



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“Francisco García Salinas”

UNIDAD ACADÉMICA DE ESTUDIOS NUCLEARES

**“FLUJO DE RADÓN EN SUELO PARA USO
HABITACIONAL EN LA CIUDAD DE FRESNILLO,
ZACATECAS”**

TESIS

Presentada en la UNIDAD ACADÉMICA DE ESTUDIOS NUCLEARES en
cumplimiento parcial de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS NUCLEARES
CON OPCIÓN TERMINAL: INGENIERÍA NUCLEAR

PRESENTA:

IQ. IRIS SELENE GÓMEZ QUIÑONES

ASESORES:

M. en C. Hugo López del Río
Dr. Ignacio Dávila Rangel



Septiembre 2016
Zacatecas, Zacatecas

“FLUJO DE RADÓN EN SUELO PARA USO HABITACIONAL EN LA CIUDAD DE FRESNILLO, ZACATECAS”

Aprobada por el jurado

Dr. J. Ignacio Dávila Rangel

Dr. Fernando Mireles García

Dr. Carlos Ríos Martínez

Dra. Sonia Azucena Saucedo Anaya

Dr. José Luis Pinedo Vega

Propiedad intelectual de I.Q. Iris Selene Gómez Quiñones y la

Unidad Académica de Estudios Nucleares

2011 ® todos los derechos reservados

irisgomqui@hotmail.com

idavilara@gmail.com

hlopezdelrio@hotmail.com

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

DEDICATORIA

A mi amado Padre Felipe de Jesús Gómez García y a mi amada Madre Socorro Quiñones Soto, por forjar en mi los mejores cimientos, por el amor que siempre me brindaron, por los principios y valores que me inculcaron, por ser los mejores padres y maestros en mi apertura a la espiritualidad, a mi integridad y a mi valor como mujer y como profesionalista, Por los triunfos y derrotas, por llevarme siempre de su mano, Por ser y estar, por regalarme lo más hermoso LA VIDA, los AMO y los HONRRO, GRACIAS.*

A mis hermanos, Oscar, Alan, Sol, Bere, Cyndia y Ale, por ser mi ejemplo a seguir y parte fundamental en mi vida, por siempre estar ahí para mí en las buenas y en las malas, por los regaños y buenos consejos, por todo su amor y apoyo incondicional, LOS AMO.

A mi esposo, amigo, cómplice y compañero de vida, Israel Corcedo Ramírez por su apoyo y amor incondicional, por ser parte importante en el logro de mis sueños y metas profesionales.

TE AMO

A mi gran y verdadero amor, mi amada hija XIMENA, por ser esa fuente de motivación, inspiración y fortaleza para ser mejor cada día, por el amor, la luz y alegría que trajiste a mi vida, por ser mi Red Bull y darme esas alas para volar. TE AMO mi pequeña hijita.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la fuerza vital, por ser ese poder superior interno que me regala cada día una prueba y una meta que lograr, dejándome aprendizaje de esta gran escuela llamada "Vida", por ser ese gran misterio que se encuentra en el corazón y en el centro de la excelencia.

A la Universidad Autónoma de Zacatecas en especial a la Unidad Académica de Estudios nucleares por abrirme sus puertas permitiendo seguir mi formación profesional con esta maravillosa maestría.

Agradezco a mis asesores: Dr. Ignacio Dávila Rangel y al M. en C. Hugo López del Río, por el apoyo, la paciencia, y los conocimientos compartidos para que este trabajo se realizara. Gracias

A cada uno de mis compañeros que formaron parte en esta etapa de aprendizaje, gracias por su compañerismo y amistad.

Al CONACYT por el apoyo de la beca para poder cursar esta maestría.

A CFE por permitirme aplicar parte de mis conocimientos en su gran empresa, a mis jefes por permitirme concluir con mi trabajo y procesos para la titulación de este posgrado.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Historia del radón	5
1.2. Propiedades físicas y químicas.....	6
1.3. Isótopos de radón	8
1.4. Efectos a la salud por exposición al radón.....	10
1.5. Geología y transporte de radón.....	12
1.6. Descripción matemática del transporte de radón en suelo y exhalación	18
1.6.1. Generación y transporte de radón en el suelo	18
1.6.2. Exhalación de radón	21
1.6.3. Acumulación de radón en una cámara de exposición	23
2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1. Descripción del sitio de estudio	26
2.2. Características geológicas del sitio de estudio	28
2.2. Materiales	36
2.2.1. Sistema de centelleo líquido	36

2.3. Métodos.....	37
2.3.1. Muestreo y preparación de la cámara de acumulación.....	37
2.3.2. Método del vial abierto.....	38
2.3.3. Detección y medición de radón	38
2.3.4. Cálculo de la tasa de exhalación de radón	39
2.3.5. Límite de detección	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4. CONCLUSIONES.....	56
Referencias	57

RESUMEN

El radón es un gas natural radiactivo, reconocido como agente cancerígeno debido a la deposición de sus descendientes radiactivos. La exposición a altas concentraciones en interiores es el factor más importante para estimar el riesgo a la salud. La principal fuente de radón atmosférico es el suelo y el potencial de exhalación de éste depende de características como permeabilidad, humedad, porosidad, presión, temperatura y, predominantemente, de la geología de la roca subyacente. La medición de la exhalación de radón en suelo y su relación con la geología presente es la base de los mapas de riesgo radiológicos por radón. El objetivo de esta investigación fue conocer la variabilidad espacial de la exhalación de radón en suelo para uso habitacional en la ciudad de Fresnillo, Zacatecas, para identificar áreas de riesgo radiológico por exposición a radón. La medición de la exhalación de radón se realizó *in situ*, a una profundidad de 20 a 30 cm, aplicando la técnica del vial abierto y centelleo líquido. En total, se midió la exhalación en 31 puntos situados alrededor del centro de la ciudad debido a la baja densidad poblacional y a la disponibilidad de suelo no perturbado por el desarrollo urbano. Aproximadamente en un tercio de puntos la exhalación fue menor a la sensibilidad del método de medición. El máximo valor registrado fue de $14.42 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$, obteniéndose valores más altos en suelos xerosol y rendzina, y roca subyacente del tipo conglomerado polimíctico. En promedio, la exhalación fue menor en suelos litosol y roca basáltica y mayor en roca sedimentaria conglomerado polimíctico y roca volcánica riolita. Se observó que la zona con mayor potencial de exhalación de radón se ubica al noroeste de la ciudad donde subyace roca sedimentaria conglomerado polimíctico, aunque cercano al afloramiento de roca riolítica, en el sur de la ciudad, se obtuvieron también valores altos de exhalación.

ABSTRACT

Radon is natural radioactive gas, known as a carcinogenic agent because of the deposition of its radioactive descendants. One of the top factors to a health risk estimation is the exposure to high radon concentrations. The soil is the main atmospheric radon source and the radon exhalation depends upon the characteristics and the geology of the soil substrate. The radon radiologic risk maps are based on the radon exhalation measurement and its relationship with the soil geology. This research objective consists in knowing the spatial variability of radon exhalation in domestic soils of the Fresnillo, Zacatecas city, in order to identify radiologic risk areas due to radon exposure. *In situ* measurements of radon exhalation to a depth of 20 to 30 cm were done using the open vial technic and liquid scintillation. A total of 31 measurement exhalation sites, located away from the city downtown were taken, because of the low population density and the non-perturbed soil. In about one third of the sites, the radon exhalation were below the measurement sensibility. A maximum of $14.42 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$ were recorded in xerosol and rendzina soils with policmitic rock substrate; in average, litosol and basaltic rock showed low exhalation values compared to sedimentary rock of the policmitic conglomerate and riolitic volcanic rock. Northwest side of town showed the mayor radon exhalation potential, since the substrate is of sedimentary policmitic conglomerate, somewhat close to a riolitic rock basset. Several southern points exhibit high exhalation values.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del radón (Cothorn, 1981); Je, 1997)	7
Tabla 2. Cadena de decaimiento del ^{220}Rn	9
Tabla 3. Cadena de decaimiento del ^{222}Rn	9
Tabla 4. Cadena de decaimiento del ^{219}Rn	9
Tabla 5. Características de los suelos predominantes en la ciudad de Fresnillo	30
Tabla 6. Características de las rocas subyacentes en la ciudad de Fresnillo	35
Tabla 7. Exhalación de radón y características geológicas del punto de muestro	45
Tabla 8. Rango y promedio de la exhalación de radón por unidad de suelo.....	46
Tabla 9. Rango y promedio de la exhalación de radón por tipo de roca	47
Tabla 10. Promedio de la exhalación de radón por tipo de suelo y roca subyacente	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dosis efectiva promedio anual (mSv) estimada para población mundial.....	10
Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de emanación de radón.	15
Figura 3. Condiciones geométricas para el transporte de radón.....	18
Figura 4. Localización del municipio de Fresnillo, Zacatecas	27
Figura 5. Área de estudio	28
Figura 6. Suelos predominantes en la ciudad de Fresnillo.....	29
Figura 7. Litología en la ciudad de Fresnillo (SGM, 2006).....	31
Figura 8. Colocación <i>in situ</i> del vial abierto y cámara de exposición para acumular radón	37
Figura 9. Variación temporal de la actividad del ^{222}Rn y sus descendientes	39
Figura 10. Puntos de medición de la exhalación de radón en la ciudad de Fresnillo	43
Figura 11. Tipo de suelo en los puntos de medición.....	44
Figura 12. Tipo de roca en los puntos de medición	44
Figura 13. Distribución e intensidad de la exhalación por tipo de suelo	50
Figura 14. Distribución e intensidad de la exhalación por tipo de unidades geológicas subyacentes	54
Figura 15. Curvas de nivel en el área de estudio	55

INTRODUCCIÓN

El radón es un gas monoatómico, químicamente inerte por pertenecer a los gases nobles; no tiene isótopos estables y existe en forma de tres isótopos radiactivos asociados a las series de decaimiento del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . El ^{222}Rn , con un tiempo de vida media de 3.8 días, es parte de la serie de decaimiento ^{238}U y se origina del decaimiento del isótopo ^{226}Ra . Este radioisótopo de radón es el más importante de los tres debido a su tiempo de vida que le permite alcanzar concentraciones importantes en el aire de interiores, y a sus efectos a la salud asociados con la exposición a sus productos de decaimiento radiactivo. El ^{220}Rn es parte de la serie de decaimiento del ^{232}Th y decae con un tiempo de vida media de 56 s. Es menos importante que el ^{222}Rn porque su corto tiempo de vida media limita su presencia en el aire. El tercer radioisótopo del radón es el ^{219}Rn generado en la cadena de decaimiento del ^{235}U ; su contribución a la exposición radiactiva del ser humano es insignificante debido a su corto tiempo de vida media (4 s) y a la baja abundancia natural de su precursor ^{235}U (~20 veces menor que la concentración en actividad del ^{238}U).

El radón y sus productos de decaimiento de vida media corta son la fuente principal de exposición radiactiva para el ser humano, y la inhalación es la principal vía de ingreso al organismo. Después de ser inhalado, sus hijos de decaimiento se depositan principalmente en el epitelio bronquial donde la radiación alfa del decaimiento provoca daño celular, básicamente en el ADN, lo que puede ser el responsable de un gran número de muertes por cáncer de pulmón cada año. Se ha estimado que aproximadamente 10 % de todos los casos de cáncer de pulmón en los Estados Unidos pueden ser provocados por la exposición al radón (NRC, 1994).

El radón ha sido reconocido como un agente ambiental de riesgo para la salud. Según estimaciones del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR por su siglas en inglés), casi la mitad de la dosis efectiva anual recibida por la totalidad de fuentes naturales es debida a la inhalación de radón

(UNSCEAR, 2000). En el Reino Unido, la inhalación de radón es reconocida como la segunda causa de cáncer en pulmón después de fumar (Poortinga, et al., 2008). Por su parte, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por siglas en inglés) ha clasificado al radón en el Grupo 1 como carcinogénico a los humanos, concluyendo que hay suficiente evidencia de que la exposición al radón puede generar cáncer de pulmón (IARC, 2001).

Naturalmente la fuente principal de radón es la corteza terrestre por su contenido de uranio o radio y, en última instancia, la roca y el suelo. La concentración promedio de radón en la corteza es de aproximadamente 1.23×10^{-8} Bq/kg y continuamente migra del suelo a la atmósfera, donde su concentración varía de 3.7×10^{-4} a 0.016 kBq/m³. En suelo su concentración fluctúa entre 0.4 y 40 kBq/ m³ (Buttafuoco, et al., 2007).

El mayor riesgo de exposición al radón se atribuye, principalmente, a su acumulación en interiores debido a la migración a través de fisuras o fracturas desde el suelo y rocas subyacentes. Por lo tanto, la geología juega un papel preponderante en la generación de radón. Puesto que el radón proviene del radio y éste existe virtualmente en todos los tipos de rocas y suelos, aunque su concentración varía con el material geológico, niveles altos de radón se asocian con tipos particulares de roca madre y depósitos no consolidados como algunos granitos, rocas fosfóricas ricas en uranio y esquistos ricos en material orgánico, suelos sobre roca caliza y algunas tipos de roca arenisca permeable (Nagda, 1994). Por ejemplo, los principales tipos de rocas altamente generadoras de radón identificados en los Estados Unidos son las rocas metamórficas uraníferas, granitos y pizarra negra marina, así como suelos derivados de carbonatos con altos contenidos de uranio y radio (Appleton, 2007).

La liberación de radón en suelos y rocas está controlada mayormente por el tipo de minerales en que se presentan el uranio y radio. Una vez que el gas radón es liberado en los minerales, su migración a la superficie depende de las características de la roca madre

y el suelo, tales como porosidad, permeabilidad y contenido de humedad; de la naturaleza de los fluidos acarreadores que incluyen al gas dióxido de carbono y agua subterránea; de factores meteorológicos como la presión atmosférica, el viento, humedad relativa y precipitación. Sin embargo, los procesos mediante los cuales el radón es liberado del suelo a la atmósfera se pueden englobar en dos etapas: 1) *emanación* que se refiere al radón que alcanza los espacios intersticiales, o poros, entre los granos de suelo una vez que ha sido generado en ellos por el decaimiento de los átomos de radio, y 2) *exhalación* que designa el escape del radón emanado hacia la atmósfera. La medición de la exhalación radón en suelo tiene varios propósitos como son la prospección de yacimientos de uranio (Binns, et al., 1998), la predicción de terremotos (Chyi, et al., 2002; Planinic, et al., 2004) o la protección radiológica de las personas.

Para prevenir la exposición a altas concentraciones de radón por acumulación en interiores se pueden efectuar dos tipos de mediciones: una en interiores y otra de la exhalación de radón en suelo. La primera proporciona el valor de la concentración de radón considerando las características del espacio, tipo de materiales, ventilación, etc. La segunda medición tiene como propósito conocer la potencialidad de un tipo de suelo para producir gas radón, lo cual representa indiscutiblemente las condiciones locales; con esta información se construyen los mapas de radón. El interés en conocer la distribución espacial de la concentración de radón en suelo radica finalmente en la protección radiológica del ser humano.

La ciudad de Fresnillo, cabecera municipal del municipio del mismo nombre, en el estado de Zacatecas, es uno de los centros urbanos de mayor crecimiento en el Estado. La población ha tenido un crecimiento aproximadamente de 9 % entre 2005 y 2010. Este aumento de habitantes ha propiciado una demanda de mayor vivienda, con la consecuente expansión de la ciudad. De aquí el interés en localizar áreas con elevados niveles de exhalación de radón debido a la importancia que representa el riesgo a la salud por inhalación de este gas radiactivo. Para determinar los niveles de exhalación del radón

es necesario ubicar la zona de muestreo, conocer factores como la geología del suelo y las condiciones climatológicas del lugar. La ciudad descansa en una zona altamente mineralizada con una actividad minera permanente de extracción de Ag, Pb y Zn.

OBJETIVO GENERAL

Obtener la variabilidad espacial de la exhalación de radón en suelo urbano de la ciudad de Fresnillo, Zacatecas, mediante la aplicación del método del vial abierto y centelleo líquido, para elaborar un mapa de tendencia geografía de la exhalación en dicho municipio permita conocer directamente del suelo, el potencial de radón en esta región en específico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Historia del radón

En 1896, Henry Becquerel descubrió la radiactividad al experimentar con el uranio. Descubrió que el uranio emitía continuamente radiación e intentó conocer si esta característica era propia del uranio o sucedía también con otros elementos. En 1897, Pierre y Marie Curie descubrieron que los elementos radio, torio y polonio también emitían la radiación reportada por Becquerel.

Friedrich Ernst Dorn, en 1900, descubrió que uno de los productos de la descomposición de radio era un nuevo elemento. A principios de 1900, mientras experimentaba con el óxido de torio, Ernst Rutherford descubrió que además de la ionización de radiación alfa y beta había una ionización adicional, un gas de difusión para capas más gruesas de compuestos de torio. En 1901, Dorn y Rutherford confirmaron que el gas emanado por el radio era un gas radiactivo (Real-Ferrer, 2002).

William Ramsay y Robert Whytlaw-Gray, en 1908, con ayuda de la balanza ideada por el primero, aislaron al gas de emanación y determinaron su densidad y masa atómica, encontrando que era el más pesado de los gases hasta entonces conocidos, con aproximadamente 222 unidades de masa atómica. En el año de 1923 el comité internacional de elementos químicos aprueba el nombre de radón a lo que llamaban emanación de radio para los gases radiactivos. La palabra nitón "Nitón" fue utilizada por Ramsay y Gray para la emanación de radio debido a la luminosidad del nuevo elemento en el estado condensado (NITON en latín se significa brillante).

1.2. Propiedades físicas y químicas

El radón es el gas monoatómico más pesado de la naturaleza a temperatura ambiente. En estado sólido presenta una coloración rojo-anaranjada debido a defectos cristalinos originados por la desintegración de sus átomos, presentando una fosforescencia brillante que se vuelve amarilla a temperaturas más bajas.

La estructura electrónica de gas noble del radón sugiere una reactividad química limitada; sin embargo, su relativamente bajo potencial de ionización de 10.7 eV supone que son posible algunas interacciones químicas. Se ha reportado que el flúor reacciona con el radón formando fluoruro de radón (Fields, et al., 1962) y que clatratos de átomos de radón se forman en cristales de ciertos compuestos de hidrógeno.

Algunas propiedades físicas del radón se dan en la Tabla 1. El radón tiene una alta solubilidad en varios líquidos orgánicos y en agua ($230 \text{ cm}^3/\text{kg}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) (Wilkening, 1990) lo que explica su presencia en cantidades sustanciales en ciertas aguas minerales. Como es de esperarse para un gas, la solubilidad del radón en los líquidos disminuye con la temperatura. También es eficientemente absorbido en carbón activado, propiedad que es utilizada para separarlo de otros gases.

Tabla 1. Propiedades físicas del radón (Cothern, 1981); Je, 1997)

Propiedad			
Densidad a temperatura y presión normal	9.96 kg/m ³		
Punto de ebullición	-62 °C		
Punto de fusión	-71 °C		
Temperatura crítica	104 °C		
Presión crítica	62 atm		
Coeficiente de difusión en el aire libre	0.1 cm ² /s		
Coeficiente de difusión en el aire agua	1.13x10 ⁻⁵ cm ² /s		
Coeficiente de partición ^a agua/aire a presión atmosférica:			
0 °C	0.507		
10 °C	0.340		
20 °C	0.250		
30 °C	0.195		
37 °C	0.167		
50 °C	0.138		
75 °C	0.114		
100 °C	0.106		
Solubilidad a 1 atm en diferentes líquidos ^b	37 °C	18 °C	0 °C
Alcohol absoluto	-	6.17	8.28
Acetona	-	6.30	7.99
Alcohol amilico	-	10.6	-
Anilina	-	3.80	4.45
Grasas animales	5.5-6.5	-	-
Benceno	-	12.82	-
Disulfuro de carbono	-	23.14	33.4
Cloroformo	-	15.08	20.5
Éter	-	15.08	20.09
Ácidos grasos	3.6-7.3	-	-
Etil acetato	-	7.35	9.41
Ácido fórmico	0.96	-	-
Glicerina	-	0.21	-
Hexano	-	16.56	23.4
Sangre humana	0.43	-	-
Grasa humana	6.33	-	-
Ácido linoleico	6.3	-	-
Ácido oléico	6.7	-	-
Aceite de oliva	-	29	-
Derivados del petróleo (parafina líquida)	-	9.2	12.6
Tolueno	-	13.24	18.4
Xyleno	-	12.75	-

^a El coeficiente de partición en agua se define como la razón C_w/C_a , donde C_w y C_a son la concentración de radón en agua y aire, respectivamente.

^b La solubilidad está dada por el volumen de gas radón disuelto en la unidad de masa de líquido: cm³/kg.

1.3. Isótopos de radón

Los isótopos naturales del radón son ^{219}Rn , ^{220}Rn y ^{222}Rn , los cuales son generados en las series de decaimiento del ^{235}U , ^{232}Th y ^{238}U , respectivamente. Todos son radiactivos y se desintegran a través de la emisión de partículas alfa. En las tablas 2, 3 y 4 se muestran las cadenas de decaimiento de cada isótopo de radón y sus características radiactivas.

Debido a la baja abundancia del ^{235}U entre todos los isótopos de naturales de uranio (~ 0.7 %) y a su corto tiempo de vida media, el ^{219}Rn no es considerado ambientalmente significativo. El ^{220}Rn también tiene un tiempo de vida media corto pero como se forma a partir del ^{232}Th , el cual es más abundante que el uranio (la concentración promedio en la corteza terrestre de torio es de 11 ppm mientras que la del uranio es de 2– 3 ppm (Wilkening, 1990), puede ser representar una fracción significativa de las emisiones de gas radón natural en algunos ambientes.

El ^{222}Rn (de ahora en adelante denominado simplemente radón) es el isótopo más importante desde el punto de vista radiológico y ambiental. Se forma durante la desintegración del ^{226}Ra en la serie de decaimiento natural del ^{238}U y, puesto que el ^{238}U se encuentra distribuido naturalmente en suelo y rocas, la exposición al ^{222}Rn es prácticamente universal. Además, el largo tiempo de vida media del ^{226}Ra (1600 años) hace que el radón se produzca a un ritmo constante en los materiales que lo contiene. Por su relativamente mayor tiempo de vida media, puede difundirse y transportarse desde el suelo donde se genera en los granos de suelo o roca, hacia la atmósfera inmediata, y en algunos casos acumularse en concentraciones nocivas para el ser humano.

Tabla 2. Cadena de decaimiento del ^{220}Rn

Radioisótopo	Vida media	Energía principal de la radiación emitida (MeV)		
		Alfa	Beta	Gamma
^{222}Rn	3.825 d	5.49	-	-
^{218}Po	3.11 min	6.00	-	-
^{214}Pb	26.8 min	-	0.67	0.295
^{214}Bi	19.9 min	-	1.0	0.609
^{214}Po	163.69 μs	7.69	-	-
^{210}Pb	22.3 a	-	0.015	0.047
^{210}Bi	5.013 d	-	1.161	-
^{210}Po	138.376 d	5.305	-	-
^{206}Pb	estable	-	-	-

Tabla 3. Cadena de decaimiento del ^{220}Rn

Radioisótopo	Vida media	Energía principal de la radiación emitida (MeV)		
		Alfa	Beta	Gamma
^{220}Rn	55.6 s	6.29	-	-
^{216}Po	0.150 s	6.78	-	-
^{212}Pb	10.64 h	-	0.331	0.239
^{212}Bi	60.55 min	6.05	1.55	0.040
^{212}Po	298 ns	8.78	-	-
^{208}Tl	3.053 min	-	1.28	0.511
^{208}Pb	Estable	-	-	-

Tabla 4. Cadena de decaimiento del ^{219}Rn

Radioisótopo	Vida media	Energía principal de la radiación emitida (MeV)		
		Alfa	Beta	Gamma
^{219}Rn	3.96 s	6.42	-	-
^{215}Po	1.78 ms	7.38	-	-
^{211}Pb	36.1 min	-	0.29	0.405
^{211}Bi	2.14 min	6.28	-	-
^{207}Tl	4.77 min	-	1.44	-
^{207}Pb	Estable	-	-	-

1.4. Efectos a la salud por exposición al radón

Los riesgos a la salud planteados por la radiación ionizante son bien conocidos. Los daños producidos por este tipo de radiaciones en el ser humano dependen de muchos factores como son la naturaleza y la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición, la energía cedida, la superficie irradiada o la dosis de radiación, siendo más perjudicial el efecto si se recibe la misma radiación en un periodo de tiempo corto que en uno mayor.

El gas radón es con mucho la fuente de radiación ionizante más importante, ya que tiende a concentrarse en espacios cerrados como minas subterráneas o casas, contribuyendo a la dosis recibida por fuentes naturales. La distribución de la concentración de radón en interiores en varios países varía entre 9 y 184 Bq/m³ y la UNSCEAR estima que la dosis anual efectiva por exposición a radón es de 1.26 mSv, lo que representa aproximadamente la mitad de la dosis total estimada para todas las fuentes naturales de radiación ionizante (Fig. 1), con la consideración que existe una gran variabilidad debido a su irregular distribución geográfica (UNSCEAR, 2008).

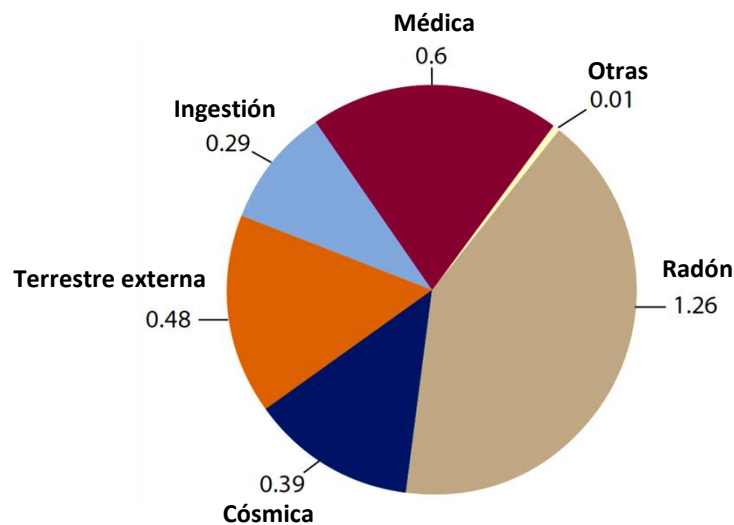


Figura 1. Dosis efectiva promedio anual (mSv) estimada para población mundial

La mayor parte de la dosis debido a la inhalación de radón y sus productos de decaimiento es recibida en las vías respiratorias, principalmente en los pulmones. Se estima que la exposición al gas radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población en general después del cigarro. Los estudios epidemiológicos han proporcionado pruebas convincentes de una asociación entre la exposición al radón y el cáncer pulmonar, principalmente en mineros de la minería de uranio (NRC, 1988).

El radón fue el primer carcinógeno respiratorio identificado como tal. A inicios del XVI, Agricola documentó una inusual alta mortalidad por enfermedades respiratorias en trabajadores de minas subterráneas de las montañas Erz en el este de Europa (Hoover & Hoover, 1950). En 1879, Harting y Hesse (Harting & Hesse, 1879) efectuaron autopsias en mineros de aquella región, encontrando tumores pulmonares, y para inicios del siglo XX se demostró que tales tumores correspondían a carcinomas de pulmón (Arnstein, 1913). El registro de altos niveles de radón en las minas de aquella región y en las cercanías de las minas de Joachimsthal, en la antigua Checoslovaquia, donde también se observaron altos índices de cáncer de pulmón entre los mineros, llevó a la hipótesis de que el radón era la causa de la enfermedad. Esta hipótesis no fue completamente aceptada hasta que estudios epidemiológicos en otros grupos de trabajadores de minas subterráneas fueron publicados en los 50's y 60's (NRC, 1988). Actualmente el radón ha sido clasificado como un agente cancerígeno por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, 1988).

Inicialmente, el radón fue considerado como la causa directa del cáncer pulmonar en los mineros. Sin embargo, posteriormente se descubrió que eran los productos de decaimiento del radón quienes impartían la dosis suficiente a las células pulmonares (Harley, 1952). Las partículas alfa liberadas por los radioisótopos ^{218}Po y ^{214}Po , entregan la energía que se considera necesaria a las células diana del epitelio respiratorio para producir daños en el ADN y provocar el cáncer pulmonar.

Las estimaciones actuales de la proporción de los cánceres de pulmón atribuible al radón varían de 3 a 14%, dependiendo de la concentración promedio de radón en el país en cuestión y los métodos de cálculo.

1.5. Geología y transporte de radón

El origen directo del elemento radón es el uranio y torio y sus productos de decaimiento presentes en suelos y rocas. Por lo tanto se considera que estas matrices naturales son la fuente más importante de radón ya que contienen minerales de uranio, torio y radio. Los factores que controlan la cantidad de radón generado y liberado en el suelo son la concentración de estos elementos en la roca y el proceso de transporte de radón desde los granos de material hacia los poros del suelo.

Niveles relativamente altos de radón se han asociado con tipos particulares de lechos de rocas y depósitos no consolidados ricos en uranio como granitos, calizas, rocas fosfóricas y pizarras ricas en materia orgánica (Appleton, 2007). Las concentraciones de uranio pueden ser muy variables pero, en general, las rocas sedimentarias con materia orgánica se encuentran moderadamente enriquecidas con uranio. Las rocas fosfatadas y las pizarras ricas en materia orgánica presentan las concentraciones de uranio más altas, en algunos hasta de 1000 ppm (Gundersen, et al., 1992).

El uranio tiene una tendencia a estar enriquecido en las fases más volátiles en rocas fundidas o parcialmente fundidas conforme se enfrían. En las rocas con bajos puntos de fusión, como los granitos, la concentración de uranio es más alta (10–40 ppm) que en rocas de mayor punto de fusión, tales como las dioritas y basaltos (0.5–5 ppm) (Kepler & Wyllie, 1990).

Bajo condiciones particulares del medio, las rocas sedimentarias pueden ser un medio importante para la absorción de uranio. La presencia de minerales arcillosos y materia orgánica, facilita la absorción del uranio en sedimentos una vez que éste ha sido lixiviado desde la roca madre (Flexser, et al., 1993).

Muchos estudios han demostrado la influencia de la geología en las concentraciones de radón en interiores (Miles & Appleton, 2005; Miksova & Bernet, 2002; Sundal, et al., 2004; Miles & Ball, 1996; Kemski, et al., 2006; Appleton & Miles, 2010). Por ello, las características geológicas proporcionan información relevante que permiten identificar áreas que pueden generar altos niveles de radón ambiental.

Además de la geología, otro factor importante que influye en la exhalación de radón en suelos es el proceso de transporte de radón a través de los espacios intersticiales del suelo hasta la superficie. Por ser un gas, tiene una gran movilidad y emigra desde los lugares de origen, a través de poros y grietas hasta la superficie y de ahí pasa a formar parte de la atmosfera. En suma, el potencial del radón para una región dada es el resultado de una combinación de las características geológica y propiedades del suelo subyacente tales como la distribución de uranio, radio, porosidad, permeabilidad y contenido de humedad (Oliver & Khayrat, 2001).

El radón que alcanza los poros del suelo puede transportarse por difusión y advección. La difusión es el movimiento de un gas en el seno de un material que lo contiene provocado por la diferencia de concentración, y la advección ocurre en respuesta a gradientes de presión.

El transporte difusivo del radón en suelos es limitado debido a su corto tiempo de vida media. Por la difusión, los átomos de radón que alcanzan los poros entre los granos del material se mueven a lo largo de un gradiente de concentración, desde los puntos donde la concentración de radón es mayor hacia zonas de menor concentración. La difusión no

es muy sensible al tamaño de poros o de granos, pero es muy sensible al contenido de agua en los poros, ya que la presencia de agua tiende a disminuir la migración de radón porque la difusión en agua es casi tres órdenes de magnitud más pequeña que en aire. Se han obtenido experimentalmente valores de la distancia promedio de difusión de radón en suelos secos entre 1.6 a 1.9 m, mientras que en suelos saturados es solo alrededor de 0.01 m (Schumann, et al., 1994).

La advección por gradiente de presión puede transportar al radón distancias significativamente más grandes que la difusión. En el caso del suelo, los gradientes de presión se dan en el gas del suelo, entre el gas del suelo y el aire atmosférico, o una combinación de ambos. El transporte advectivo está gobernado por la permeabilidad intrínseca del suelo, la viscosidad del fluido que se mueve a través de los poros y el gradiente de presión del fluido en movimiento. Como en el caso de la difusión, los flujos advectivos se reducen significativamente en suelos húmedos.

Al estudiar la difusión de radón se consideran dos etapas: su emisión hacia los poros del material y su transporte en la fase gaseosa hacia el exterior del material. Ambos procesos, llamados emanación y exhalación, determinan el flujo de radón desde el suelo hasta la atmósfera.

La **emanación** se define como la liberación de átomos de radón en el grano del material después de la desintegración de su precursor inmediato, un isótopo de radio, presente en el material. Sin embargo, no todo el radón producido logra escapar; la mayoría de los átomos de radón producidos permanecen dentro del grano y solo una fracción alcanzará el espacio de los poros del material.

El principal proceso que permite a los átomos de radón escapar de los granos es el retroceso alfa. Cada decaimiento radioactivo de radio da lugar a una partícula alfa de gran velocidad y un átomo de radón que retrocede en dirección opuesta a la partícula alfa

debido a la conservación del momentum, y cada una de ellas con una energía inversamente proporcional con su masa; esto es, la energía de la partícula alfa será 10^4 – 10^5 veces más grande que la de los átomos de radón (86–103 keV) (Hassan, et al., 2009)

El rango de retroceso de un átomo de ^{222}Rn después de la desintegración del ^{226}Ra es de 30 a 50 nm para sólidos, 95 nm en agua y 64 μm en aire (Greeman & Rose, 1996; Tanner, 1980). Por lo tanto, el radón generado puede quedar atrapado entre los poros, y más aún si este contiene agua debido al rango de retroceso del átomo de radón en agua. A menor tamaño de grano más posibilidad de escape tienen los átomos de radón, aunque el número de átomos de radón que emerge es siempre menor al número de átomos generados puesto pueden ocurrir diferentes trayectorias para el átomo de radón en retroceso (Fig. 1).

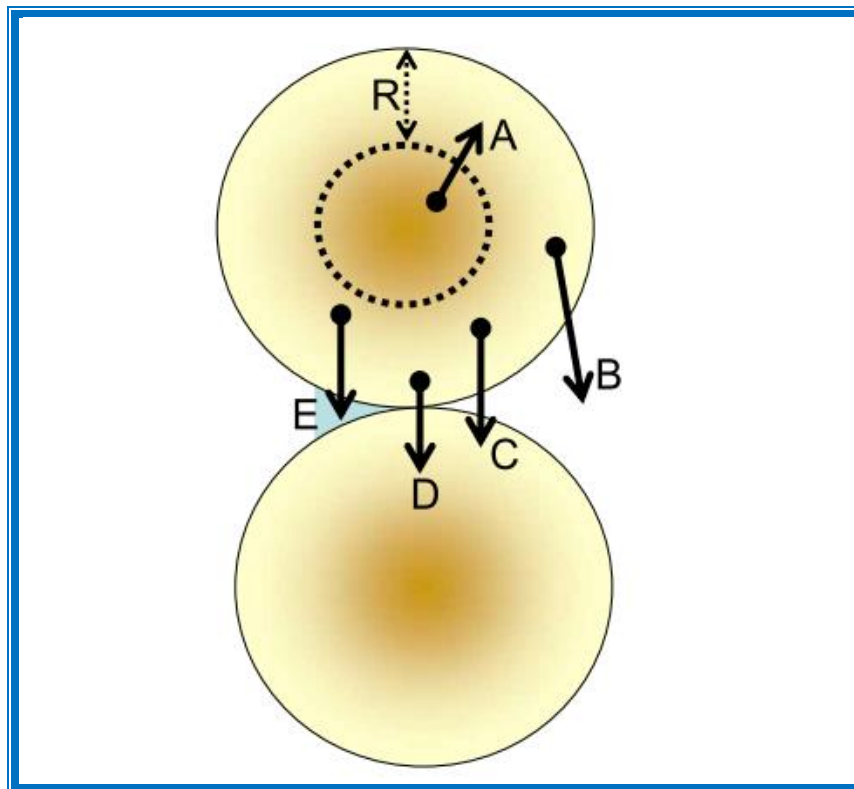


Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de emanación de radón.

En el caso de que el átomo de radio esté localizado a una profundidad mayor al rango R del retroceso del átomo de radón (trayectoria A en Fig. 2), el átomo de radón no alcanzará la superficie del grano y permanecerá incrustado en el grano. En algunos casos los átomos de radón escapan del grano original pero quedarán atrapados en granos adyacentes (trayectoria D en Fig. 2); o bien alcanzarán el aire intersticial pero poca energía será absorbida en el aire, alcanzando un grano adyacente (trayectoria C en Fig. 2). Si existe agua entre los poros del material, la energía residual del retroceso puede ser absorbida por ella y los átomos de radón permanecen disueltos en el agua libres para transportarse a través de los poros (trayectoria E en Fig. 2). La fracción de átomos de radón que alcanzan el espacio intersticial en relación al total de átomos generados, se conoce como “**poder de emanación**” o “**coeficiente de emanación**”. Esta proporción de átomos de radón libres se incrementa con el contenido de agua en el material hasta un valor máximo mientras que un aumento del tamaño de grano disminuye su valor (Markkanen & Arvela, 1992).

Sakoda y colaboradores (Sakoda, et al., 2011) compilaron una gran cantidad de coeficientes de emanación de radón para varias matrices. Los valores representativos que encontraron fueron de 0.03, 0.13, 0.20, 0.17 y 0.03 para minerales, rocas, suelos, jales de uranio y cenizas, respectivamente.

La emanación de radón es dependiente de la humedad del suelo. A bajo contenido de humedad el coeficiente de emanación se incrementa pero al aumentar la humedad eventualmente se reduce la emanación. Esta reducción se atribuye a una disminución en la difusión del radón atrapado en el agua intersticial. Markkanen (Markkanen & Arvela, 1992) y colaboradores encontraron que el efecto del contenido de agua sobre la emanación de radón también es dependiente del tamaño de grano. En un rango de 10 a 15 % de contenido de agua la emanación de radón es máxima mientras se incrementa el tamaño de grano. Generalmente la emanación es muy baja para materiales secos y gradualmente aumenta hasta registrarse una meseta en sus valores cuando la humedad

se incrementa. A un nivel más alto de humedad, la movilidad del gas se reduce porque el agua de los poros captura el radón. Así, en climas fríos y húmedos, la concentración de radón será más elevada en verano que en invierno, mientras que en zonas de clima seco la concentración en invierno será mayor.

El transporte por fluidos es el mecanismo más importante de desplazamiento para el radón. Este mecanismo depende de las propiedades del fluido (gradientes de presión, estado físico) y de las características geológicas del subsuelo (litología, fallas). Este mecanismo le permite al radón desplazarse varios cientos de metros en el subsuelo lo que explica las concentraciones anormales de radón sobre fallas o fracturas geológicas en subsuelos con actividad geotérmica.

El radón cercano al límite de la superficie del suelo se difundirá hacia la atmósfera inmediata. Este proceso se le conoce como **exhalación** y la tasa de exhalación de un suelo es dependiente de la temperatura, de la velocidad del viento y de la presión atmosférica. La tasa de exhalación se define como actividad de radón por unidad de superficie por unidad de tiempo ($\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$). La tasa de exhalación E se puede calcular con la ley de Fick en la interfaz suelo-aire:

$$E = D \left. \frac{\partial C_s}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (1.1)$$

donde D es el coeficiente de difusión de radón en el material (m^2/s); C_s es la concentración, en actividad, de radón en los poros del suelo (Bq/m^3); z es la coordenada de difusión de radón, con $z = 0$ para la interfaz suelo-atmosfera.

Los factores a considerar en el estudio del flujo de radón del suelo al aire libre del ambiente son: 1) concentración de radio en el suelo; 2) capacidad de emanación del suelo; 3) porosidad del suelo; 4) humedad y temperatura del suelo; 5) profundidad; y 6) factores meteorológicos como precipitación y presión atmosférica. Finalmente, la dispersión de

radón depende de la estabilidad atmosférica, incluyendo gradientes verticales de temperatura y dirección de la fuerza del viento, así como de la turbulencia.

1.6. Descripción matemática del transporte de radón en suelo y exhalación

El análisis del transporte de radón dentro del material que lo general (suelo) y la exhalación que se produce cuando el gas alcanza la interfaz entre el material sólido y la atmósfera inmediata, permite obtener el modelo matemático que asocia las variables del fenómeno con cantidades medibles para calcular la exhalación de radón del material mediante una cámara de acumulación.

1.6.1. Generación y transporte de radón en el suelo

En esta sección se derivará una ecuación que describe la concentración en actividad de radón en los espacios intersticiales del suelo, respecto a la profundidad del suelo. Se asume que el suelo es uniforme y que la variación de la concentración de radón es en una dimensión, con el eje z a partir de la superficie del suelo e incrementándose con la profundidad (Fig. 3).

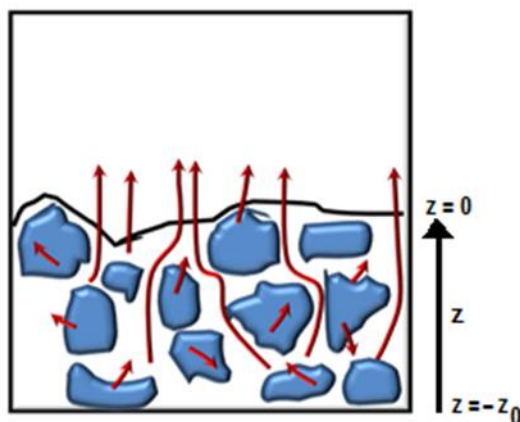


Figura 3. Condiciones geométricas para el transporte de radón

La ecuación que describe la variación espacial y temporal de la concentración de radón en el suelo toma en cuenta la generación de radón, su rapidez de decaimiento, el transporte por difusión y por convección (advectivo).

Si $C_s(z,t)$ es la concentración de radón (Bq/m^3) en el espacio intersticial de los granos del suelo para una posición z de la coordenada de desplazamiento o difusión principal de radón en un tiempo particular, entonces la variación de la concentración de radón en el suelo se describe con una ecuación diferencial que incluye cuatro procesos básicos: generación de radón, decaimiento, difusión y convección:

$$\frac{\partial C_s(z,t)}{\partial t} = \left[\begin{array}{c} \text{Rn que alcanza} \\ \text{los poros} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Decaimiento} \\ \text{de Rn en los poros} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Difusión} \\ \text{de Rn en los poros} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Advección} \\ \text{de Rn} \end{array} \right] \quad (1.2)$$

El radón se produce por el decaimiento del radio que contiene, pero solo una fracción del radón total producido escapa hacia los poros intersticiales. Esta fracción se llama **Coficiente de Emanación** o **Factor de Emanación** y se define de la siguiente forma:

$$f = \frac{C_{Ra,eff}}{C_{Ra}} \equiv \frac{C_{Rn,poros}}{C_{Ra}} \quad (1.3)$$

donde $C_{Ra,eff}$ es la concentración de *Radio efectivo* (Bq/kg) que se refiere a la fracción del radio total de la muestra que produce al radón alcanza el espacio de los poros; C_{Ra} es la concentración de Radio total en el suelo (Bq/kg).

La ecuación de transporte de radón es (López-Coto, et al., 2009; Cosma, et al., 2001; Shafiq-Rehman, et al., 2006):

$$\frac{\partial C_s(z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda \rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} - \lambda C_s(z,t) + \frac{D_b}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C_s(z,t)}{\partial z^2} + \frac{\kappa \nabla P \cdot \nabla C_s(z,t)}{\mu \varepsilon} \quad (1.4)$$

donde λ es constante de decaimiento del radón, s^{-1} ; ρ_s la densidad gruesa del suelo, (kg/m^3); f es el factor de emanación del suelo; ε la porosidad del suelo; D_b el coeficiente de difusión del radón en el material (m^2/s); κ la permeabilidad intrínseca del suelo (m^2); μ la viscosidad dinámica del aire (Pa); y P la presión dentro del material (Pa).

Para resolver la ecuación diferencial parcial (1.4) se considera: a) humedad despreciable; b) distribución de presión homogénea (el campo de presiones es constante) y, por tanto, el último término del segundo miembro de la ecuación se anula; c) la adsorción de radón a superficies sólidas es despreciable; y d) la exhalación solamente ocurre en la interfaz suelo-aire ($z = 0$).

Considerando lo dicho en el inciso (b), la ecuación de transporte se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C_s(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{Rn} \rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} - \lambda_{Rn} C_s(z, t) + \frac{D_b}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C_s(z, t)}{\partial z^2} \quad (1.5)$$

Para resolver la ecuación (1.5) se tienen en cuenta las siguientes condiciones límite:

$$C_s(0, t) = C_a(t) \quad (1.6a)$$

$$\left. \frac{\partial C_s}{\partial z} \right|_{z=-z_0} = 0 \quad (1.6b)$$

$$C_s(0, 0) = 0 \quad (1.6c)$$

donde $C_a(t)$ es la concentración de radón sobre la interfaz suelo-aire. Además se supone que la concentración de radón en el aire de los poros evoluciona en una sucesión de estados estacionarios. Esto significa que en algún punto del procedimiento de solución de la ecuación diferencial parcial (1.4) se debe considerar que la concentración de radón en los poros es independiente del tiempo.

La solución a (1.5) es (López-Coto, et al., 2009):

$$C_s(z, t) = \left(C_a(t) - \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \right) \cosh\left(\frac{z}{l_o}\right) + \left(C_a(t) - \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \right) \tanh\left(\frac{z_o}{l_o}\right) \cdot \sinh\left(\frac{z}{l_o}\right) + \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

donde

$$l_o = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \quad (1.8)$$

$$D_e = \frac{D_b}{\varepsilon} \quad (1.9)$$

Al parámetro l_o se le denomina “longitud de difusión”. En materiales porosos l_o está en el rango de 0.25 – 0.30 m (López-Coto, et al., 2009). Según Shafi-ur-Rehman *et al.* (2006) la “longitud de difusión” de radón en suelo poroso seco es de 1.55 m.

En el caso particular cuando $z_o \ll l_o$, se puede considerar que

$$\tanh\left(\frac{z_o}{l_o}\right) \sim \frac{z_o}{l_o}, \quad z_o \ll l_o$$

Así, la ecuación (1.7) se puede escribir como

$$C_s(z) = \left(C_a(t) - \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \right) \cdot \cosh\left(\frac{z}{l_o}\right) + \left(C_a(t) - \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \right) \left(\frac{z_o}{l_o}\right) \cdot \sinh\left(\frac{z}{l_o}\right) + \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \quad (1.10)$$

1.6.2. Exhalación de radón

La tasa exhalación de radón, definida como el flujo de radón que cruza la interfaz suelo-aire ($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$), se da desde la superficie del suelo donde en $z=0$. De acuerdo a la ecuación (1.1):

$$E = -D_b \left. \frac{\partial C_s}{\partial z} \right|_{z=0}$$

Entonces, si derivamos (1.10) la tasa de exhalación es:

$$E = -D_b \left. \frac{\partial C_s}{\partial z} \right|_{z=0} = -D_b \left(C_a(t) - \frac{\rho_s f C_{Ra}}{\varepsilon} \right) \left(\frac{z_o}{l_o^2} \right) = \frac{D_b \rho_s f C_{Ra} z_o}{\varepsilon l_o^2} - \frac{D_b z_o}{l_o^2} C_a(t) \quad (1.11)$$

Considerando las definiciones (1.8) y (1.9), la exhalación se reduce a la siguiente expresión:

$$E(t) = f \rho_s \lambda C_{Ra} z_o - \varepsilon \lambda z_o C_a(t) \quad (1.12)$$

Definiendo E_o como “*exhalación libre*”, y a ω como “*constante de retro-difusión*”

$$E_o = f \rho_s \lambda C_{Ra} z_o \quad (1.14)$$

$$\omega = \varepsilon \lambda z_o \quad (1.15)$$

la tasa de exhalación por unidad de área será:

$$E(t) = E_o - \omega C_a(t) \quad (1.16)$$

La exhalación depende de la concentración de radón presente sobre la interfaz suelo-aire $C_a(t)$; por lo tanto hay una disminución de radón exhalado conforme la concentración de radón aumenta en el espacio de aire. Para cámaras de acumulación, cuando $C_a(t)$ llega a un valor máximo, el radón de la cámara comenzará a difundirse hacia los poros de suelo, a lo que se le denomina “*retro-difusión*”. Así, la concentración de radón en la cámara disminuye por un factor ω . Cuando $t=0$, $E = E_o$, si la concentración de radón inicial en la cámara es cero $C_a(0)=0$.

1.6.3. Acumulación de radón en una cámara de exposición

Cuando el radón exhalado por suelo (o una muestra de material) es acumulado en una cámara, el radón acumulado dependerá de la exhalación y del decaimiento. Matemáticamente, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = [\text{Acumulación por exhalación}] - [\text{Decaimiento del radón}] \quad (1.17)$$

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = \frac{S \cdot E(t)}{V_a} - \lambda C_a(t) \quad (1.18)$$

donde $C_a(t)$ es la concentración de radón en el espacio de aire de la cámara, en Bq/m^3 ; S es la superficie de exhalación, en m^2 ; V_a es el volumen efectivo para la acumulación en la cámara (volumen de aire), en m^3 ; $E(t)$ es la tasa de exhalación, en $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$.

Al sustituir el valor de $E(t)$ dado por la ec. (1.16) se tiene:

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = \frac{S \cdot E_o}{V_a} - \frac{\omega \cdot S}{V_a} C_a(t) - \lambda C_a(t) \quad (1.19)$$

Reescribiendo:

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = \frac{S \cdot E_o}{V_a} - \left(\frac{\omega \cdot S}{V_a} + \lambda \right) C_a(t) \quad (1.20)$$

Que se resuelve con las condiciones a la frontera:

$$\begin{aligned} C_a(t=0) &= 0 \\ C_a(t \rightarrow \infty) &= C_{a,eq} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Resolviendo (1.20) se obtiene

$$\int_0^{C_a(t)} \frac{dC_a(t)}{\frac{E_o \cdot S}{V_a} - \left(\frac{\omega \cdot S}{V_a} + \lambda_a \right) C_a(t)} = \int_0^t dt \quad (1.22)$$

$$-\frac{1}{\left(\frac{\omega \cdot S}{V_a} + \lambda_a\right)} \ln \left[\frac{E_o \cdot S}{V_a} - \left(\frac{\omega \cdot S}{V_a} + \lambda_a \right) C_a(t) \right]_0^{C_a(t)} = t \quad (1.23)$$

Finalmente la concentración de radón en el aire de la cámara de exposición es:

$$C_a(t) = \frac{E_o \cdot S \left(1 - e^{-\left(\frac{\omega \cdot S}{V_a} + \lambda\right)t} \right)}{\omega \cdot S + \lambda V_a} \quad (1.24)$$

Cuando no hay *retro-difusión*, o es despreciable, la concentración de radón en la cámara es:

$$\omega \rightarrow 0 \quad C_{a,s/r}(t) = \frac{E_o \cdot S}{\lambda V_a} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.25)$$

Para un tiempo de exposición muy grande ($t \rightarrow \infty$), la concentración de radón en la cámara es de equilibrio:

$$t \rightarrow \infty \quad C_{a,eq} = \frac{E_o \cdot S}{\omega \cdot S + \lambda V_a} \quad (1.26)$$

y si no hay *retro-difusión*:

$$\begin{matrix} \omega \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty \end{matrix} \quad C_{a,eq,s/r} = \frac{E_o \cdot S}{\lambda V_a} = \frac{f \cdot m_s \cdot C_{Ra}}{V_a} \quad (1.27)$$

donde se ha usado el valor de E_o dado por (1.14). Como el producto $f \cdot C_{Ra}$ es el *Radio efectivo*, entonces la ecuación (1.27) se puede escribir como

$$C_{a,eq,s/r} = \frac{m_s}{V_a} \cdot C_{Ra,eff} \quad (1.28)$$

Otras formas de la concentración de radón en la cámara de exposición, cuando la *retro-difusión* es despreciable, son:

$$C_a(t) = C_{a,eq,s/r} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.29)$$

$$C_a(t) = \frac{m_s}{V_a} \cdot C_{Ra,eff} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.30)$$

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del sitio de estudio

El municipio de Fresnillo, Zacatecas, se encuentra ubicado entre los paralelos 22° 51' y 23° 36' de latitud norte, y entre los meridianos 102° 29' y 103° 32' de longitud oeste; se encuentra a una altitud 2190 msnm. Colinda con los municipios de Sombrerete, Saín Alto, Río Grande, Cañitas de Felipe Pescador, Villa de Cos, Pánuco, Calera, General Enrique Estrada, Jerez y Valparaíso (Fig. 4). Ocupa el 6.7% de la superficie del estado y cuenta con 242 comunidades dispersas en sus 5372 km² de territorio, con una población total de 230 865 habitantes. La ciudad de Fresnillo, cabecera municipal, tiene una población de 213 199 habitantes y del 2005 al 2010, ha crecido un 9% en habitantes y un 10% en vivienda (INEGI, 2015).

La temperatura promedio anual es de 16.8 °C, con una precipitación media anual de 407.5mm. El clima es semiseco templado con lluvias en verano (91.6%), templado subhúmedo con lluvia en verano, de menor humedad (8.3%) y seco templado con lluvias en verano (0.1%).

El municipio de Fresnillo es el de mayor importancia económica y el de mayor población en el estado. Entre sus actividades económicas más importantes destacan el comercio, la minería (con una importante producción de plata a nivel mundial) y la industria (se cuenta con un parque industrial en desarrollo). La agricultura, la ganadería y el turismo religiosos son también actividades importantes en el municipio.

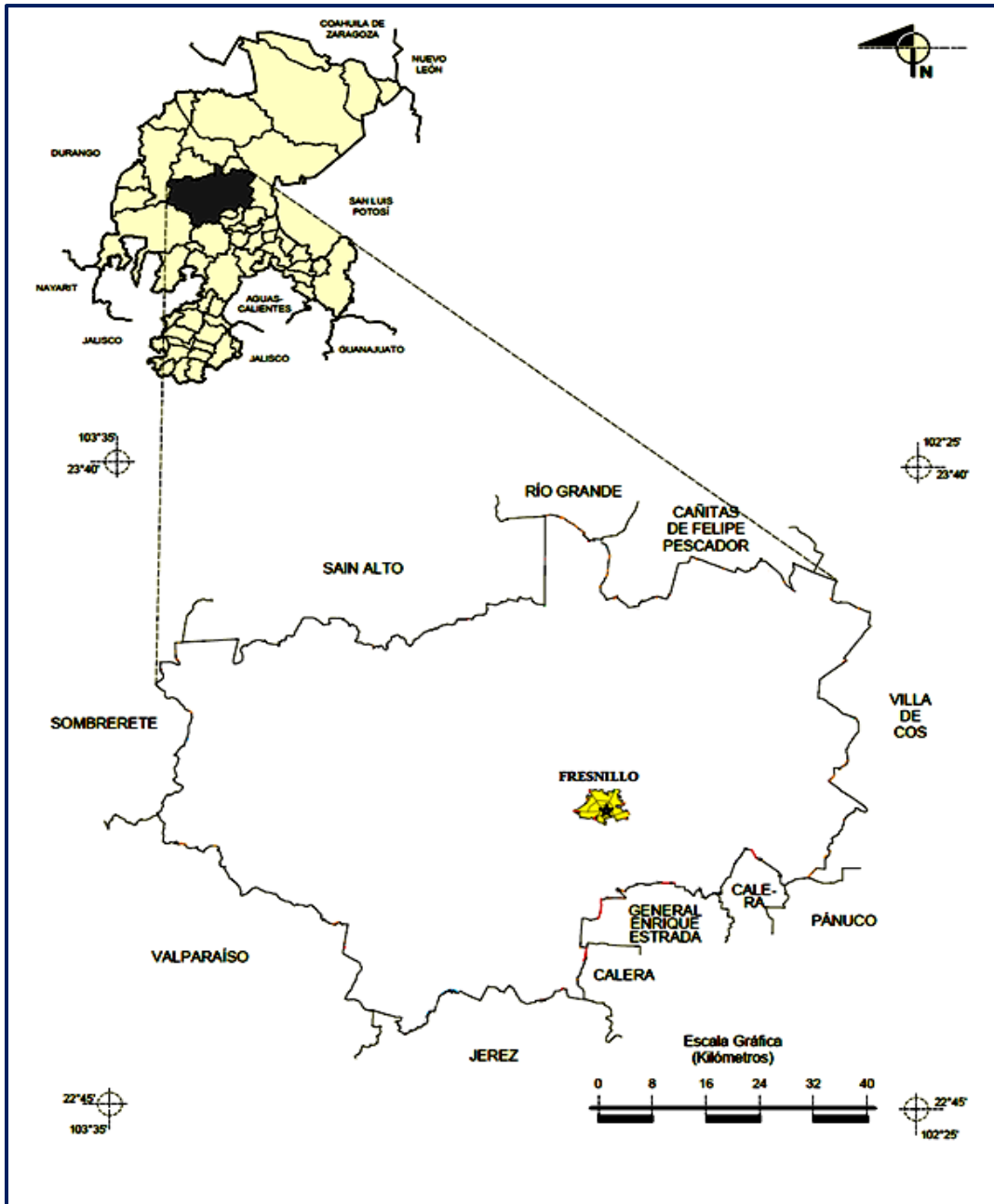


Figura 4. Localización del municipio de Fresnillo, Zacatecas

La presente investigación se efectuó en la ciudad de Fresnillo, con un área aproximada de 38 km². En la Figura 5 se muestra un mapa satelital de la ciudad.



Figura 5. Área de estudio

2.2. Características geológicas del sitio de estudio

En el área de estudio predominan los suelos del tipo xerosol, litosol y rendzina (Fig. 6). Las características de cada tipo de suelo se describen en la Tabla 5.

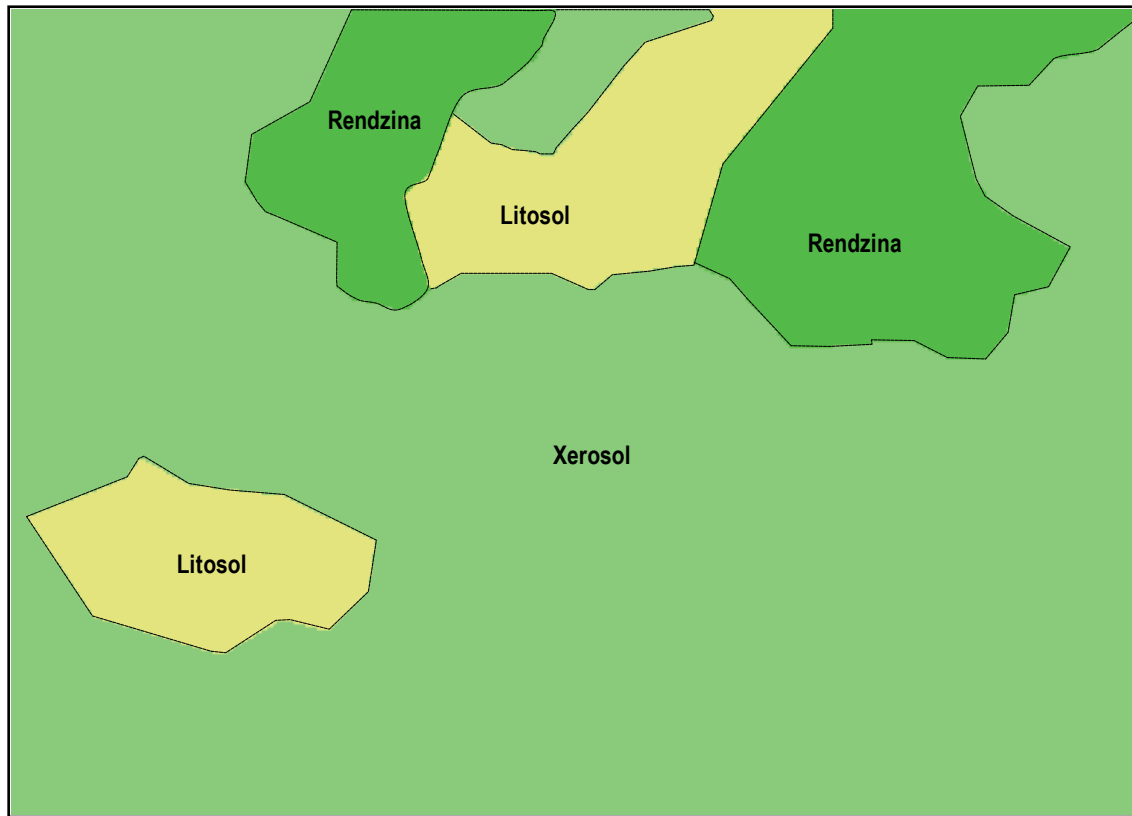

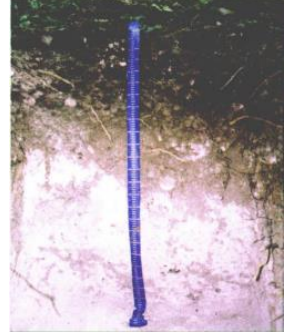



Figura 6. Suelos predominantes en la ciudad de Fresnillo.

Tabla 5. Características de los suelos predominantes en la ciudad de Fresnillo

Suelo	Características	Imagen
<p>Xerosol</p>	<p>Del griego <i>xeros</i>: seco. Es un suelo seco que abunda en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Presenta una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, semejante a la capa superficial. En ocasiones presentan, a cierta profundidad, manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Es el tercer tipo de suelo más importante por su extensión en el país (9.5%). Su símbolo es (X)</p>	
<p>Rendzina</p>	<p>Del polaco <i>rzedzic</i>: ruido. Suelos someros, pedregoso que se presentan en climas semiáridos, tropicales o templados. Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente las rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos (menores a 25 cm) pero llegan a soportar vegetación de selva. Son moderadamente susceptibles a la erosión y su símbolo es (E).</p>	
<p>Litosol</p>	<p>Del griego <i>lithos</i>: piedra. Literalmente, suelos de piedra. Son suelos muy delgados (menor a 10 cm), limitados por la presencia de roca, tepetate o caliche. Se encuentran en todos los climas (secos, templados, húmedos) y son comunes en las zonas montañosas y regiones altamente erosionadas. Su símbolo es (I).</p>	

La geología del sitio está conformada por rocas sedimentarias (arenisca-lutita, conglomerado polimíctico, caliza-lutita, grava-limo) y roca ígneas (riolita, basalto y pórfido monzónico) (Fig. 7). Las características de la litología se describen en la Tabla 6.

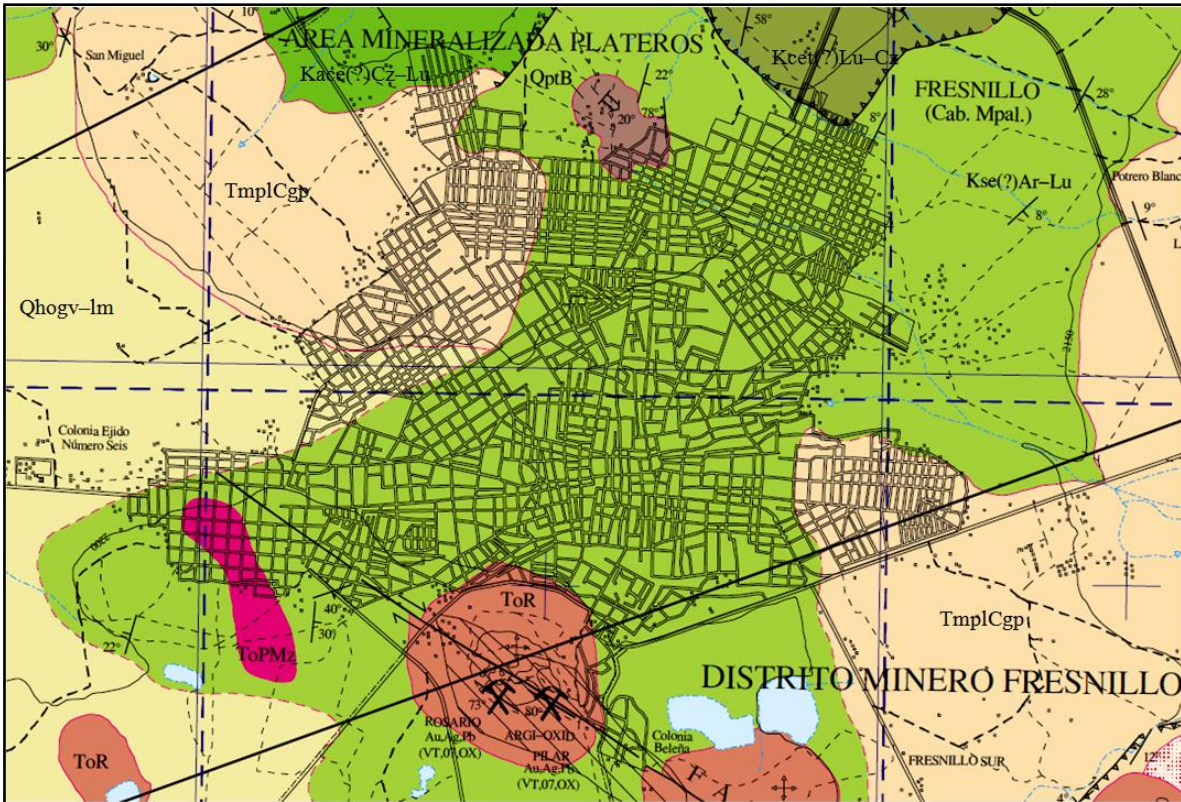


Figura 7. Litología en la ciudad de Fresnillo (SGM, 2006)

(**Kse(?)Ar-Lu**: Arenisca–Lutita; **Kace(?)Cz-Lu**: Caliza–Lutita; **Kcet(?)Lu-Cz**: Lutita–Caliza; **QptB**: Basalto; **ToR**: Riolita; **ToPMz**: Pórfido Monzónico; **TmplCgp**: Conglomerado Polimíctico; **Qhogv-lm**: Grava–Limo)

Al sur del área de estudio, y a lo largo del arroyo Chilitos, se localiza la unidad geológica más antigua denominada Formación Chilitos. Los afloramientos de esta secuencia vulcanosedimentaria constan litológicamente de andesitas y aglomerados andesíticos intercalados con limonita, arenisca, lentes de margas, caliza y lutita (SGM, 2006). En contacto con esta secuencia están rocas sedimentarias de la Formación Cuesta del Cura (**Kace(?)Cz-Lu**) que consiste de una secuencia calcáreo-pelítica, cuya edad abarca del Albiano (Cretácico inferior) al Cenomaniano (Cretácico superior), y la Formación Indidura

(Kcet(?)Lu-Cz) constituida por una secuencia pelítica-calcareá cuya edad corresponde al Cenomaniano-Turoniano (Cretácico superior). Ambas unidades se encuentran en contacto tectónico con la Formación Caracol (Kse(?)Ar-Lu) que tiene una edad del Coniaciano-Maastrichtiano (Cretácico superior) (SGM, 2006).

Durante el Oligoceno se presenta una intrusión de dos cuerpos de rocas ígneas intrusivas, el primero de composición granodiorítica representado por roca pórfido granodiorítico (ToPGd), mientras que el segundo corresponde a un cuerpo de composición monzonítica representado por pórfido monzonítico (ToPMz) (SGM, 2006).

En el Oligoceno medio a tardío se presentó una serie de cambios en el ángulo de incidencias entre las placas Farallón y de Norteamérica, originando un arco magmático continental que producirá el edificio volcánico de la Sierra Madre Occidental, lo que provocó el afloramiento de tobas riolíticas e ignimbritas (ToRTR-Ig), con algunas intercalaciones de basalto (ToB). Afectando a éstas rocas se presentan domos de composición riolítica (ToR) (SGM, 2006).

Un conglomerado polimíctico se depositó a finales del Mioceno y durante el Plioceno, constituido principalmente por fragmentos volcánicos y en menor medida por fragmentos de caliza y arenisca (Formación Santa Inés, TmplCgp). La reactivación de muchas fallas antiguas durante el Pleistoceno se asocia con la erupción de basaltos alcalinos (QptB) y los depósitos continentales cuaternarios se presentan en forma de coluviones de grava y limo (Qhogv-lm) (SGM, 2006).

Las rocas ígneas, también llamadas magmáticas, son aquellas que se forman por la solidificación de la roca fundida denominada magma, que es una mezcla de diferentes minerales y elementos. Cuando el magma fluye hacia la superficie terrestre, la disminución de la temperatura enfría la roca líquida hasta solidificarla; el resultado es la formación de las **rocas ígneas**. Este tipo de rocas también son formadas por la acumulación y consolidación de lava, que es magma expulsado por los volcanes. Cuando la

solidificación del magma se produce en el seno de la litósfera (interior de la corteza terrestre), la roca resultante se denomina **plutónica** o **intrusiva**; cuando el enfriamiento se produce, al menos en parte, en la superficie o a escasa profundidad, la roca resultante se denomina **volcánica** o **extrusiva**. Las rocas intrusivas están formadas por cristales de gran tamaño debido al lento enfriamiento del magma que permite un mejor desarrollo de los cristales. Generalmente abarcan grandes extensiones de terreno y llegan a la superficie terrestre mediante procesos orogénicos (deformaciones tectónicas) o mediante procesos externos de erosión; la roca intrusiva más frecuente es el granito. Por su parte, las rocas extrusivas se forman por el rápido enfriamiento de lava al llegar a la atmósfera, acelerando la cristalización y produciendo pequeños cristales que forman rocas de grano fino. Son ejemplo de rocas ígneas extrusivas la obsidiana y el basalto.





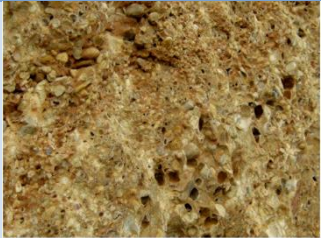

El magma se puede clasificar de acuerdo a su contenido de sílice como magma básico o basáltico y magma ácido o granítico. El primero está constituido por silicatos fundidos, con un porcentaje de sílice que oscila entre 45 y 52 % y el contenido de sustancias volátiles es escaso. Toda la corteza oceánica está constituida por basalto, pero también se ha derramado en vastas extensiones continentales. El magma granítico contiene más del 66 % de sílice y una proporción relativamente elevada de sustancias volátiles. Se origina en las suturas de subducción por fusión parcial de rocas sedimentarias.



Las rocas sedimentarias se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución, o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras. Los sedimentos son depositados, una capa sobre la otra, en la superficie de la litósfera a temperaturas y presiones relativamente bajas y pueden estar integrados por fragmentos de roca preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de reacciones químicas o de evaporación. Tienen gran importancia en la formación de suelos ya que son las de mayor superficie. Ocupan una extensión inmensa: alrededor del 75% de la superficie terrestre se encuentra cubierta por sedimentos y, considerando una profundidad de 16 km para la corteza

terrestre, los sedimentos corresponden a un 5 % del total. Las rocas sedimentarias comprenden dos grupos: 1) rocas detríticas terrígenas, formadas principalmente por fragmentos de rocas preexistentes y minerales transportados desde su fuente por un fluido (agua o aire) y depositados; 2) rocas formadas por precipitación a partir de una solución, bien por la acción de organismos, como es el caso de muchas calizas, o bien por una precipitación directa, como es el caso de los depósitos salinos.

Las rocas metamórficas resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, o una combinación de ambas, como son la temperatura, la presión y/o la actividad química de los fluidos (agentes del metamorfismo). Estos ajustes, impuestos comúnmente bajo la superficie, transforman la roca original sin que pierda su estado sólido generando una roca metamórfica. La roca generada depende de la composición y textura de la roca original, de los agentes del metamorfismo, así como del tiempo en que la roca original estuvo sometida a los efectos del llamado proceso metamórfico. Por la naturaleza de su origen puede haber una gradación completa entre las rocas metamórficas y las ígneas o sedimentarias de las que se formaron.

Tabla 6. Características de las rocas subyacentes en la ciudad de Fresnillo

Roca	Características	Roca
Arenisca (sandstone)	Roca sedimentaria detrítica constituida por clastos o granos de tamaño de arena (2–0.0625 mm) y una matriz (o cemento) que los engloba. Son de las rocas sedimentarias más comunes en la corteza terrestre. En su mayoría los granos son cuarzo y/o feldespato. Figuran entre las rocas consolidadas más porosas, aunque ciertas cuarcitas sedimentarias pueden tener menos de 1% de espacios vacíos.	
Lutita (shale)	Roca sedimentaria detríticas de granos finos integrada por partículas del tamaño de la arcilla y del limo (<0.0039 mm). Están formadas esencialmente por arcillas que poseen fisilidad y/o laminación muy fina. Constituyen más de la mitad de todas las rocas sedimentarias. Son porosas.	
Basalto	Roca ígnea extrusiva de color oscuro y composición másica rica en silicatos de magnesio y hierro pero baja en sílice (<50%), por lo que se le considera una roca básica. Es una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.	
Caliza	Roca sedimentaria constituida predominantemente por carbonatos de calcio y magnesio. Se formaron por precipitación de sales de soluciones acuosas, o por reacciones químicas que tienen lugar en la corteza terrestre.	
Conglomerado polimíctico	Roca sedimentaria constituida por clastos de rocas de gran tamaño (>2 mm) y diversos materiales englobados por una matriz arenosa o arcillosa y con un cemento de grano fino que los une (caliza o sílicea).	
Grava-limo	Rocas sedimentarias detríticas. Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas con diámetro superior a 2 mm. Los limos son fragmentos que presentan un diámetro comprendido entre 0.004 y 0.063 mm; si se encuentran cementados se denomina limolita.	

Pórfido monzonítico	Roca ígnea intrusiva de grano grueso definida en base a su textura. La textura porfídica se caracteriza por fenocristales relativamente grandes situados en una masa básica de grano más fino o de vidrio. A menudo los fenocristales son redondeados con respecto a sus aristas o corroídos con bordes redondeados o arqueados	
Riolita	Roca ígnea extrusiva de color gris a rojizo, con una textura de granos finos. Se le considera el equivalente volcánico del granito. Esencialmente está formada por feldespato alcalino y cuarzo. Esta roca intrusiva se origina a partir del magma de la misma estructura química que el granito cuando este llega a la superficie terrestre.	

2.2. Materiales

2.2.1. Sistema de centelleo líquido

La detección y medición del radón y sus descendientes radiactivos se efectuó mediante un equipo de centelleo líquido Wallac-Oy 1411-001, el cual opera en coincidencia de los tubos fotomultiplicadores. La cámara de conteo que aloja a los viales está rodeado por un blindaje de 48 mm de espesor con 99.9% en composición de plomo. El equipo tiene la opción de efectuar un análisis de pulsos para discriminar aquellos generados por radiación alfa de aquellos producidos por partículas beta. Con esta característica el contador es capaz de medir simultáneamente emisores alfa y emisores beta.

Se utilizó el líquido de centelleo lento miscible en agua (50%) OptiPhaseHiSafe 3 de Wallac, que usa como solvente el derivado de naftaleno DIN (diisopropilnaftaleno, >60%) capaz de aceptar una amplia gama de solutos. El centellador responde adecuadamente a la separación de forma de pulsos para conteo alfa/beta y, de acuerdo al fabricante es biodegradable, no tóxico, con una presión de vapor muy pequeña, sin olor, resistente al

apagamiento químico, y no penetra a través de las paredes de viales de polietileno. Los contenedores para la mezcla centellante fueron viales de polietileno de 20 mL.

2.3. Métodos

2.3.1. Muestreo y preparación de la cámara de acumulación

Se aplicó el método aleatorio simple (De Vivo, et al., 2008) para la selección de los puntos a medir, considerando la disponibilidad de suelo no modificado por la actividad humana.

En cada punto seleccionado, se excavaron hoyos de 20–30 cm de profundidad, donde se colocaron viales abiertos con la mezcla centellante (Fig. 8). Los viales fueron cubiertos con un recipiente de plástico de volumen conocido que actúa como cámara de acumulación; los viales fueron expuestos al radón exhalado por el suelo durante 2 días. Para reducir la exposición directa de la cámara a los rayos solares y evitar la sustracción del vial, o la perturbación del sistema de acumulación, la perforación se cubrió adecuadamente. En cada punto seleccionado se efectuaron mediciones por duplicado.



Figura 8. Colocación *in situ* del vial abierto y cámara de exposición para acumular radón

2.3.2. Método del vial abierto

El método del vial abierto se basa en la exposición de un vial con líquido de centelleo a una atmósfera con radón. Debido a la alta solubilidad del radón en algunos líquidos orgánicos, durante la exposición una fracción del gas radón se disolverá en el líquido de centelleo. En esta investigación se empleó una mezcla de 12 ml de líquido de centelleo Optiphase Hisafe 3 (PerkinElmer) y 8 mL de agua desionizada. Según el trabajo realizado por Calderón-Espinoza (Calderón-Espinoza, 2011), a estas condiciones la mezcla disuelve el 2.0 ± 0.3 % del radón acumulado en una cámara de exposición para tiempos de acumulación de hasta 15 días.

2.3.3. Detección y medición de radón

Después del periodo de exposición, los viales sellados se trasladaron al laboratorio de medición donde fueron analizados durante 6 h en el contador de centelleo líquido, a un valor de PSA de 49 (Dávila et. Al, 2002). Como la resolución del equipo de centelleo líquido es muy pobre, y debido a que simultáneamente se detectan las radiaciones alfa del ^{222}Rn y sus descendientes ^{218}Po y ^{214}Po , la cuantificación del radón disuelto en los viales expuestos se realizó de forma indirecta midiendo a su descendiente ^{214}Po . Su partícula alfa de 7.7 MeV de energía produce un pico en el espectro que aparece aislado y sin solapamientos con los producidos por las partículas alfas del ^{222}Rn y ^{218}Po .

La eficiencia de conteo para ^{214}Po se obtuvo midiendo un vial con una mezcla de 12 mL del líquido de centelleo y 8 mL de agua desionizada, al cual se le agregó una actividad conocida de un estándar NIST de ^{226}Ra . El vial se midió después de alcanzar el equilibrio radiactivo entre el ^{226}Ra y sus descendientes. La eficiencia de conteo para ^{214}Po fue 80.22 ± 0.97 %.

2.3.4. Cálculo de la tasa de exhalación de radón

Como se mencionó anteriormente, la actividad del ^{222}Rn disuelto en el vial durante el periodo de exposición se obtuvo a partir de la razón de conteo de su descendiente emisor alfa ^{214}Po . Las actividades de ambos radioisótopos están relacionadas por un factor de decaimiento que depende del tiempo transcurrido a partir de la actividad inicial del padre ^{222}Rn . En la figura 9 observa que aproximadamente en 3 h las actividades del ^{222}Rn y ^{214}Po son prácticamente iguales pero diferentes a la actividad inicial del padre, alcanzando el llamado “equilibrio transitorio”.

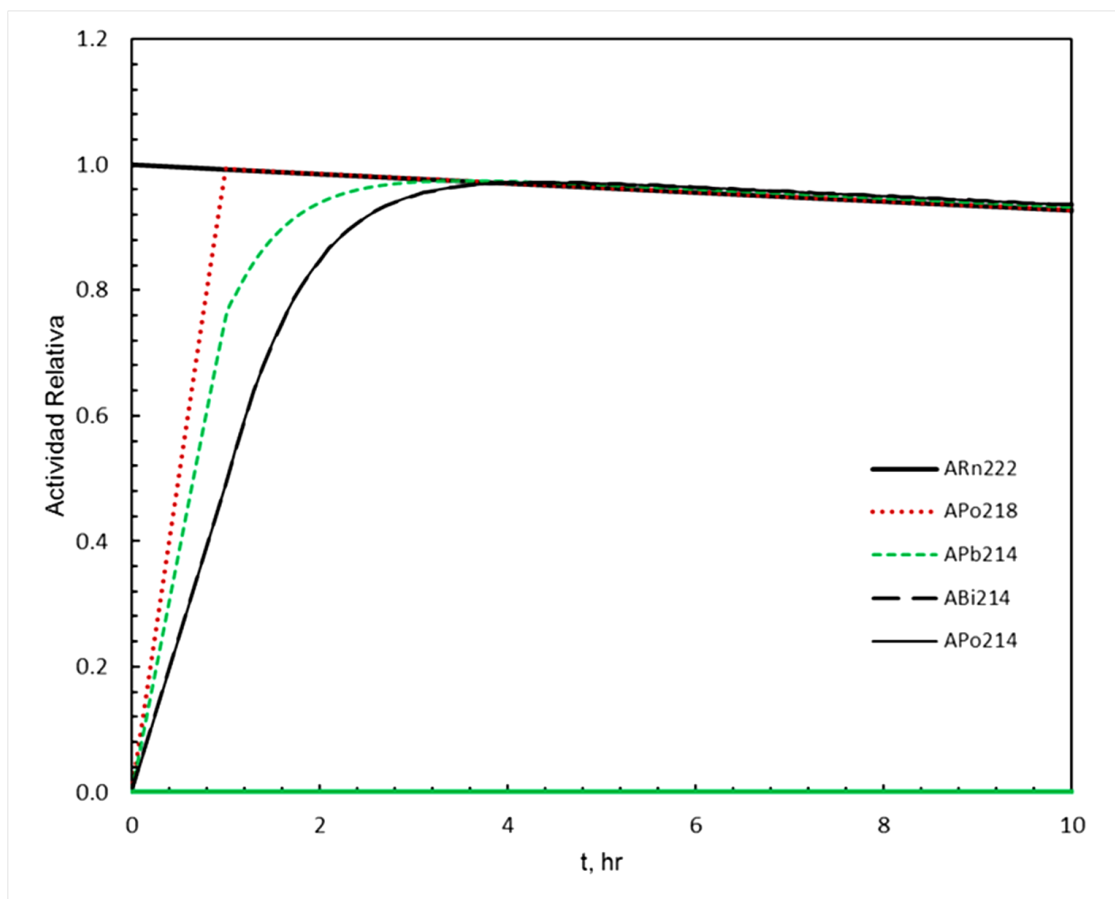


Figura 9. Variación temporal de la actividad del ^{222}Rn y sus descendientes

Por su parte, la actividad del ^{214}Po se calcula mediante con la siguiente expresión:

$$A_{^{214}\text{Po}} = \frac{R_{^{214}\text{Po}}}{60 \cdot \varepsilon_{^{214}\text{Po}}} \quad (1.31)$$

donde $R_{^{214}\text{Po}}$ es la razón de conteo neta (cpm) correspondiente al ^{214}Po , y $\varepsilon_{^{214}\text{Po}}$ es la eficiencia de conteo del ^{214}Po . En todos los casos, la razón de conteo del fondo se obtuvo de la medición del vial expuesto después de transcurridos al menos 7 vidas medias del ^{222}Rn (en 30 días aproximadamente).

Si entre ambos radioisótopos se alcanza el equilibrio transitorio, entonces se tiene que $A_{^{214}\text{Po}} \approx A_{^{222}\text{Rn}}$. Sin embargo, debido al tiempo de retraso que existe entre la extracción del vial y el conteo de la muestra, se debe considerar un factor de corrección por decaimiento (f). Entonces, al término de la exposición la actividad real de radón en el vial se obtiene con la siguiente fórmula:

$$A_{^{222}\text{Rn,vial}} = \frac{A_{^{214}\text{Po}}}{f} \quad (1.32)$$

Según el trabajo realizado por Calderón (2011), a las condiciones del experimento, la mezcla en el vial disuelve solo el 2 % del radón en la cámara de acumulación. Por lo tanto la actividad real en la cámara de acumulación al final de la exposición es:

$$A_{^{222}\text{Rn,acumulado en cámara}} = \frac{A_{^{222}\text{Rn,vial}}}{0.02} \quad (1.33)$$

Inmediatamente después que el suelo ha sido cubierto por la cámara de exposición y considerando que la *retro-difusión* y las fugas de radón son despreciables, la concentración de radón la cámara de acumulación crecerá en función del tiempo según la ecuación (1.25):

$$C_{a,^{222}\text{Rn}}(t) = \frac{E_o \cdot S}{\lambda V_a} (1 - e^{-\lambda t})$$

donde $C_a(t)$ es la concentración de radón en el espacio de aire de la cámara, (Bq/m^3); E_o la exhalación libre ($\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); S es el área de la superficie del suelo cubierta por la cámara de acumulación (m^2); λ la constante de decaimiento del ^{222}Rn (s^{-1}); t el tiempo de acumulación (s), y V_a es el volumen efectivo para la acumulación en la cámara (m^3).

Puesto que el producto entre la concentración de radón en la cámara y el volumen de la misma es igual a la actividad del radón

$$C_{a,^{222}\text{Rn}} \cdot V_a = A_{^{222}\text{Rn}} \quad (1.34)$$

entonces, al despejar la exhalación de la ecuación (1.25) se obtiene la expresión que permite calcular la exhalación del suelo con parámetros conocidos y medidos:

$$E_o = \frac{\lambda A_{^{222}\text{Rn}}(t)}{S(1 - e^{-\lambda t})} \quad (1.35)$$

2.3.5. Límite de detección

El límite de detección se refiere al nivel mínimo de respuesta neta que se espera sea producido por la muestra, considerando un nivel de confianza específico. Es decir, es el umbral de respuesta que indica, con cierta probabilidad, que la radiactividad está presente en la muestra y la señal no es provocada por el fondo. Para una probabilidad de 95 % (Currie, 1968), el límite de detección es:

$$LD = \frac{2.71 + 4.75\sqrt{R_b \cdot t_c}}{t_c} \quad (1.36)$$

donde R_b es la razón de conteo del fondo en la región de interés (cps o cpm) y t_c el tiempo de conteo (s o min).

El LD puede ser reportado como Actividad Mínima Detectable (AMD) que corresponde a la mínima actividad que puede ser detectada por el sistema de medición. Para el caso del radón en el vial abierto, la AMD se refiere al nivel mínimo de actividad de radón en la cámara de exposición que puede ser detectada y distinguida del fondo, a una probabilidad de 95%. Para el cálculo de la AMD (Bq) se considera la fracción de radón absorbido por la mezcla centellante (f_a), el factor de corrección por decaimiento (f) y la eficiencia de conteo de ^{214}Po , lo cual se expresa como sigue:

$$AMD = \frac{2.71 + 4.75 \sqrt{R_b \cdot t_c}}{\epsilon_{222\text{Po}} \cdot f \cdot f_a \cdot t_c} \quad (1.36)$$

La Exhalación Mínima Detectable (EMD) indica la exhalación mínima del radioisótopo que tiene la probabilidad de ser detectada y distinguible del fondo. Se calcula sustituyendo la AMD en la fórmula para el cálculo de la exhalación, considerando el tiempo t de exposición del vial:

$$EMD = \frac{\lambda \cdot AMD}{S(1 - e^{-\lambda t})} \quad (1.37)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se colocaron 40 viales en el área de investigación, de los cuales 31 se recuperaron en forma íntegra. En la Figura 10 se muestra la distribución de los puntos medidos. Debido a la poca disponibilidad de suelo no alterado por la urbanización, la mayoría de los puntos de medición se ubicó en zonas alrededor del centro urbano.

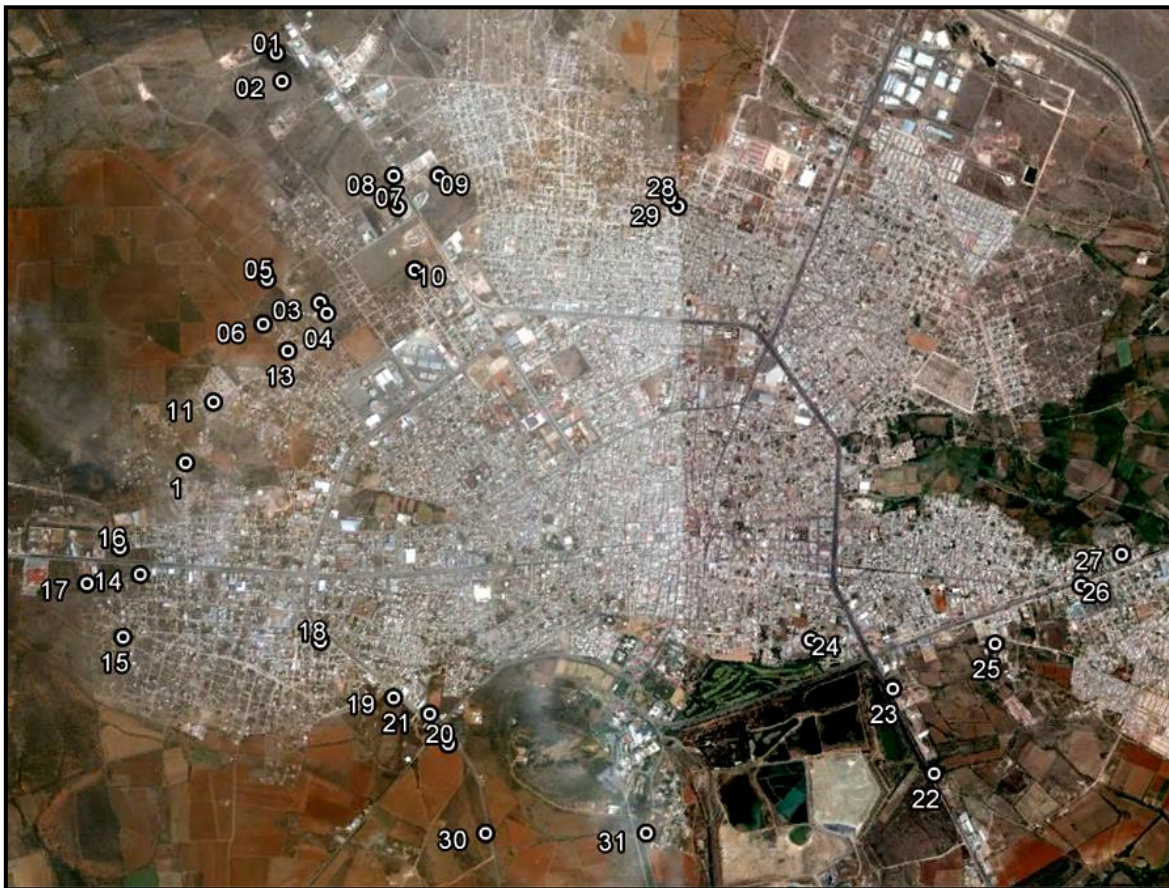


Figura 10. Puntos de medición de la exhalación de radón en la ciudad de Fresnillo

La distribución de puntos de muestreo de acuerdo al tipo de suelo fue la siguiente (Fig. 11): 20 en xerosol, 7 en litosol y 4 en rendzina. Por tipo de roca subyacente (Fig. 12): 15 en conglomerado polimíctico, 9 en arsenica-lutita, 4 en grava-limo, 2 en basalto y 1 en riolita.

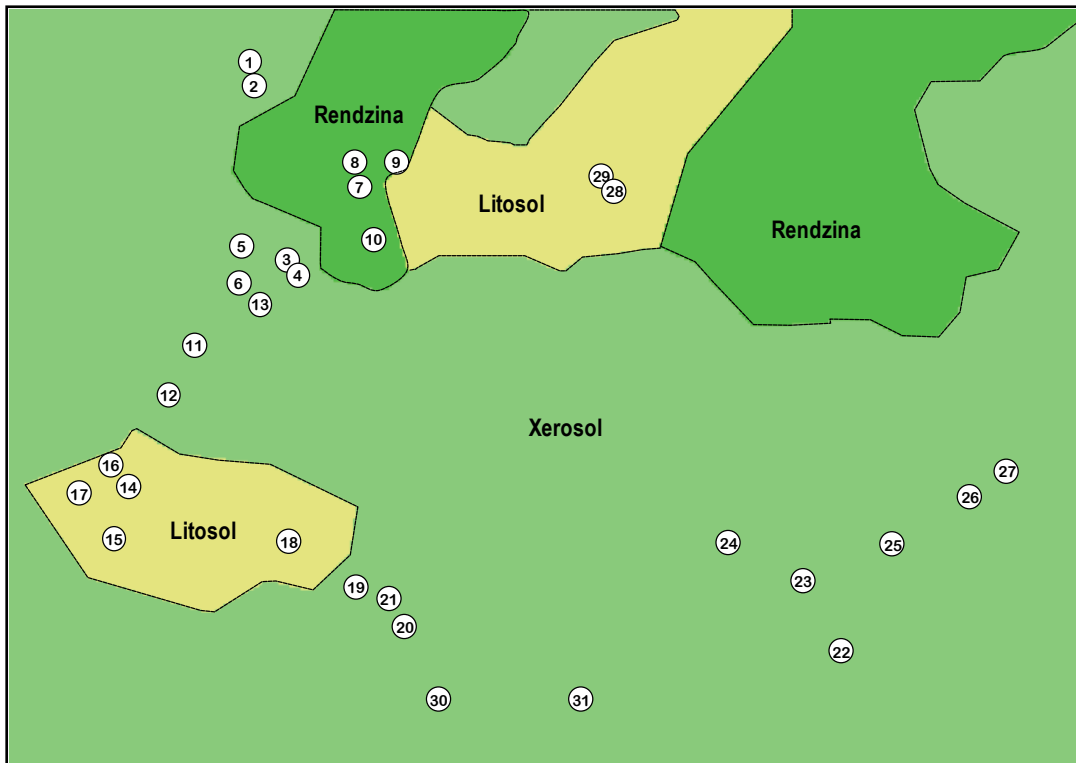


Figura 11. Tipo de suelo en los puntos de medición

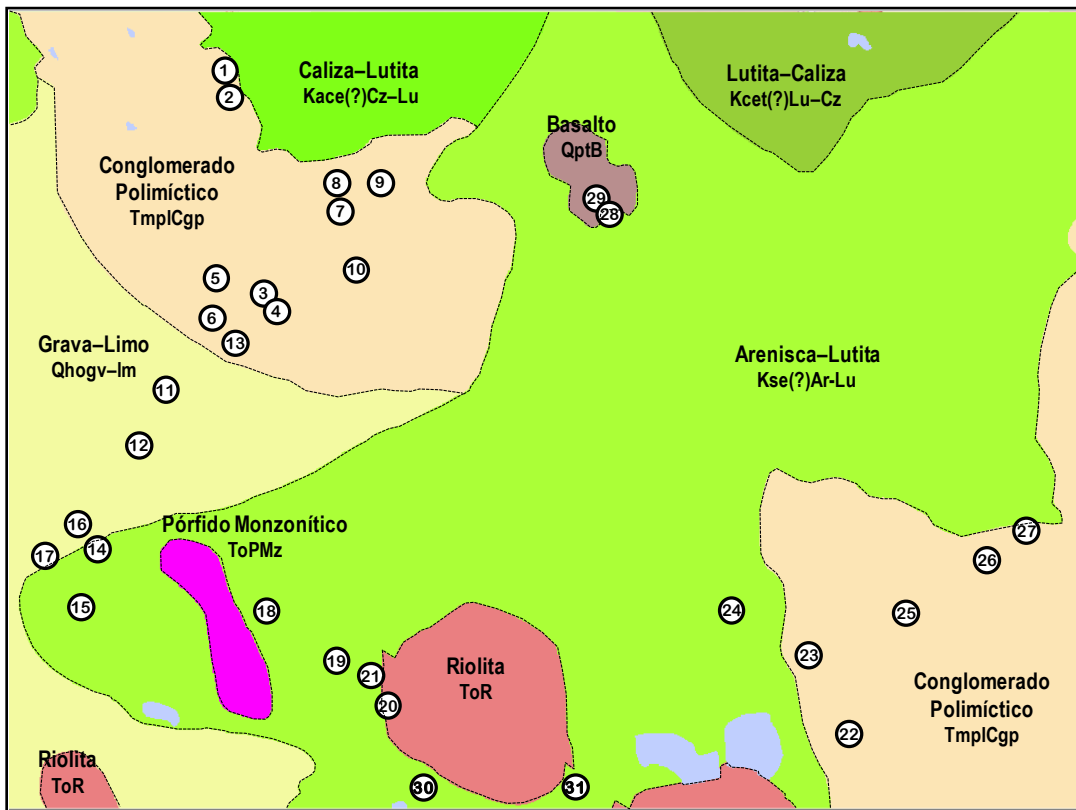


Figura 12. Tipo de roca en los puntos de medición

Los valores de la exhalación de radón y la exhalación mínima detectable para cada medición se presentan en la Tabla 7. El promedio de la exhalación por unidad de suelo y tipo de roca se muestra en las Tablas 8 y 9; la Tabla 10 contiene los valores promedio de exhalación para cada unidad de suelo y roca subyacente.

Tabla 7. Exhalación de radón y características geológicas del punto de muestreo

Punto	Coordenadas Geográficas	Suelo	Litología	E Bq/m ² ·h	EMD Bq/m ² ·h
1	23°12'17"N 102°53'46"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	3.71 ± 0.71	1.61
2	23°12'11"N 102°53'45"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	-	1.57
3	23°11'21"N 102°53'36"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	6.41 ± 0.76	1.64
4	23°11'19"N 102°53'34"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	9.21 ± 0.82	1.73
5	23°11'27"N 102°53'49"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	2.30 ± 0.57	1.31
6	23°11'17"N 102°53'50"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	11.67 ± 0.83	1.64
7	23°11'43"N 102°53'17"O	Rendzina	Conglomerado Polimíctico	-	1.70
8	20°11'50"N 102°53'18"O	Rendzina	Arenisca-Lutita	3.50 ± 0.61	1.37
9	23°11'50"N 102°53'07"O	Rendzina	Conglomerado Polimíctico	14.42 ± 0.82	1.55
10	23°11'29"N 102°53'13"O	Rendzina	Conglomerado Polimíctico	-	1.67
11	23°11'59"N 102°54'02"O	Xerosol	Grava-Limo	3.00 ± 0.65	1.50
12	23°10'46"N 102°54'09"O	Xerosol	Grava-Limo	-	2.24
13	23°11'11"N 102°53'44"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	10.54 ± 0.79	1.59
14	23°10'21"N 102°54'20"O	Litosol	Arenisca-Lutita	3.61 ± 0.74	1.69
15	23°10'07"N 102°54'24"O	Litosol	Arenisca-Lutita	3.47 ± 0.61	1.38
16	23°10'27"N 102°54'25"O	Litosol	Grava-Limo	-	1.51

Punto	Coordenadas Geográficas	Suelo	Litología	E Bq/m ² ·h	EMD Bq/m ² ·h
17	23°10'19"N 102°54'33"O	Litosol	Grava-Limo	5.52 ± 0.80	1.79
18	23°10'06"N 102°53'36"O	Litosol	Arenisca-Lutita	-	1.28
19	23°09'53"N 102°53'18"O	Xerosol	Arenisca-Lutita	1.37 ± 0.44	1.02
20	23°09'43"N 102°53'05"O	Xerosol	Riolita	5.90 ± 0.54	1.07
21	23°09'49"N 102°53'09"O	Xerosol	Arenisca-Lutita	6.69 ± 0.58	1.14
22	23°09'36"N 102°51'07"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	5.44 ± 0.80	1.79
23	23°09'55"N 102°51'17"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	1.65 ± 0.57	1.32
24	23°10'06"N 102°51'37"O	Xerosol	Arenisca-Lutita	6.22 ± 0.62	1.26
25	23°10'05"N 102°50'52"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	-	1.39
26	23°10'18"N 102°50'31"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	1.52 ± 0.52	1.20
27	23°10'25"N 102°50'21"O	Xerosol	Conglomerado Polimíctico	-	1.50
28	23°11'45"N 102°52'11"O	Litosol	Basalto	-	1.31
29	23°11'43"N 102°52'09"O	Litosol	Basalto	-	1.24
30	23°09'23"N 102°52'56"O	Xerosol	Arenisca-Lutita	-	1.59
31	23°09'23"N 102°52'17"O	Xerosol	Arenisca-Lutita	4.75 ± 0.64	1.39

Tabla 8. Rango y promedio de la exhalación de radón por unidad de suelo

Suelo	E, Bq/m ² ·h	
	min – max	promedio
Litosol	< 3.47 - 5.52	4.20 (7)
Rendzina	< 3.50 - 14.42	8.96 (4)
Xerosol	< 1.37 - 11.67	5.11 (20)

* Número de muestras entre paréntesis

Tabla 9. Rango y promedio de la exhalación de radón por tipo de roca

Roca	E, Bq/m ² ·h	
	min – max	promedio
Arenisca –Lutita	< 1.37 – 6.69	4.23 (9)
Basalto	-	- (2)
Conglomerado polimíctico	< 1.52 – 14.42	6.69 (15)
Grava-Limo	< 3.0 – 5.52	4.26 (4)
Riolita	-	5.90 (1)

* Número de muestras entre paréntesis

Tabla 10. Promedio de la exhalación de radón por tipo de suelo y roca subyacente

Roca	Suelo		
	Litosol	Rendzina	Xerosol
Arenisca –Lutita	3.54 (2)	3.50 (1)	4.85 (4)
Basalto	- (2)	-	-
Conglomerado polimíctico	-	14.42 (1)	5.83 (9)
Grava-Limo	5.52 (1)	-	3.00 (1)
Riolita	-	-	5.90 (1)

* Número de muestras entre paréntesis

La cantidad de radón liberado de rocas y suelos está controlada principalmente por los tipos de mineral en que se presenta el uranio y el radio. Una vez que el radón es liberado, su migración hacia la superficie depende de las características de transmisión de la roca subyacente y de la porosidad del suelo, de la naturaleza de los gases acarreadores, la humedad y las condiciones atmosféricas.

Los resultados de la Tabla 7 muestran que la exhalación alcanzó valores hasta 14.42 Bq/m²·h, con flujos mayores en suelos tipo xerosol y rendzina (Fig. 13), así como en la zona de conglomerado polimíctico (Fig. 14). El máximo valor de la exhalación se observó

en suelo rendzina con roca subyacente tipo conglomerado polimíctico (Tabla 10). Estos suelos están asociados estrechamente con el tipo de roca madre subyacente y, generalmente, se forman por la meteorización de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita; son ricas en materia orgánica y de poca profundidad, lo que facilita la exhalación del gas radón. Por su parte, las rocas polimícticas son sedimentarias y pueden contener cantidades importantes de uranio debido al contenido de minerales arcillosos y materia orgánica que facilita la absorción de uranio (Flexser, et al., 1993), aumentando la probabilidad de emanación de radón cuando subyacen a suelos permeables.

En promedio (Tabla 8), la tasa de exhalación de radón fue mayor en suelo rendzina, aunque solo se obtuvieron dos mediciones con valores superiores a la exhalación mínima detectable, mientras que la distribución de valores de exhalación en suelos litosol fue más homogénea, con un promedio menor. Por su parte, el promedio de la exhalación en suelos tipo xerosol fue intermedio respecto a las otras unidades de suelo, con una distribución de niveles de exhalación más amplia y mayor número de puntos medidos.

En un estudio similar efectuado en el municipio de Noria de Ángeles, Zacatecas (Hernández Rodríguez, 2012), se encontró la misma tendencia de los valores promedio de la exhalación de radón, con valores más altos en suelos rendzina y xerosol, y rocas tipo arenisca-caliza y riolita. Las primeras son rocas sedimentarias que se caracterizan por ser porosas, y las segundas son rocas volcánicas del tipo ígnea intrusiva que, al igual que las rocas graníticas, suelen presentar una concentración elevada de uranio (Chiozzi, et al., 2001; Tamrakar & Pitre, 2000). Mireles et al. (2007), al monitorear el radón en interiores de edificio en el estado de Zacatecas, reportaron que, en promedio, la concentración de radón en el interior de construcciones edificadas sobre suelo xerosol es una de las más altas.

Respecto a la distribución de valores de exhalación por tipo de roca, los valores más altos de exhalación se registraron en la zona de roca sedimentaria conglomerado polimíctico

(Tabla 9) ubicada al noroeste del área de estudio (Fig. 14). Este sedimento depositado a finales del Mioceno y durante el Plioceno se constituye principalmente de fragmentos volcánicos, caliza y arenisca (SGM, 2006). Como se observa en los cortes de columna geológica de la Figura 14, el conglomerado polimíctico del noroeste subyace a una capa de arenisca, caliza y lutita, aunque el declive que se presenta desde el área de roca caliza-lutita (Fig. 15), hace suponer que el conglomerado polimíctico está compuesto mayormente de caliza y elementos lixiviados desde esa zona hacia el sur. Por su parte, el conglomerado polimíctico al sureste subyace fundamentalmente a una unidad de arenisca. En esta zona la mayoría de los valores de exhalación fueron inferiores al conglomerado de la zona noroeste.

La radiación ambiental natural depende principalmente del contenido de radionúclidos en los afloramientos de roca. Las rocas ígneas, especialmente los granitos, exhiben la más alta radiactividad debido al comportamiento geoquímico de elementos como el uranio, durante la geogénesis. Las rocas graníticas pueden producir áreas secundarias de enriquecimiento de uranio durante el movimiento del agua subterránea a través de las fracturas en esas rocas, o a través de zonas porosas entre las rocas adyacentes a las rocas graníticas. El uranio es disuelto y transportado a sitios más favorables para su deposición. Este mismo proceso puede ocurrir en rocas con alto contenido de uranio sometidas a la interemperización.

En el afloramiento de la roca ígnea riolita, y en puntos cercanos a ella (puntos de muestreo 20, 21 y 31) se obtuvieron valores relativamente altos de la exhalación de radón, aunque inferiores al promedio reportado para el conglomerado polimíctico. Al igual que los granitos, y por su origen volcánico, las riolitas pueden contener cantidades apreciables de uranio y, por lo tanto, presentarse mayor exhalación de radón (Chiozzi, et al., 2001; Tamrakar & Pitre, 2000). En algunos casos se ha reportado que la exhalación de radón en rocas volcánicas es hasta 10 veces superior que en rocas de arenisca (Keller &

Schütz, 1988). Por su parte, la exhalación en la roca ígnea basalto no superó la sensibilidad del método de medición.

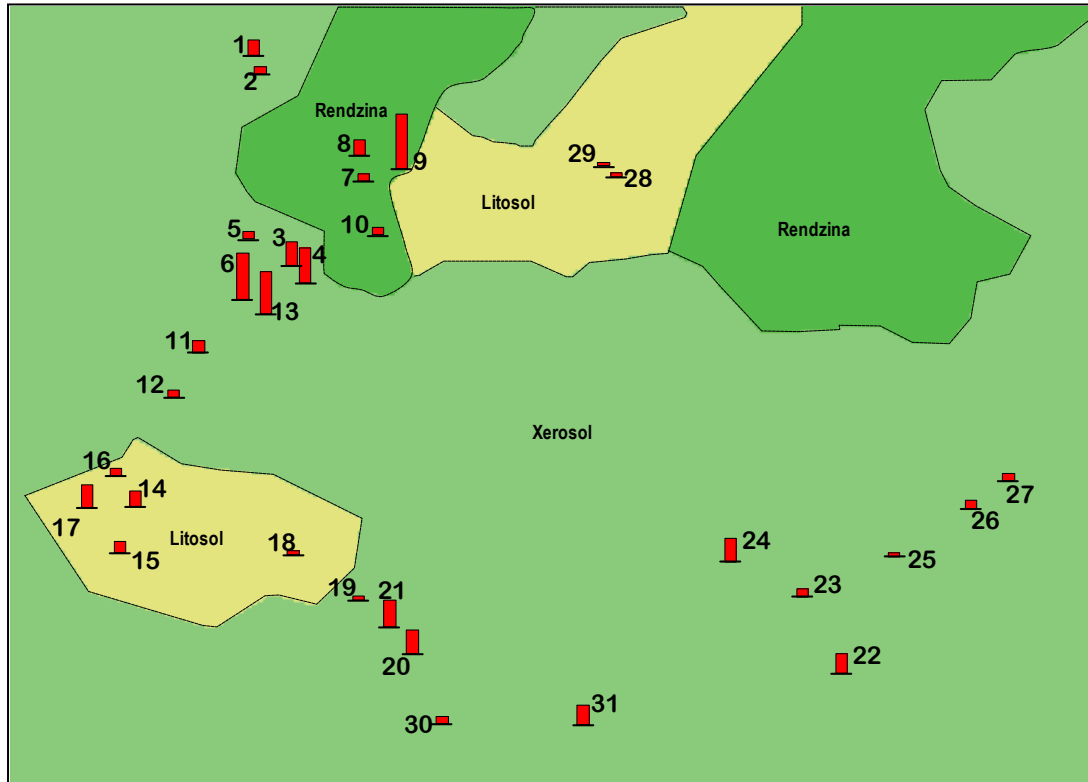


Figura 13. Distribución e intensidad de la exhalación por tipo de suelo

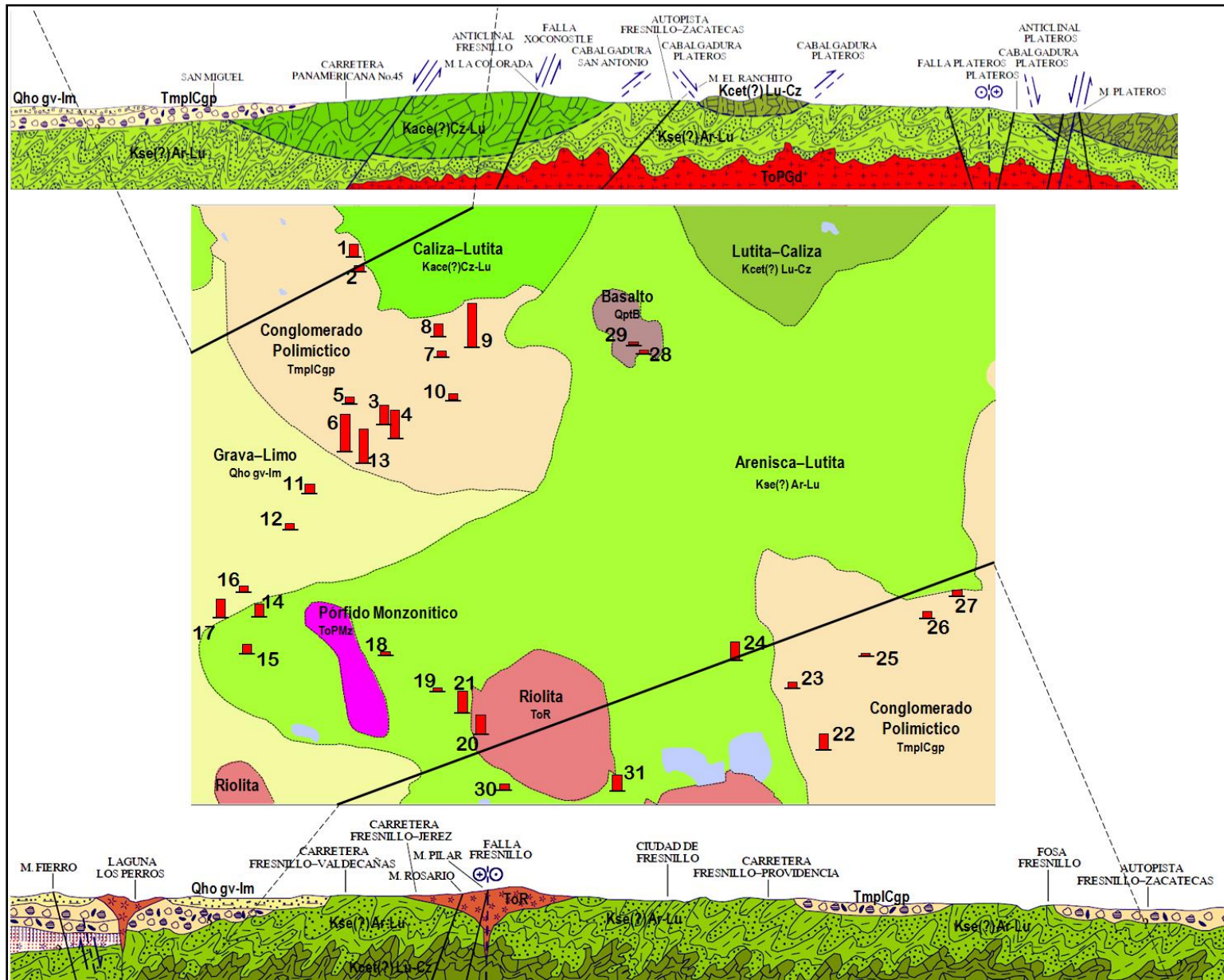


Figura 14. Distribución e intensidad de la exhalación por tipo de unidades geológicas subyacentes

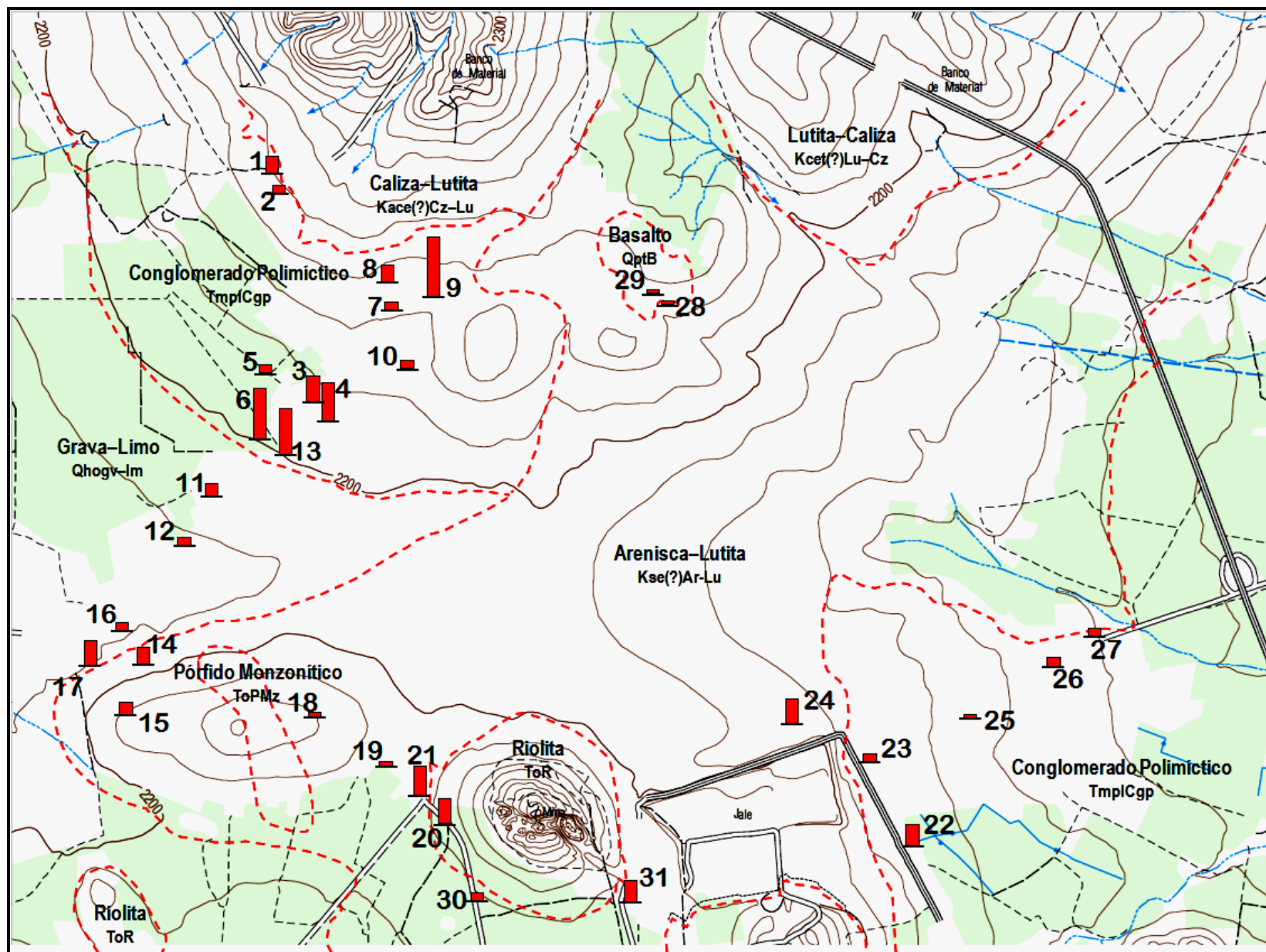


Figura 15. Curvas de nivel en el área de estudio

4. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como propósito medir el flujo de radón en suelo urbano de la ciudad de Fresnillo, Zacatecas, para obtener un mapa general de tendencia geográfica de la exhalación de radón, y asociar el radón con la geología de la zona de estudio.

La ciudad de Fresnillo es una de las ciudades con mayor población urbana del estado y está ubicada en una zona altamente mineralizada donde, en la actualidad se extraen concentrados de Ag, Pb y Zn. Geológicamente el área de estudio está conformada por rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario, con afloramientos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, y un depósito continental cuaternario en forma de coluviones. Los suelos predominantes son calcáreos.

En el área de estudio fue posible medir la exhalación en 31 puntos de suelo no perturbado, en su mayoría alrededor del centro urbano. La exhalación fue dependiente del tipo de suelo y roca. El máximo valor de exhalación de radón fue de $14.42 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$ registrado en suelo tipo rendzina y roca subyacente conglomerado polimíctico. En promedio, la exhalación fue mayor en suelo rendzina y menor en suelo litosol; respecto a la litología, el promedio más alto se registró sobre roca sedimentaria conglomerado polimíctico y menores sobre arenisca-lutita y grava limo, mientras que la exhalación sobre roca ígnea riolítica fue cercana al valor obtenido para conglomerado polimíctico.

De acuerdo al mapa de distribución de exhalación, las zonas con mayor potencial de emisión de radón se ubican al noroeste de la ciudad, donde subyace roca sedimentaria conglomerado polimíctico, y al sur alrededor del afloramiento de roca ígnea riolítica.

Referencias

- Appleton, J. D., 2007. Radon: Sources, Health Risks, and Hazard Mapping. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1), pp. 85-89.
- Appleton, J. D. & Miles, J. C. H., 2010. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 101, pp. 799-803.
- Arnstein, A., 1913. On the so-called "Schneeberg Lung Cancer". *Verhandl di deutsch path Gesellsch*, Volume 16, pp. 332-342.
- Binns, D. A., Figueiredo, N., Melo, V. P. & Gouveaa, V. A., 1998. Radon-222 measurements in a uranium-prospecting area in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 38(2), pp. 249-254.
- Buttafuoco, G., Tallarico, A. & Falcone, G., 2007. Mapping Soil Gas Radon Concentration: A Comparative Study of Geostatistical Methods. *Environ Monit Assess*, Volume 131, pp. 135-151.
- Calderón-Espinoza, J. F., 2011. Evaluación del método de vial abierto y centelleo líquido en la medición de ^{222}Rn en suelo. In: *Tesis de Maestría*. s.l.:Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Chiozzi, P. et al., 2001. Laboratory application of NaI(Tl) gamma-ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics. *Application Radiation and Isotopes*, 53(1-2), pp. 127-132.
- Chyi, L. L., Chou, C. Y., Yang, F. T. & Chen, C. H., 2002. Automated radon monitoring of seismicity in a fault zone. *Geofísica Internacional*, 41(1), pp. 507-511.
- Cosma, C., Dancea, F., Jurcut, T. & Ristoiu, D., 2001. Determination of ^{222}Rn emanation fraction and diffusion coefficient in concrete using accumulation chambers and the influence of humidity and radium distribution. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 54, pp. 467-473.
- Cothorn, C. R., 1981. Properties. In: C. R. Cothorn & J. E. Smith, eds. *Environmental Radon*. New York, N.Y.: Plenum Press, pp. 1-30.
- Currie, L., 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Analytical Chemistry*, 40(3), pp. 586-593.
- Fields, P. R., Stein, L. & Zirin, M. H., 1962. Radon Fluoride. *Journal of the American Chemical Society*, 84(21), pp. 4164-4165.
- Flexser, S., Wollenberg, H. A. & Smith, A. R., 1993. Distribution of radon sources and effects on radon emanation in granitic soil at Ben Lomond, California. *Environmental Geology*, 22(2), pp. 162-177.
- Greeman, D. J. & Rose, A. W., 1996. Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of the eastern U.S.A.. *Chemical Geology*, Volume 129, pp. 1-64.

- Gundersen, L. C. et al., 1992. Geology of radon in the United States. In: A. E. Gates & L. C. S. Gundersen, eds. *Geological Controls on Radon*. Boulder, CO: Geological Society of America, pp. 1-16.
- Harley, J. H., 1952. *Sampling and measurement of airborne daughters products of radon*. Doctoral dissertation, s.l.: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Harting, F. H. & Hesse, W., 1879. Der Lungenkrebs, die bergkrankheit in den schneeberger gruben. *Viertel Gerichtl Med Oeff Sanitaetswes*, Volume 31, pp. 102-132.
- Hassan, N. M. et al., 2009. Radon Migration Process and Its Influence Factors; Review. *Jpn. J. Health Phys.*, 44(2), pp. 218-231.
- Hernández Rodríguez, P., 2012. *Medición de la exhalación de Radón en suelo en Noria de Ángeles, Zacatecas, y en jales de la mina Real de Ángeles*. Tesis de Maestría ed. Zacatecas: Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Hoover, H. C. & Hoover, L. C., 1950. *Georgius Agricola De Re Metallica*. New York: Dover Publications, Inc.
- IARC, 1988. *Man-made Mineral Fibers and Radon..* IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans ed. Lyon, France: International Agency for research on Cancer.
- IARC, 2001. Radon. In: *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Vol. 78. Ionizing Radiation, Part 2: Some Internally Deposited Radionuclides*. Lyon, France: IARC Press, pp. 137-167.
- IARC, 2009. *IARC Monograph Volume 100: A review of human carcinogens - Part D: radiation*, s.l.: IARC.
- INEGI, 2015. *México en cifras*. [Online]
Available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=32>
[Accessed septiembre 2016].
- Keller, G. & Schütz, M., 1988. Radon exhalation from the soil. *Radon exhalation from the soil*, 24(1), pp. 43-46.
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A. & Valdivia-Manchego, M., 2006. Radon risk prediction in Germany based on gridded geological maps and soil gas measurements. In: I. Barnet, M. Neznal & P. Pacherova, eds. *Radon Investigations in the Czech Republic XI and the 8th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*. Prague: Czech Geological Survey, RADON v.o.s. and JRC IES REM Ispra.
- Kepler, H. & Wyllie, P. J., 1990. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes. *Nature*, Volume 348, pp. 531-533.

- López-Coto, I., Mas, J. L., Bolívar, J. P. & García-Tenorio, R., 2009. A short-time method to measure the radon potential of porous materials. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 67, pp. 133-138.
- Markkanen, M. & Arvela, H., 1992. Radon Emanation from Soils. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 45, pp. 269-272.
- Miksova, J. & Bernet, I., 2002. Geological support to the National Radon Programme (Czech Republic). *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77(1), pp. 13-22.
- Miles, J. C. H. & Appleton, J. D., 2005. Mapping variation in radon potential both between and within geological units. *Journal of Radiological Protection*, Volume 25, pp. 257-276.
- Miles, J. C. H. & Ball, T. K., 1996. Mapping radon-prone areas using house radon data and geological boundaries. *Environment International*, Volume 22, pp. 779-782.
- Mireles, F. et al., 2007. Radon survey related to construction materials and soils in Zacatecas, México using LR-115. *Radiation Measurements*, Volume 42, pp. 1397-1403.
- Nagda, N. L., 1994. Radon - A Multifaceted Environmental Problem: An Overview. In: N. L. Nagda, ed. *Radon: Prevalence, Measurements, Health Risks and Control*. Philadelphia, PA: ASTM, pp. 1-9.
- NRC, 1988. *Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Health risk on radon and others internally deposited alpha-emitters. BEIR V*. Washington, D.C.: National Academic Press.
- NRC, 1994. *Health Effects of Exposure to Radon: Time for Reassessment?*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Oliver, M. A. & Khayrat, A. L., 2001. A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil. *Computers & Geosciences*, Volume 27, pp. 939-957.
- Planinic, J., Radolic, V. & Vukovic, B., 2004. Radon as an earthquake precursor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Volume 530, pp. 568-574.
- Poortinga, W., Cox, P. & Pidgeon, N. F., 2008. The Perceived Health Risks of Indoor Radon Gas and Overhead Powerlines: A Comparative Multilevel Approach. *Risk Analysis*, 28(1), pp. 235-248.
- Real-Ferrer, G., 2002. *El radón: Tratamiento jurídico de un enemigo invisible*. Alicante, España: Editorial Club Universitaria.
- Sakoda, A., Ishimori, Y. & Yamaoka, K., 2011. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 69, pp. 1422-1435.
- Schumann, R. R., Gundersen, L. C. S. & Tanner, A. B., 1994. Geology and Occurrence of Radon. In: N. L. Nagda, ed. *Radon: prevalence, measurements, health risks and control*. Philadelphia, PA: ASTM, pp. 83-96.

SGM, 2006. *Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-B47*, s.l.: Servicio Geológico Mexicano.

Shafi-ur-Rehman, Matiullah, Shakeel-ur-Rehman & Rahman, S., 2006. Studying ^{222}Rn exhalation rate from soil and sand samples using CR-39 detector. *Radiation Measurements*, Volume 41, pp. 708-713.

Sundal, A. V., Henriksen, H., Soldal, O. & Strand, T., 2004. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *The Science of the Total Environment*, Volume 328, pp. 41-53.

Tamrakar, P. K. & Pitre, K. S., 2000. Voltammetric trace analysis of uranium and other metals in meta rhyolite rock samples. *Analytical Science*, 16(9), pp. 951-955.

Tanner, A. B., 1980. Migration in The Ground: a Supplementary Review. In: T. F. Gesell & W. M. Lowder, eds. *The Natural Radiation Environment III*. Springfield, VA: Technical Information Center, US Dept of Energy, pp. 5-56.

UNSCEAR, 2000. *UNSCEAR Report 2000 Vol I. Sources and effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations.

UNSCEAR, 2008. Annexe B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. In: U. N. S. C. o. t. E. o. A. Radiation, ed. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Report to the General Assembly*. New York: United Nations.

Wilkening, M., 1990. *Radon in the Environment*. 1990: Elsevier.