

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Riesgo por Emisiones de Radón en el Área
Metropolitana de San Luis Potosí**

Tesis que presenta
Jafet García Chávez

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Directores de la Tesis:

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Dr. José Noel Carbajal Pérez

San Luis Potosí, S.L.P., 9 de Octubre de 2015



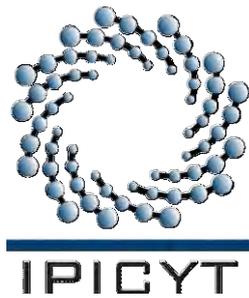
Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Riesgo por Emisiones de Radón en el Área Metropolitana de San Luis Potosí”*** presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Jafet García Chávez** y aprobada el **nueve de octubre del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Codirector de la tesis

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Codirector de la tesis

Dr. Vsevolod Yutis von Brincken
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal y del Dr. José Noel Carbajal Pérez

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 298352 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 009 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 9 días del mes de octubre del año 2015, se reunió a las 17:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Noel Carbajal Pérez	Presidente	IPICYT
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Secretario	IPICYT
Dr. Vsevolod Yutsis von Brincken	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Jafet García Chávez

sobre la Tesis intitulada:

Riesgo por Emisiones de Radón en el Área Metropolitana de San Luis Potosí

que se desarrolló bajo la dirección de

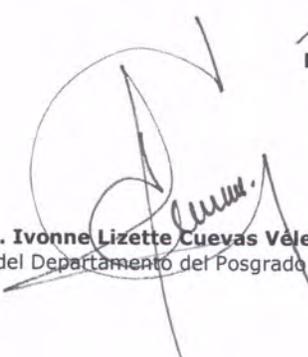
Dr. José Alfredo Ramos Leal
Dr. José Noel Carbajal Pérez

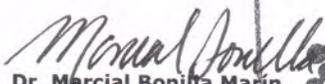
El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 18:25 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 9 días del mes de octubre de 2015.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



A Rosa y Noé
Por su apoyo y amor incondicional

Agradecimientos

A mi familia:

A mis padres Rosa y Noé por su cariño, guía y motivación en todo momento.

A mis hermanos: Ana Lía, Jorge Noé y Yosh, por brindarme todo su apoyo, y comprensión, por ser una fuente de inspiración y a quienes admiro enormemente.

A Susy, Marcos y Uriel, por abrirme las puertas de su hogar y su apoyo desde mi primer día en San Luis.

Al Dr. Alfredo Ramos: por su dirección y consejos, por los conocimientos compartidos y el gran apoyo que me ha brindado durante el posgrado.

Al Dr. Noel Carbajal: por sus lecciones y enseñanzas, su asesoría y apoyo, que ha sido fundamental en la conclusión de mi maestría.

Al Dr. Vsevolod Yutsis, Dra. María Luisa García, Geog. Rosa Lilia Díaz, por su asesoría, que ha enriquecido enormemente este trabajo.

Al Dr. Guillermo Espinosa García, M.C. José Ignacio Golzarri Moreno del Instituto de Física de la UNAM, por proporcionar el polímero CR-39, para de este estudio.

A la Fraternidad y Mancomunidad Española: Regina, Paty, Nacho, Fermín, Efrén y Luis, con quienes he aprendido y compartido los mejores momentos en esta aventura potosina.

A mis amigos y compañeros del IPICYT: Sonia, Oscar, Pablo, Simón, Edgar, Shary, Alex, Janete, Paco, Gil, Jesús, Nery, Robert, Moy, Gaby e Irene.

A Gaby Pérez Assaf por su orientación y ayuda durante toda mi maestría y el gran apoyo brindado para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Florentino López, Dr. Vladimir Escobar, M. C. Dulce Partida, y a los laboratorios de Petrografía y de Polímeros Avanzados: Dalia, Yare, Mariana, Miriam, Elsy, Meche, Manuel y Harim por su amistad y su orientación en la fase experimental de mi trabajo.

Al IPICYT y CONACYT, por la beca otorgada durante estos dos años.

A todos los que han contribuido de una u otra manera en la realización de este proyecto.

Índice General

Constancia de aprobación de tesis	II
Créditos Institucionales	III
Acta de Examen	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Índice general	VII
Resumen	X
Abstract	XI
Hipótesis	XII
Objetivo	XII
Justificación	XII

Capítulo 1. Introducción

1.1 Radiactividad	1
1.1.2 Medición de la radiactividad	3
1.2 Información general del radón	5
1.2.1 Fuentes	6
1.2.2 Transporte	9
1.2.3 Factores que influyen en la concentración de radón	10

1.2.3.1 Concentración de radón en casas y edificios	12
1.3 Antecedentes	13
1.3.1 Trabajos previos	13
1.4 Efectos nocivos en la salud	15

Capítulo 2. Zona de Estudio

2.1 Información Sociodemográfica	17
2.2 Geología	22
2.3 Edafología	25
2.4 Climatología	27

Capítulo 3. Metodología

3.1 Sistemas de medición	30
3.2 Dispositivo RAD7	31
3.2.1 Técnica de medición mediante RAD7	33
3.3 Detectores solidos de trazas nucleares	34
3.3.1 Dispositivo CR-39	36
3.3.2 Técnica de medición mediante CR-39	36
3.4 Generación de mapa de riesgo	38
3.4.1 Algebra de mapas	39

Capítulo 4. Resultados y Discusión	
4.1 Niveles de radón en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí	42
4.1.1 Concentraciones obtenidas mediante el método activo (RAD7)	42
4.1.2 Concentraciones obtenidas mediante el método pasivo (CR -39)	48
4.2 Análisis de resultados	51
4.3 Riesgo por emisiones de radón	61
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	65
Bibliografía	67
Anexos	73

Resumen

El radón (^{222}Rn), es un gas radiactivo de origen natural, el cual aporta la mayor parte de la radiación que recibe el ser humano a lo largo de su vida; el radón no tiene olor, color ni sabor, por lo que la forma de detectarlo a través de la radiación que emite en forma de partículas alfa. El radón se emite constantemente del suelo y de algunos materiales de construcción. El contacto con este gas en concentraciones elevadas es nocivo para la salud, pues su inhalación puede producir cáncer de pulmón. Por esta razón se midieron las concentraciones de ^{222}Rn en el suelo del Área Metropolitana de San Luis Potosí con la finalidad de conocer los niveles que existen y generar un mapa de riesgo por emisiones de este gas. Los niveles de radón se obtuvieron por dos métodos, uno pasivo, en el cual se emplearon detectores sólidos de trazas nucleares, usando CR-39 como material detector, y otro activo con el que se tomaron muestras por medio del dispositivo RAD7. La zona de estudio presentó un promedio de $5,723 \text{ Bq/m}^3$ con un máximo de $47,100 \text{ Bq/m}^3$ y un mínimo de 400.5 Bq/m^3 ; con los resultados de ambas técnicas se realizaron mapas de concentración de ^{222}Rn para el área de estudio. Las condiciones geológicas, el relieve de la zona de estudio y la influencia antropogénica son los principales factores que influyen en la distribución y niveles de radón encontrados en la ciudad de San Luis Potosí. La zona del valle donde se tiene una capa sedimentaria más gruesa y donde se encuentra la mayor parte de la ciudad cuenta con los niveles más altos de radón a diferencia de las zonas montañosas o de loma que tienen concentraciones mucho menores. La combinación de las capas de concentración de radón, las densidades de población de la zona metropolitana, la capa de asfalto y el tipo de material geológico que compone el valle da como resultado el mapa de riesgo por emisiones de radón. La zona con mayor riesgo se localizó al sureste de la ciudad en los alrededores del Boulevard Río Española, es un área de valle con altas densidades de población y concentraciones de radón bastante elevadas que llegan a rebasar los $40,000 \text{ Bq/m}^3$ y donde habitan alrededor de 250,000 personas.

Abstract

Radon (^{222}Rn) is a natural occurring radioactive gas, it provides most of the radiation received by man throughout his life; radon is odorless, colorless and tasteless, so the way to detect it is through the radiation emitted in the form of alpha particles.

Radon is constantly emitted from soil and some construction materials; contact with this gas is a health hazard, because its inhalation may cause lung cancer. For this reason, radon concentrations were measured in soil of San Luis Potosí metropolitan area, in order to know the levels that exist in the city and generate a risk map for radon emissions.

Radon levels were obtained using 2 methods, a passive one, in which solid nuclear track detectors were employed, using CR-39 as track detector; and an active one, which samples were taken by the RAD7 device; the study area had an average of $5,723 \text{ Bq/m}^3$, with a maximum of $47,100 \text{ Bq/m}^3$ and a minimum of 400.5 Bq/m^3 ; the results of both techniques were used in the mapping of radon concentration in the study area.

Geological conditions, the relief of the study area and anthropogenic influence are so important in the radon levels in the city of San Luis Potosi. The highest levels are found in the valley zone, which has a thicker layer of sediments and where most of the city is established. The mountain or hill areas had much lower radon concentrations.

The combination of layers of radon concentration, population density, and type of geological material making up the valley has resulted in the risk map for radon emissions.

The most risk area is located in the southeast of the city near of Río Españita Boulevard; it is a valley area with high population densities and fairly high concentrations of radon that exceed $40,000 \text{ Bq/m}^3$ and where around 250,000 people live.

Hipótesis

El tipo de roca de la zona de estudio, el relieve y las características del suelo que existe en la ciudad de San Luis Potosí pueden influir en las concentraciones de ^{222}Rn , que rebasen los niveles máximos permitidos.

Objetivo

Mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), métodos de trazas nucleares y monitores continuos obtener la distribución espacial del ^{222}Rn en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP). Medir los niveles de radiación emitidos por este gas, analizar la relación que existe entre las concentraciones de radón con la geografía general del área de estudio. Generar un mapa de riesgo por emisiones de gas radón para la mancha urbana de San Luis Potosí.

Justificación

Los rangos máximos de concentración ^{222}Rn , establecidos por distintos países y los niveles encontrados en el área de estudio, pueden ser de gran ayuda en el establecimiento de normas y reglamentos en la futura planeación y ordenamiento territorial de la ZMSLP. El tipo de roca es el principal factor que influye en las concentraciones de radón, el basamento de San Luis Potosí se compone por riolitas, la cuales emiten grandes cantidades de este gas.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Radioactividad

La radioactividad, es la propiedad que poseen algunos elementos para desintegrarse con el paso del tiempo y dar lugar a nuevos átomos que pueden ser o no radioactivos, durante este proceso se emiten partículas y radiaciones de diversa naturaleza (Quindós, 1995). Existen 2 clases de radioactividad, la natural y la artificial, la primera ocurre en la naturaleza de manera cotidiana mientras que la segunda es creada por el hombre.

Los materiales radiactivos y las fuentes de radiación producen las llamadas radiaciones ionizantes, las cuales producen ciertos efectos al incidir sobre el cuerpo humano; generalmente la dosis de radiación que recibe una persona de manera artificial es mucho menor que la dosis que tiene su origen en la radiación natural (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2010).

La mayor parte de la radiación artificial a la que está expuesta la población en general se debe a los rayos X y a los materiales radiactivos que se utilizan en el diagnóstico y tratamiento de algunas enfermedades; sin embargo estas dosis pueden variar de manera considerable de acuerdo a las condiciones de cada persona. En la actualidad diversos aparatos como televisores, teléfonos celulares, computadoras, y otros productos que son utilizados diariamente, aportan parte de la radiación artificial que recibe el hombre (Consejo de Seguridad Nuclear España, 2010).

La mayor parte de la radiación que recibe una persona a lo largo de su vida es debido a fuentes naturales, proviene de la desintegración de radioisótopos que se encuentran en la corteza terrestre, de la radiación cósmica y de los isotopos radiactivos que forman parte de los seres vivos.

La radiación procedente de la corteza terrestre depende del tipo de roca que existe en un lugar, mientras que la radiación cósmica que recibe una persona está en función de la latitud y altitud donde se habite y por último la de los seres vivos que depende de la edad de las personas y su dieta. (Bulbulian, 1996; EPA Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

El potasio – 40 es la fuente de radiación interna más importante, ya que está presente en alimentos y bebidas, los mariscos concentran el material radiactivo de una forma en la que aún sin que existiera radiactividad artificial, las personas que consumen grandes cantidades de algunos productos marinos pueden recibir una dosis de radiactividad natural por alimentación hasta un 50% más alta que la media.



Figura 1.1 La Radioactividad existente en el medio ambiente acaba alcanzando al ser humano a través de diferentes vías de incorporación. Dosis de radiación/CSN. Consejo de Seguridad Nuclear (España) 2010.

El 60% de la cantidad de radiación natural que absorbemos se debe al gas radón, el cual por sus características químicas no interactúa con otros elementos y permite que se mueva con facilidad desde el suelo y los materiales de construcción, el radón que escapa y se infiltra en las edificios puede quedar atrapado si no se tiene una buena ventilación, lo que hace que pueda ser inhalado por las personas y penetre en los pulmones, quedando las células en contacto directo con las partículas alfa, lo cual puede ser un riesgo que conlleva al desarrollo de cáncer pulmonar (Espinosa, 1994).

Fuentes de Exposición a la Radiación

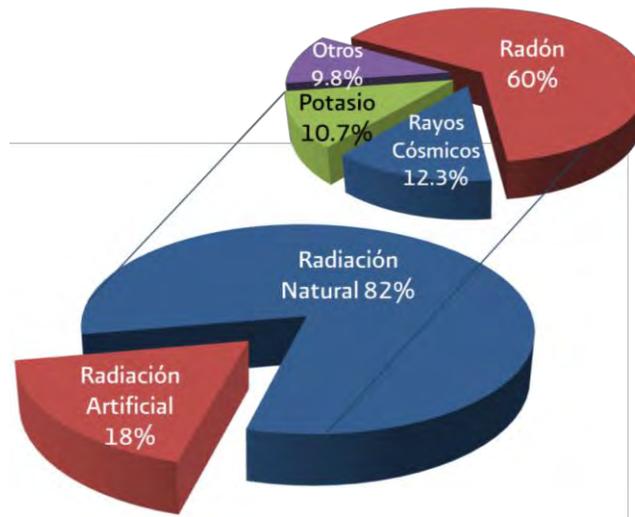


Figura 1.2 Porcentajes por tipo radiación que recibe el ser humano, la mayor parte se debe a procesos ambientales, el gas radón es la principal fuente de radiación natural. Elaboración propia en base a Espinosa 1994, BEIR VII, 2004.

1.1.2 Medición de la radiactividad

La radiactividad se origina por la desintegración de núcleos radiactivos. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), se define el becquerel (Bq) como la unidad de actividad radiactiva, esto equivale a una desintegración por segundo (Mans Teixidó, 2011). Los niveles de radiactividad en el aire y el suelo debido al radón se miden en becquerels por m^3 (Bq/m^3).

La exposición a la radiación se mide en términos de la cantidad de radiación absorbida, esto equivale a la energía absorbida por un cuerpo u órgano. En el SI se ha definido el Gray (Gy) como la unidad de dosis absorbida de radiación ionizante, y es igual a 1 joule/ kilogramo (J/kg), anteriormente se utilizaba otra unidad denominada rad. $1Gy = 100 \text{ rad}$ (Mans Teixidó, 2011).

Debido a existe una diferencia entre recibir una dosis de radiación en forma de fotones (rayos gamma o X), que la misma dosis pero en forma de partículas más pesadas (neutrones, protones, radiación alfa), que tiene efectos más nocivos,

se ha desarrollado otra unidad de medición llamada sievert (Sv) que se define como dosis equivalente de radiación ionizante.

Un Sv es igual a Un Gy si la radiación se absorbe en forma de fotones o electrones, pero 1 Sv equivale a 2 Gy si se absorben protones, de 5 a 10 Gy si se absorben neutrones y 20 Gy si son partículas alfa, esto se debe a que las partículas alfa depositan su energía más densamente; además las partículas alfa descargan su energía en áreas más pequeñas, es decir que se recibe una dosis más alta de radiación por volumen de tejido. Hasta hace algún tiempo se utilizó otra unidad para la dosis equivalente: el rem, 1 Sv es igual a 100 rem (Mans Teixidó, 2011).

Tabla 1.1 Unidades de Medición de la Radiación. Modificada de Selinus et al., 2005.

Unidades de Medición de la radiactividad y Dosis			
Cantidad	Unidad	Propósito	Observaciones
Actividad	Becquerel	Medición de la actividad radiactiva de un material	1 Bq = 1 desintegración atómica por segundo
	Curie	Unidad de medida de decaimiento de ²²² Rn en Estados Unidos	El Curie se basa en la tasa de decaimiento de un gramo de ²²⁶ Ra, o 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo
	Pico Curies (pCi)		1 pCi = una billonésima parte de un Curie; 0.037 desintegraciones por segundo, o 2.22 desintegraciones por minuto
Radiactividad en Aire y Agua	Becquereles/m ³ (Bq/m ³)	Medida promedio de concentración de radón en un edificio o en el suelo Bq/L medición de radón en agua	Promedio de radón en casas de Gran Bretaña: 20Bq/m ³ , Suecia 108 Bq/m ³ , EU: 46 Bq/m ³ , México: 96 Bq/m ³
Dosis Absorbida	Gray (Gy) Rad	Energía absorbida por unidad de masa de un cuerpo u órgano	1 Joule de energía absorbido por 1 Kg de tejido 1 Rad = 0.01 Gy
Dosis Equivalente	Sievert (Sv) Roentgen (Rem)	Medidas de dosis absorbidas causada por distintos tipos de radiación	Dosis absorbida de acuerdo a la nocividad de diferentes tipos de radiación. El Rem ha sido reemplazado por el Sievert, el cual es igual a 100 rem

Los tipos de radiación más comunes emitidos por los radioisótopos son partículas alfa, partículas beta y rayos gamma; las partículas alfa cuentan con un rango de penetración bajo que no es capaz de penetrar la piel, pero se considera como el tipo de radiación más peligrosa ya que su masa y carga son tan altas que causa una ionización muy intensa.

Los rayos gamma son mucho más penetrantes pueden causar una ionización y daños al tejido comparables con los efectos de los rayos X, las partículas beta tienen un poder de penetración intermedio; mientras las fuentes radioactivas se mantengan fuera del cuerpo las que causan mayor problema son los rayos gamma (Selinus et al., 2005).

Hasta hace unas décadas se consideraba a la radiación natural como un fenómeno al que el hombre estaba adaptado y que no lo afectaba de ninguna forma; esto cambió a finales de los años setentas del siglo pasado, cuando se detectaron altas intensidades de radiación en zonas habitacionales. Ciertos laboratorios comenzaron a realizar algunos estudios, particularmente en los daños provocados por la radiación de los descendientes del radón en los pulmones (Bulbulian, 1996).

1.2 Información general del radón

El Radón (^{222}Rn) es un gas de origen natural, es incoloro, insípido y carece de olor, por lo cual sólo puede ser detectado con el uso de equipo adecuado. Este gas es producido por el decaimiento radioactivo del uranio en su paso para convertirse en un elemento estable (plomo). El uranio se encuentra en suelos y rocas, su concentración varía de acuerdo a las características geológicas y edafológicas de cada lugar (Quindós, 1995; Selinus et al., 2005; EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

El radón es un elemento radioactivo, lo que significa que sus átomos se transforman en otros elementos, que son conocidos como sus descendientes o

progenie. Las partículas que resultan del decaimiento del radón es la radiación alfa y puede ser inhalada por el ser humano. Esta radiación tiene la capacidad de dañar las células de los pulmones y causar cáncer, motivo por el cual el estudio del radón ha tomado un enorme interés los últimos años (BEIR, 1999).

Existen 3 tipos de isotopos de radón: el ^{219}Rn (actinon) que tiene un periodo de semidesintegración de 4 segundos procede del ^{235}U , el ^{220}Rn (Torón) posee un periodo de 55.6 segundos proveniente del ^{232}Th y finalmente el ^{222}Rn , producto del decaimiento del ^{226}Ra y que pertenece a la cadena de desintegración del ^{238}U , tiene un periodo de semidesintegración 3.82 días, este último es al que se le denomina propiamente radón y que figura en la tabla periódica como elemento químico del grupo de los gases nobles con el número atómico 86 (Quindós, 1995). El ^{222}Rn es el objeto de análisis en este estudio.

1.2.1 Fuentes

El uranio es un elemento químicamente muy activo, abundante en el planeta, capaz de asociarse con otros elementos y desplazarse con ellos, tiene un periodo de semidesintegración de 4,500 millones de años. El radio, eslabón en la cadena de decaimiento del uranio y del cual desciende directamente el radón tiene un periodo de 1660 años. Por esta razón, a pesar de su corto periodo de vida y ser un producto de la desintegración del uranio y del radio, el radón se genera constantemente. (Quindós, 1995; EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

La concentración de ^{222}Rn y de su progenie dependen en primer lugar de su situación geológica; debido a que el radón es producto de la desintegración del ^{238}U , una primera aproximación para determinar su presencia se correlaciona con el contenido de uranio en el basamento; encontramos uranio en casi todas las rocas y suelos de nuestro planeta generalmente en pequeñas porciones, gramos por tonelada que se denominan partes por millón (ppm) (Taeger, 2001; Quindós 1995).

Tabla 1.2 Desintegración radioactiva del Uranio-238 (^{238}U) hasta convertirse en Plomo (^{206}Pb), el radón aparece en el 7° lugar de la cadena. Fuente: Selinus. et al., 2005.

Serie de decaimiento del Uranio – 238		
Isotopo	Principal modo de decaimiento	Vida Media
^{238}U	α	4.5×10^9 años
^{234}Th	β	24.1 días
^{234}Pa	β	1.2 minutos
^{234}U	α	2.5×10^5 años
^{234}Th	α	7.5×10^4 años
^{226}Ra	α	1.6×10^3 años
^{222}Rn	α	3.8 días
^{218}Po	α	3.1 minutos
^{214}Pb	β	26.8 minutos
^{218}At	α	1.5 segundos
^{214}Bi	α	19.9 minutos
^{214}Po	α	$1.6 - 10^4$ segundos
^{210}Tl	β	1.3 minutos
^{210}Pb	β	22.6 años
^{210}Bi	β	5 días
^{210}Po	α	138.4 días
^{206}Tl	β	4.2 minutos
^{206}Pb	Estable	Estable

Los altos niveles de emisiones de radón están asociados con algunos tipos de roca en particular así como con depósitos de material no consolidado, algunos tipos de granitos, riolitas, rocas fosfatadas, y esquistos ricos en material orgánico (Selinus et al., 2005). Existen áreas donde la exposición al radón es naturalmente alta, especialmente en regiones montañosas de suelos graníticos y lutitas (Hall et al., 1987).

Tabla 1.3 Contenido de uranio por tipo de roca, partes por millón (ppm) Radón, Un gas radiactivo de origen natural en su casa. Quindós 1995.

Tipo de Roca	²³⁸U (ppm)	²³²Th (ppm)
Basálticas	1.0	4.0
Granitos		
Riolitas	5.0	12.0
Arcillas	3.7	11.0
Arenas	0.5	1.7
Suelos	1.0	6.0
Ultrabásicas	0.001	0.004

La presencia de radón y su concentración en casas y edificios depende de algunas cuestiones como el tipo de roca, tipo de suelo, permeabilidad, drenaje y contenido de humedad, la naturaleza de los fluidos que lo transportan como el dióxido de carbono o el agua de consumo, aunque esta fuente sólo es importante en casos particulares, además de factores meteorológicos: presión viento, humedad relativa y lluvia (EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012; Selinus et al., 2005). Al tratarse de un gas, su concentración en un ambiente interior depende también de determinadas prácticas y hábitos que favorezcan su acumulación, especialmente la falta de ventilación, acompañada de hermeticidad en la construcción (Berenguer, 1999).

La segunda fuente de emisión de radón en las casas son los materiales de construcción. En los últimos años el incremento del uso de materiales industriales denominados de desecho y de residuos mineros como aditivos a los materiales tradicionales han revelado la importancia de esta fuente de radón en las casas. Muchos de los productos utilizados presentan un alto contenido de elementos radioactivos en particular radio que al transformarse en radón es exhalado en el interior de las casas. (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2006; Quindós, 1995).

1.2.2 Transporte

Como producto de desintegración del radio, el radón se forma y se libera dentro de los poros del suelo, las fisuras y orificios en la tierra permiten que el radón ascienda a la superficie y pueda ser liberado en el aire. Aunque el radón es químicamente inerte, este decae por los procesos normales de radioactividad, y su progenie, principalmente los isótopos de polonio ^{214}Po y ^{218}Po emiten las partículas alfa que dañan a los pulmones y son causa de cáncer (EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

El radón que alcanza la superficie en lugares abiertos no representa un riesgo importante para la población, al liberarse se diluye con facilidad en el aire y se mezcla con otros gases de la atmósfera; el riesgo para las personas ocurre cuando el gas queda atrapado en sitios cerrados.

Las fuentes más importantes de radón en lugares cerrados provienen del suelo y de los materiales de construcción, los mecanismos empleados por este gas para introducirse en las casas son mediante difusión molecular y flujo convectivo, cuando algunos átomos de radio se desintegran y se transforman en radón se mueven por medio de los poros y fisuras, que existen en la roca, el suelo o en los materiales, y son exhalados hacia la superficie (Thomas y Wayne, 1978; Quindós 1995).

Proceso de difusión: En la naturaleza los elementos se mueven de altas a bajas concentraciones. De acuerdo con la ecuación de difusión, el radón tiene una longitud de propagación de 10 a 20 cm en los materiales de hormigón mientras que en los suelos normales la longitud alcanza alrededor de un metro. Debido a las grandes distancias que el radón tiene que recorrer desde el suelo, es evidente que en muchos casos no alcanzaría la superficie, por lo que el mecanismo de difusión es relevante principalmente cuando el radón es exhalado por los materiales de construcción. (Quindós, 1995).

Proceso de Convección: Este proceso es el más significativo cuando el radón es emitido por el suelo y se basa en diferencias de presión. En el suelo los gases están sometidos a una mayor presión que en el interior de las casas, que se encuentran en la superficie; mediante este fenómeno, el gas se mueve con mayor velocidad desde el subsuelo hacia la atmósfera y se introduce en ambientes cerrados por orificios y fisuras que existen en las estructuras de las construcciones. Aunado a ello los sistemas de calefacción y extracción de aire de las casas y edificios favorecen a crear bajas presiones y facilitan aún más el movimiento del radón y su concentración en ciertas habitaciones (Quindós, 1995).

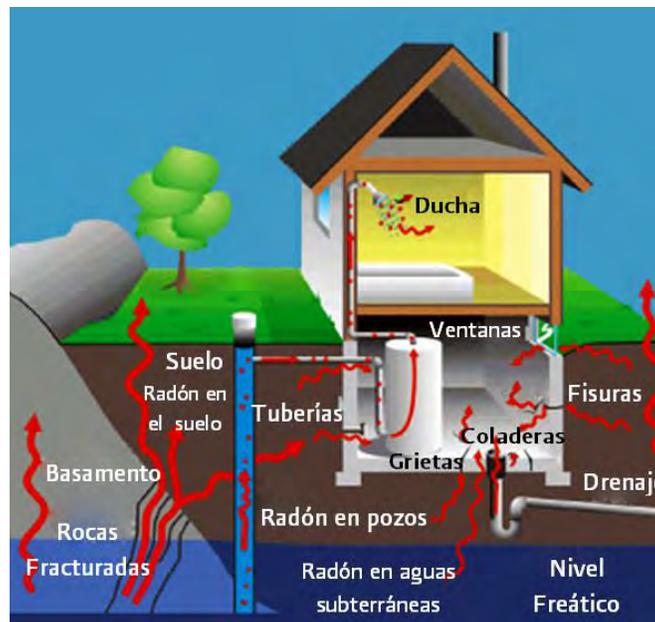


Fig. 1.3 Mecanismos de entrada de radón a una casa. Fuente: Health Canada, Natural Resources Canadá. 2008. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/radon_brochure/index-eng.php

1.2.3 Factores que influyen en las concentraciones de radón

El suelo influye en la cantidad de gas que es liberado al ambiente y puede determinar los niveles de radón en las casas. Las propiedades más importantes son su permeabilidad y humedad. La permeabilidad indica la mayor o menor dificultad que los suelos presentan al paso de fluidos, depende de características como textura, estructura, porosidad y tamaño de grano (Selinus et al., 2005).

Siendo un gas, la permeabilidad es muy importante para determinar la cantidad de radón que escapa a la atmósfera, las rocas fracturadas y los suelos muy porosos permiten que el radón, ascienda a la superficie con mayor facilidad.

Un suelo arcilloso contiene concentraciones de uranio apreciables, pero su carácter impermeable disminuye la cantidad de radón que exhala, en cambio un terreno calcáreo con un contenido bajo de uranio, puede emanar mayores cantidades de gas si existen fisuras o fracturas en la roca de un sitio determinado (Quindós, 1995).

El estado del tiempo es otro de los factores que puede determinar los niveles en los edificios y hogares. La temperatura, la presión y la velocidad del viento son los principales elementos meteorológicos que modifican los niveles de ^{222}Rn en la atmósfera cercana al suelo. Una disminución en la presión atmosférica provoca un incremento en la exhalación de ^{222}Rn , y por consecuencia un aumento en la concentración de este gas en sitios cerrados (Thomas y Wayne, 1978). Una vez que el radón alcanza una altura de aproximadamente 1 metro por encima de la superficie del suelo, su dispersión se determina principalmente por la estabilidad atmosférica (Cohen, 1979).

Los fenómenos meteorológicos, los cambios diarios o a lo largo del año pueden tanto mejorar como inhibir el transporte de radón del suelo a otros medios, puede ser liberado por evaporación del agua de la nieve derretida, o por el contrario puede mantener atrapado el gas en un suelo congelado; el gradiente vertical de temperatura en la atmósfera puede crear ligeras condiciones de vacío que favorecen la expulsión de radón del suelo así como disminuirlo cuando la temperatura aumenta (Fujiyoshi et al., 2000; Bunzl et al., 1998).

Las inversiones térmicas en las primeras horas de la mañana producen una atmósfera estable la cual mantiene al radón en el suelo o el agua. La radiación solar rompe la inversión, lo que lleva a la dispersión ascendente del radón, que se invierte nuevamente cuando se enfría el suelo al atardecer (EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

1.2.3.1 Concentración de radón en casas y edificios

Normalmente la mayor contribución de radón proviene del suelo, por lo que las secciones inferiores de cualquier construcción presentan una exposición más alta, y por consecuencia concentraciones mayores que los niveles superiores de una casa o edificio. El gas puede trasladarse de una habitación a otra y ascender a los pisos superiores por medio de ventanas, escaleras, fisuras de las paredes, materiales porosos, canales o conductos de una casa (Quindós, 1995).



Fig. 1.4 Principales fuentes y formas de transporte de radón en una casa, Fuente: *El radón un gas de origen natural en su casa*, Quindós 1995.

El movimiento del gas inicia por pequeñas diferencias de presión entre las habitaciones con el exterior, esto se debe principalmente a las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior y del efecto del viento (Nero, 1987; Planinic et al., 1994). El transporte de radón en el aire interior está en función de la tasa de ventilación de las habitaciones. Los edificios que cuentan con sistemas de calefacción y de aire acondicionado, no contribuyen con una buena ventilación, ya que estos sistemas operan utilizando el mismo aire del edificio. Bajo condiciones normales la concentración de radón en interiores aumenta en proporción directa a la disminución de la ventilación de un lugar; la circulación del aire dentro de un sitio también influye en las variaciones de los índices de radiación (OMS, 1983; EPA, Agency for Toxic Substances, Toxicological profile for radon, 2012).

1.3 Antecedentes

Las investigaciones y trabajos relacionados con el estudio de radón son muy amplios, la detección de radón se ha utilizado para diversos fines, como el monitoreo de actividad volcánica, localización de fallas y fracturas, y se han hecho mediciones en algunos lugares que lo colocan como un precursor sísmico. El ^{222}Rn se ha usado también en la prospección de yacimientos de uranio, así como en investigaciones hidrogeológicas y para identificar el riesgo a desarrollar cáncer del pulmón (García – Betancourt, 2004; Ayala – Estrada, 2009).

1.3.1 Trabajos previos

Cárdenas et al, (2004), utilizaron un método pasivo para la detección de radón (LR-115) en el Centro Nuclear de México, donde obtuvieron un promedio de $2,640 \text{ Bq/m}^3$, el valor más alto fue de $5,250$ y el mínimo de 540 Bq/m^3 , su objetivo era determinar la distribución espacial del radón en el suelo y el agua.

En 1999 Espinosa et al, llevaron a cabo un estudio para obtener las concentraciones de radón promedio en algunas ciudades de más de 100,000 habitantes del centro, bajío, occidente y norte de México usando CR – 39 como material detector. Este estudio tomó en cuenta además del suelo, los materiales y tipo de construcción como factores que influyen en las concentraciones de ^{222}Rn .

De acuerdo con Segovia et al (2007), se han hecho estudios de radón en más de 150 lugares de la república, donde se ha utilizado CR – 39 y LR – 115 principalmente para medir las concentraciones de radón dentro de las casas.

En cuanto a estudios internacionales Jabbar et al, (2014), llevaron a cabo mediciones de radón en el suelo en los alrededores de una planta de fertilizantes en Basrah Iraq, en el que se usó tanto CR- 39 como el dispositivo RAD7 para obtener los niveles de ^{222}Rn y se encontraron promedio de 112 y 115 Bq/m^3 respectivamente.

En Benghazi, Libia, A. F. Saad et al, midió en 2008 las concentraciones de radón producidas por los materiales de construcción de la Universidad de

Garyounis, el estudio se realizó en base a un método pasivo en el que se usó CR – 39, los valores obtenidos en ese estudio mostraron una variación de entre 107 y 277 Bq/m³, con una media de 172 Bq/m³.

En el 2002, Barros – Dios et al, analizaron los niveles de radón en Santiago de Compostela, España con la finalidad de determinar la relación que existe entre, la exposición al radón residencial con el riesgo a padecer cáncer de pulmón. Se examinaron las condiciones y forma de vida de un grupo de personas sanas y otro de personas que padecían cáncer.

Ayala – Estrada (2009) realizó un estudio de ²²²Rn en el área de La Muralla y la Zona de Pénjamo – Abasolo, en el estado de Guanajuato. Llevó a cabo pruebas de radón en el suelo y el agua, utilizando un método pasivo y uno activo, CR-39 y el equipo RAD7 respectivamente, con el objetivo de obtener las concentraciones en esa región e implementar técnicas de medición de en ambientes hidrogeológicos.

En 2004, García Betancourt llevó a cabo un estudio con la finalidad de determinar las concentraciones de radón en interiores de todos los municipios del estado de Zacatecas, las pruebas fueron hechas dentro de casas habitación y algunas unidades médicas. En general se obtuvo una media de 55.28 Bq/m³, con un máximo de 85.96 Bq/m³ y un mínimo de 33.83Bq/m³. Estos valores se encuentran por debajo de la norma de la EPA que es de 148 Bq/m³.

Recientemente, Díaz – Sandierna (2015) realizó un estudio especial sobre la falla Mc Donald's – Morales de la ciudad de San Luis Potosí. En este estudio se midieron y detectaron anomalías de ²²²Rn en relación con la tectónica del valle, las concentraciones fueron determinadas con ayuda del monitor continuo RAD7. Los resultados de este estudio arrojaron valores de radón muy elevados en sitios fuera de la falla y valores muy bajos sobre la traza de la misma, de esta manera logró localizarla debido a que los bajos valores indicaban permeabilidad del suelo y los valores altos indicaban un encapsulamiento del gas y así como actividad tectónica de profundidad en el subsuelo.

1.4 Efectos nocivos en la Salud

El único efecto de salud reconocido hasta el momento por exposición a radón se relaciona con el incremento en el desarrollo de cáncer pulmonar (Health Canada, 2014). Cada año el cáncer de pulmón ocasiona la muerte de miles de personas, el radón junto con el fumar y el humo del tabaco son sus principales causas. Aunque existen tratamientos, las probabilidades de sobrevivir a esta enfermedad son muy bajas, sólo entre el 11 y 15 % de los pacientes afectados con este tipo de cáncer logran vivir más de 5 años desde el momento en que fueron diagnosticados.

De acuerdo con estimaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el radón es la primera causa de cáncer pulmonar entre los no fumadores y la segunda causa de este tipo de cáncer en general.

Anualmente el radón es responsable de alrededor de 21,000 muertes de cáncer pulmonar en Estados Unidos y aproximadamente, 2,900 de estas muertes ocurren entre personas que nunca han fumado. Según la Organización mundial de la Salud (OMS) el 15% de cáncer pulmonar en todo el mundo es ocasionado por el radón (EPA, Acerca del Radón: Riesgos para la Salud).

El problema por la exposición al radón radica en que junto con sus descendientes se desintegra emitiendo partículas alfa, el tipo de radiación más peligrosa una vez que ha entrado al cuerpo humano.

Debido al bajo nivel de penetración de las partículas alfa, las principales vías por las que el cuerpo recibe este tipo de radiación son por ingerir elementos que contengan elementos radioactivos, así como por la inhalación de gas radón y sus descendientes, (^{218}Po y ^{214}Po).

Las partículas alfa descargan una gran cantidad de energía sobre volúmenes muy pequeños de tejido que pueden ocasionar alteraciones en el ADN de las células de los pulmones y al reproducirse conllevan al desarrollo de cáncer.

El radón y su progenie no son capaces de dañar otros órganos debido a que la radiación alfa viaja distancias extremadamente cortas dentro del cuerpo que no van más allá del tracto respiratorio (Selinus et al., 2005; BEIR VI, 1999).

No todas las personas expuestas al radón llegan a desarrollar cáncer, el tiempo entre la exposición y la aparición de la enfermedad generalmente tarda muchos años. A diferencia de fumar, la exposición ocasional al radón no presenta síntomas como tos o dolores de cabeza.

El riesgo a desarrollar cáncer de pulmón derivado de la exposición a radón depende de la concentración en el aire que se respira y el tiempo al que se está expuesto, las personas que fuman y habitan en lugares donde existen altos niveles de radón tienen un riesgo mucho mayor de contraer cáncer pulmonar (Health Canada, 2014).

Capítulo 2

Zona de Estudio

2.1 Información Sociodemográfica

El área de estudio cubre a la mancha urbana de la ciudad de San Luis Potosí, se localiza en las coordenadas: 22°09'04" de latitud norte y 100°58'34" de longitud oeste, a una altitud media sobre el nivel del mar de 1860 m, para el año 2010 contaba con una población de 977,787 habitantes.

El municipio de San Luis Potosí junto con Soledad de Graciano Sánchez conforman la décima ciudad más poblada de país, de acuerdo con las cifras del Censo de Población y Vivienda 2010, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) tiene una superficie de 1787.7 Km² y cuenta con una población de: 1'040,443 habitantes. (San Luis Potosí: 772, 604 h, Soledad de Graciano Sánchez: 267, 839 h) Por lo que presenta una densidad de población de 582 hab/Km². Durante el periodo 2000 – 2010 presentó un crecimiento medio anual de 2%.

En la tabla 2.1 y así como en la figura 2.1 se puede apreciar el crecimiento de la población de las últimas 2 décadas en los municipios que conforman la zona metropolitana.

Tabla 2.1 Habitantes en el Área Metropolitana de SLP, Periodo 1990 – 2010, elaboración propia en base a ITER 2010, INEGI 2011.

Año	San Luis Municipio	San Luis Ciudad	Soledad Municipio	Soledad Ciudad	Área Metropolitana	Zona Conurbada
1990	525,733	489,238	132,979	123,943	658,712	613,181
1995	625,466	586,585	156,498	147,188	781,964	733,773
2000	670,532	629,208	180,296	169,574	850,828	798,782
2005	730,950	685,934	226,803	215,968	957,753	901,902
2010	772,604	722,772	267,839	255,015	1,040,443	977,787

Crecimiento de la Población en el Área Metropolitana de SLP

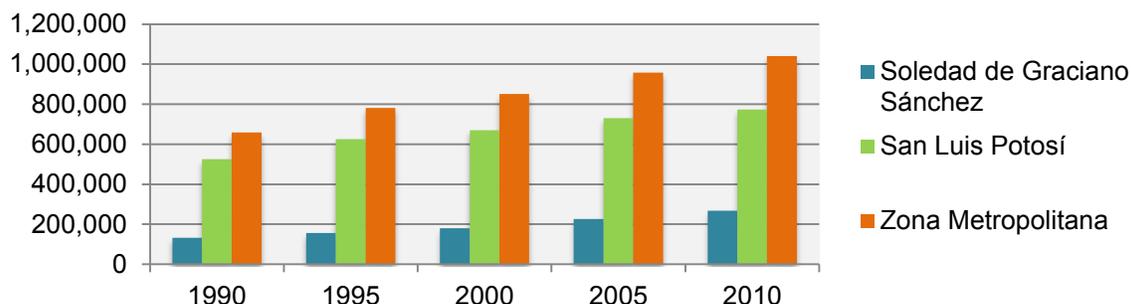


Fig. 2.1 Crecimiento de la Población en el Área Metropolitana de SLP. Elaboración propia en base a ITER 2010, INEGI 2011.

Las pirámides de población de los municipios de la zona de estudio pueden describirse como estables, hay 93 hombres por cada 100 mujeres y el 50% de los habitantes tiene menos de 26 años. Dentro de la ZMSLP, existen 266,486 viviendas habitadas, el 99% cuenta con energía eléctrica, 94% con servicio de agua potable y 98% con drenaje y servicio sanitario. Existe un promedio de 4 habitantes por cada vivienda. (Figs. 2.3 y 2.4)

La ciudad de San Luis Potosí presenta altas densidades de población en diversas zonas, principalmente en el norte del área urbana, así como al oriente, en un amplio sector del municipio de Soledad, además del sur y sureste. Esto se explica porque la mayor parte de estas zonas albergan fraccionamientos de interés social, los cuales se caracterizan por sus altas densidades poblacionales.

En contraste la zona de Las Lomas al poniente de la mancha urbana cuenta con las densidades de población medias y bajas. El sector central de la ciudad tiene densidades de población media y media baja. Sin embargo, se puede considerar como un sector de alta densidad debido a que durante el día concentra una gran cantidad de personas que acuden al centro por trabajo, educación, comercio y todo tipo de servicios. (Fig. 2.2)

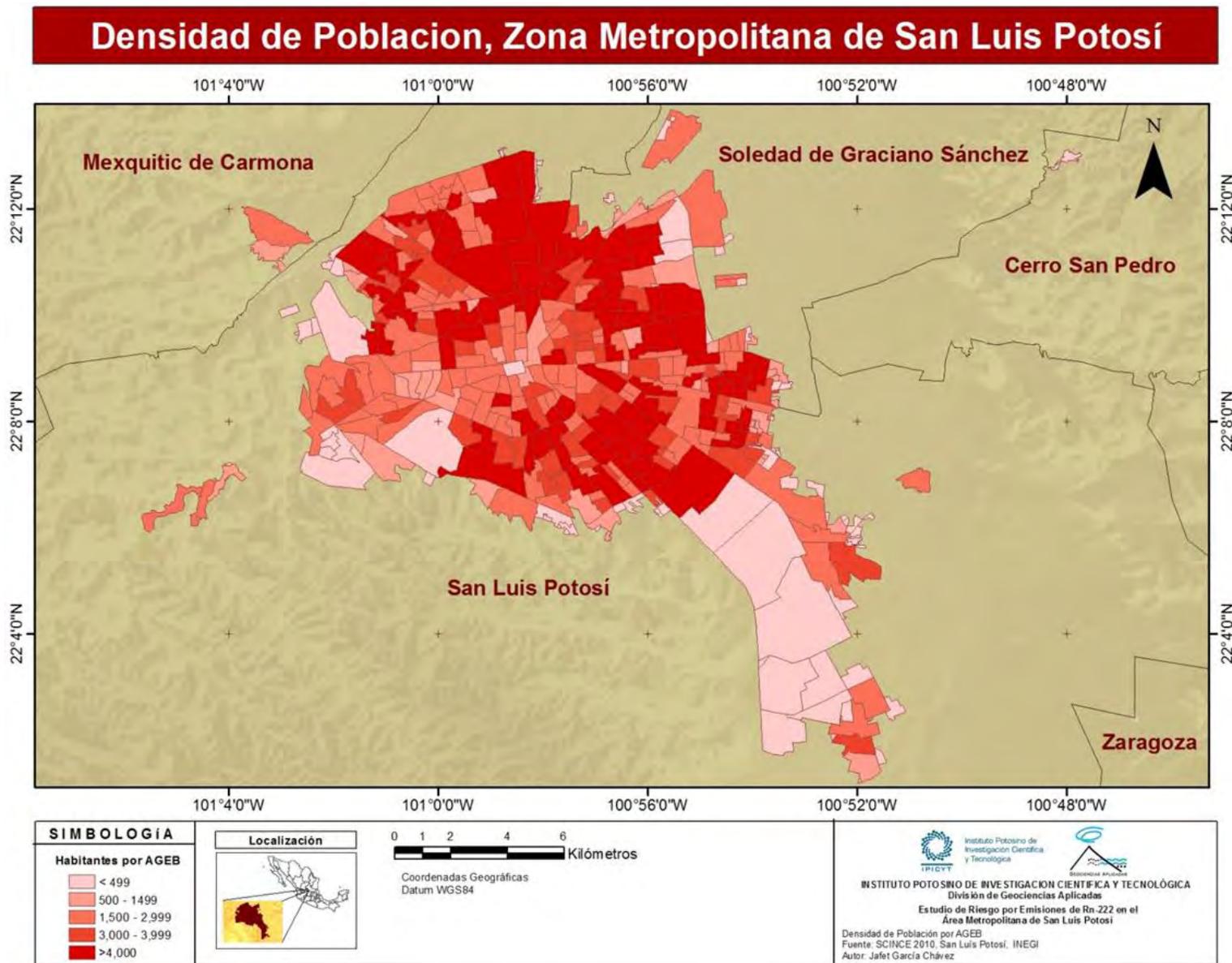
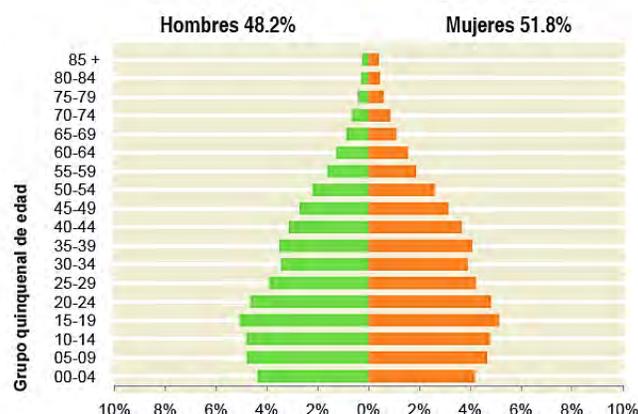


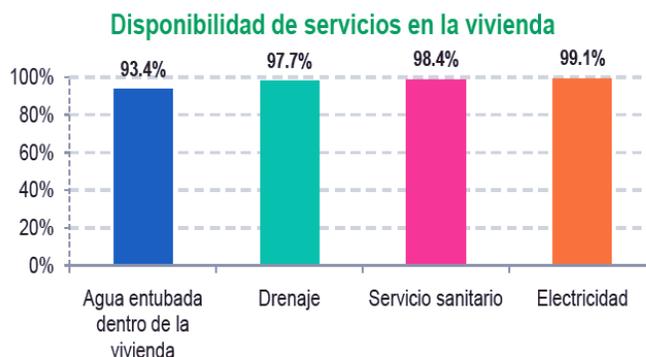
Fig 2.2 Densidad de Población por AGE de la Zona Metropolitana de SLP. Elaboración propia en base a SCINCE 2010, INEGI 2011.

Características Sociodemográficas del Municipio de San Luis Potosí

Población total:	772 604
Representa el 29.9% de la población de la entidad.	
Relación hombres-mujeres:	92.9
Hay 93 hombres por cada 100 mujeres.	
Edad mediana:	26
La mitad de la población tiene 26 años o menos.	
Razón de dependencia por edad:	50.3
Por cada 100 personas en edad productiva (15 a 64 años) hay 50 en edad de dependencia (menores de 15 años o mayores de 64 años).	



Total de viviendas particulares habitadas:	199 277
Promedio de ocupantes por vivienda*:	3.9
*Se excluyen las viviendas sin información de ocupantes y su población estimada.	
Viviendas con piso de tierra:	1.9%
De cada 100 viviendas, 2 tienen piso de tierra.	



Población de 12 años y más	Total	Hombres	Mujeres
Económicamente activa:	55.4%	70.9%	41.4%
Ocupada:	94.3%	93.0%	96.2%
No ocupada:	5.7%	7.0%	3.8%
No económicamente activa:	44.3%	28.7%	58.3%
Condición de actividad no especificada:	0.3%	0.4%	0.3%

De cada 100 personas de 12 años y más, 55 participan en las actividades económicas; de cada 100 de estas personas, 94 tienen alguna ocupación.

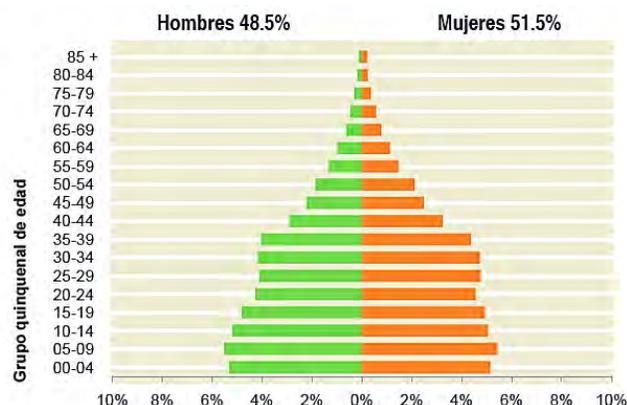
De cada 100 personas de 12 años y más, 44 no participan en las actividades económicas.



Fig. 2.3 Características Sociodemográficas del Municipio de San Luis Potosí. Panorama Sociodemográfico de San Luis Potosí, Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI, 2011

Características Sociodemográficas del Municipio de Soledad de Graciano Sánchez

Población total: Representa el 10.4% de la población de la entidad.	267 839
Relación hombres-mujeres: Hay 94 hombres por cada 100 mujeres.	94.1
Edad mediana: La mitad de la población tiene 24 años o menos.	24
Razón de dependencia por edad: Por cada 100 personas en edad productiva (15 a 64 años) hay 55 en edad de dependencia (menores de 15 años o mayores de 64 años).	55.1



Total de viviendas particulares habitadas:	67 209
Promedio de ocupantes por vivienda*: <small>*Se excluyen las viviendas sin información de ocupantes y su población estimada.</small>	4.0
Viviendas con piso de tierra: De cada 100 viviendas, 2 tienen piso de tierra.	1.8%



Población de 12 años y más	Total	Hombres	Mujeres
Económicamente activa:	56.5%	74.3%	40.3%
Ocupada:	94.0%	92.9%	96.0%
No ocupada:	6.0%	7.1%	4.0%
De cada 100 personas de 12 años y más, 57 participan en las actividades económicas; de cada 100 de estas personas, 94 tienen alguna ocupación.			
No económicamente activa:	43.2%	25.4%	59.5%
De cada 100 personas de 12 años y más, 43 no participan en las actividades económicas.			
Condición de actividad no especificada:	0.3%	0.3%	0.2%



Fig. 2.4 Características Sociodemográficas del Municipio de Soledad de Graciano Sánchez. Panorama Sociodemográfico de San Luis Potosí, Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI, 2011

2.2 Geología

Los datos geológicos que se presentan están basados en la información descrita en el Estudio Geológico – Geofísico para la evaluación de hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana de San Luis Potosí – Soledad de Graciano Sánchez (Arzate et al., 2006) así como por la información obtenida del Estudio Geológico del Predio Ciudad Satélite (Ramos et al., 2006).

El área de estudio se encuentra ubicada en lo que regionalmente se conoce como Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP), en el extremo norte de una fosa tectónica local conocida como Graben de Villa de Reyes. En un valle delimitado por las Sierras de Álvarez y de San Miguelito (Arzate et al. 2006).

Las unidades más antiguas corresponden a la formación La Peña del Aptiano (Cretácico Inferior) y a las formaciones Indidura y Cuesta del Cura Turoniano (Cretácico Superior). Esta unidad está ampliamente expuesta y en algunas partes de la Sierra de San Miguelito; se localiza a profundidades de 700 a 1,200 m. La unidad está compuesta por calizas arcillosas. Sobre esta unidad sedimentaria se encuentra ubicada la Formación Cenicera cuya edad va del Paleoceno – Eoceno (Terciario Inferior). Se encuentra expuestas al sur del Valle de San Luis Potosí. La formación Cenicera se localiza a profundidades de 550 a 1,000 m., se constituye por conglomerados, areniscas, limos y arcillas, poco consolidados (Ramos et al. 2006).

Encima de la Formación Cenicera, se localiza la Latita Portezuelo del Oligoceno Tardío. Aflora al oriente en los lomeríos próximos a la Sierra de Álvarez, se localiza a profundidades de 100 a 650 m; está constituido por latita, tiene un espesor de 450 m aproximadamente. Cubriendo la Latita Portezuelo se encuentran depósitos de abanicos aluviales compuestos por caliza, pedernal, y rocas volcánicas (latitas, basaltos y riolitas) (Ramos et al. 2006).

El Valle de San Luis Potosí, representa una depresión que contiene una columna considerable de rellenos aluviales compuestos por productos volcánicos retrabajados y en general sedimentos continentales con espesores que oscilan entre los 50 y 500 m hasta el piso rocoso; el cual está constituido comúnmente por riolitas, que son rocas volcánicas extrusivas de composición ácida y de grano muy fino, de edad del oligoceno, de alrededor de 26 a 31 millones de años (Aguirre-Hernández, 1992 y Martínez-Ruiz 1997).

La granulometría sedimentaria del periodo cuaternario que ha rellenado el valle está compuesta por fracciones que van desde conglomerados y brechas, arenas gruesas, medias y finas, hasta sedimentos en fracciones de limos y arcillas. Los conglomerados y brechas se encuentran principalmente hacia los bordes oriental y occidental del valle, influenciados por la cercanía de las Sierras de Álvarez y de San Miguelito. Los primeros conglomerados se encuentran parcialmente cementados y llegan a tener entre 20 y 100 m. de espesor. (Arzate et al. 2006).

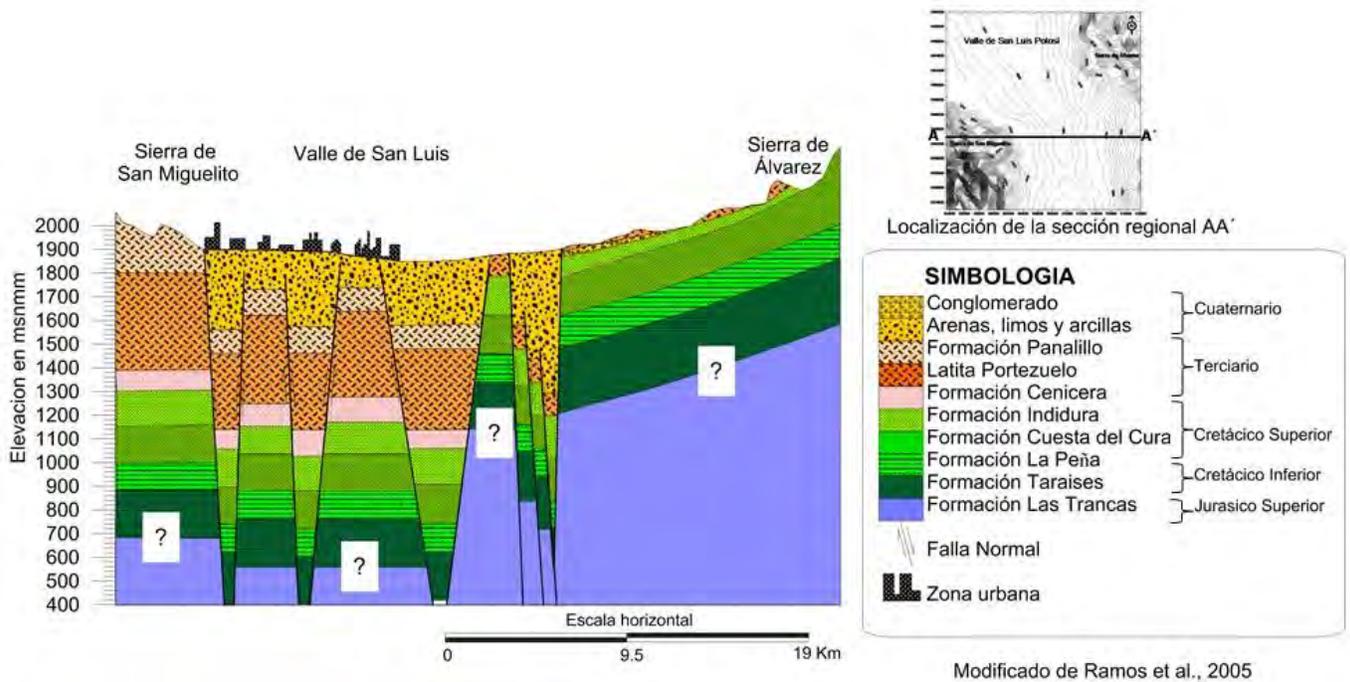


Fig. 2.5 La columna estratigráfica del Valle de San Luis Potosí. Ramos et al., 2005.

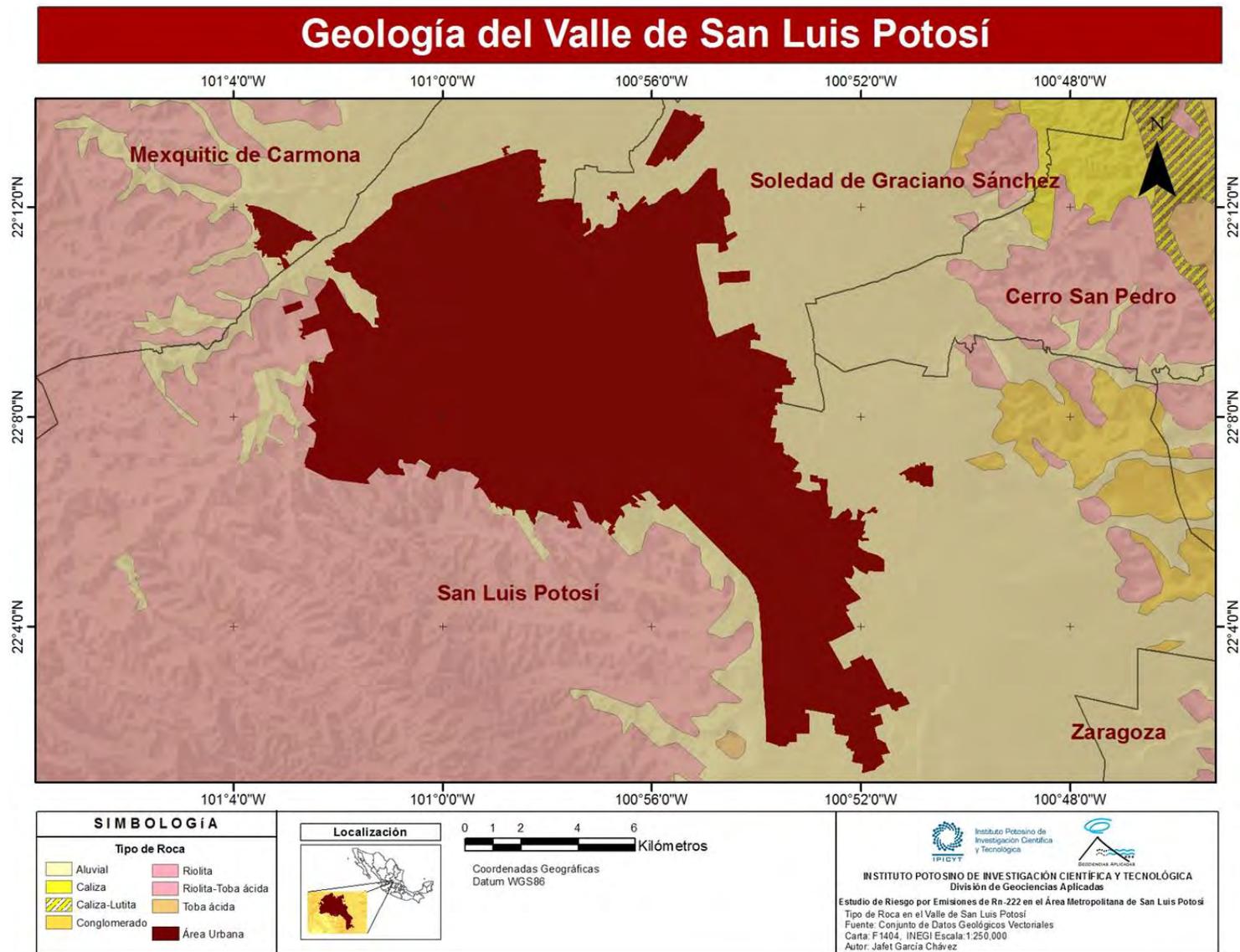


Fig. 2.6 Tipo de Roca en el Valle de San Luis Potosí, elaboración propia en base a la Carta Geológica F1404, INEGI.

2.3 Edafología

El tipo de suelo es un factor importante en el estudio del radón, ya que depende de características geológicas, porosidad y la profundidad de la roca. Los valores de concentración se correlacionan con el tipo de suelo predominante (García – Betancourt et al., 2007).

La descripción edafológica presentada por CONABIO describe el área de estudio con 4 diferentes tipos de suelo, Regosol calcárico, Xerosol háplico, Planosol Mólico y Feozem háplico.

La clasificación de suelo que se describe en este estudio está basada en la Base Referencial Mundial de Suelo de la FAO (2007), así como en la Guía para la interpretación de Cartografía, Sección de Edafología de INEGI (2004).

La sección que cubre el norte y parte del centro y oriente de la mancha urbana de San Luis se compone de Xerosol háplico, este suelo es característico de las zonas áridas y semiáridas del centro y norte del país. Su vegetación natural es de matorral y pastizal, tiene por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica; bajo esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, aunque también puede ser muy parecido a la capa superficial.

En algunas ocasiones presentan manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza a cierta profundidad. Su rendimiento agrícola está en función de la disponibilidad de agua para riego, aunque frecuentemente tienen uso pecuario. Son poco susceptibles a la erosión, excepto en zonas de laderas o si se encuentran directamente sobre caliche o tepetate a escasa profundidad.

El Feozem háplico cubre la sección centro-sur así como una fracción del sureste de la ciudad este suelo se puede presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Se

caracteriza por tener una capa superficial oscura suave, rica en materia orgánica y nutrientes.

Los Feozems tienen una profundidad variable; los más profundos se localizan por lo general en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal de granos u hortalizas. Los Feozems menos profundos situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen bajo rendimiento agrícola y se erosionan con facilidad, pero pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería.

La zona de Las Lomas al poniente de San Luis así como la mayor parte de la zona industrial localizada sureste de la ciudad, están clasificadas como Regosol Calcárico. Este tipo de suelo se compone de material suelto que cubre la roca, se ubica en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí; por lo general son de color claro y pobres en materia orgánica con mucho parecido al material parental. Están asociados con afloramientos de roca o tepetate, son someros de fertilidad variable y su productividad se asocia con la profundidad y pedregosidad.

El Planosol Mólico, no forma parte de la mancha urbana, pero se encuentra hacia el oriente dentro del área de estudio. Los planosoles mólicos cuentan con una capa superficial suave, oscura, fértil y rica en materia orgánica. Son suelos desarrollados en relieves planos que se inundan en alguna parte del año. Son medianamente profundos entre 50 y 100 cm y se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos. Su vegetación natural es de pastizal o matorral. Se caracterizan por presentar debajo de la capa más superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas que lo cubren. Por debajo de esta capa se presenta un subsuelo muy arcilloso, o con roca o tepetate, todos impermeables. Son suelos con rendimientos moderados en la ganadería; son muy susceptibles a la erosión sobre todo en las capas superficiales.

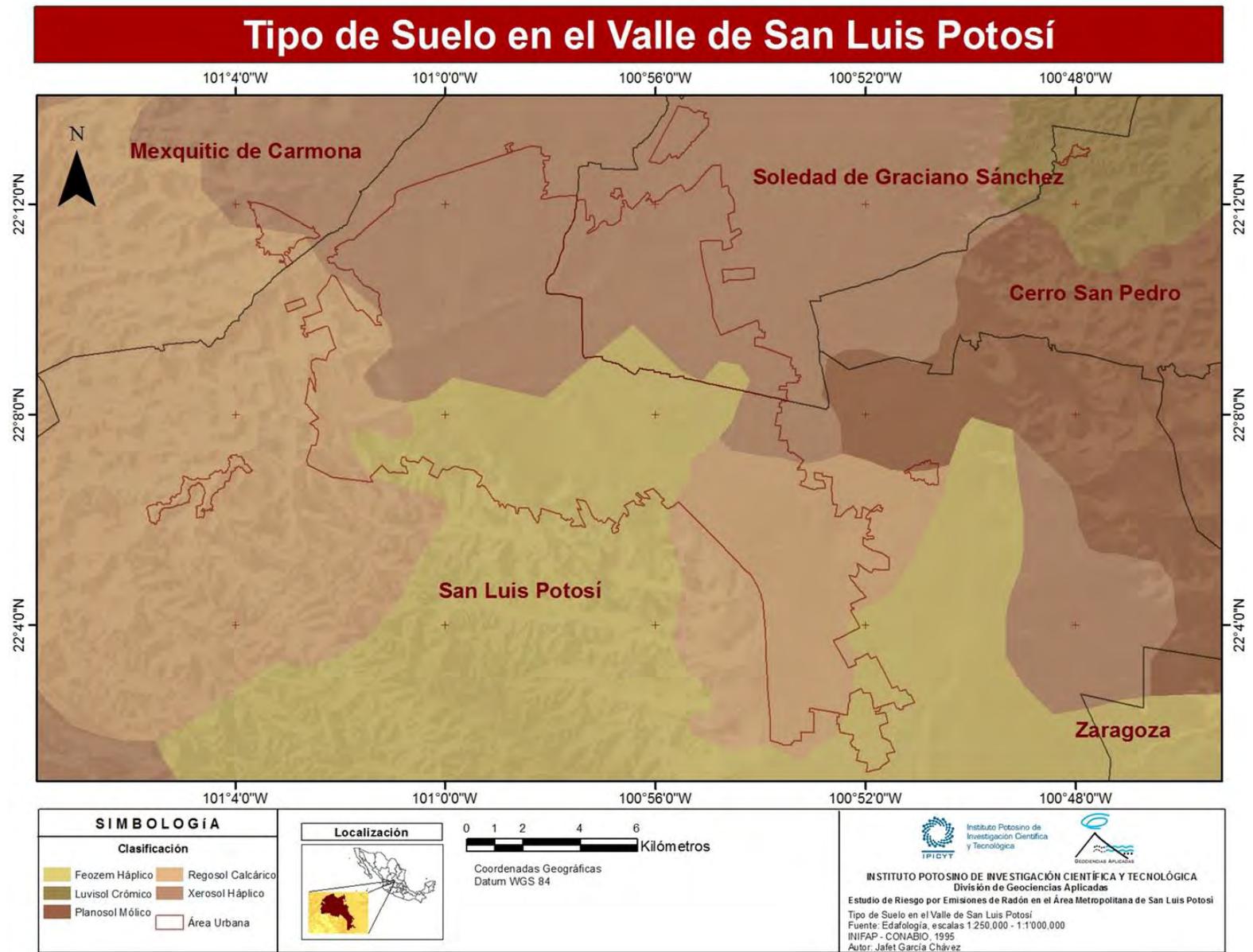


Fig. 2.7 Tipo de Suelo en el Valle de San Luis Potosí, elaboración propia en base a la información edafológica de INIFAP - CONABIO 1996.

2.4 Climatología

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por E. García, la zona de valle del área de estudio se clasifica como BSokw, es decir árido templado, con una temperatura media anual entre 12° C y 18°C, la temperatura del mes más frío oscila entre los -3°C y 18°C. Aunque la mayor parte de las lluvias se presentan en verano, durante el invierno se tienen precipitaciones menores, estas representan entre el 5 y el 10.2% de la precipitación total.

La zona de la montaña al poniente de la ciudad se clasifica como BS1kw, Semiarido, templado, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío se encuentra entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente es menor de 22°C. Al igual que la zona de valle la mayor parte de las lluvias ocurre durante el verano y en menor proporción en invierno. La precipitación media anual se encuentra entre un rango de 300 mm. a 400 mm (García E. – CONABIO, 1998).

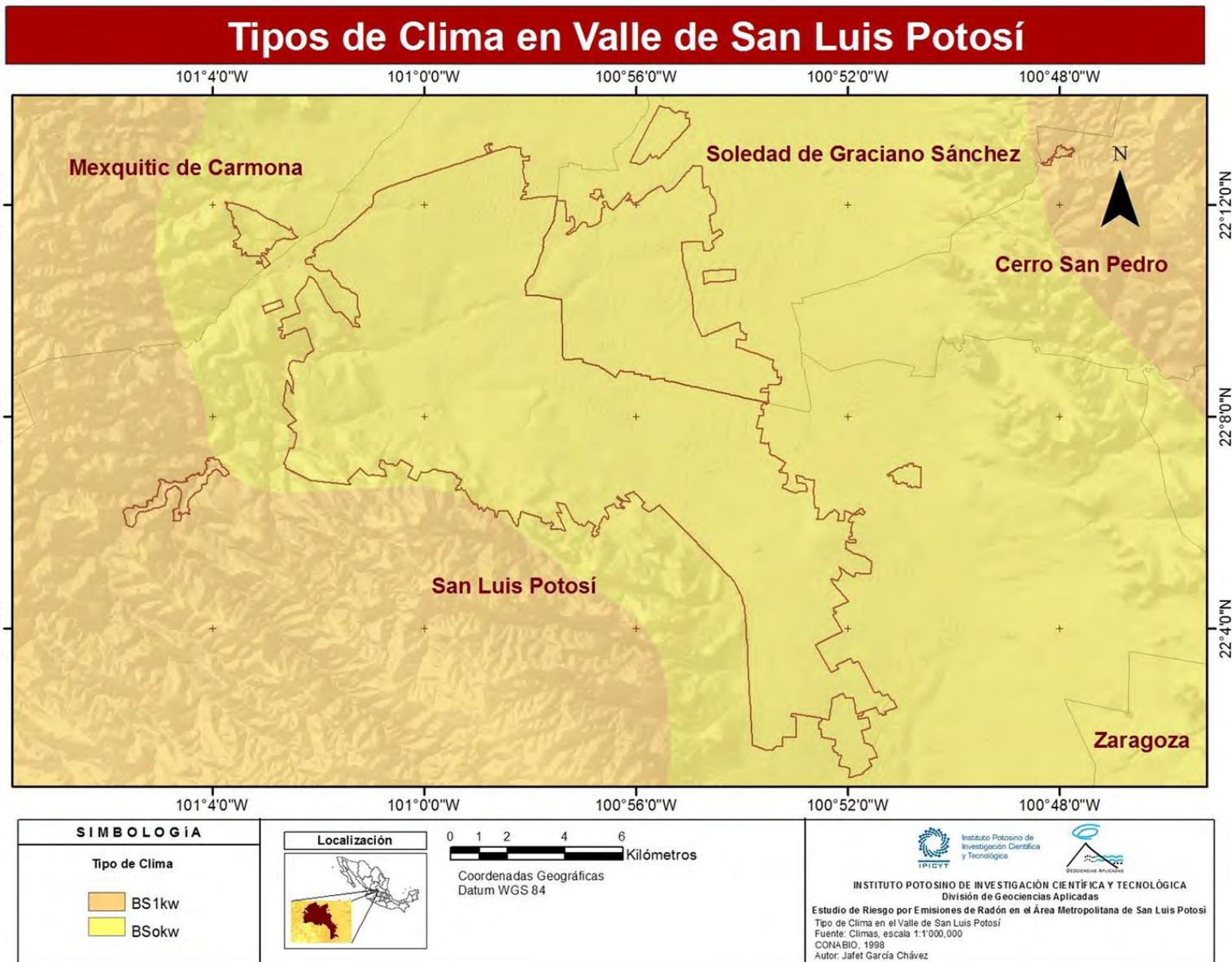


Fig. 2.8 Tipo de Suelo en el Valle de San Luis Potosí, elaboración propia en base a la información edafológica de INIFAP - CONABIO 1999.

Capítulo 3

Metodología

3.1 Sistemas de Medición

El radón carece de sabor, olor y color, que lo hace imperceptible al ser humano, pero tiene la característica de ser el único gas natural que emite partículas alfa, por lo que la forma de medir sus concentraciones es a través de estas partículas. Existen diferentes métodos y dispositivos para hacerlo y se dividen en 2 categorías: activos y pasivos. (García, 2004).

Un dispositivo activo requiere de alguna fuente de voltaje para operar, como los monitores continuos, cámaras de ionización, o espectrómetros de partículas alfa, estos métodos ofrecen información rápida en periodos cortos de tiempo; los pasivos no necesitan de fuentes de energía pero se aplican a periodos más largos, consisten en dispositivos que acumulan conteos y posteriormente son analizados en un laboratorio. Entre los métodos pasivos se encuentran latas de carbón activado, y los detectores solidos de trazas nucleares (Selinus et al., 2005; García, 2004; Jamil et al., 1997; Budd et al., 1998).

Para determinar las concentraciones de gas radón en el suelo y sitios cerrados del área urbana de San Luis Potosí, se aplicó tanto un método activo como uno pasivo. Esto con la finalidad de hacer una correlación entre ambos y obtener resultados más precisos. Para el método activo se utilizó el equipo de monitoreo continuo RAD7. La toma de muestras del método pasivo se llevó a cabo por medio de detectores solidos de trazas nucleares utilizando el polímero CR-39 como material detector.

Las primeras mediciones se llevaron a cabo durante los meses de invierno (Diciembre – Febrero) ya que es el periodo del año en donde existe una mayor exposición al gas, debido al mayor flujo de radón del suelo hacia la superficie y a la hermeticidad de casas y edificios que se genera por las condiciones frías de la estación. La segunda fase del muestreo se llevó a cabo en el mes de Junio.

A continuación se presentan las características de cada uno de los métodos y las técnicas de medición que fueron utilizadas en el estudio.

3.2 Dispositivo RAD7

La información descrita acerca del funcionamiento del equipo de medición utilizado (RAD7) está basada en el manual de operación de DurrIDGE Company 2012.

Existen diversas clases de monitores continuos de radón, la mayoría de ellos diseñados para detectar radiación alfa, estos pueden ser de 3 tipos: Celdas de centelleo, Cámaras de iones y Detectores alfa de estado sólido.

El RAD7 DURRIDGE utiliza un detector alfa de estado sólido hecho de silicio, un material semiconductor que convierte la radiación alfa directamente en una señal eléctrica. El RAD7 tiene la capacidad de determinar electrónicamente la energía de cada partícula alfa, lo que hace posible saber exactamente que isotopo, (^{218}Po , ^{214}Po) produjo la radiación.



Fig. 3.1 Equipo de medición RAD7.

Los instrumentos que miden los productos generados por la desintegración del radón en el aire se llaman monitores de “nivel de actividad”. Los monitores de nivel de actividad toman una muestra de aire a través de un filtro fino y luego analizan el filtro buscando la radiactividad. La progenie del radón son metales y se adhieren al filtro. Son contabilizados por un instrumento de nivel de actividad. El ^{222}Rn , un gas inerte, atraviesa el filtro, por lo tanto no se contabiliza por dicho instrumento, es decir que un instrumento de nivel de actividad mide la concentración de la progenie del radón pero no la del radón como tal.

El RAD7 mide la concentración del gas radón. Los descendientes del radón no tienen ningún efecto sobre esta medición, El RAD7 extrae las muestras de aire mediante un filtro fino de entrada, que excluye a los descendientes, y deposita las muestras en una cámara para su análisis. El radón se desintegra en la cámara del RAD7 produciendo una progenie emisora de partículas detectables particularmente los isotopos de polonio. Aunque el RAD7 detecta internamente la radiación de la progenie, lo único que mide es la concentración del gas radón.

La celda interna para muestras del RAD7 es un hemisferio de 0.7 litros, recubierta internamente con un detector eléctrico. En el centro del hemisferio hay un detector de partículas alfa de silicio, aplanado, de iones implantados, de estado sólido. El circuito de alta tensión carga el conductor interno con un potencial de 2,000 a 2,500 V en relación con el detector, creando un campo eléctrico en todo el volumen de la celda. El campo eléctrico impulsa a las partículas cargadas positivamente a ubicarse arriba del detector.

Un núcleo de ^{222}Rn que se desintegra dentro de la celda deja su núcleo transformado (^{218}Po) como un ion cargado positivamente. El campo eléctrico que existe en el interior de la celda impulsa este ion cargado positivamente hacia el detector hacia el cual se adhiere. Cuando el núcleo de ^{218}Po se desintegra sobre la superficie activa del detector, su partícula alfa tiene la probabilidad del 50% de entrar en el detector y de producir una señal eléctrica con una fuerza proporcional a la de la energía de la partícula alfa. Las desintegraciones posteriores del mismo núcleo producen partículas beta que no son detectadas, o partículas alfa de

energía diferente. Los diferentes isótopos tienen diferentes energías alfa y producen diferentes señales de fuerza en el detector; el RAD 7 amplifica, filtra y ordena las señales de acuerdo con su fuerza.

El espectro del RAD7 es una escala de energías alfa, entre 0 y 10 MeV. Cuando los descendientes del radón depositados en la superficie del detector se desintegran, emiten partículas alfa con una energía característica (entre 6 y 9 MeV) directamente dentro del detector de estado sólido, el cual produce una señal eléctrica y los circuitos del sistema amplían y acondicionan la señal para convertirla en un formato digital que determina la concentración de ^{222}Rn .

3.2.1 Técnica de medición mediante RAD7

Con el equipo RAD7 se tomaron muestras de gas radón en el suelo en más de 200 puntos del área urbana de San Luis Potosí y sus alrededores. Para evitar en lo posible el escape de gas, se abrió un pequeño orificio de ± 30 cm de profundidad con una varilla metálica de un diámetro similar al de la manguera de absorción del dispositivo, ésta se introdujo y se tapó la superficie con tierra nuevamente.



Fig. 3.2 Toma de muestras en suelo y roca con el equipo RAD7.

En cada punto de control se llevaron a cabo 2 mediciones de 15 minutos cada una, el aparato indica el nivel de concentración en Bq/m^3 de las tomas realizadas, ambas tomas se promediaron para obtener el dato final de la muestra para cada sitio.

La humedad es un factor que reduce la sensibilidad del RAD7, pero el equipo tiene la ventaja de contar con un detector para ello. Así al momento de realizar una medición, el dispositivo guarda el dato de porcentaje de humedad existente en el sitio y posteriormente con el software CAPTURE se puede realizar una corrección automática de los datos, haciendo que las lecturas regresen a su valor en condiciones secas (Durrige Company, 2010).

3.3 Detectores solidos de trazas nucleares

Cuando una partícula cargada atraviesa un sólido que no es conductor eléctrico produce un rastro estrecho debido al daño en el material. A este daño se le denomina traza. En un polímero la partícula cargada ioniza y excita las moléculas rompiendo las cadenas de sus átomos; las cadenas rotas forman nuevas especies que son químicamente reactivas. Una vez que la radiación ionizante deja una huella a su paso por el interior del sólido, la traza que se forma puede ampliarse a través de un grabado químico (García - Betancourt, 2004).

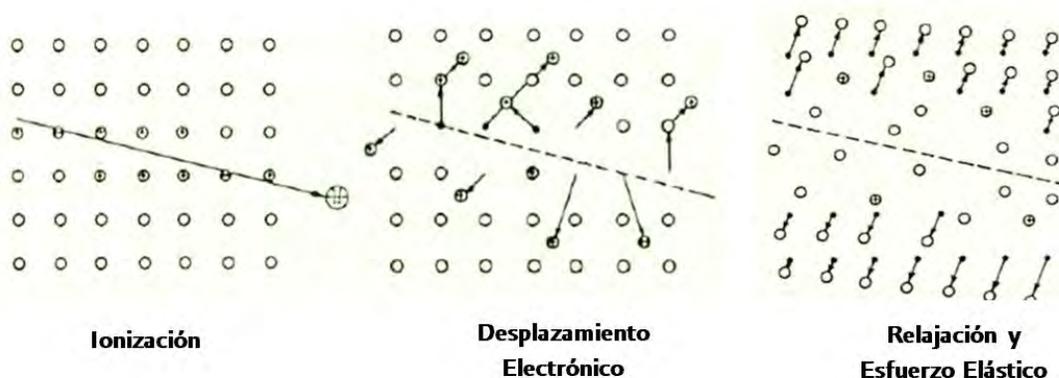


Fig 3.4 Mecanismo de formación de trazas en sólidos. Espinosa, 1994.

Este estudio sigue la metodología del uso de Detectores de Trazas Nucleares descrita por Espinosa (1994). La Detección de Trazas Nucleares en Sólidos (DTNS) es un método sencillo, económico y que no necesita de grandes recursos tecnológicos para su disponibilidad. Su principal característica es que los materiales detectores sólo son sensibles a las partículas alfa, no perciben partículas beta, radiación gamma ni rayos X.

Este método puede resumirse en 3 pasos básicos

- Exposición del material a la radiación ionizante
- Revelado químico de la traza
- Caracterización y lectura de la traza

El primer paso consiste en exponer el material a la radiación ionizante con la finalidad de crear la traza nuclear en el material que permanece latente por cientos o miles de años, hasta que la traza es revelada mediante un ataque químico.

Después de la exposición, el material debe ser sometido a un ataque químico de desgaste superficial, el cual tiene una mayor incidencia sobre las huellas generadas formando un cono denominado traza grabada. Para el proceso de revelado existen ciertos parámetros que deben ser tomados en cuenta:

- Características del material detector
- Tipo de solución química de grabado y su concentración
- Temperatura de la solución
- Tiempo de permanencia en la solución

Un recipiente con la solución y un baño de agua a temperatura controlada (baño maría), son suficientes para este proceso. Finalmente, después del revelado químico, se obtiene una traza o huella de la radiación recibida a escala microscópica, que es leída y caracterizada. Para ello el procedimiento más directo es mediante microscopía. Contando el número de trazas por unidad de área se obtiene una relación del número de partículas incidentes. (Espinosa, 1994).

3.3.1 Dispositivo CR-39

El material de detección utilizado en el estudio fue el CR-39. Este detector es un policarbonato de alil-diglicol. Se seleccionó este material debido a su alta sensibilidad, fácil manejo y bajo fondo de trazas ($30 \pm 5 \text{ cm}^2$). Su sensibilidad es suficiente para determinar desde 0.82 Bq/m^3 , en un tiempo mínimo de integración de 14 días. El tiempo de integración recomendado para los sensores de CR-39 es de 14 a 28 días (Espinosa, 1994; Espinosa y Ramos, 1992; Ayala, 2009).

El detector tiene un espesor de 600μ , y una superficie de $19.0 \pm 0.05 \text{ mm}$ por $09.50 \pm 0.05 \text{ mm}$. Para conocer la relación del número de impactos con la concentración de ^{222}Rn , el laboratorio de trazas nucleares de IFUNAM llevó los detectores de CR-39 que ahí se utilizan a una cámara primaria de calibración con condiciones específicas, que contenía ^{226}Ra y que se conocía la radiactividad producida por el ^{222}Rn . De tal forma que el número de impactos se relaciona mediante un factor de calibración: 100 trazas/cm^2 equivalen a 22.5 Bq/m^3 (Espinosa, 1994).

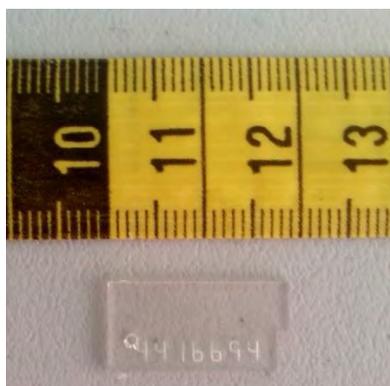


Fig 3.5 Detector de radón CR-39.

3.3.2 Técnica de medición mediante CR-39

La técnica utilizando CR – 39 consistió en colocar el material detector dentro de un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 50 cm de largo, el tubo se enterró en el suelo aproximadamente a la mitad, y fue cerrado por la parte superior con una tapa donde se colgó el material detector (ver figuras 3.6 y 3.7).

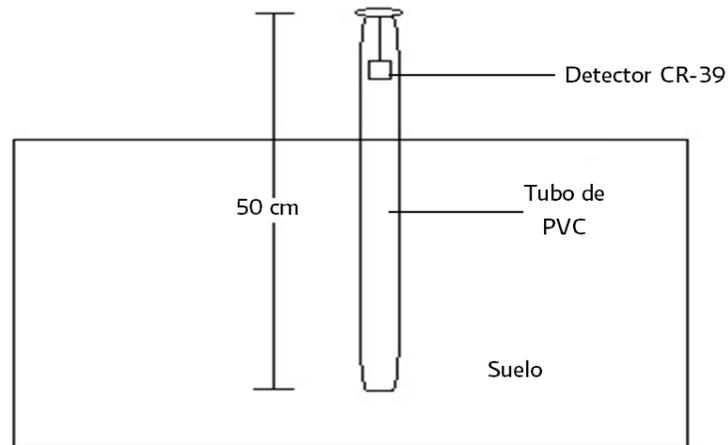


Figura 3.6 Dispositivo de CR – 39 en el suelo.



Figura 3.7 Dispositivo de medición CR – 39.

Este proceso se llevó a cabo en 28 sitios distribuidos aleatoriamente en toda la zona urbana, el periodo de integración del material fue de 28 días como lo recomienda Espinosa (1994). Una vez pasado este tiempo se recolectaron los dispositivos, las placas de detección fueron cubiertas con papel aluminio y colocadas en una bolsa también de aluminio para protegerlas de nuevas partículas incidentes, posteriormente las placas fueron llevadas al laboratorio para continuar con su revelado.

Con la finalidad de resaltar las trazas hechas por la radiación sobre el material detector, se realizó un proceso de revelado por medio de un ataque químico (Fig. 3.8). Las placas de CR-39 fueron sometidas a una solución de hidróxido de potasio (KOH), a una concentración de 6 molar y puestas en baño maría a una temperatura de 70° C durante 20 horas. (Gamage y Espinosa, 1997).

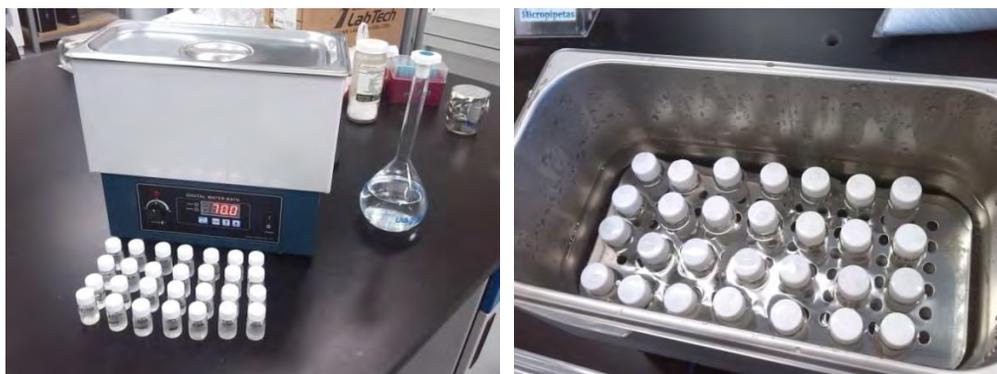


Fig 3.8 Revelado de placas de CR-39 mediante baño maría

Una vez que se resaltaron las trazas por el ataque químico, se procedió al análisis de las placas de CR – 39. Con la ayuda de un microscopio óptico se calculó la densidad de trazas por cm² que recibió el material y en base al factor de conversión dado por Espinosa (1994) se determinaron los niveles de radón en cada sitio en Bq/m³.

3.4 Generación de mapa de Riesgo

En base a los niveles de concentración de ²²²Rn y las características geográficas del área de estudio se realizó una serie cartográfica con el objetivo de generar un mapa de riesgo por emisiones de gas radón para la zona conurbada de San Luis Potosí.

Por medio de un sistema de información geográfica (SIG), se llevó a cabo una digitalización y rasterización de los parámetros seleccionados con el fin de realizar un análisis cualitativo, el cual fue empleado en la elaboración del mapa final.

3.4.1 Algebra de Mapas

La técnica utilizada para la generación del mapa de riesgo es una adecuación del método para identificar sitios con potencial de recarga de acuíferos propuesto por García-Chávez et al. (2014). Este método consiste en la asignación de valores a los parámetros seleccionados respecto al grado de influencia que representan en el estudio.

Los parámetros utilizados fueron el tipo de material o capa geológica externa en el valle, la densidad de población y las concentraciones de radón obtenidas en el valle de San Luis Potosí.

La información del tipo de material en el valle se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de la carta geológica F1404 de INEGI. El mapa de densidad de población de la mancha urbana se elaboró de acuerdo al Sistema para la Consulta de Información Censal versión 05/2012, el cual contiene los datos estadísticos del Censo de Población y Vivienda 2010 de INEGI.

Los mapas de concentración de radón se realizaron por medio de una interpolación hecha directamente con las muestras que se tomaron en toda el área de estudio. El método de interpolación geoestadístico utilizado fue el de distancia inversa (IDW), el cual determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

Finalmente se adicionaron las fallas geológicas del valle de San Luis al mapa obtenido con el propósito de realizar una correlación entre éstas, las emisiones de radón y el potencial de riesgo.

La información obtenida de cada una de las capas fue clasificada en 5 categorías, que representan el grado de amenaza: bajo, medio, alto, muy alto y extremo a la exposición de radón.

En la figura. 3.9 se resume de manera general el procedimiento utilizado para la elaboración del mapa de riesgo por concentraciones de radón en el área de estudio. El nivel de importancia de las categorías se clasificó tanto de manera cuantitativa como cualitativa; el rango de valores numéricos se asignó tomando en cuenta el nivel de influencia de los factores, así como entre la diferencia entre los valores máximos y mínimos. (García-Chávez et al.).

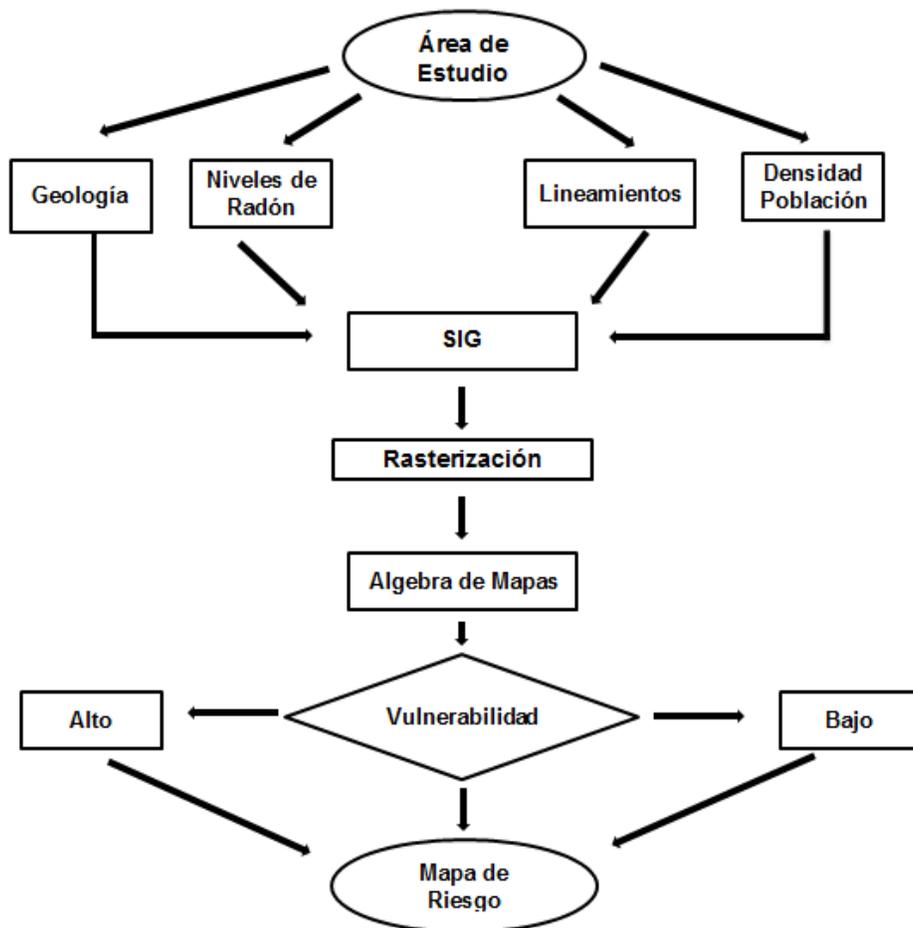


Fig. 3.9 Procedimiento para la creación de mapa de riesgo por emisiones de ^{222}Rn .

Tabla 3.1 Escala de exhalación de radón, nivel de importancia de cada factor y porcentaje que representa cada parámetro respecto al riesgo toxicológico. Modificada de García – Chávez et al. (2014).

Factores de Riesgo	Muy Alto	Alto	Medio Alto	Medio	Bajo	Importancia	a*b	% Representativo
	Valores (10 ~ 1)					1~10		
Densidad de Población	10	8	6	4	2	4	120	44.4%
Niveles de Radón	10	8	6	4	2	4	120	44.4%
Tipo de material en el Valle	*	7	5	3	*	2	30	11.1%

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Niveles de radón en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí

4.1.1 Concentraciones obtenidas mediante el método activo (RAD7)

Con del equipo de medición RAD7 se realizó un total de 201 muestras tanto en la mancha urbana como en los alrededores (Anexo 2). Cada una de las tomas fue clasificada en diversas categorías con la finalidad de analizar los resultados tomando en cuenta sus condiciones y características respecto a la ubicación de cada punto en el área de estudio (ver tabla 4.1). La toma de muestras se llevó a cabo en 2 partes, la primera del 11 de Diciembre de 2014 al 15 de Febrero del 2015, y la segunda entre el 6 y 13 de Julio del 2015.

Tabla 4.1 Categorías de clasificación de los puntos de muestreo tomados con el equipo RAD7

Clasificación de puntos			
Condición urbana	Tipo de Suelo	Condición del suelo	Zona de ubicación
Urbana	Arcilla	Húmedo	Valle
Semiurbanizada	Arena		
Suburbana	Arena Arcilla	Seco	
Rural	Arena Grava		Loma - Montaña
Industrial	Roca	Semiseco	
Parque			

Durante el 2013, 2014 y 2015 San Luis Potosí ha presentado condiciones climáticas atípicas, las precipitaciones han sido mayores al promedio, y debido a esto se tiene una alta humedad en el suelo. La humedad influye de manera considerable en la detección de radón, ya que reduce los niveles de ^{222}Rn que son detectados por el equipo. Se realizó una corrección de los datos tomados en campo y se obtuvieron los valores reales, los cuales tuvieron un aumento promedio de 38% (Ver anexo 1).

Para el área de estudio se observó una humedad relativa media en el suelo de 62%, con una máxima de 79% y una mínima de 41%. Los valores de radón aumentaron de manera considerable después de haberse aplicado las correcciones. Cuanta más alta es la medición tomada en campo, mayor es el incremento del valor al realizar el ajuste. Las mediciones hechas con el equipo RAD7, muestran un buen coeficiente de correlación: 0.98 (Fig. 4.1).

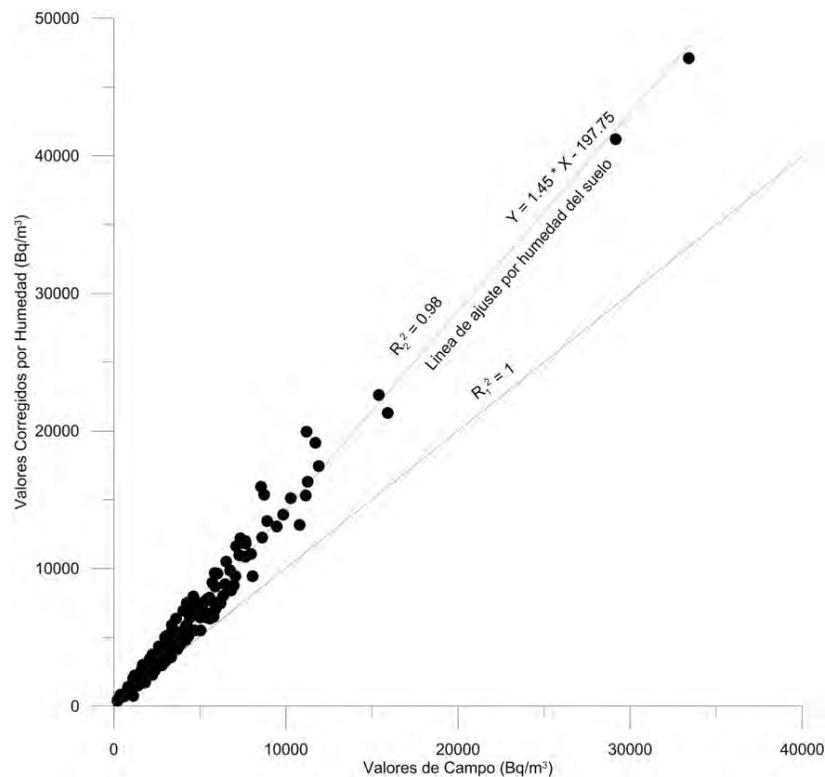


Fig. 4.1 Ajuste de humedad de los valores de ^{222}Rn , y Coeficiente de correlación.

La zona de estudio presenta un promedio de concentración de radón de $5,723 \text{ Bq/m}^3$ y una desviación estándar de $5,648$. El nivel más alto alcanzó los $47,100 \text{ Bq/m}^3$, y se localizó en la parte central del área urbana en las cercanías de la zona industrial. El valor mínimo se tomó en una zona rural en el km 240 de la carretera a Rio Verde – San Luis Potosí y fue de 400.5 Bq/m^3 , es importante mencionar que este no es el nivel mínimo absoluto encontrado. Se tomó una muestra sobre un afloramiento de roca riolítica en el municipio de Ahualulco, donde se observó un valor de 377.5 Bq/m^3 . En la Figura 4.2 se pueden apreciar los niveles de concentración de radón obtenidos con el equipo RAD7.

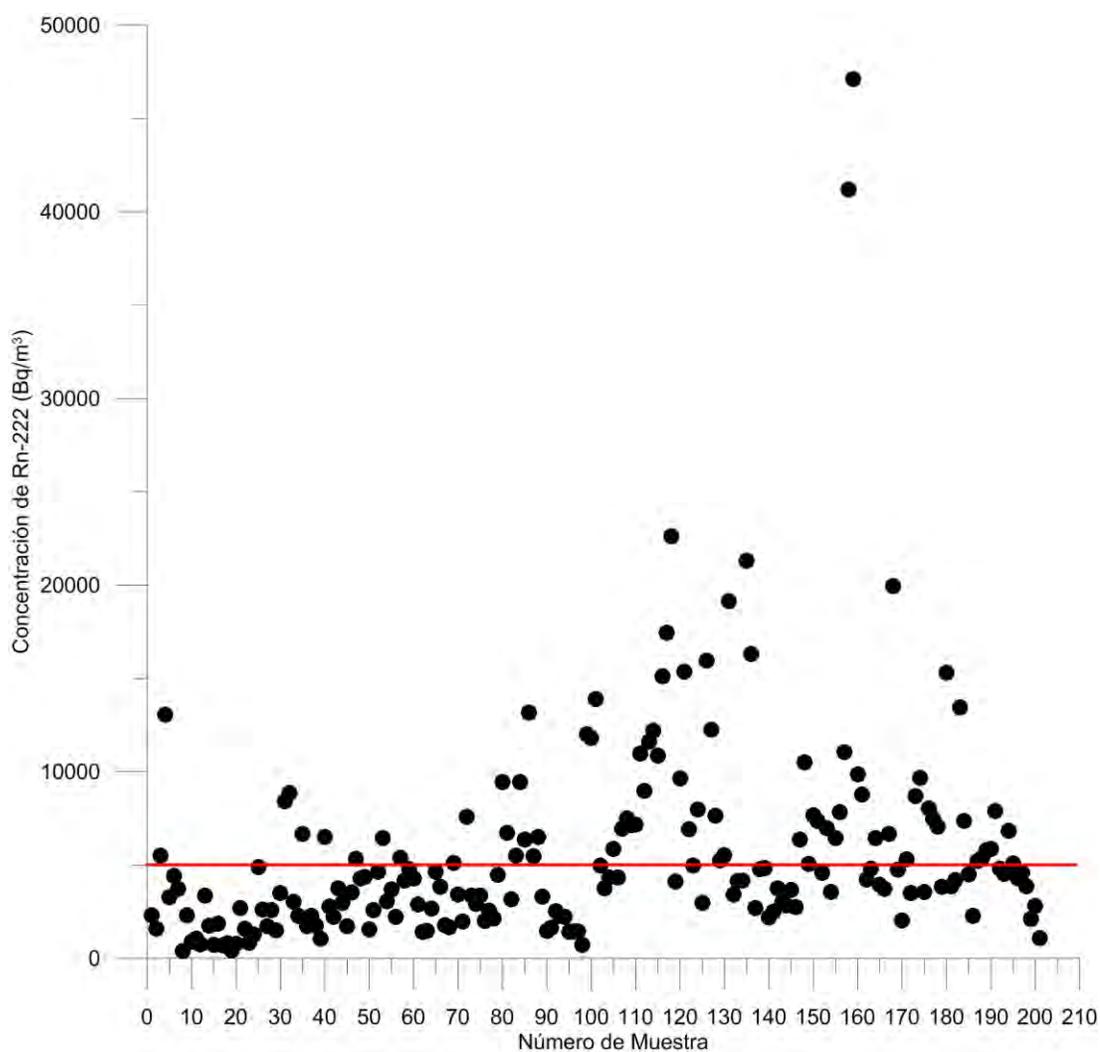


Fig. 4.2 Concentración de ^{222}Rn en cada una de las muestra tomadas mediante el método activo, la línea roja indica el promedio general en Bq/m^3 .

Los puntos que se localizan en el valle tienen niveles de radón más altos que los que se ubican en la zona de Loma – Montaña; los del valle muestran una media de 6,180 con una desviación estándar de 5,910 Bq. mientras que los que se ubican en el área de Loma – Montaña tienen un promedio de 3,113 Bq/m³ y 2,577 bequerels como desviación estándar.

La zona urbana presenta un promedio de 6,362 Bq/m³, lo que rebasa la media general por más de 600 Bq. El valor máximo registrado en la zona urbana es el máximo encontrado en toda el área de estudio el cual fue de 47,100 Bq/m³ y el mínimo de 711 Bq. La desviación estándar para el área urbana fue de 6,002.

En contraste la zona rural muestra niveles de radón muy por debajo de la media general, a excepción de un punto donde se detectaron 3,370 Bq. Este sitio se ubicó en una pequeña meseta con un suelo de material sedimentario y brecha volcánica, el punto forma parte de línea de muestras que se realizó en el municipio de Ahualulco. El promedio de concentración para la zona rural es de 1,284 Bq/m³ con una desviación estándar de 851; los máximos fueron de 3,370 y 2,295 y un valor mínimo de 692 Bq.

Las áreas semiurbanizadas y suburbanizadas muestran valores intermedios; el promedio de los puntos semiurbanizados es de 5,524 Bq/m³; la desviación para esta categoría fue de 4,281. Existen un par de valores muy altos dentro de esta categoría, los cuales sobrepasan por mucho la media tanto general como de la sección semiurbanizada. Estos puntos se encuentran en las inmediaciones de la planta de zinc, presentan máximos de 21,300 y 16,300 respectivamente, mientras que el mínimo obtenido fue de 1,540 y se ubicó en la localidad de San Marcos, en las afueras de la ciudad.

Los sitios bajo la categoría suburbana presentaron desviación estándar de 1,172 y una media de 1,994 Bq. el nivel máximo detectado fue de 4,765 y el mínimo de 766 Bq/m³.

Dadas las características de los parques públicos y las zonas industriales se les asignó una categoría propia. El promedio de concentración de radón en los parques fue de 2,205 Bq/m³ el valor mínimo fue de 1,720 y el máximo de 2,605. Su desviación estándar fue de 316.

Las concentraciones de radón en la zona industrial fueron muy altas. Esta categoría tiene un promedio 8,188 Bq/m³, es decir, que rebasa por más de 2,400 bequerels a la media general. El nivel máximo fue de 22,600 mientras que el mínimo fue de 1,435 Bq. La desviación estándar de la zona industrial alcanzó los 6,215 bequerels. La Tabla 4.2 contiene el promedio de los niveles de ²²²Rn de acuerdo su clasificación general

Fig. 4.2 Niveles de concentración de radón por categorías

Clasificación	Nivel medio	Bq/m ³
	General	5723
Condición Urbana	Industrial	8188
	Urbana	6362
	Semiurbanizada	5524
	Parque	2205
	Suburbana	1994
	Rural	1284
Zona de Ubicación	Valle	6180
	Loma-Montaña	3113
Tipo de Suelo	Arcilla	8058
	Arena Arcilla	6870
	Arena	5614
	Arena Grava	4916
	Roca	823
Condición del Suelo	Húmedo	7047
	Semiseco	5981
	Seco	5341

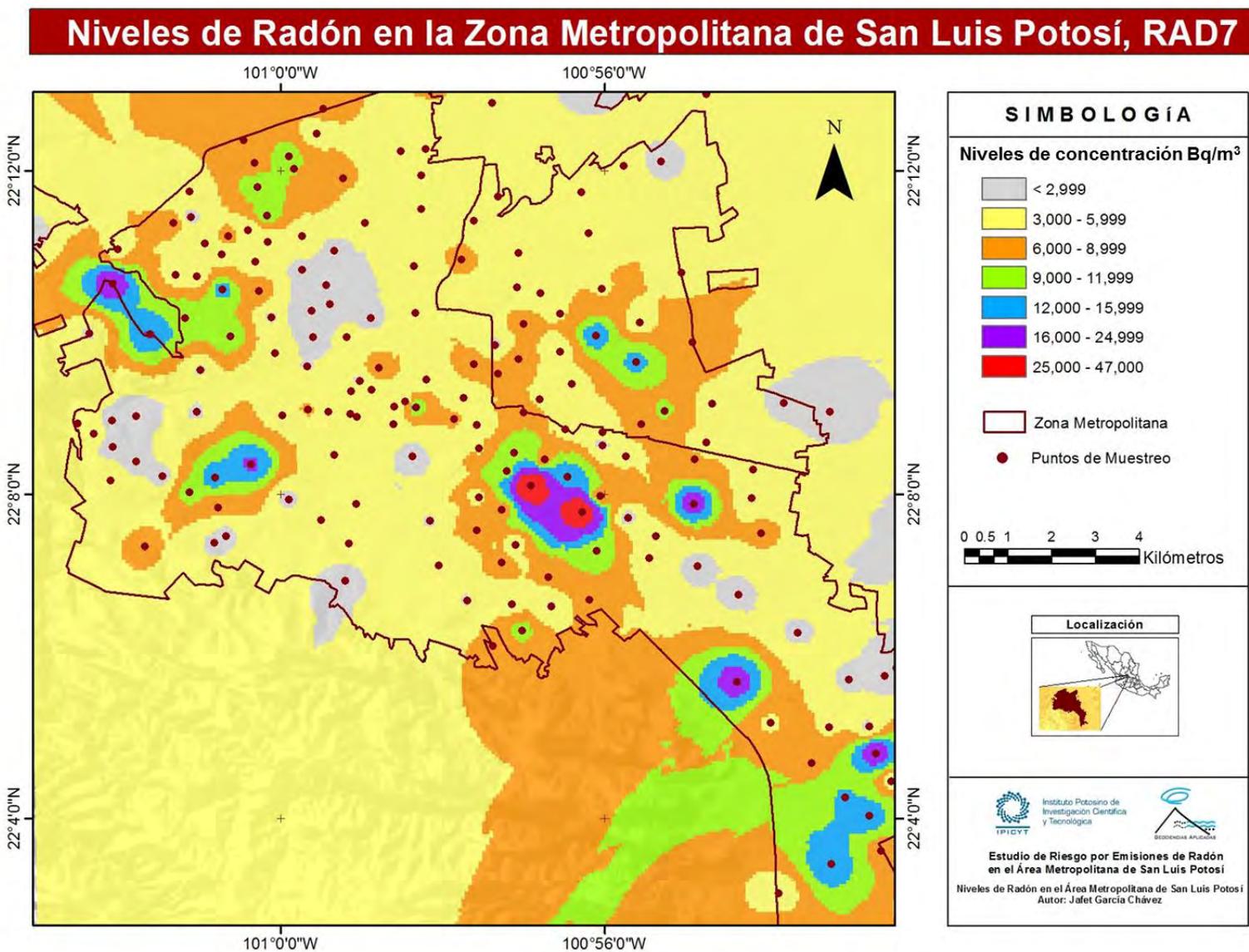


Fig. 4.3 Niveles de Concentración de Radón en la Zona Metropolitana de Potosí (Método Activo).

Como se puede observar en la figura 4.3 la distribución y las concentraciones de ^{222}Rn en el área de estudio son muy diversas. Alrededor del 50% de la zona conurbada de San Luis Potosí presenta niveles que oscilan entre los 3,000 y 6,000 bequerels. Aunque existen concentraciones altas, medias y bajas en distintas secciones, éstas tienden a incrementarse hacia el centro del valle y al sureste de la ciudad, donde se tienen valores mayores a $15,000 \text{ Bq/m}^3$ e inclusive superan los 19,000. En esta zona se encuentran los puntos con las concentraciones más altas, 41,200 y 47,100 Bq/m^3 .

En contraste, el oriente y poniente, así como un polígono localizado al centro – norte de la mancha urbana (Parque Tangamanga II, Industrial Aviación, Los Reyes), muestran las concentraciones más bajas, entre 1,000 y 2,000 Bq/m^3 .

4.1.2 Concentraciones obtenidas mediante el método pasivo (CR-39)

Se colocaron 28 dispositivos en la ZM de San Luis Potosí, la mayor parte de ellos fueron instalados en jardines de casas habitación, pero algunos otros se situaron en parques (Tangamanga I y II) y zonas suburbanizadas en las afueras de la ciudad, esto para realizar una mejor interpolación de los resultados obtenidos.

Al igual que en el método anterior, en el pasivo también se llevó a cabo una clasificación de acuerdo a las condiciones urbanas, de humedad y tipo de suelo con el objetivo de hacer un análisis más específico de los datos, tomando en cuenta las características del sitio donde fue instalado cada uno de los dispositivos.

El promedio general de los niveles de radón en la ZMSLP fue de 2,370 Bq/m^3 . El sitio donde se encontraron las concentraciones más altas se ubica en el fraccionamiento San José, al norte de la zona metropolitana. En este lugar se tiene un nivel de 6393 Bq/m^3 , en contraste el nivel más bajo se localiza en una

zona habitacional relativamente cercana, en la colonia Industrial Aviación donde solo se alcanzaron los 964 Bq/m³.

Los promedios obtenidos por condición de urbanización no difieren tanto de la media general como sucedió con los resultados del método activo. La media para los puntos con la clasificación de área urbanizada fue de 2,371 Bq/m³, que es prácticamente igual a la media general (2,370 bequerels). Para las áreas clasificadas como no urbanizadas la media es de 2219 Bq/m³, 151 Bq por debajo del promedio general.

Es importante señalar que la media de las zonas semiurbanizadas presentaron los niveles de radiación más altos, 2417 Bq/m³, pero sólo presentaron una variación de 47 bequerels más respecto a la media general.

De acuerdo con el mapa elaborado en base a las mediciones del método pasivo, la mayor parte de la zona urbana presenta valores por debajo de los 3,000 bequerels, a excepción de una zona al norte de la ciudad, en donde las concentraciones de radón se encuentran entre los 3,000 y 4,000 Bq/m³. Es en esta zona dentro del fraccionamiento San José donde se tomó la mayor concentración de radón, 6,396 Bq.

El oriente y poniente de la ciudad presentan valores bajos alrededor de 1,000 y 2,000 Bq/m³. Las menores concentraciones se localizaron en un sector cercano al Parque Tangamanga II, en la zona centro – norte de la ciudad, en esta área los niveles de radón fueron aproximadamente de 1,000 bequerels (Ver Fig. 4.4).

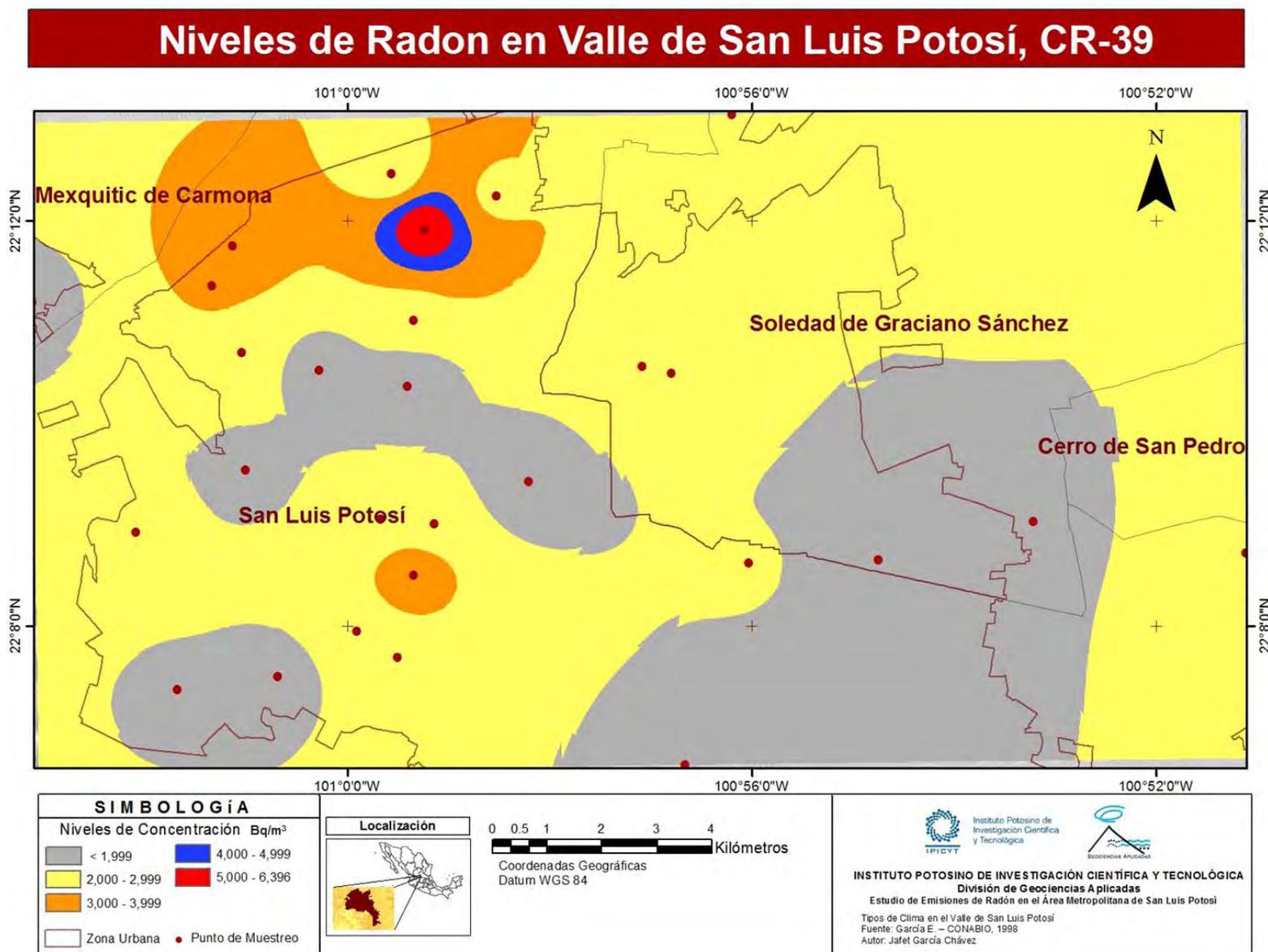


Fig. 4.4 Niveles de Concentración de Radón en la Zona Metropolitana de Potosí, Método Pasivo.

4.2 Análisis de resultados

Al observar los datos y mapas que fueron generados por cada uno de los métodos, se pueden notar diferencias importantes (principales zonas de concentración y niveles del radón). Esto se explica debido a las condiciones y características de cada uno de los métodos y la forma como se emplearon. Sin embargo al analizarlos con detenimiento se encuentran patrones similares.

Como se mencionó anteriormente, los valores de ^{222}Rn varían a lo largo de un día, de un mes o un año. Las pruebas del método activo ofrecen datos rápidos para un momento determinado; con el RAD7 se realizaron mediciones únicas de 2 tiempos en cada uno de los puntos seleccionados. La información recabada fue de gran utilidad, ayudó a entender el comportamiento del radón en la zona de estudio y a tener una idea general de los niveles que se pueden encontrar en diversas partes de la ciudad.

El método pasivo muestra valores más homogéneos y menor diferencia entre los rangos de concentración. Esto se debe a que el CR-39 ofrece el promedio de las concentraciones a lo largo de un mes, y con el RAD 7 (activo), las de un momento específico del día. Lamentablemente se contó con pocos dispositivos de CR-39 y algunas áreas de la ZM no fueron analizadas, por lo que ciertos sectores del mapa podrían tener valores de radiación mayores.

La aplicación de dos métodos diferentes ha sido fundamental ya que se complementan entre sí, y con ello se obtiene un mapa de riesgo más confiable. Además permite identificar áreas que requieren de mayor atención y donde es conveniente hacer estudios con mayor detalle.

Es importante señalar que el área donde se realizaron las mediciones con CR – 39, fue menor que las hechas con el equipo RAD7, ambos métodos cubren las áreas habitacionales de la zona metropolitana, pero el activo tuvo una mayor densidad de puntos especialmente hacia el sur y oriente de la ciudad, además de que la toma de muestras por este método se extendió hasta la zona industrial.

En la figura. 4.5 se observan las áreas con menores concentraciones de ^{222}Rn ; al noreste (en el polígono formado entre la carretera a Matehuala y el Camino a Peñasco), al sur (alrededores del Parque Tangamanga I, el fraccionamiento Balcones, Lomas de Bella Vista) así como ciertos sectores de la ciudad en las cercanías de Sendero, Bosques de Oriente y la Avenida Ricardo B Anaya., y en zonas semiurbanizadas, suburbanas, o con densidades de población bajas como es el caso de Las Lomas al poniente de San Luis Potosí.

Generalmente las zonas con mayor urbanización suelen tener niveles de radiación más altos, ya que las construcciones y la carpeta asfáltica, actúan como una especie de capa dura que no permite que el gas se libere con facilidad, ni en forma homogénea. Por lo que el radón sale a mayores concentraciones en los puntos que se consideran débiles, como fisuras o grietas en las calles, o en los pisos de las casas, y en lugares sin construir como terrenos abandonados, jardines y/o jardineras.

Las mayores concentraciones se ubicaron en áreas altamente urbanizadas y con grandes densidades de población, al norte (Fraccionamiento María Cecilia y el Sauzalito) al oriente en el municipio de Soledad (Fraccionamiento Santa Mónica, Avenida San Pedro, Valentín Amador oriente), al sureste en la zona industrial y en colonias aledañas al Blvd. Río Española, y la Avenida Salk (ver Fig. 4.5).

Existe un par de zonas con anomalías muy marcadas, ya que cuentan con niveles de radón muy bajos o muy altos en áreas donde teóricamente deberían contar con valores opuestos. Es el caso de las 3 secciones de la colonia Industrial Aviación, Damián Carmona, Manuel José Othón, y Avenida Muñoz. Este es un sector en la zona del valle completamente urbanizado y los valores encontrados oscilan entre 1000 y 4,000 Bq/m³.

Por otro lado los alrededores de la planta de zinc, que son zonas semiurbanizadas y suburbanizadas presentan valores de alrededor de 12,000 Bequerels y alcanzan los 20,000 muy cerca de la planta.

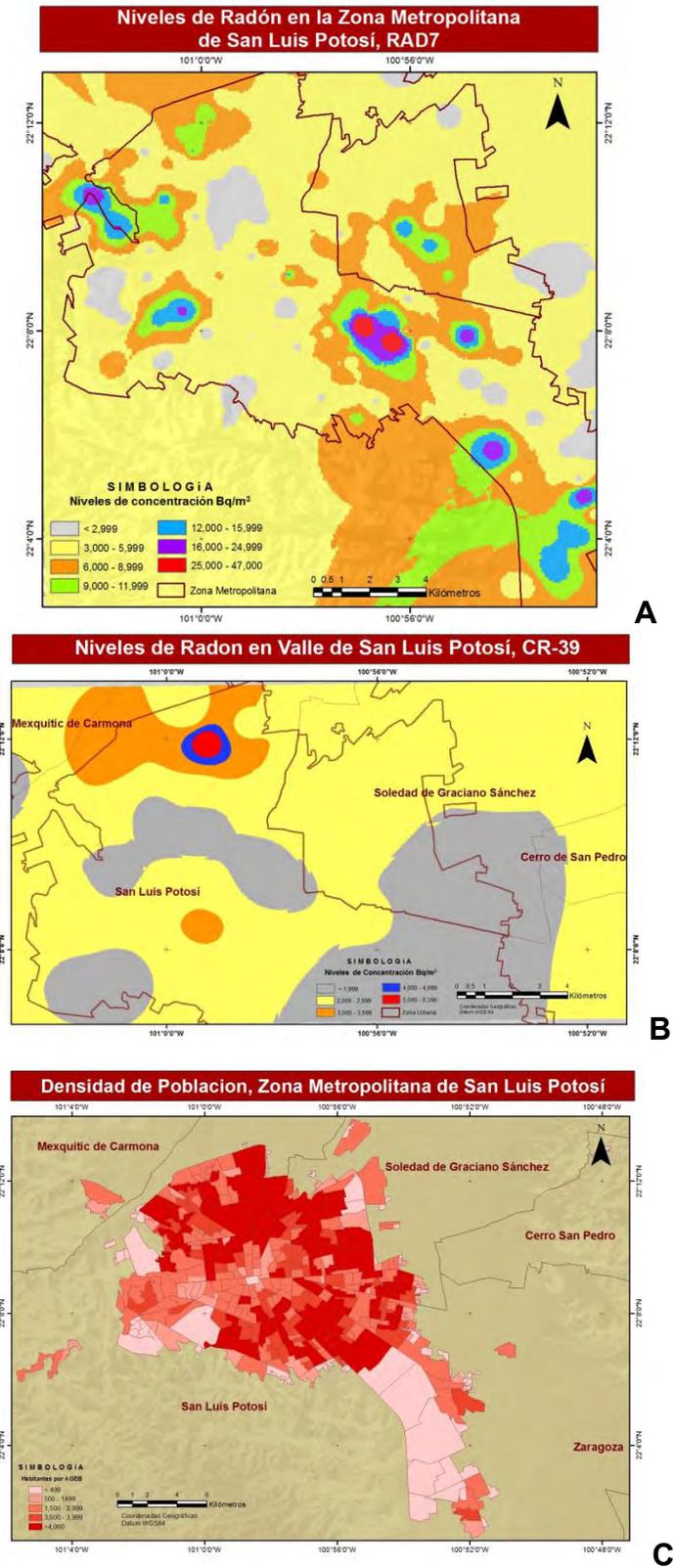


Fig. 4.5 Comparativo entre niveles de ^{222}Rn obtenidos por los métodos activo y pasivo con respecto a la densidad de Población de la zona urbana de San Luis Potosí.

Al inicio del trabajo se contaba con algunas hipótesis acerca del comportamiento del radón en la zona de estudio. Una de las más importantes es la situación Montaña – Valle. Se esperaba que en las zonas bajas las concentraciones de radón fueran más altas que en las laderas o montañas, ya que en las zonas planas cuentan con una capa de sedimentos más gruesa, la cual actúa como una tapa que cubre la riolita, y provoca que el gas se encapsule en el suelo, y salga a mayores concentraciones en sitios donde encuentra salida.

Con la finalidad de comprobar esta hipótesis, se realizó una serie de muestras a lo largo de una ladera sobre una línea de fallas cerca de la localidad de Ahualulco, (S.L.P.). Las mediciones de prueba dieron como resultado una primera aprobación de la hipótesis. La zona más baja de la ladera en donde se encuentra el arroyo presentó una de las concentraciones más altas, en contraste con la parte alta de la ladera donde los niveles de ^{222}Rn fueron más bajos.

La figura 4.6 muestra el comportamiento del radón a lo largo de la ladera, en la gráfica se observa que los niveles aumentan y disminuyen, esto se debe a que se tomaba una muestra en un escarpe de la falla y el siguiente sobre un bloque pero aun así se aprecia de forma clara una tendencia decreciente en las concentraciones hacia la parte alta de la ladera.

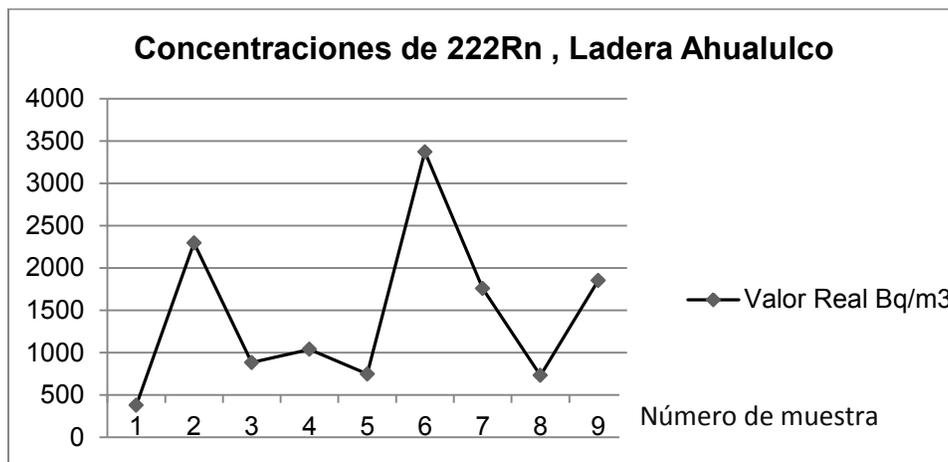


Tabla 4.6 Comportamiento de las concentraciones de radón en la línea de muestras sobre una ladera en Ahualulco, S.L.P.

Para demostrar la influencia que tiene el relieve con las concentraciones de radón en el Valle de San Luis Potosí, se llevó a cabo al igual que en Aqualulco una serie de mediciones en una línea que va desde la zona de las Lomas (Sierra de San Miguelito) atravesando el valle hasta la Sierra de Álvarez.

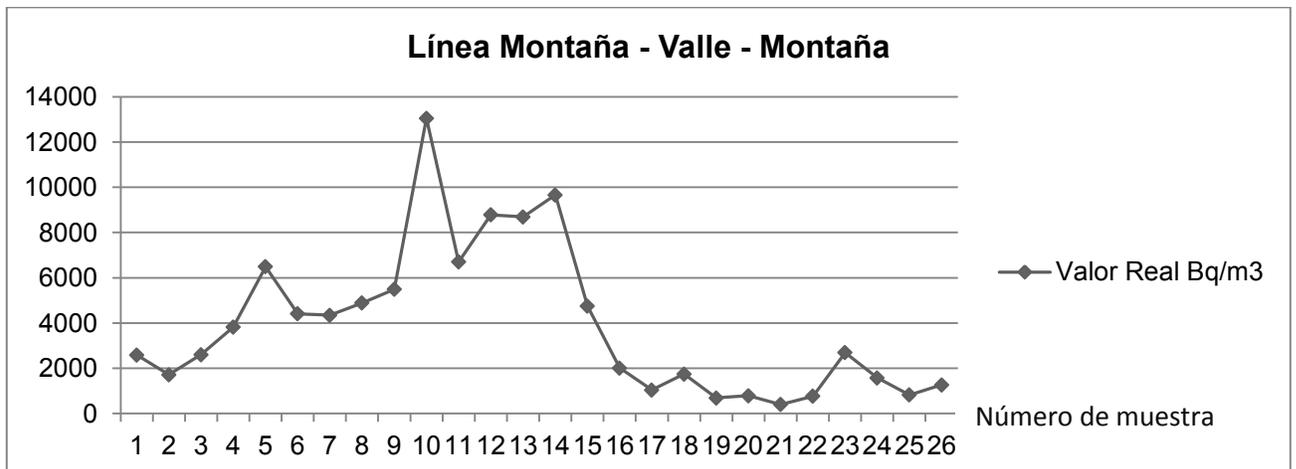
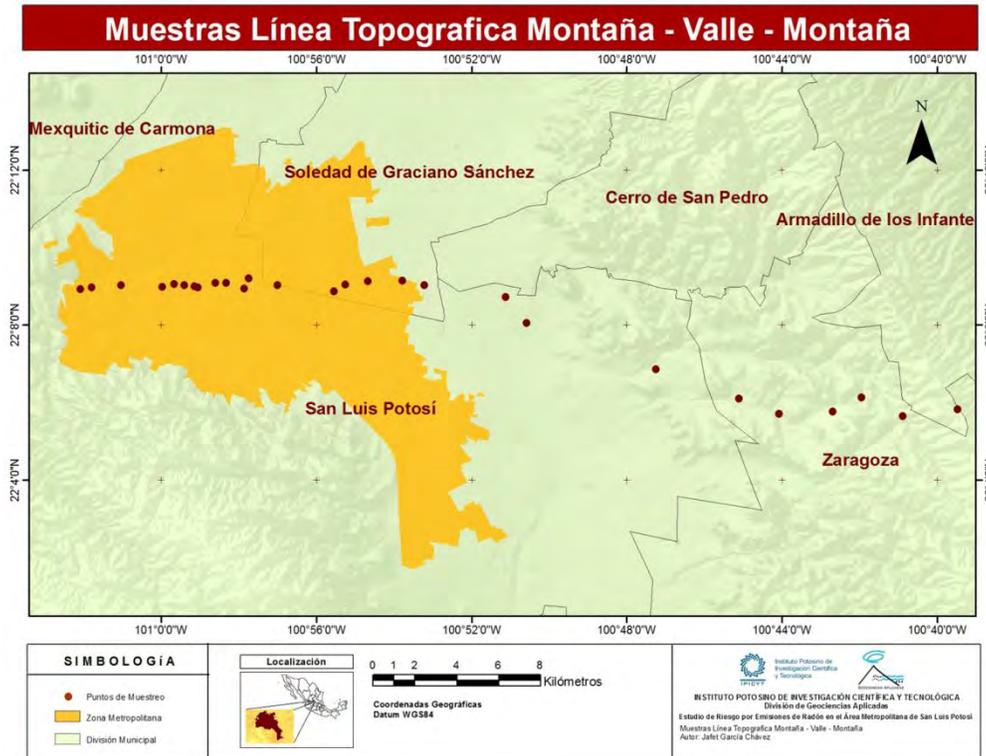


Fig. 4.7 Tendencia en las concentraciones de ^{222}Rn de acuerdo con la topografía del valle de San Luis Potosí. Del lado izquierdo de la gráfica se encuentra la Sierra de San Miguelito, y del lado derecho la Sierra de Álvarez.

Como se puede ver en la figura 4.7 los niveles de radón son más bajos en los puntos próximos a las zonas montañosas (Sierra de San Miguelito puntos 1 – 3, Sierra de Álvarez puntos 21 – 27), la sección central representa al Valle de San Luis, donde se tienen las concentraciones más altas.

La geología es uno de los factores que influyen considerablemente en la emisión del radón en San Luis Potosí, la roca (riolita), que produce este gas (^{222}Rn), se encuentra cubierta por una capa de material aluvial fino; que en la zona del valle llega a alcanzar los 500 m de espesor. Es precisamente en las áreas donde las capas de aluvión son más gruesas cuando se registran las mayores concentraciones de radón.

El grosor de la capa de aluvión va disminuyendo y predominan las brechas y conglomerados de mayor permeabilidad, conforme se aproxima a las sierras de Álvarez y San Miguelito, de igual manera que los niveles de radón también disminuyen.

En la zona urbana las concentraciones de radón son aún más altas, que en las zonas sin urbanizar. Las que tienen menores se localizan en áreas suburbanas y rurales, lugares abiertos y con pocas construcciones, donde no existe una capa de concreto y asfalto que lo encapsule y el gas se libera constantemente a bajas concentraciones.

Se trazó una línea a lo largo del Valle de San Luis Potosí con dirección Oeste – Este. Sobre esta línea se proyectaron las mediciones de ^{222}Rn que se encontraban más cerca. Adicionalmente se correlacionó con una sección geológica del Valle de San Luis hecha en la misma dirección.

Como se puede ver en la figura 4.8, los niveles de radón hacia la zona de la Sierra de San Miguelito tienen concentraciones bajas ($\pm 2,000 \text{ Bq/m}^3$) y a medida de que las muestras se acercan al valle y a la zona urbana las concentraciones de radón se incrementan considerablemente, obteniendo valores de alrededor de $10,000 \text{ Bq/m}^3$. Posteriormente los niveles comienzan a decrecer hacia el este en la periferia de la zona urbana.

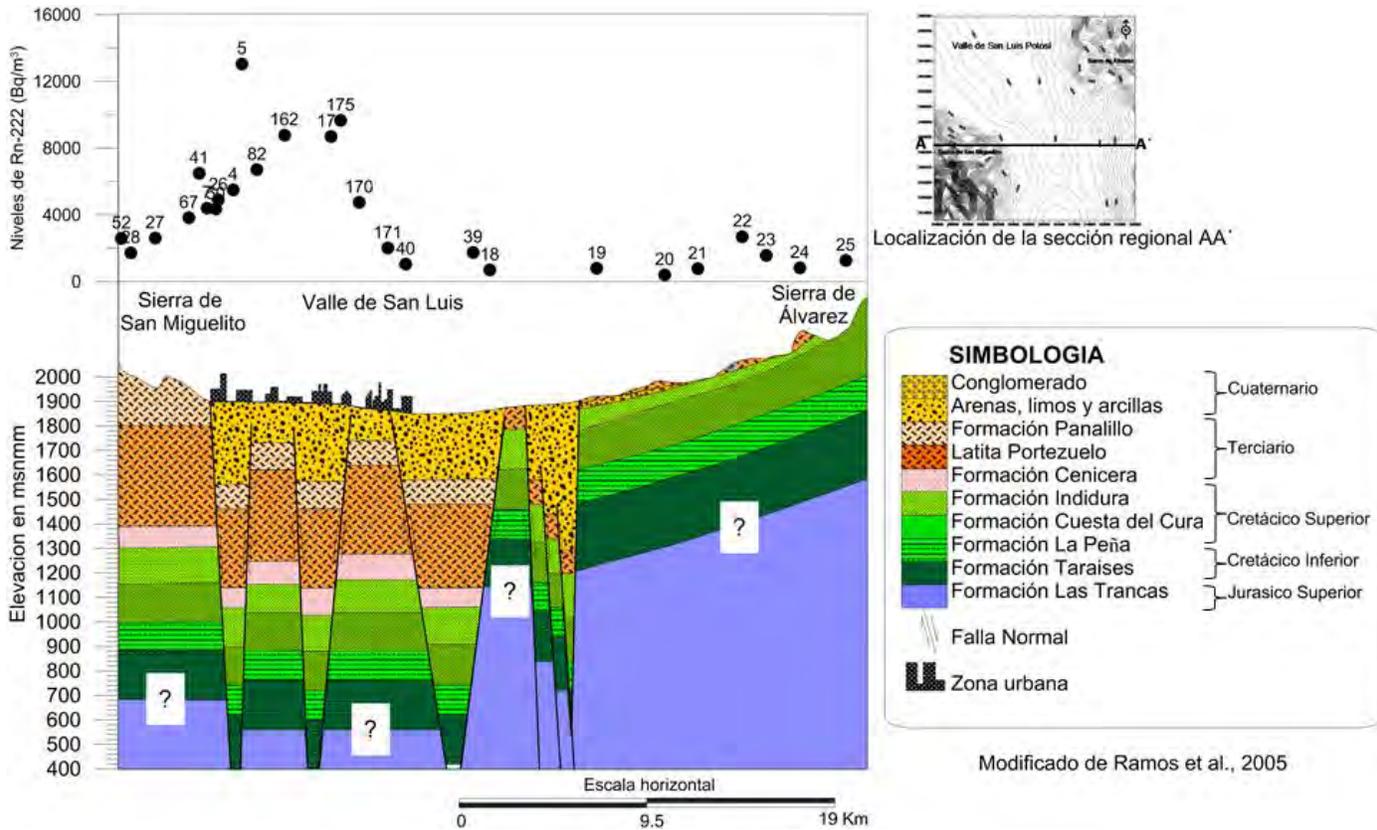


Fig. 4.8 Relación entre los niveles de ^{222}Rn con las características geológicas y topográficas del Valle de San Luis Potosí. Ramos et al, 2005.

Conforme las mediciones se acercan a la Sierra de Álvarez los valores de radón van disminuyendo, debido a que esta región montañosa se compone de calizas, que por su naturaleza emiten bajas concentraciones de radón. Los puntos que presentaron niveles más altos posiblemente fueron tomados en remanentes de roca volcánica.

Las bajas concentraciones de ^{222}Rn en la Sierra de San Miguelito, pueden explicarse porque, como ya se mencionó la riolita está expuesta y al encontrarse en campo abierto, el radón se dispersa rápidamente en el ambiente; no obstante en la zona urbana, los valores pueden asociarse a dos factores, un espesor de relleno aluvial grueso y a la carpeta asfáltica de la ciudad.

Al igual que Cárdenas et al. (2004), se determinó la distribución espacial de radón con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica, los resultados de los estudios tienen similitudes, ya que ambas zonas de estudio se localizan en sitios que presentan características geológicas del cuaternario.

Los altos valores encontrados en el centro de México se deben al tipo de suelo con un horizonte de materia orgánica que evita el escape del gas e incrementa los valores de concentración. Mientras que en el Valle de San Luis Potosí, la capa que evita que el gas se libere con facilidad está compuesta de material sedimentario.

Espinosa (1999) incluyó a la ciudad de San Luis Potosí en su estudio para determinar los niveles de radiación por ^{222}Rn en casas habitación, y se obtuvo un promedio de 73 Bq/m^3 con un mínimo de 30 Bq/m^3 y un máximo de 132 Bq/m^3 .

El estudio no incluyó la medición de los niveles de radón en el aire dentro de una casa, que de acuerdo con Segovia et al. (2007), es en primavera y otoño cuando se tienen las mayores concentraciones. Nuestro estudio sugiere que las mayores concentraciones en interiores podrían darse en invierno y no en primavera u otoño, ya que las condiciones frías de la estación llevan a tener condiciones herméticas en las casas. Sería necesario elaborar un estudio a mayor profundidad y con periodos de medición a mediano y largo plazo para determinar las condiciones en los hogares de San Luis Potosí.

El presente estudio al igual que el realizado por Jabbar et al, (2014), utilizó los mismos métodos para medir las concentraciones de ^{222}Rn , pero se obtuvieron resultados muy diferentes. En el estudio Iraquí, los niveles fueron muy bajos en comparación con los obtenidos en San Luis Potosí, que los superaron en más de 1000%, además en Basrah el coeficiente de correlación entre ambos métodos fue de prácticamente de 1, y para el caso de San Luis Potosí, solo fue de 0.08. Esto podría ser debido a los periodos de tiempo a los que estuvieron expuestos y a las diferencias entre las condiciones geológicas y el suelo que existen en Basrah y la capital potosina.

Las altas concentraciones de ^{222}Rn en la ciudad de San Luis Potosí se pueden apreciar en la Fig. 4.9, donde se muestran los impactos sobre el material detector (CR – 39) en comparación con el de un estudio de Ayala – Estrada en el bajío mexicano.

Como se puede observar la placa de San Luis Potosí, la densidad de impactos es muy alta comparada con la densidad de impactos registrados en el bajío.

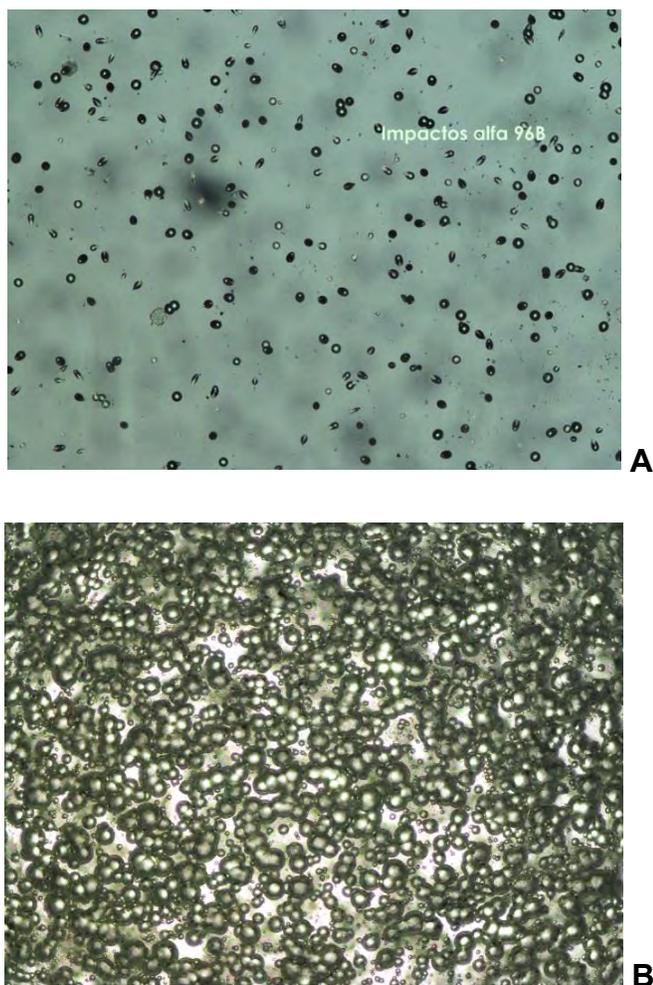


Fig. 4.9 Impactos de las partículas alfa sobre CR- 39, la fig. A corresponde a una medición hecha en el bajío. La fig. B pertenece a toma de una muestra tomada al norte de la ciudad de san Luis Potosí.

Las mediciones hechas por Ayala – Estrada en la zona de Pénjamo – Abasolo tuvieron un valor promedio de $3,520 \text{ Bq/m}^3$, con un máximo de $8,880$ y un mínimo de $1,320 \text{ Bq/m}^3$. Aunque son altos, muchos se encuentran por debajo de los encontrados en el Valle de San Luis Potosí que llegan a superar los $20,000 \text{ Bq/m}^3$; e incluso en 2 puntos superaron los $40,000 \text{ Bq/m}^3$.

No existe una norma que establezca los límites máximos de concentración de ^{222}Rn en el suelo, debido a que al salir a la superficie pueden diluirse con mucha facilidad. Esta tesis solo contempla los valores encontrados en el suelo. Puesto que se han obtenido concentraciones tan altas a solo unos centímetro de profundidad, es conveniente realizar a futuro mediciones del aire en el interior de las casas en diferentes épocas del año, como lo realizado por García – Betancourt en Zacatecas; de esta manera se podría llevar a cabo un mapa de riesgo toxicológico real sobre las concentraciones de radón en la mancha urbana de San Luis Potosí.

El estudio de Díaz – Saldierna (2015), coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Al empalmar la capa de fallas conocidas dentro de la mancha urbana sobre la de concentraciones de radón, se puede observar que presentan el mismo comportamiento demostrado por Díaz – Saldierna, bajos niveles en puntos hechos sobre las fallas y altos en las áreas que no presentan fallamiento, lo que podría ser indicio de alguna actividad tectónica.

Estas conclusiones podrían explicar las anomalías registradas en el sureste de la ciudad, en la zona del Boulevard Española, donde se encuentra una serie de fallas escalonadas, y los puntos con los niveles de radón más altos coinciden con sitios donde se pudiera estar generando actividad tectónica a profundidad que de origen a una nueva falla. (Ver Fig. 4.10)

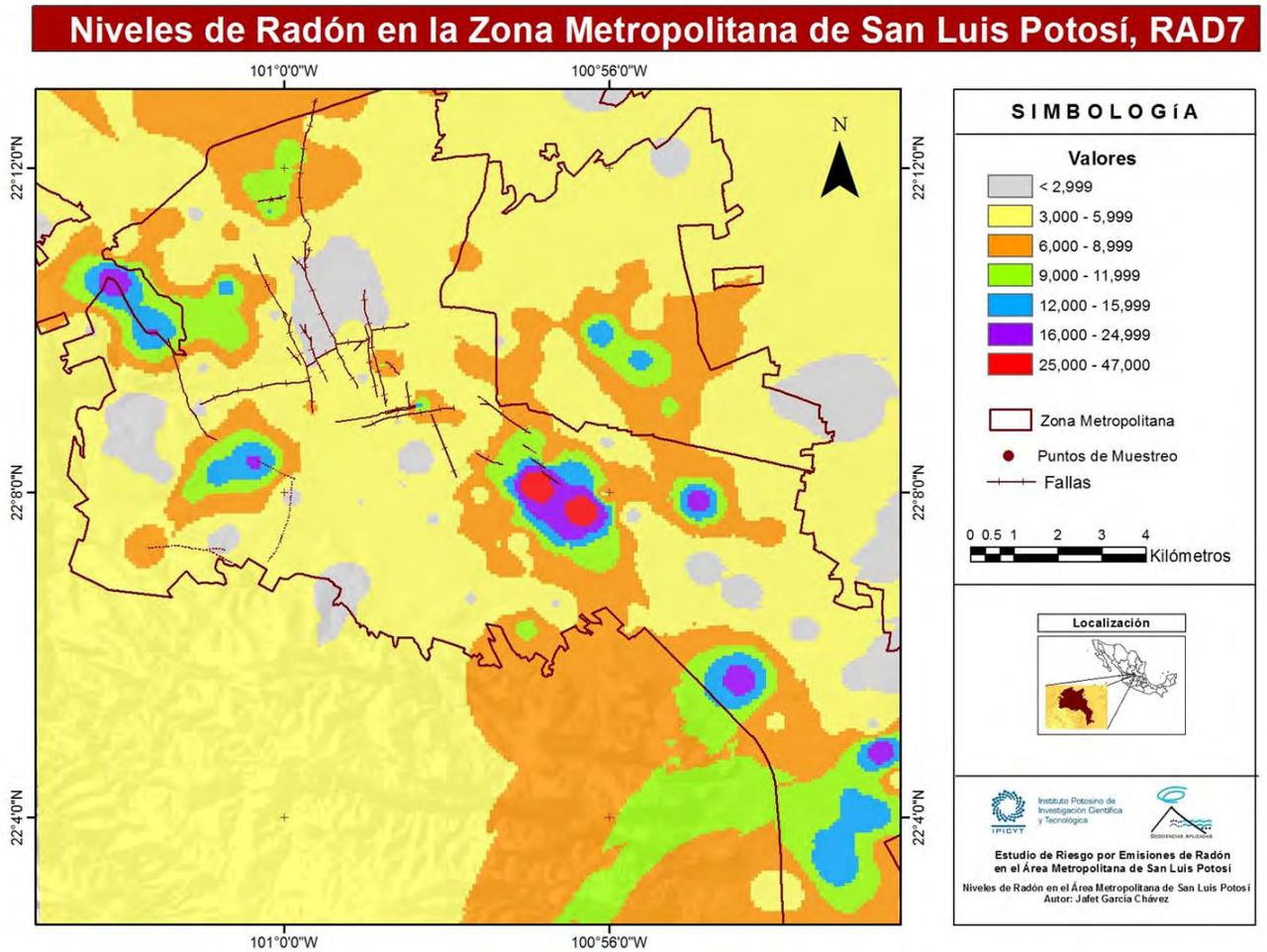


Fig. 4.10 Niveles de concentración de radón y fallas geológicas de la zona urbana

4.3 Riesgo por Emisiones de radón

Como resultado del algebra de mapas elaborado con las capas de emisiones de radón, geología, densidad de población, lineamientos, así como las características en el relieve que forma el Valle de San Luis Potosí; se obtuvo el mapa de riesgo toxicológico por emisiones de ^{222}Rn para la zona metropolitana.

De acuerdo con la figura 4.11, se observa que amplias zonas del sur y sureste de la ciudad se encuentran en condiciones de riesgo altas y extremas, principalmente en los alrededores del Boulevard Rio Española, en las colonias

Valle Dorado, Del Llano, Española, El Naranjal, Esmeralda, Anáhuac. En esta área convergen valores de radón sumamente altos con fraccionamientos densamente poblados. Este sector de la zona metropolitana se encuentra en la parte central del valle donde la capa de material sedimentario es más gruesa y sumado con la carpeta asfáltica y el concreto contribuyen a generar altas concentraciones de radón que llegan a superar los 40,000 Bq/m³. Basados en el censo del año 2010 se calcula que la población afectada en esta zona es de alrededor de 250,000 personas, las cuales son propensas a padecer cáncer de pulmón.

Existen otras 2 zonas con índices de riesgo extremo en el norte de la ciudad, presentan al igual que en el sureste, una urbanización muy fuerte y altas densidades de población (mayores a 4,000 habitantes por AGEB); los valores en estas áreas oscilan entre los 9,000 y 16,000 Bq/m³. La población afectada es de aproximadamente 55,000 habitantes de las colonias Los Pirules, Infonavit Morales, Los Molinos, Las Piedras, Las Julias, Jacarandas, San Alberto y Lomas del Mezquital.

Las principales zonas con índices de riesgo muy alto se localizan hacia el centro – norte de la mancha urbana en fraccionamientos localizados en el poniente del municipio de Soledad, en los límites con el municipio de San Luis (Parque Tangamanga II, Las Terceras, Las Morenas, Colonia Ecuestre, Centro de Soledad y colonias aledañas). Este sector cuenta con niveles de radón que oscilan entre los 3,000 y 6,000 Bq/m³ (mucho menores que en las zonas con riesgo extremo) sin embargo las densidades de población son bastante altas, lo que provoca que el índice de riesgo aumente debido a la cantidad de personas que habitan esa área.

El centro histórico de San Luis; así como, en las inmediaciones del Barrio de Tequisquiapan, El Parque Morales, e Himno Nacional presentan un índice de riesgo alto. A pesar de ser zonas altamente urbanizadas, cuentan con densidades de población medias, y concentraciones de radón de entre 3,000 y 6,000 Bq/m³.

Las áreas periféricas de la zona metropolitana presentan los menores índices de riesgo, ya que son lugares con niveles bajos de ^{222}Rn . En el municipio de San Luis estas se ubican en las zonas de Montaña o Loma, mientras que en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez se localizan en áreas semiurbanizadas.

En la zona industrial ocurre una situación particular, este sector, reúne las condiciones geológicas, urbanas y de niveles de radón ideales para un índice de riesgo muy alto e incluso extremo; sin embargo, el índice de riesgo toxicológico es bajo. El problema es que no se cuenta con datos correctos de población, de acuerdo con el censo del 2010, la zona presenta una densidad de habitantes baja, lo cual es cierto si se toma en cuenta que pocas personas habitan de manera permanente, pero el censo no considera a la población flotante de trabajadores de empresas y fábricas.

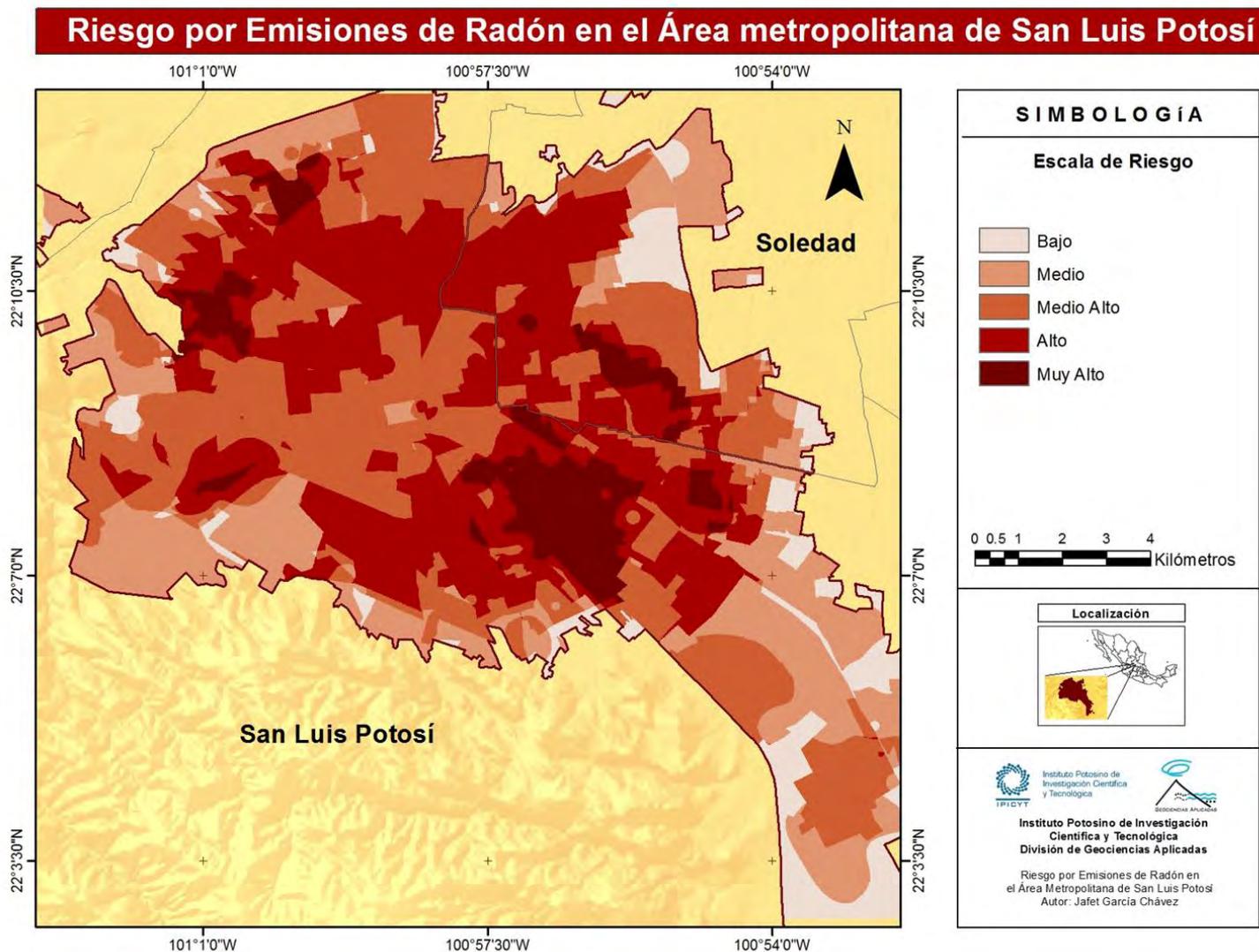


Figura 4.11 Mapa de riesgo toxicológico por emisiones de radón en el Área Metropolitana de San Luis Potosí, elaborado a partir de la geología, emisiones de radón y densidad de población.

Capítulo 5

Conclusiones

- La zona metropolitana de San Luis Potosí, presenta altos niveles de ^{222}Rn . El área de estudio cuenta con un promedio de $5,723 \text{ Bq/m}^3$ la mayor concentración fue de $47,100 \text{ Bq/m}^3$ y la menor de 400 Bq/m^3 .
- Existen factores naturales y antropogénicos que influyen en las concentraciones de radón en la zona urbana de San Luis Potosí.
- Dentro de los factores naturales en las altas emisiones de ^{222}Rn , se encuentra la geología, (roca fuente y relleno sedimentario en el valle) y la urbanización como factor antropogénico.
- Las bajas concentraciones de radón están asociadas principalmente a la geología; en el poniente de la zona urbana se debe al afloramiento de la roca fuente (riolita), conglomerados permeables, zonas con baja urbanización; mientras que, en el oriente las bajas concentraciones se deben a la presencia de calizas que son rocas con bajas emisiones de radón.
- Los valores más bajos encontrados en la zona de estudio sobrepasan en gran medida los niveles máximos establecidos por normas internacionales.
- Alrededor de un 50% de la mancha urbana presenta niveles de radón entre $3,000$ y $6,000 \text{ Bq/m}^3$.
- Hacia la parte central de la zona urbana, se midieron los valores más altos que llegan a alcanzar los $40,000 \text{ Bq/m}^3$.
- Con el método pasivo (CR -39) se pudo comprobar las altas concentraciones en San Luis Potosí, debido a la gran cantidad de impactos registrados en las placas en comparación con otras regiones del país como en Bajío.
- El mapa de riesgo toxicológico de ^{222}Rn indica que existen condiciones extremas en las inmediaciones de la central camionera, el Blvd. Española, las colonias Valle Dorado, Del Llano, Española, El Naranjal, Esmeralda y Anáhuac.

Recomendaciones

- Llevar a cabo un estudio con una mayor densidad de mediciones por el método pasivo, considerando las anomalías encontradas con el método activo.
- Realizar mediciones durante periodos de tiempo más largos con el método activo (RAD7) para analizar la variación de las concentraciones diurnas, nocturnas y estacionales.
- Ampliar el área de estudio con el método activo, densificando los puntos tanto en la zona de valle como montañosa.
- Medir las condiciones de ^{222}Rn en los aprovechamientos de abastecimiento de agua de San Luis Potosí.
- Llevar a cabo un monitoreo de las concentraciones de radón en el aire en casas habitación y sitios públicos cerrados con la finalidad de ver los niveles a los que está expuesta la población directamente.
- Se recomienda a la población en general a mantener una buena ventilación en las habitaciones de las casas para disminuir los niveles de radón que puedan concentrarse.
- Llevar a cabo un estudio de personas que padecen o padecieron de cáncer de radón
- Se recomienda a la secretaria de salud llevar a cabo una campaña de diagnóstico de cáncer de pulmón en las zonas con un alto índice de riesgo toxicológico por ^{222}Rn .
- Este trabajo se podría complementar con estudios geofísicos, (magnetometría, gravimetría, radiación gamma, métodos eléctricos) que ayuden a entender mejor el comportamiento del radón, con respecto a la geología estructural del valle de San Luis Potosí.

Bibliografía

- A. F. Saad, Y.K. Abdalla, N.A. Hussein, I.S.Elyaseery. Radon exhalation rate from building materials used on the Garyounis University campus, Benghazi, Libya. Turkish J. Eng. Env. Sci. 34, 67 – 74. 2010
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2006. Health consultation. An investigation of cancer incidence in Monticello, Utah. Atlanta, Georgia: U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Health Assessment and Consultation.
- Arzate-Flores, F., Barboza-Gudiño, R., Del Rosal, A., R., López-Doncel, R., Mata-Segura, J.L., Olivares, C., Pacheco-Martínez, J., Peña-Díaz, I. Estudio Geológico-Geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, H. Ayuntamiento de San Luis Potosí, H. Ayuntamiento de Soledad de Graciano Sánchez, Gobierno del estado de San Luis Potosí, Informe final. 2006.
- Atlas de Riesgos para la zona conurbada San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2011.
- Aguirre Hernández M.A. Geología del subsuelo de las cuencas Geohidrológicas del Valle de San Luis Potosí y Villa de Reyes, en el Edo. De San Luis Potosí. UASLP Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 116, 46 p. 1992. Estudio de fallas – geológico de San Luis pp 31
- Ayala – Estrada A. Medición de Radón-222 en Ambientes Geohidrológicos en la Fracción Central de México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2009.

Bibliografía

- Barros-Dios J., Barreiro M., Ruano-Ravina A., Figueiras A. Exposure to Residential Radon and Lung Cancer in Spain: A Population-based Case-Control Study. American Journal of Epidemiology Vol 156 No.6, 548 – 555. 2002.
- BEIR VI. Health effects of exposure to Radon. National Academy Press. Washington, DC. 1999. Pag 1-
- Berenguer M. Radón en Ambientes interiores Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales España. 1999
- Budd G. et al. Intercomparison of radon and decay products measurements in an underground mine and EPA Radon Laboratory: a study organized by the IAEA International Radon Metrology Programme. Health Phys. 75, 465-474. 1998
- Bulbulian S. La radiactividad. Fondo de Cultura Económica. México 1996.
- Bunzl K, Ruckerbauer F, Winkler R. Temporal and small-scale spatial variability of ²²²Rn gas in a soil with a high gravel content. Sci Total Environ 220(2-3):157-166. 1998
- Cárdenas S.L, Peña P., López M. B. E., Balcázar M., Madrigal D. Distribución espacial de la concentración de radón en suelo y agua subterránea en el Centro Nuclear de México y sus alrededores utilizando un sistema de información geográfica. XIII Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN.
- Claudi Mans Teixidó. ¿Cómo se mide la radiactividad y Cuáles son sus efectos?. Artículo de divulgación publicado en 24/Marzo/2011 encontrado en:
- Consejo de Seguridad Nuclear de España. Madrid. 2010

Bibliografía

- Censos de Población y Vivienda 1995, 2005 Principales Resultados por Localidad (ITER), México 2015.
- Díaz – Saldierna R.L. Emisiones de Radón 222 en la falla Morales de la Zona Urbana de San Luis Potosí, S.L.P., y Riesgos Asociados U.A.S.L.P. 2015.
- DURRIDGE Company Inc. Manual de usuario detector de radón RAD7. Billerica, MA. 2012
- EPA, Acerca del Radón, Riesgos para la Salud
http://www.epa.gov/iaq/espanol/radon_riesgos_para_la_salud.html
28/Ago/14
- EPA, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for radon, U.S. Department of Health and Human Services. 2012
- Espinosa G. Trazas Nucleares en Sólidos. UNAM. México pp.33 – 35. 1994
- Espinosa G., Golzarri J.I., Rickards J., Gammage R.B. Distribution of Indoor Radon Levels in Mexico. Radiation Measurements 31, 355-358 1999.
- F. Mireles, M.L. García, L.L. Quirino, J.I. Dávila, J.L. Pinedo, C. Ríos, M.E. Montero, L. Colmenero, L. Villalba. Radon survey related to construction materials and soils in Zacatecas, México using LR-115. ELSERVIER pp 1397 – 1403. 2007
- Fujiyoshi R, Morimoto H, Sawamura S. Investigation of the soil radon variation during the winter months in Sapporo, Japan. Chemosphere 47(4):369-373. 2002
- García – Betancourt M. L. Distribución de la concentración de ^{222}Rn en el Estado de Zacatecas mediante Trazas Nucleares. Universidad Autónoma de Zacatecas, Centro Regional de Estudios Nucleares. 2004.

Bibliografía

- García M.L., Radon survey related to construction materials and soils in Zacatecas, México using LR-115, Radiation Measurements 42, 1397 – 1403. 2007.
- García E. Climas, escala 1:1'000,000, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Mexico. 1998
- Health Canada: <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/radiation/radon/effects-effets-eng.php> visto: 28/Ago/2014
- <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/pha/CancerIncidenceInMonticelloUT/CancerIncidenceMonticelloHC051706.pdf>. August 08, 2008.
- <http://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/24/posts/nuclear-3-cmo-se-mide-la-radiactividad-y-cules-son-sus-efectos-10297>
- INEGI, Censos de Población y Vivienda 1990, 2000, 2010 Principales Resultados por Localidad (ITER), México 2015.
- INEGI, Guías para la Interpretación de Cartografía, Edafología, México 2004
- INEGI, Panorama sociodemográfico de San Luis Potosí, Censo de Población y Vivienda (2010), México 2011
- INEGI, Sistema para la Consulta de la Información Censal, SCINCE 2010, México 2011. <http://gaia.inegi.org.mx/scince2/viewer.html>
- INIFAP – CONABIO, Edafología Escalas 1:1,000,000, México. 1995
- IUSS – WRB, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. 2007
- García-Chávez J., Rojas-Ortega, J. E., Galván-Pineda, A. Martínez-Ramírez, Identificación de Sitios con Potencial de Recarga Natural y Artificial de Acuíferos en el Valle de Querétaro. IPICYT. 2014

Bibliografía

- Jabbar H. Jebur, Abdul Ridha H. Subber. The Measurements of Natural Radioactivity, (Radon and Gamma concentrations), around the old fertilizer factory in Basrah/Iraq. *Journal of Advances in Physics* Vol. 7 No.1, 1324 – 1335. 2014.
- Jamil K. et al. Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors. *Health Phys.* pp.73, 629-632. 1997.
- Martínez-Ruiz, V. J. Actualización del Marco Geológico del Subsuelo del Valle de San Luis Potosí; Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico No. 123, 19 p. 1997
- Nero A. Indoor concentrations of radon-222 and its daughters: Sources, range, and environmental influences. In: Gammage R, Kaye S, eds. *Indoor air and human health*. Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc., 43-67. 1987
- OMS. Selected radionuclides. *Environmental Health Criteria* 25. Geneva: Organización Mundial de la Salud. 1983.
- Planinić J, Šuveljak B, Faj Z. Radon distribution in dwellings. *J Radiol Prot* 1994. 14(3):235-239.
- Quindós Poncela L.S. Radón, Un gas radiactivo de origen natural en su casa. Consejo de Seguridad Nuclear y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, Madrid. 1995
- Radon, Radium, and Other Activity in Ground Water. Hall F. *Geologic Controls and Radon Occurrence in New England*.
- Segovia N., Gaso M.I., Armienta M. A. Environmental radon studies in Mexico. *Environ Geochem Health* 29,143–153. 2007.
- Selinus O. et al. *Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Elsevier Academic Press. 2005

Bibliografía

- Taeger D. Radon, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011
- The National Academy of Sciences. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI, National Academy Press. 1999
- Thomas F. Gesell, Wayne M. Lowder. Natural Radiation Environment III, Technical Information Center/U.S. Department of Energy, Estados Unidos de America. 1980

Anexos

Anexo 1 Valores de ^{222}Rn método activo (RAD7)

Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m ³	% Aumento	Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m ³	% Aumento
1	2030	2290	13	40	5570	6490	17
2	1490	1590	7	41	1765	2775	57
3	5040	5495	9	42	1615	2220	37
4	9445	13050	38	43	2680	3735	39
5	3000	3280	9	44	2795	2975	6
6	3575	4410	23	45	1815	1725	-5
7	2825	3705	31	46	2875	3520	22
8	207	377.5	82	47	4200	5335	27
9	1960	2295	17	48	3505	4260	22
10	801	882	10	49	3730	4345	16
11	879	1037.5	18	50	1355	1540	14
12	642.5	746.5	16	51	2155	2590	20
13	2525	3370	33	52	3740	4625	24
14	1605	1755	9	53	5380	6445	20
15	1128.5	730	-35	54	2405	3065	27
16	1545	1850	20	55	3175	3690	16
17	546.5	691.5	27	56	2095	2230	6
18	397.5	789	98	57	4165	5390	29
19	219.5	400.5	82	58	3320	4165	25
20	445.5	766	72	59	3435	4765	39
21	2035	2695	32	60	3640	4270	17
22	1240	1575	27	61	2245	2890	29
23	397	822.5	107	62	1062	1425	34
24	805	1268.5	58	63	1116	1455	30
25	3955	4890	24	64	1830	2650	45
26	2395	2605	9	65	3625	4635	28
27	1605	1720	7	66	2540	3820	50
28	2310	2590	12	67	1515	1770	17
29	1395	1505	8	68	1550	1650	6
30	2915	3495	20	69	3050	5100	67
31	6810	8420	24	70	2305	3410	48
32	6445	8850	37	71	1365	1965	44
33	2650	3010	14	72	5760	7570	31
34	2075	2285	10	73	2740	3355	22
35	5335	6650	25	74	2255	2920	29
36	1720	1720	0	75	2620	3345	28
37	2225	2275	2	76	1700	1990	17
38	1490	1745	17	77	1850	2555	38
39	844	1045	24	78	1655	2135	29

Anexos

Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m3	% Aumento	Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m3	% Aumento
79	3505	4465	27	118	15400	22600	47
80	7055	9430	34	119	2630	4120	57
81	5580	6705	20	120	6015	9640	60
82	2600	3150	21	121	8715	15350	76
83	4615	5485	19	122	4375	6920	58
84	8055	9445	17	123	2975	4980	67
85	5565	6355	14	124	4610	7960	73
86	10795	13150	22	125	1680	2980	77
87	4705	5480	16	126	8555	15950	86
88	5780	6485	12	127	8605	12250	42
89	2715	3290	21	128	5290	7625	44
90	1214	1467.5	21	129	3845	5255	37
91	1350	1640	21	130	3380	5535	64
92	1930	2530	31	131	11700	19150	64
93	1535	2265	48	132	2080	3420	64
94	1210.5	2215	83	133	3665	4145	13
95	821.5	1405	71	134	3375	4160	23
96	954.5	1430	50	135	15900	21300	34
97	1075	1435	33	136	11250	16300	45
98	508	710.5	40	137	1632.5	2676.5	64
99	7640	12000	57	138	3005	4770	59
100	7645	11800	54	139	3070	4825	57
101	9840	13900	41	140	1259	2190	74
102	3690	4980	35	141	1570	2485	58
103	2235	3735	67	142	2535	3755	48
104	2925	4335	48	143	1990	2990	50
105	3360	5870	75	144	2460	2825	15
106	2600	4335	67	145	2780	3660	32
107	4040	6945	72	146	1771	2751	55
108	4230	7490	77	147	3605	6355	76
109	4325	7140	65	148	6515	10505	61
110	5030	7165	42	149	3560	5050	42
111	7270	10965	51	150	4700	7650	63
112	5730	8955	56	151	4430	7355	66
113	7105	11600	63	152	3215	4590	43
114	7345	12200	66	153	5055	6975	38
115	7625	10850	42	154	2435	3545	46
116	10270	15100	47	155	5020	6450	28
117	11900	17450	47	156	5480	7840	43

Anexos

Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m3	% Aumento	Punto	Valor campo	Valor Real Bq/m3	% Aumento
157	7960	11050	39	196	3750	4290	14
158	29150	41200	41	197	3550	4570	29
159	33400	47100	41	198	2685	3855	44
160	6735	9865	46	199	1720	2105	22
161	6970	8785	26	200	2005	2795	39
162	3015	4230	40	201	848.5	1070	26
163	4175	4795	15				
164	4405	6440	46				
165	3085	3945	28				
166	2420	3725	54				
167	4510	6650	47				
168	11200	19950	78				
169	3275	4745	45				
170	1120	2015	80				
171	3600	5315	48				
172	2230	3500	57				
173	5885	8695	48				
174	5865	9660	65				
175	3315	3560	7				
176	6340	8025	27				
177	6180	7475	21				
178	5910	7050	19				
179	2900	3825	32				
180	11150	15300	37				
181	2740	3865	41				
182	2775	4195	51				
183	8910	13450	51				
184	4880	7345	51				
185	2920	4490	54				
186	1715	2260	32				
187	3815	5210	37				
188	3890	5385	38				
189	4160	5780	39				
190	4230	5870	39				
191	5535	7875	42				
192	3890	4815	24				
193	3870	4530	17				
194	5270	6825	30				
195	4320	5070	17				

Anexo 2

Valores de ²²²Rn método pasivo (CR-39)

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud	Niveles (Bqm3)	Registro	Instalacion	Recolección	Zona	Condición urbana	Tipo de Suelo	Condición del Suelo
1	299430	2446335	1863	1238.16	7030887	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arcilla	Humedo
2	294809	2453284	1876	942.48	7030888	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arcilla	Seco
3	291864	2455885	1902	3787.52	7030889	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Gravas-Arenas	Seco
4	291511	2455164	1911	2999.92	7030890	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Gravas-Arenas	Seco
5	293312	2453604	1896	1073.6	7030891	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arcilla	Humedo
6	294582	2457165	1883	2147.2	7030892	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arcilla-Arena	Seco
7	300566	2449991	1858	2062.72	7030893	24-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
8	290816	2447814	1973	1828.64	7030895	24-ene-15	22-feb-15	Montaña	Semiurbanizado	Arena	Semiseco
9	292539	2448025	1918	1304.16	7030896	25-ene-15	22-feb-15	Valle	No Urbanizada	Arena	Semiseco
10	293889	2448836	1885	2665.52	7030897	25-ene-15	22-feb-15	Valle	No Urbanizada	Arena	Semiseco
11	309014	2450068	1847	2763.2	7030898	25-ene-15	22-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arena	Semiseco
12	305406	2450688	1841	1717.76	7030899	25-ene-15	22-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arena	Seco
13	294321	2450875	1892	2368.08	7030900	25-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
14	292041	2451805	1896	1474.88	7030915	25-ene-15	22-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
15	294924	2454496	1875	2540.56	7030916	25-ene-15	22-feb-15	Valle	No Urbanizada	Arena-Grava	Seco
16	296849	2451529	1867	946	7030917	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arcilla	Humedo
17	299295	2453476	1861	2419.12	7030918	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Semiseco
18	300377	2458176	1857	2385.68	7030919	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arena - Grava	Seco
19	291995	2453940	1916	2872.32	7030920	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
20	294864	2449839	1890	3881.68	7030921	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena-Arcilla	Semiseco
21	294570	2448354	1882	2601.28	7030922	26-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Semiseco
22	295224	2450773	1882	2422.64	7030923	27-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Semiseco
23	288455	2454912	1948	1442.32	7030924	27-ene-15	24-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arena	Seco
24	290159	2450685	1914	2493.92	7030925	27-ene-15	24-feb-15	Montaña	Semiurbanizado	Arena	Seco
25	298802	2453603	1866	2513.28	7030894	27-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
26	295135	2456145	1880	6254.16	7030926	27-ene-15	24-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena	Seco
27	296364	2456744	1872	2705.12	7030927	28-ene-15	24-feb-15	Valle	Semiurbanizado	Arenas	Seco
28	302771	2450026	1851	1027.84	7030928	28-ene-15	25-feb-15	Valle	Urbanizado	Arena - Arcilla	Seco