreo del sector de Cajabamba.

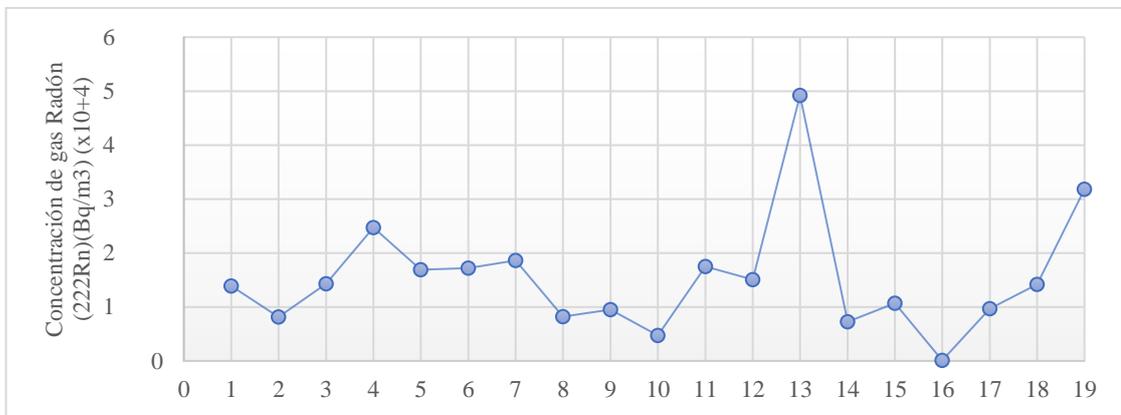


Ilustración 4-1: Concentraciones de gas radón-222(Bq/m³)

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

En la Ilustración 4-2, podemos observar la Ilustración de concentraciones de gas radón presentes en el área de estudio, en donde, se puede visualizar el punto16 (746275-9811620) que posee menor concentración con un valor de 103 ± 234 Bq/m³ de radón mientras que si observamos el punto 13 (744877-9811834) es el punto con mayor concentración de gas en este sector de estudio con una valoración de 49200 ± 525 Bq/m³.

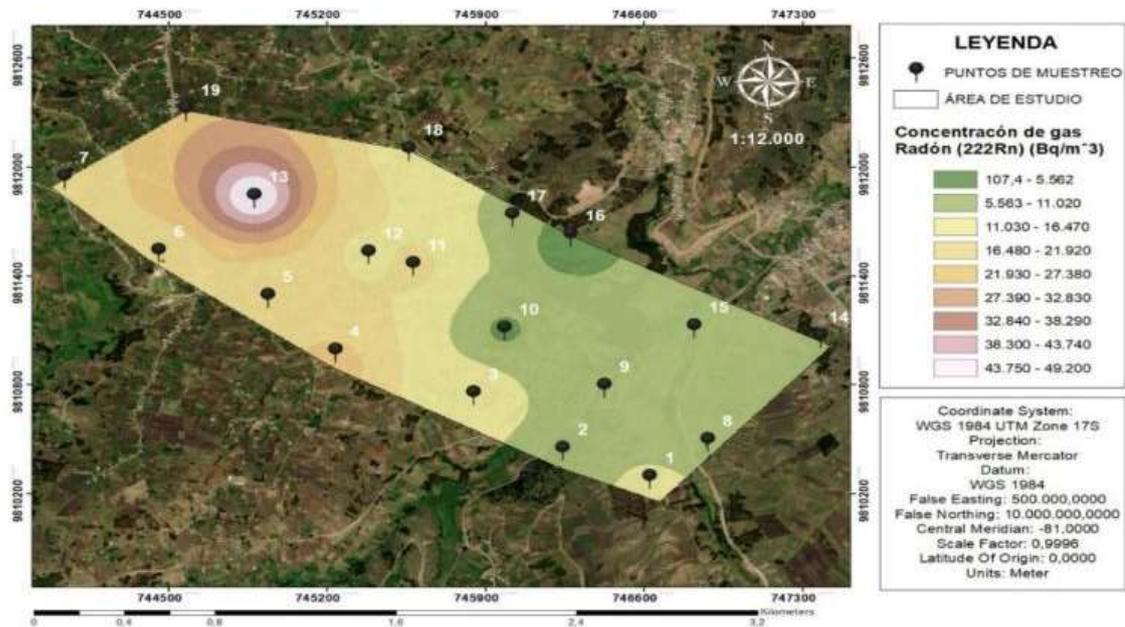


Ilustración 4-2: Mapa con las concentraciones de gas radón-222

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

4.1.2. Correlación entre las variables de estudio

En la *Ilustración 4-3*, se presentan los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos que revelan las relaciones entre diferentes variables de estudio. Se observa una correlación negativa entre la concentración de Radón y el pH, indicando una asociación fuerte con un valor de correlación alto de -0,61 con un p-valor de 0.02. Asimismo, la concentración de Radón muestra una correlación negativa con la conductividad, aunque esta relación es de baja magnitud con un valor de -0,22. En contraste, la humedad exhibe una correlación positiva significativa con la concentración de Radón, con un coeficiente alto de 0,74 con un p-valor de 0.03.

En cuanto a la relación entre el pH y la conductividad, se observa una correlación mediana y positiva de 0,51. Por otro lado, tanto el pH y la humedad como la conductividad y la humedad presentan correlaciones negativas y de magnitud mediana, con valores de -0,50 y -0,42, respectivamente.

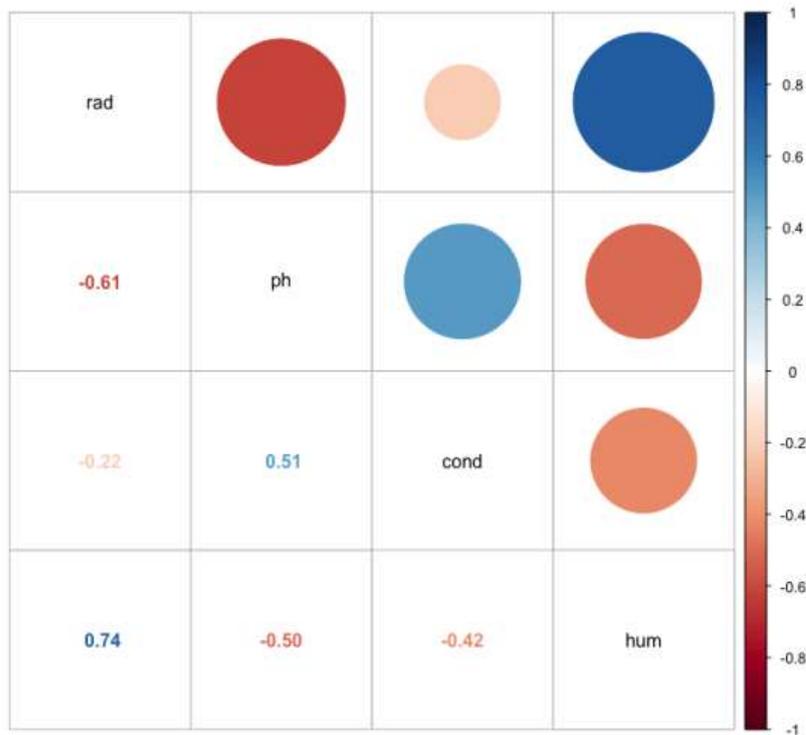


Ilustración 4-3: Correlación de radón con las variables

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

En donde:

pH=potencial de hidrógeno

Hum=humedad

Cond=conductividad

A continuación, se muestra el diagrama de dispersión y la regresión lineal de las correlaciones significativas encontradas.

4.1.2.1. Correlación entre Concentración de Radón y humedad

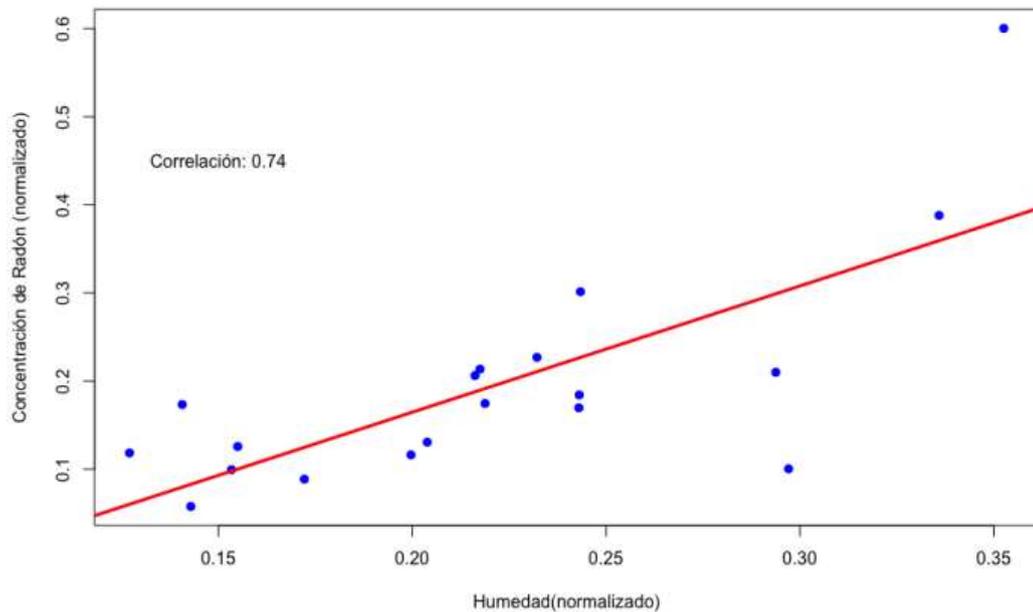


Ilustración 4-4: Diagrama de correlación entre Concentración de Radón y humedad

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

La *Ilustración 4-4*, muestra claramente que a medida que la humedad aumenta, también lo hace la concentración de Radón. Esto indica una relación directa y proporcional entre estas dos variables. En otras palabras, existe una asociación positiva entre la humedad y la concentración de Radón. Este análisis sugiere que la humedad puede desempeñar un papel importante en la determinación de la concentración de Radón, al ser éste, muy soluble en agua.

Sin embargo, es esencial tener en cuenta que la correlación observada entre la humedad y la concentración de Radón no implica necesariamente una relación causal directa, como señala Vinuesa (2018, pp. 1-3). Es posible que existan otros factores o variables que influyan en esta asociación.

$$Rad = 0.39 * Hum + 0.015$$

Ecuación 4-1: Ecuación lineal de radón con humedad

La *Ecuación 4-1* de regresión lineal sugiere una relación directa entre la concentración de radón y la humedad. Al aumentar la humedad, también aumenta la concentración de radón. El término constante de 0.015 indica que, teóricamente, si la humedad alcanzara cero, se esperaría una concentración de radón de 0.015, pero en la práctica, este escenario es poco probable. Por lo tanto, este término puede tener poca relevancia en la interpretación real de los datos.

4.1.3. Correlación entre concentración de radón y pH

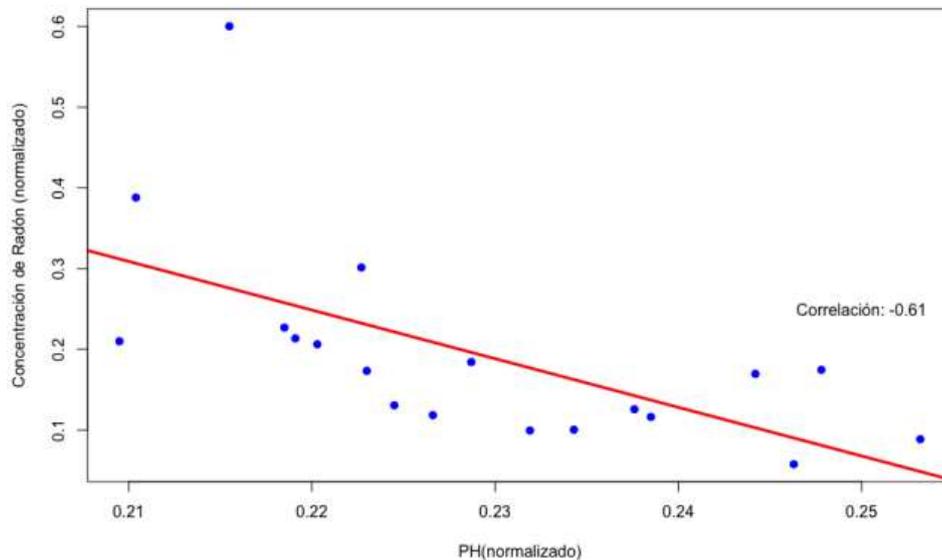


Ilustración 4-5: Diagrama de correlación ente Concentración de Radón y pH

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

La *Ilustración 4-5* muestra de manera evidente una correlación negativa, lo cual indica que a medida que el valor de pH aumenta, la concentración de radón tiende a disminuir. Sin embargo, es crucial resaltar nuevamente que esta correlación negativa no implica necesariamente una relación de causalidad directa. Existen otras variables o factores que podrían estar influyendo en esta asociación (Vinuesa, 2018, pp. 1-3).

$$Rad = -0.63 * pH + 0.34$$

Ecuación 4-2: Ecuación lineal de radón con pH

La *Ecuación 4-2* de regresión lineal revela una relación inversa entre el pH y la concentración de radón. A medida que el valor del pH aumenta, la concentración de radón tiende a disminuir. El término constante de 0.34 indica que, en teoría, si el pH fuera cero, se esperaría una concentración de radón de 0.34. Sin embargo, dado que los valores de pH rara vez alcanzan cero en la práctica, este término puede tener poca relevancia en la interpretación real.

4.1.4. Concentraciones de humedad

En la *Ilustración 4-6* se puede observar un mapa con todos los puntos de muestreo en donde se identifica las zonas de mayor presencia de humedad como son los puntos 13(744877-9811834), 6(744473-9811480), 7(743977-9811889) y 19(744576-9812310) esto debido a las

precipitaciones del suelo, presencia de fuentes de agua, temperatura del aire al ser puntos de mayor altitud y la vegetación. El punto 17 (746018-9811728) es el que presenta menor humedad debido a que se encuentra en un bosque de pinos y eucalipto.

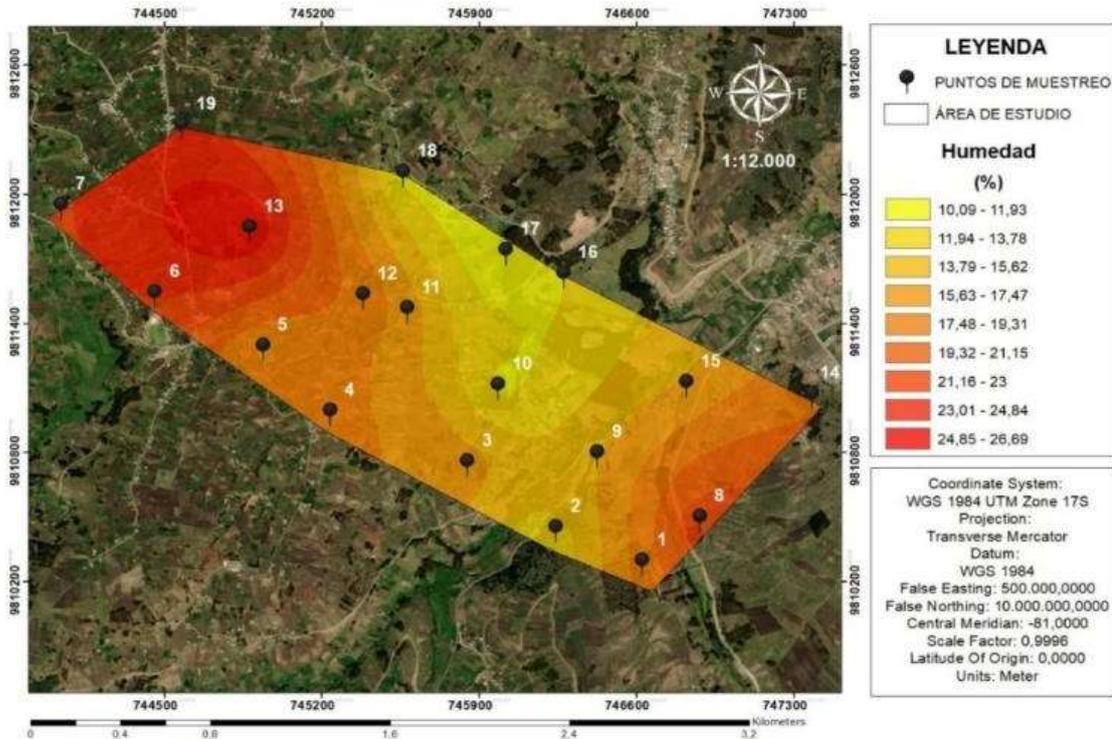


Ilustración 4-6: Mapa de concentraciones de humedad

Elaborado por: Murillo, C., 2023

En la *Ilustración: 4-7*, se muestran los resultados obtenidos de humedad de suelo

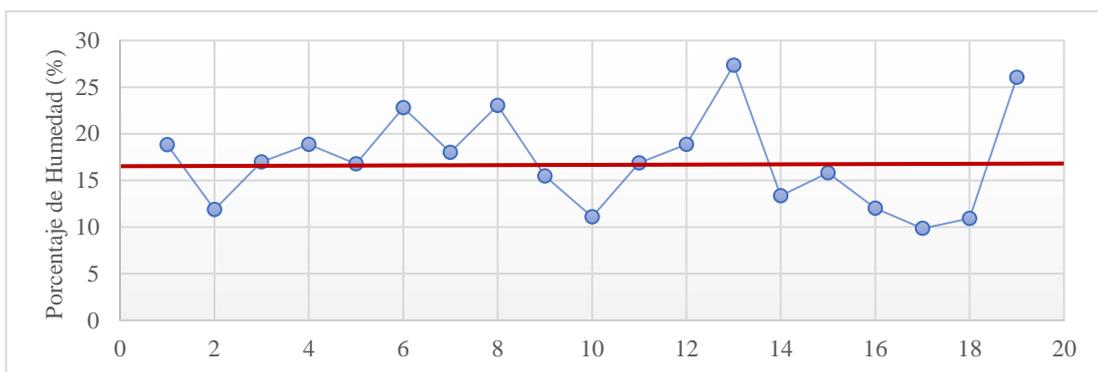


Ilustración 4-7: Porcentaje de concentraciones de humedad en suelo

Elaborado por: Murillo, C., 2023

4.1.5. Concentraciones de conductividad eléctrica

En la *Ilustración 4-8*, se puede observar un mapa con las concentraciones de conductividad eléctrica en donde los puntos 18 (745561-9812092), 16 (746275-9811620) y 14 (747427-9811013) son los que presentan mayor conductividad, estos puntos son los más cercanos a la zona urbana entonces se puede atribuir que sus valores altos podrían deberse a que en estos lugares se utilizan químicos y sales en las tierras que cambian la conductividad y existe mayor presencia de minerales.

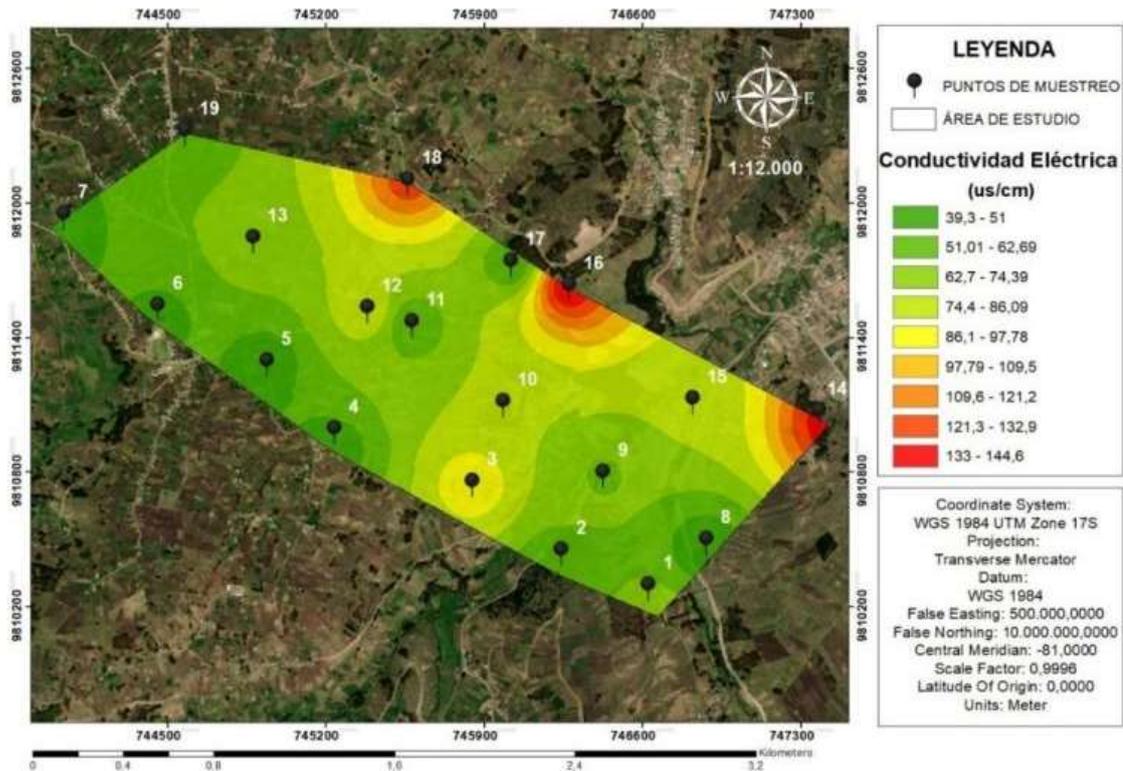


Ilustración 4-8: Mapa con las concentraciones de conductividad eléctrica

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

En la *Ilustración:4-9* se muestran los resultados de conductividad eléctrica en el suelo

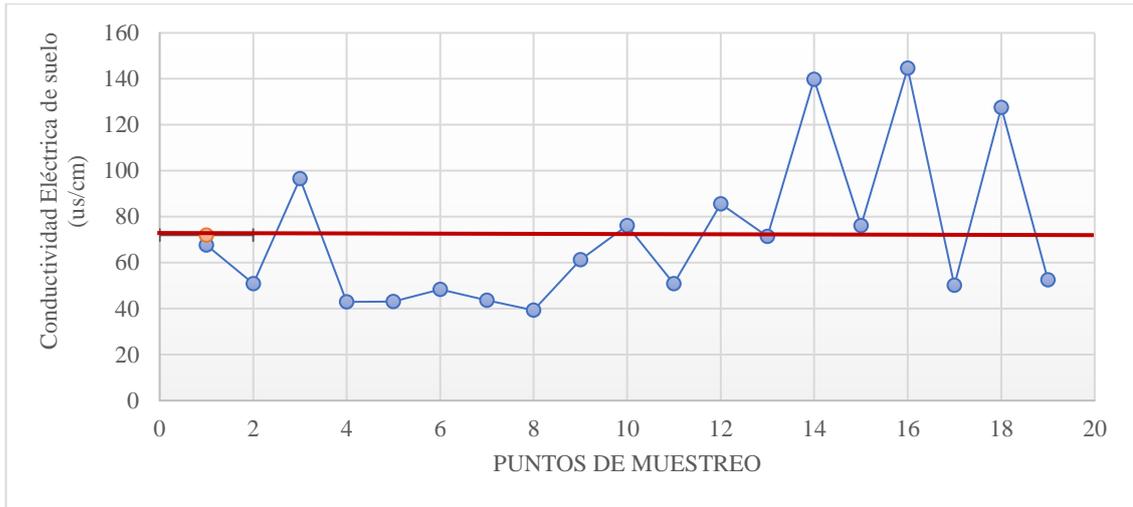


Ilustración 4-9: Datos obtenidos de conductividad eléctrica de suelo

Elaborado por: Murillo, C., 2023

4.1.6. Concentraciones de pH

En la *Ilustración 4-10*, se puede observar en el mapa las variaciones de pH que se encontraban en la zona de estudio, dando como resultados suelos neutros y suelos alcalinos como es en el caso de los puntos 10 (745984-9811102) y 3 (745848-9810746) que son los más significativos.

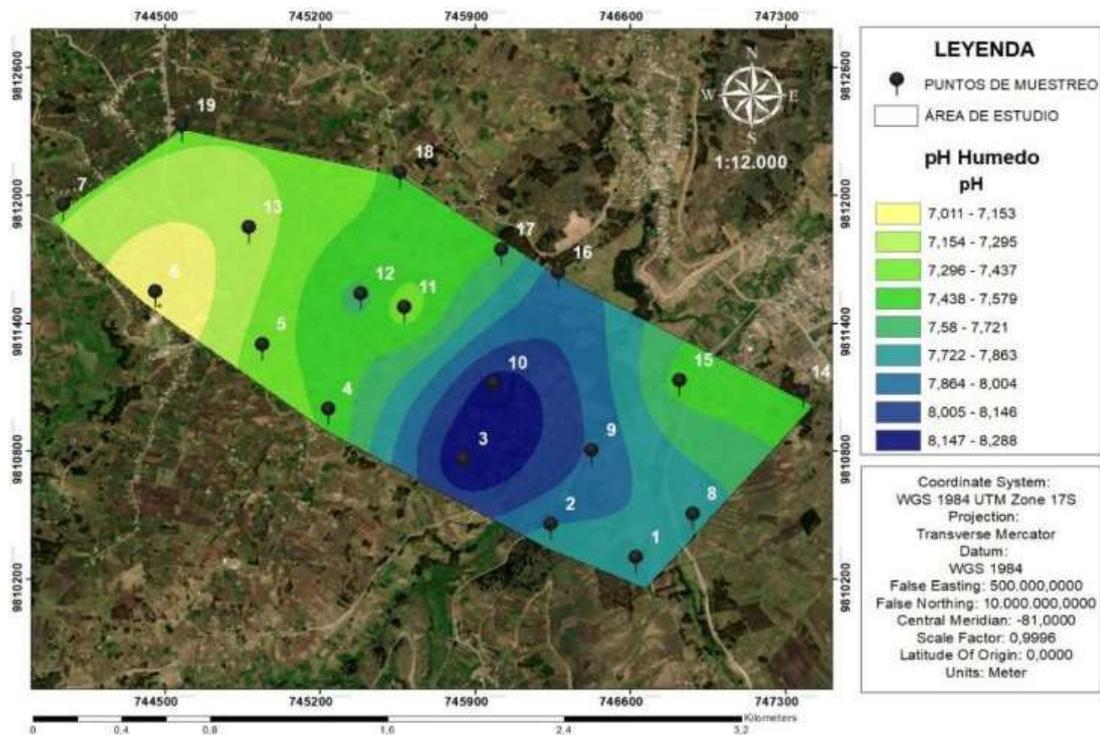


Ilustración 4-10: Mapa de concentraciones de pH

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

En la *Ilustración 4-11* se muestran los resultados de concentraciones de pH.

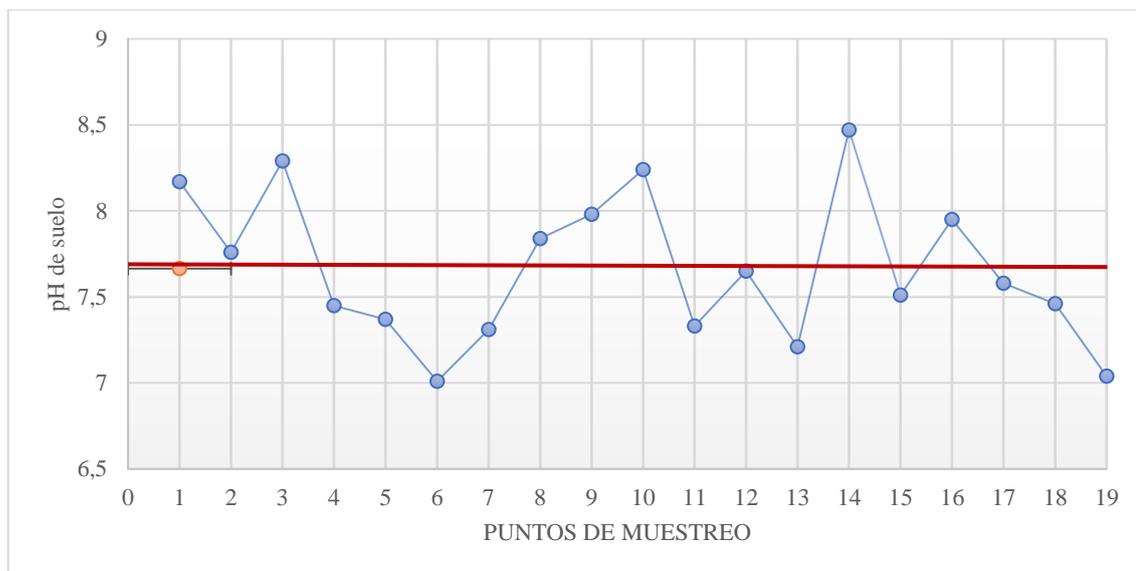


Ilustración 1-11: Datos obtenidos de pH de suelo

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

4.1.7. Variables meteorológicas

En la *Tabla 4-1* se muestran los datos de las variables ambientales, como son: las coordenadas geográficas UTM, altitud, temperatura, velocidad del viento (máxima y promedio), humedad relativa y presión barométrica.

Tabla 2-1: Datos obtenidos de las variables meteorológicas

Punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS84 (17M)	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Velocidad de viento (m/s)		Humedad Relativa (%)	Presión Barométrica (hP)
				Promedio	Máxima		
P30	746823-9811116	3233	17,1	0,7	1,9	57,1	695,6
P29	747427-9811013	3286	17,3	0,4	3,6	41,6	692,7
P32	746018-9811728	3448	19,3	0,3	0,7	52	681,4
P31	746275-9811620	3380	25	0,5	2,8	51,2	683,7
P22	746878-9810462	3369	14,4	1	2,2	65,5	687,7
P15	746669-9810155	3316	15,2	0,4	1,7	61,3	686,2
P16	746220-9810346	3410	14,9	0,3	0,6	66,8	683,2
P23	746426-9810789	3319	18,5	1,1	2,3	43	687,5
P17	745848-9810746	3411	19,8	0,8	1,5	59,4	684
P24	745984-9811102	3403	24	0,3	0,6	39,9	682,4
P18	745222-9810896	3512	14,5	0,8	4	52,8	674,9
P25	745579-9811457	3469	28,4	0,3	1,1	39,5	677,4
P19	744937-9811282	3556	15,3	0,9	1,9	60,8	671,1

P26	745384-9811523	3519	9,9	1	1,4	90,8	672,3
P21	743977-9811889	3504	15,4	0,4	0,7	91,7	674,7
P20	744473-9811480	3600	14,9	0,8	2,2	74,4	666,4
P33	745561-9812092	3470	15,5	0,3	0,6	68,1	678,7
P28	744576-9812310	3654	7,2	1,4	3,7	57,9	664,4
P27	744877-9811834	3584	13,5	0,4	1	62,5	669,6

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

4.1.7.1. Mapa de calor con datos meteorológicos obtenidos de temperatura

En la *Ilustración 4-12*, se puede observar los valores que se midieron en cada punto de muestreo respecto al parámetro ambiental de temperatura, siendo así el punto 11(745579-9811457) el que mayor temperatura presentó, mientras que el punto 19 (744576-9812310) fue el más frío.

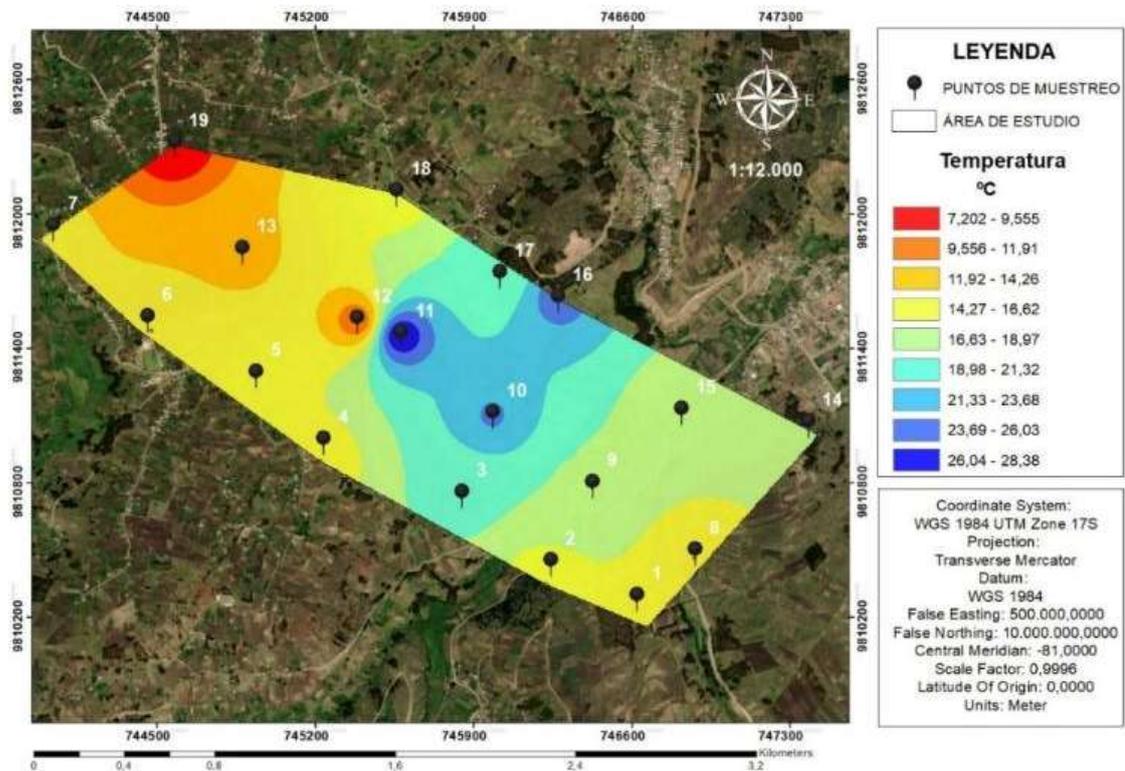


Ilustración 4-12: Mapa de calor de temperatura

Elaborado por: Murillo, C., 2023.

4.1.7.2. Mapa de calor con datos meteorológicos obtenidos de humedad relativa %

En la *Ilustración 4-13*, se presenta un mapa de calor con los valores tomados en cada punto de muestreo sobre el parámetro ambiental de humedad relativa, siendo los puntos 12 (745384-9811523), 5 (744937-9811282) y 7 (743977-9811889) los más representativos en donde se presentó niebla y rocío a medida que el vapor se condensaba.

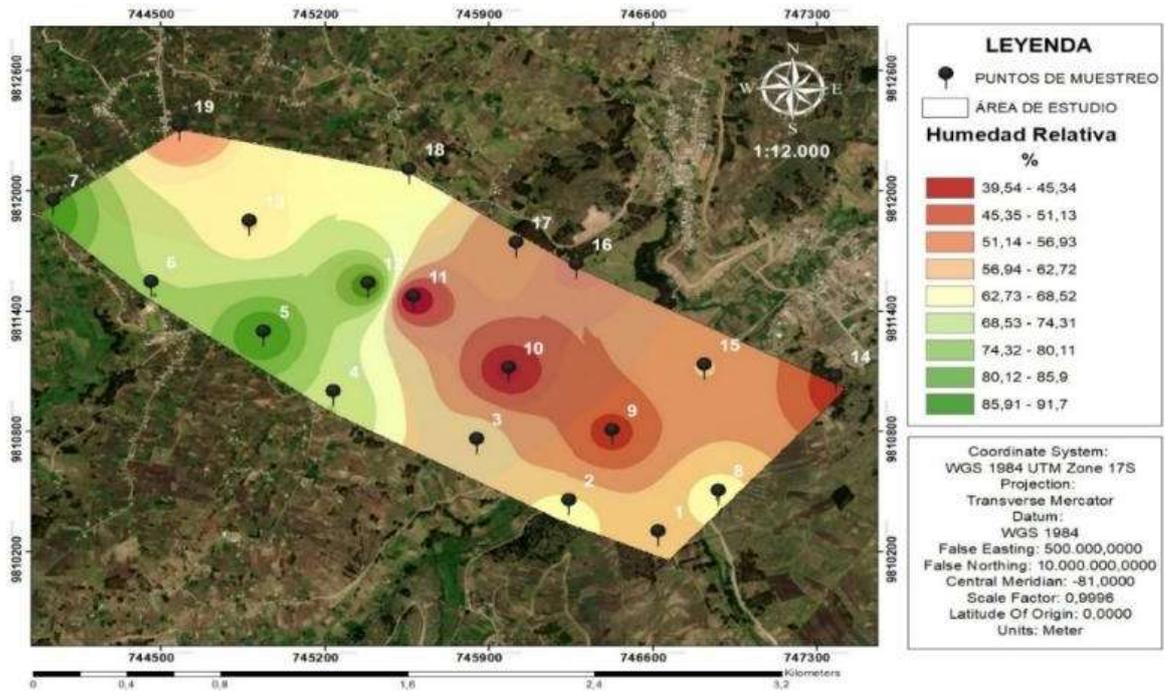


Ilustración 4-13: Mapa de color de la humedad relativa

Elaborado por: Murillo, C., 2023

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Del análisis de las concentraciones de radón en los 19 puntos del sector de estudio, se determinó que el punto de mayor concentración es el punto 13 con un valor de 49200 ± 525 Bq/m³, mientras que en el punto 16 se encontró una concentración menor de 103 ± 234 Bq/m³. Además, el valor promedio de concentración de los 19 puntos de estudio es de 15357 ± 280 Bq/m³.
- La correlación entre las concentraciones de radón en la zona de estudio con humedad se obtuvo que la concentración de radón con la humedad del suelo exhibe una correlación significativa positiva de 0.74. La correlación entre radón con pH y conductividad eléctrica se identificó una correlación negativa de -0.61.
- Mediante el mapa de calor se pudo identificar las zonas de mayor presencia de humedad obteniendo como resultado los puntos 13, 6, 7 y 19; que puede ser atribuido a las precipitaciones, presencia de fuentes de agua, temperatura del aire al ser puntos de mayor altitud y la vegetación.
- El análisis de la conductividad eléctrica determinó que, los puntos 18, 16 y 14; son los que presentan mayor conductividad, este resultado se puede atribuir a que estos puntos se encuentran cerca de las zonas pobladas, entonces, el suelo podría presentar altos índices de sales y químicos que cambian la conductividad y por ende existe mayor presencia de minerales.
- Al evaluar los resultados de potencial de hidrógeno se verificó que toda la zona de estudio se encuentra conformada por suelos neutros y suelos alcalinos, esto debido a que estos suelos poseen una estructura pobre y densa de baja capacidad de infiltración y lenta permeabilidad, a su vez presentan porcentajes equilibrados y disponibilidad de los elementos químicos primarios y secundarios como boro, aluminio, zinc, hierro en menores proporciones.
- Del análisis de temperatura y humedad relativa del aire con la elaboración de mapas de calor, se identificó, el valor más alto de temperatura de 28.4 °C en el punto 11 mientras que el valor

más bajo fue en el punto 19 con una temperatura de 7.2 °C; en la humedad relativa los puntos 12, 5 y 7 fueron los más representativos sobrepasando el 80% de humedad, dando a entender que el aire se encuentra saturado y a punto de rocío.

5.2. Recomendaciones

- Se sugiere el uso de una ahoyadora a gasolina para los puntos de fácil acceso, es decir, los puntos que estén cerca de las vías, esto con el fin de agilizar el proceso de perforación y con ello la optimización del tiempo por ende se podría sacar más muestras en un solo día.
- Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales, como la medición de flujo de radón en el suelo, para investigar los patrones de movimiento y determinar posibles áreas de emisión y acumulación de radón, de igual manera considerar otros factores que podrían influir en las concentraciones. Por ejemplo, la composición geológica y la presencia de materia orgánica.
- Se recomendaría que se eviten posibles asentamientos humanos en la zona circundante al punto 13 de coordenadas (744877-9811834) ya que para el periodo de estudio se ha dictado una alta concentración de radón que podrá tener repercusiones sobre la vida de los pobladores.

BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, N.; et al. "Natural Radioactivity in Virgin and Agricultural Soil and its Environmental Implications in Sungai Petani." *Pollution* [en línea], 2015, 10(4) , pp. 305-313. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: https://journal.ut.ac.ir/article_53933_e334513d4db5c65a70d52a915609257c.pdf

AHMAD, N.; et al. "Effect of geochemical properties (pH, conductivity, TDS) on natural radioactivity and dose estimation in water samples in Kulim, Malaysia". *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* [en línea], 2019, pp. 1-9. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1526633>

AHMED ELZAIN, A. E. . *Radon Monitoring in the Environment*, s.l.: InTechOpen. 2016. pp. 26-41.

ALMAYAHI, B.; et al. "Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula". *Applied Radiation and Isotopes* [en línea], 2012, 70(11), pp. 2652-2660. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.07.021>

AMANCHA CAGUANA, J. E. Evaluación de la concentración del gas radón en ladrillos artesanales en las parroquias: Juan Montalvo- San Sebastian e Ignacio Flores comunidad la vicentina de la ciudad Latacunga, provincia de Cotopaxi (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Latacunga, Ecuador. 2021. pp. 1-140.

ANON. "Finite element modeling of radon distribution in natural soils of different geophysical regions". *Cogent Physics* [en línea], 2016, 3(1), p. 1–16. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/23311940.2016.1254859>

AUCAPIÑA RIOS, G.; & LLANES SÁNCHEZ, R. Implementación de una red de Monitoreo del Gas Radón a través de una red de Internet (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado), Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador. 2016, pp. 1-135.

BASKARAN, M. *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*, USA: Springer Geochemistry. 2016. p. 15–35.

BAIZE, S.; et al. "Active Tectonics and Earthquake Geology Along the Pallatanga Fault, Central Andes of Ecuador". *Frontiers in Earth Science Francia* [en línea], 8(1), 2020. pp. 5-13. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00193>

BEST, L.; et al. *Radiation Oncology Primer and Review*. S.l.: Demos Medical Publishing. 2013.

BERRY, W.; & FELDMAN, S. *Multiple Regression in Practice (Quantitative Applications in the Social Sciences)*. Newbury Park, CA: Sage University. 1985. pp. 7-50.

BUSHARA MOHAMEED, I. O. *Investigation of radon concentration in some house's in Soba*, S.l.: IAEA. 2013.

CARRIÓN, P.; et al. "Geosites and Geotourism in the Local Development of Communities of the Andes Mountains.A Case Study". *Sustainability* [en línea], 2021, 13(8). pp. 2-23. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/4624#>

CAJAS, E. *Propiedades químicas de los suelos*. Quito: s.n. 2018.

COHEN, J., & COHEN, P. *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1983. pp. 8-21.

CORWIN, D. & YEMOTO, K. "Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids". *Methods Soil Analysis* [en línea], 2020, 84(5), pp. 1442-1461. [Consulta: 14 febrero 2023]. Disponible en: https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20361500/pdf_pubs/P2558.pdf

CRONIN, C.; et al. "An Examination of Radon Awareness, Risk Communication, and Radon Risk Reduction in a Hispanic Community". *International Journal of Radiation Biology* [en línea], 2020, 96(6), pp. 1-40. [Consulta: 4 julio 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1730013>

DANKHE, G. *La comunicación humana: ciencia social*. Mexico D.F: McGraw Hill de México 1986. pp. 385-454.

DURRIDGE COMPANY INC. *Detector de radón rad 7*, Boston-USA: DurrIDGE Company Inc. 2014. pp. 1-17.

DURRIDGE COMPANY INC. *Soil gas probe manual*. Boston: Durrige Company Inc. 2015. pp. 1-16.

EL ARABI, A.; et al. "Natural radionuclides and dose estimation in natural water resources from Elba protective area, Egypt". *Radiat Prot Dosimetry* [em línea], 2006, 284(92), p. 121. [Consulta: 4 julio 2023]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncl022>

EOS. El Control De La Humedad Del Suelo: Un Factor Clave. *EOS* [En línea]. 2020. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo/#:~:text=El%20contenido%20de%20humedad%20del,agua%20por%20pie%20de%20suelo>

ESAN, D.; et al. "Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over the Lithological Units of a Southwestern Nigeria University". *Scientific Reports* [en línea], 2020, 10(7368). pp. 1-10. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-64217-8>

FARINDE, O.; et al. *Essential Physics dor Senior Secondary Schools*. S.l.: Tonad publishers limited, 2015.

FONT, L.; & BAIXERAS, C. "The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors". *Science of The Total Environment* [en línea], 2003, 307(1-3), pp. 55-69. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(02\)00462-x](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(02)00462-x)

FOSSÉN, H. *Regional Geology and Tectonics*. segunda ed. Oxford: Elsevier. 2020.

GADD, M.; & BORAK, T. "Partitioning of Rn-222 entry into a structure surrounded by soil". *Health Physics*, Vol. 68, n° 1 (1994), pp. 53-59.

GADPCH. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Chimborazo 2019-2023* [En línea]. Chimborazo: GADPCH. 2020. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://chimborazo.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/1.-PDOT-Provincial.pdf>

GARZÓN, G. *El Radón. Manual Teórico Práctico*. S.l.:Igeominas, 2009. p. 15.

GLASS, C. *Interpreting Aerial Photographs to Identify Natural Hazards*. Reino Unido: Elsevier, 2013. p. 69.

HARLEY, N.; et al. "Radon carcinogenesis: risk data and cellular hits". *Radiation Protection Dosimetry*[en línea], 2008, 130(1), p. 107–109. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: 10.1093/rpd/ncn123

HERNÁNDEZ, R. *Definiciones de los enfoques cuantitativo y cualitativo, sus similitudes y diferencias. Metodología De la Investigación*. Sexta ed. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2014, p. 4.

IBM. *¿Qué es la regresión lineal?* . IBM [en línea] 19 de febrero de 2022. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://www.ibm.com/mx-es/analytics/learn/linear-regression>

INTAGRI. La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. S.l.: *Artículos Técnicos de INTAGRI*, 2017. p. 5.

IOANNIDES, K.; et al. . "Soil gas radon: a tools for explorong active fault zones". *Applied radiation and isotopes*. Vol. 52, n° 2-3 (2003), pp. 205-213.

KING, C. Impulsive radon emanation on a creeping segment of the San Andreas fault, California. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, Vol. 12, n°2-4, 1984, pp. 341-352.

KING, C.; et al. Radon Anomalies on three kinds of faults in California. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, Vol. 141, n°1, 1993, pp. 111-124.

KUMAR, A.; et al. "Assessment of indoor radon, thoron concentrations, and their relationship with seasonal variation and geology of Udhampur district, Jammu & Kashmir, India". *International Journal of Occupational and Environmental Health* [en línea], 2018, 23(3), p. 202–214. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: 10.1007/BF00876238

LAGIOS, E.; et al. "Tectonic Early Warning System Through Real-Time Radon (Rn) Monitoring: Preliminary Results of a Geophysical Method for Forecasting Earthquakes". *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction*. Netherlands: Springer, Dordrecht, Vol. 1, n°1 (2000), pp. 261-270.

LIANG, S.; & WANG, J. *Advanced Remote Sensing*. Segunda ed. Estados Unidos: Academic Press. 2020.

LORENZO GONZÁLEZ, M.; et al. "Radon exposure: a major cause of lung cancer". *Expert Review of Respiratory Medicine* [en línea], 2019, 13(9), pp. 839-850. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17476348.2019.1645599>

LOVELAND, W.; et al. *Modern Nuclear Chemistry*. Canada: Wiley Interscience, 2006, p. 57.

MÁRQUEZ, C. Técnicos estudian la falla de Pallatanga. *El Comercio*[en línea], 9 junio 2019, pp. 5-9. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/tecnicos-estudio-falla-pallatanga-sismos.html>

MARTÍNEZ, I. *Emanaciones de Radón (^{222}Rn) en aguas termales del Estado de México. Premonitro Geofísico*. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2017, pp. 10-23.

MINITAB. *Métodos y fórmulas para Correlación* [En línea]. 2020. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/methods-and-formulas/methods-and-formulas/#:~:text=El%20estadístico%20de%20prueba%20para,n%20-%20%20grados%20de%20libertad>

MINKIN, L. "Is Diffusion, Thermodiffusion, or Advection a Primary Mechanism of Indoor Radon Entry?". *Radiation Protection Dosimetry* [en línea], 2002, 102(2), p. 153–161. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006084>

MORALES SIMFORS, N.; et al. "Recent progress in radon-based monitoring as seismic and volcanic precursor: A critical review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, Vol. 50, n° 3, pp. 1-34.

MOSE, D.; et al. "Field evaluation of the effects of water table fluctuations on soil radon gas emanations". *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, Vol. 42, n°9 (2014), pp. 1071-1076. [Consulta: 21 junio 2023]. Disponible en:

NIELSON, K.; & ROGERS, V. *Determining and Managing Radon Risk*. S.l.:s.n. 2000.

OMEODU, D.; & BETHEL, U. "Effect of Cooperative Learning Strategy on Secondary School". *International Journal of Education and Evaluation* , Vol. 4, n°4 (2018), pp. 37-58.

OMS. *El radón y sus efectos en la salud*. [En línea]. 2021. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

PALAU, M.; et al. . *Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano*, Madrid: s.n. 2019. pp. 1-73.

PEPPER, I.; & BRUSSEAU, M. *Environmental and Pollution Science*. Tercera ed. Reino Unido: Academic Press. 2019.

PEREYRA ANAYA, P. E. *Concentration Measurements of Radon 222 Indoors in Lima*. Peru, Lima : s.n. 2015.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. *Radiación, efectos y fuentes*. S.l.:Pnuma, 2016, p. 32.

RICHON, P.; et al. "Anomalía de radón en el suelo del volcán Taal, Filipinas: un probable precursor del M 7.1 Mindoro terremoto (1994)". *Geophysical Research Letters* [en línea], 2003, pp. 14-81. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2003GeoRL..30.1481R/doi:10.1029/2003GL016902

RIVADENEIRA, F.; et al. *Breves fundamentos terremotos Ecuador*. Quito: Corporación Editora Ecuador, 2007, pp. 22-28.

SAM KEITH, M.; et al. *Toxicological Profile for Radon*. Atlanta: Division of Toxicology and Human Health Sciences. 2012.

STABIN, M. "Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics". *Springer*, Vol. 5 , n°3 (2007), pp. 18-42.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. *El suelo: un universo invisibles.* [En línea]. Argentina: UNLP. 2016. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/98/27598/3f23fc987dbbda82587753c9796000a.pdf>

UNSCEAR. *Sources, effects and risks of ionizing radiation,* New York: s.n. 1988.

VÁZQUEZ, B. *El gas radón. Un contaminante radiactivo en los edificios que requiere un tratamiento especial,* Madrid : s.n. 2018. pp. 1-21.

VAZQUEZ, C. ; et al. "Marie Sklodowska-Curie: Apasionada por la investigación en radioactividad". *Ciencias y Tecnología* [en línea], 2019, 13(2), pp. 54-68. [Consulta: 18 junio 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22125.82400>

VINUESA, P. *Tema 8: Correlación teoría y práctica* [en línea]. México: UNAM. 2018. [Consulta: 4 julio 2023]. Disponible en: https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion.html

WILLIAMSON, J. Cambiando el pH del suelo. *Home & Garden Information Center.* [En línea]. 2016. [Consulta: 4 julio 2023]. Disponible en: <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/#:~:text=El%20pH%20del%20suelo%20afecta,mayores%20a%207%20indican%20alcalinidad.>



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: 21 / 08 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Cristian Ismael Murillo Pástor
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería en Biotecnología Ambiental
Título a optar: Ingeniero en Biotecnología Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo, MSc.



1670-DBRA-UPT-2023