

GAS RADON EN CUEVAS

*Su origen, medición, distribución,
y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública*

Guillermo C. Espinosa G.



Edición Técnica: José Ignacio Golzarri y Moreno



**Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria**

04510, México, D.F., México.

México, 2016.

GAS RADON EN CUEVAS

**Su origen, medición, distribución,
y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública**

**Guillermo C. Espinosa G.
Instituto de Física, UNAM**

Instituto de Física, UNAM
México, 2016

GAS RADON EN CUEVAS

**Su origen, medición, distribución,
y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública**

Guillermo C. Espinosa G.

Edición Técnica: José Ignacio Golzarri y Moreno

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria
04510, México, D.F., México.

México, 2016

GAS RADON EN CUEVAS, su origen, distribución, y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública.

D.R. © Primera edición, 2016
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México.

Instituto de Física, UNAM

ISBN 978-607-02-7822-8

Impreso y hecho en México / Print and made in Mexico.

Portada
Joan Miro (1893-1983)
Azul III (1961)

A ROSA, BARUJ Y AARON

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas e instituciones que han dado su apoyo, a través del tiempo, a la creación y desarrollo de Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) del Instituto de Física (IF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). A todos los Directores de mi querido Instituto de Física, UNAM, por su aportación al crecimiento académico del Instituto.

A José Ignacio Golzarri, amigo y compañero, que realizó la captura y estructuración del manuscrito, recolección de fotografías, y todos los demás detalles requeridos para la creación del libro.

A la Mtra Aleida Rueda, por su apoyo e interés en la Divulgación de la Ciencia, y la gestión administrativa con la UNAM.

Un muy especial reconocimiento a los colegas con los que a través de muchos años hemos venido colaborando en el tema de radón en cuevas, hemos realizado medidas, trabajado en campo, e investigaciones como han sido: Javier Borau y Alejandro González, del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Linda Manzanilla, del Instituto de Investigaciones Antropológicas (UNAM); Juan Morales Malacara y Marisol Eliuth Vega-Orihuela, del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); y José Viccon y Martha Signoret (qepd) de la Universidad Autónoma Metropolitana, plantel Xochimilco (UAM-X).

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su muy importante contribución a la investigación, docencia y divulgación de la ciencia y la cultura en nuestro País.

A el Instituto de Física de la UNAM, por su dedicación al cultivo de la ciencia básica y experimental en Física y temas afines.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA), a través de los proyectos IN-101910, IN-103013, e IN-103316, que ha apoyado económicamente la realización de estas investigaciones, la producción de artículos científicos, la formación de recursos humanos, y la producción de este libro.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

CAPITULO I

RADÓN, SU ORIGEN Y PROPAGACIÓN	1
I.1.- Exposición a radón ambiental y su contribución a la dosis total de los seres vivos y los humanos.	5
I.2.- Acumulación de radón intramuros, en cuevas y en general en espacios cerrados.	8
I.2.1.- Casas, edificios y construcciones.	8
I.2.2.- Cuevas, cavernas y grutas.	10
I.3.- Como evitar riesgos radiológicos dentro de cuevas y espacios cerrados.	12
I.4.- Riesgo radiológico y efectos biológicos debidos al radón intramuros.	13
I.5.- Efectos del radón en Salud Pública.	14
I.6.- El medir radón es un “Arte”.	17

I.7.- Niveles de concentración de radón intramuros y su reglamentación internacional.	20
---	----

CAPITULO II

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RADÓN INTRAMUROS	27
--	----

II.1.- Métodos Dinámicos o Activos (características y condiciones de operación)	27
---	----

II.1.1.- AlphaGUARD [®]	28
----------------------------------	----

II.1.2.- Rad-7 [®]	28
-----------------------------	----

II.1.3.- SARAD RTM-1688	29
-------------------------	----

II.1.4.- Sun Nuclear [®] 1027	30
--	----

II.1.5.- DOSEman [®]	32
-------------------------------	----

II.2.- Métodos Pasivos (características y condiciones de medición)	33
--	----

II.2.1.- Carbón activado	33
--------------------------	----

II.2.2.- Electret (E-PERM)	35
----------------------------	----

II.2.3.- Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos (NTS)	36
--	----

II.2.4.- Termoluminiscencia (TL)	39
----------------------------------	----

CAPÍTULO III

MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)	43
III.1.- Dispositivo PAD-IFUNAM para la medición de radón intramuros	43
III.2.- CR-39 (PADC - Poly Allyl Diglicol Carbonate) como material detector.	46
III.3.- Procedimientos de grabado químico.	48
III.4.- Conteo y análisis de trazas nucleares	49
III.5.- Métodos de conteo	51
III.5.1.- Microscopio óptico	51
III.5.2.- Sistema de análisis digital de imágenes (DIAS)	52
III.5.3.- Sistema de conteo y análisis digital de imágenes (CADIS)	52
III.6.- Cámara de calibración de radón del ORNL-USA	55
III.7.- Cámara de verificación PAD-IFUNAM.	55
III.8.- Cámara de radón natural bajo tierra.	57

CAPÍTULO IV

CUEVAS ESTUDIADAS	61
IV.1.- Estudios y mediciones de radón en cuevas mexicanas	61
IV.1.1.- Gruta de Aguacachil (Zacatecolotla), Guerrero.	64
IV.1.2.- Cueva de Pozas Azules, Guerrero.	68
IV.1.3.- Gruta de San Jerónimo, Guerrero.	71
IV.1.4.- Cueva Gabriel, Oaxaca.	74
IV.1.5.- Cueva de los Riscos, Querétaro.	78
IV.1.6.- Cueva del Judío, Querétaro.	83
IV.1.7.- Cueva Coyozochico, Puebla.	85
IV.1.8.- Cueva Karmidas, Puebla	87
IV.1.9.- Cuevas de las Varillas y Cueva del Pirul, en Teotihuacán, Edo de México.	91
IV.1.10.- Gruta de la Pirámide del Sol, en Teotihuacán.	94
IV.2.- Comparación de niveles de radón (^{222}Rn) intramuros en cuevas en diferentes regiones del mundo	100
IV.3.- Relación del nivel de concentración de radón en cuevas y espacios cerrados, y colonias de murciélagos y otras especies	102

COROLARIOS	105
REFERENCIAS	107
ANEXO 1 DEFINICIONES	115
ANEXO 2 UNIDADES	119
ANEXO 3 Trabajos publicados por nuestro grupo de investigación en el IFUNAM, sobre Radón (1990-2015).	127

INTRODUCCIÓN

El radón (^{222}Rn , ^{220}Rn , y ^{219}Rn) es un gas noble que existe en la naturaleza, producto del decaimiento radioactivo del Uranio y del Torio, elementos que, existentes en el planeta Tierra desde su formación. Este gas natural es incoloro, inodoro, insípido, pertenece al grupo de los gases nobles, y tiene la característica de ser Radioactivo.

Actualmente, se sabe que el gas radón por ser radioactivo, es el contribuyente más importante de radiación natural que reciben los seres vivos, y el propio Humano; con más del 50% de dosis efectiva (IAEA, 1989; NCRP, 2009). Por tener el gas radón esta característica de radioactividad, se considera un posible riesgo para la salud, ha sido y es, objeto de estudio por Instituciones, Organismos Nacionales e Internacionales, Países, Centros de Salud, y Universidades, entre otras (IAEA, 2012; ICRP, 1993; USEPA, 2004; UNSCEAR 2000, 2009; WHO, 2009).

En países como Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Irlanda, Francia, Alemania, España, Suiza, Italia, Países Bajos, República Checa, Dinamarca, Suecia, Noruega, Finlandia, Rusia, Israel, Japón, e India, se han creado programas nacionales para el estudio, de radón intramuros y extramuros. La principal motivación de estos programas, es entender la relación entre los niveles de radón, su distribución, y el riesgo en salud pública y epidemiológica. Padecimientos como cáncer pulmonar, de tráquea, leucemias, daño en el sistema digestivo y vascular, pueden ser atribuibles a la ingesta e inhalación de radón. (Espinosa et al, 2011; Kendall and Smith, 2002; Dixon et al, 1996; Choubey et al, 2005)

El Proyecto de Aplicación de la Dosimetría (PAD) del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM), ha puesto énfasis en el estudio del radón intramuros, como tema de investigación desde hace más de 25 años, se han

publicado más de 50 artículos en revistas internacionales sobre este tema, sus riesgos, aplicaciones y forma de medición y mitigación. Se desarrollaron varios dispositivos para la medición de radón y torón, se estructuró la metodología y se realizaron los protocolos para la evaluación de los niveles de concentración de radón intramuros, así como los procedimientos de calibración y verificación de contenidos de radón. Estos dispositivos para el estudio de radón intramuros, se han utilizado en casas, edificios y lugares de trabajo, en la zona metropolitana de la Ciudad de México, y en casi todos los estados de la Republica Mexicana. Así como en la Pirámide del Sol en la zona arqueológica de Teotihuacán, en cuevas mexicanas, motivo fundamental de este libro.

En el capítulo I, Se describe el radón, su origen y propagación; los riesgos radiológicos y efectos biológicos debidos al radón; al arte de medir el radón, y los niveles de radón y su reglamentación a internacional; en el capítulo II, se describen los métodos para las mediciones de radón intramuros, tanto dinámicos como pasivos; en el capítulo III, se presenta la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, para la medición de radón intramuros; en el capítulo IV se muestra en forma detallada el estudio y análisis de concentraciones de radón en cada una de las cuevas estudiadas, así como la comparación con otras cuevas reportadas en la literatura internacional, y la propuesta de establecer como biomarcadores vivientes a los murciélagos hospedados en las cuevas, en base a los datos encontrados en el estudio de estas cuevas mexicanas.

Uno de los objetivos de este libro es acercar a los lectores, tanto especialistas como al público en general, al conocimiento del gas noble, natural y radioactivo, denominado radón, el cual se encuentra y acumula en recintos cerrados o de baja ventilación. Haciendo énfasis sobre la distribución del radón en cuevas mexicanas. Siendo esta información valiosa para espeleólogos, biólogos, arqueólogos, geólogos, guías de turistas y visitantes de cuevas, tanto desde el punto de vista científico, de salud pública y económico.

ANTECEDENTES

Desde el origen de la vida en el planeta Tierra, ha existido lo que se denomina las “radiaciones ambientales”. Las primeras células y seres vivos, recibieron estas radiaciones y no murieron, sino al contrario, crecieron, se multiplicaron y evolucionaron, dando origen a la infinidad de especies, desde las arqueobacterias hasta los mamíferos, pasando por los celentéreos (medusas), los crustáceos, moluscos, anfibios, reptiles, artrópodos, los peces, las aves, hasta llegar al ser humano.

Esto es una evidencia de que las “radiaciones ambientales” naturales, no solo no han sido nocivas, sino como se menciona en los círculos científicos actuales: “Las radiaciones son esenciales para la vida humana”, pudiendo agregar: y para la evolución de las especies en la Tierra.

Más recientemente (1995) sobre el conocimiento de las radiaciones ionizantes, se introdujo un nuevo concepto llamado “Hórmesis”. Esto es, el estudio de los efectos benéficos de las radiaciones ionizantes en el humano y los seres vivos, a bajas dosis de radiación, similares a los niveles de la radiación ambiental.

Dentro de los efectos horméticos de la radiación ambiental, se ha encontrado: (Luckey, 1991)

- 1) Propician un mejor crecimiento celular.
- 2) Existe una estimulación positiva al sistema inmune.
- 3) Una menor propensión a cánceres, en los seres vivos.

Todo esto nos lleva a continuar estudiando y conociendo el universo de radiaciones ionizantes en donde hemos vivido inmersos, y sus efectos en los organismos y los seres vivos.



<http://www.psicoadactiva.com/ilu/curios5.htm>

En la figura (vieja- joven), se muestra perfectamente lo que es en general la opinión pública sobre las radiaciones ionizantes. Muchos ven una vieja bruja en esta figura, pero si se escudriña con cuidado, encontraremos una joven muy “prometedora”, como son la infinidad de aplicaciones de las radiaciones como son en industria, medicina, investigación entre otras, la hórmesis; pero siempre en beneficio de la sociedad, de la economía y de la salud.

*La principal motivación de un investigador,
es el del placer que encuentra cuando,
a partir de datos o ideas confusas,
logra aclararlos o insertarlas
en el lugar que les corresponden
dentro del esquema
de las ciencias que cultiva*

Marcos Moshisky B.

CAPITULO I

RADÓN, SU ORIGEN Y PROPAGACIÓN.

El radón es un gas noble, radioactivo, producto natural de la cadena del decaimiento del uranio doscientos treinta y ocho y del uranio doscientos treinta y cinco (^{238}U y ^{235}U), y del torio doscientos treinta y dos (^{232}Th), elementos que existen distribuidos en nuestro planeta Tierra, desde su origen. En el medio ambiente se encuentran presentes 3 isótopos del radón; el radón-222 (^{222}Rn), producto de la cadena de decaimiento del uranio (^{238}U) y que tiene una vida media de 3.8 días; el radón-220 (^{220}Rn) también llamado torón, producto de la cadena natural del ^{232}Th y tiene una vida media de 3.96 segundos; y el radón-219 (^{219}Rn) también conocido como actinon, que se genera del decaimiento de ^{235}U y tiene una vida media de 55 segundos. En la figura 1 se muestra la cadena natural de decaimiento del uranio-238 (^{238}U).

Siguiendo esta cadena, como ejemplo, el isótopo del uranio (^{238}U) éste decae a torio (^{234}Th) por emisión de partículas alfa, y este a su vez decae en protactinio (^{234}Pa), y esta cadena continúa hasta el radio (^{226}Ra), teniéndose la característica de que todos estos elementos son sólidos y permanecen dentro de la molécula que lo contiene como sólido. Pero al pasar del radio (^{226}Ra) al radón (^{222}Rn) por la emisión de una partícula alfa, los átomos cambian de estado de sólido a gaseoso, generando así una emanación al medio ambiente, permaneciendo en el aire que respiramos hasta su siguiente transformación en la cadena, en 3.8 días, convirtiéndose en polonio (^{218}Po) sólido, con vida media de 3.1 minutos, posteriormente decae por emisión beta en plomo (^{218}Pb) con vida media de 26.8 minutos. Este a su vez decae emitiendo otra partícula alfa en bismuto (^{214}Bi) con vida media de 19.7 minutos, emitiendo otra partícula alfa en plomo (^{210}Pb), para finalmente, pasando por bismuto (^{210}Bi), polonio (^{210}Po) y talio (^{206}Tl), terminar en plomo (^{206}Pb), elemento estable.

Esto mismo ocurre con las otras dos cadenas del decaimiento del ^{235}U y del ^{232}Th , que se muestran en las figuras 2 y 3, que generan el torón (^{220}Rn) y el actinon (^{219}Rn).

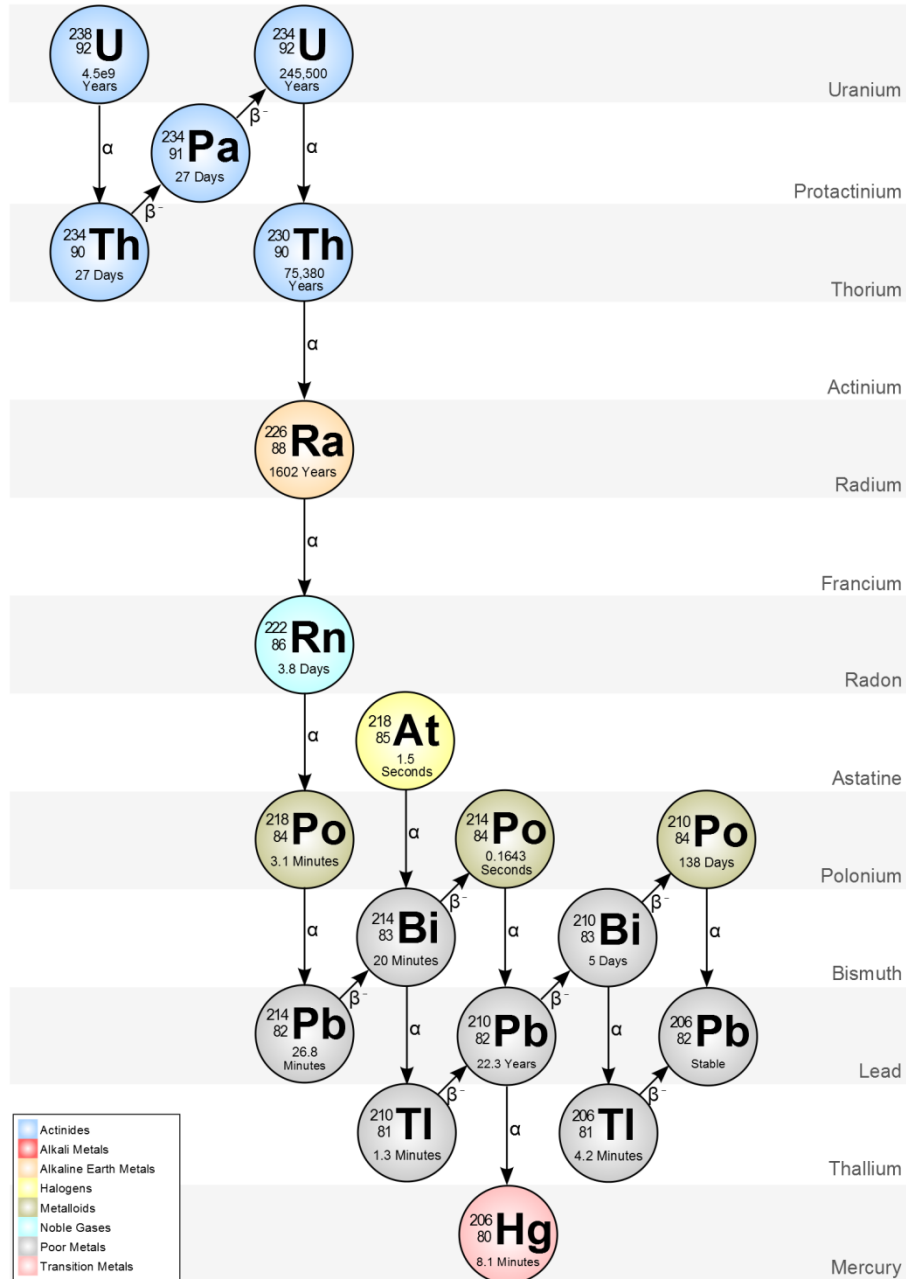


Figura 1.- Cadena natural de decaimiento del uranio (^{238}U).
<http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U238.png>

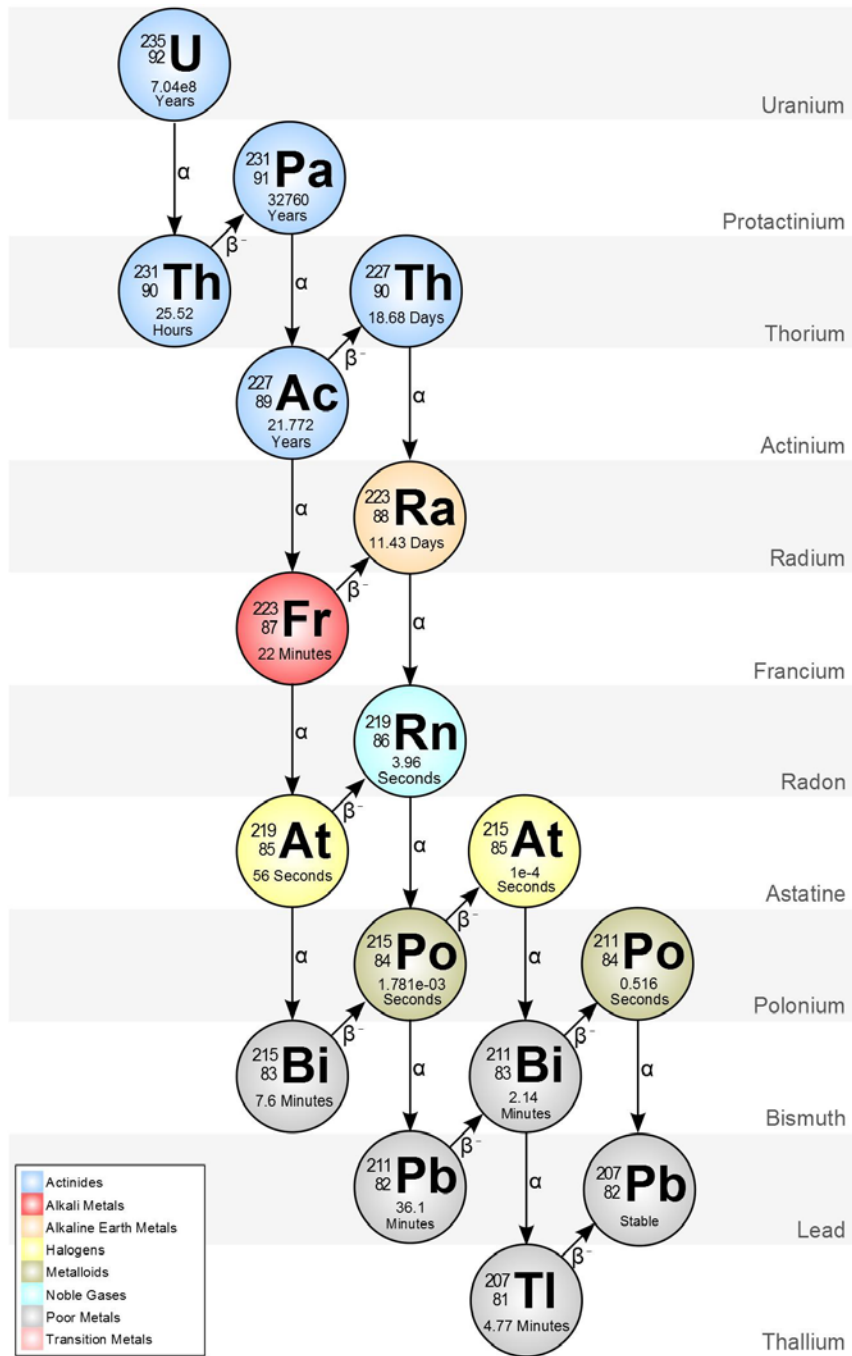


Figura 2.- Cadena de decaimiento natural del uranio (^{235}U).
<http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U235.png>

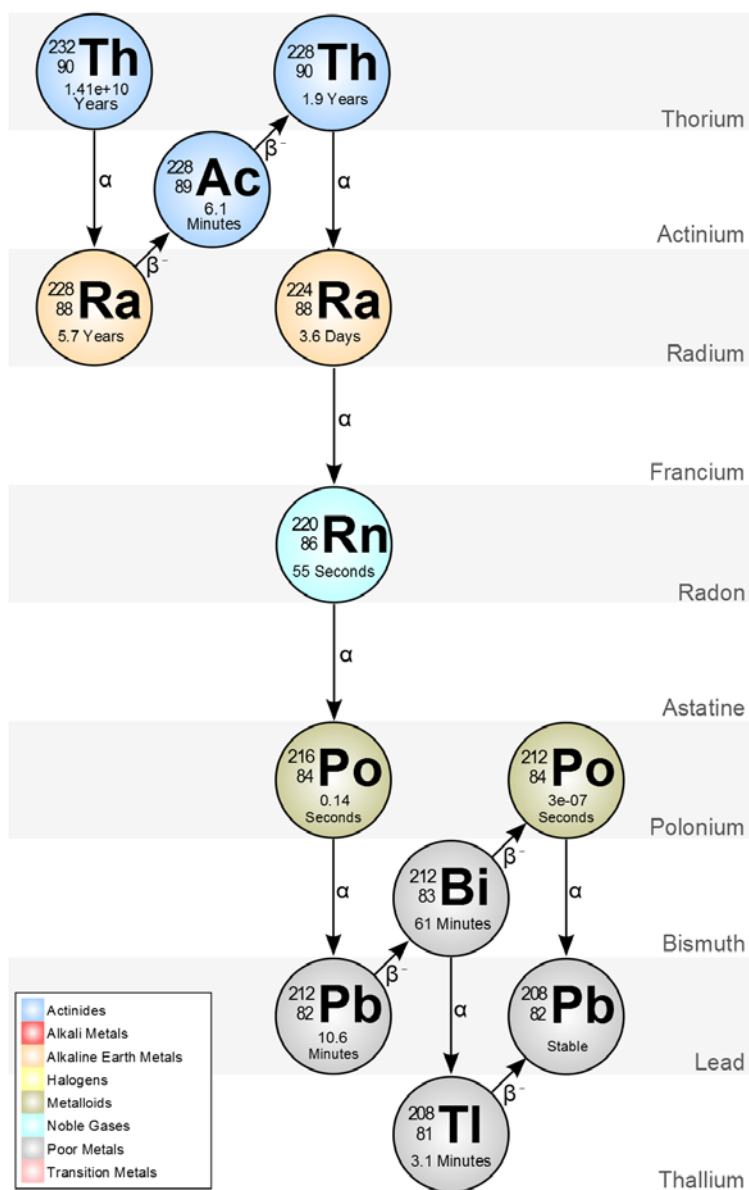


Figura 3.- Cadena de decaimiento natural del torio (^{232}Th).
<http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/Th232.png>

Como se observa en el texto anterior, los materiales de la corteza terrestre que contienen minerales de uranio y torio, debido al decaimiento radioactivo, son fuentes de radón. Por su naturaleza gaseosa, y pertenecer al grupo de los gases nobles, el radón posee una gran movilidad, y emigra desde los lugares de origen a través de

poros, grietas y fallas, hacia la superficie. Y de ahí pasa a formar parte de la atmosfera terrestre. Toda la superficie de nuestro planeta Tierra, constituye una fuente de radón, debido al fenómeno de exhalación. El gas radón, se acumula en lugares cerrados como son las cuevas, casas y edificios herméticos, o bien se va a la atmosfera mezclándose con los demás componentes del aire, y se distribuye alrededor de la Tierra debido a los agentes meteorológicos como son vientos, y corrientes convectivas, entre otras.

La distribución de radón en las aguas superficiales de océanos, ríos y lagos, puede presentar en lo general bajas concentraciones. Por lo contrario, en aguas subterráneas, en su recorrido a través de diversas formaciones geológicas, y/o acumulaciones en acuíferos, y siendo el radón soluble en agua, las concentraciones de éste pueden llegar a alcanzar valores muy elevados, siempre en función de las características hidrogeológicas del terreno. Por ejemplo, en zonas graníticas, las concentraciones de radón son muy superiores a las encontradas en suelos de otro tipo. Estas elevadas concentraciones de radón en aguas subterráneas, puede originar un riesgo radiológico para la salud, por lo que es recomendable la determinación de las concentraciones de radón en estas aguas para el consumo humano (Espinosa et al, 1981; Vázquez et al., 2011), así como en casas o habitaciones colindantes o por encima de estas aguas subterráneas.

I.1.- Exposición a radón ambiental y su contribución a la dosis total de los seres vivos y los humanos.

Se sabe que el radón de origen natural ambiental es el elemento radioactivo que contribuye con la mayor proporción (57%) a la exposición colectiva a la radiactividad natural que recibe la población en el mundo (ICRP, 1993; EURATOM, 1990; IAEA, 1989, 2012; NCRP, 2009; BEIR-VI, 1999, UNSCEAR, 2009). Y la inhalación de los productos de decaimiento

del radón, de corta duración son los responsables de la generación de cáncer pulmonar y algunas otras enfermedades, representando esto un riesgo potencial en salud pública de la población (ICPR, 1993). En la figura 4 se muestra la distribución porcentual de la radiación natural que recibe el ser humano (NCRP, 1987).

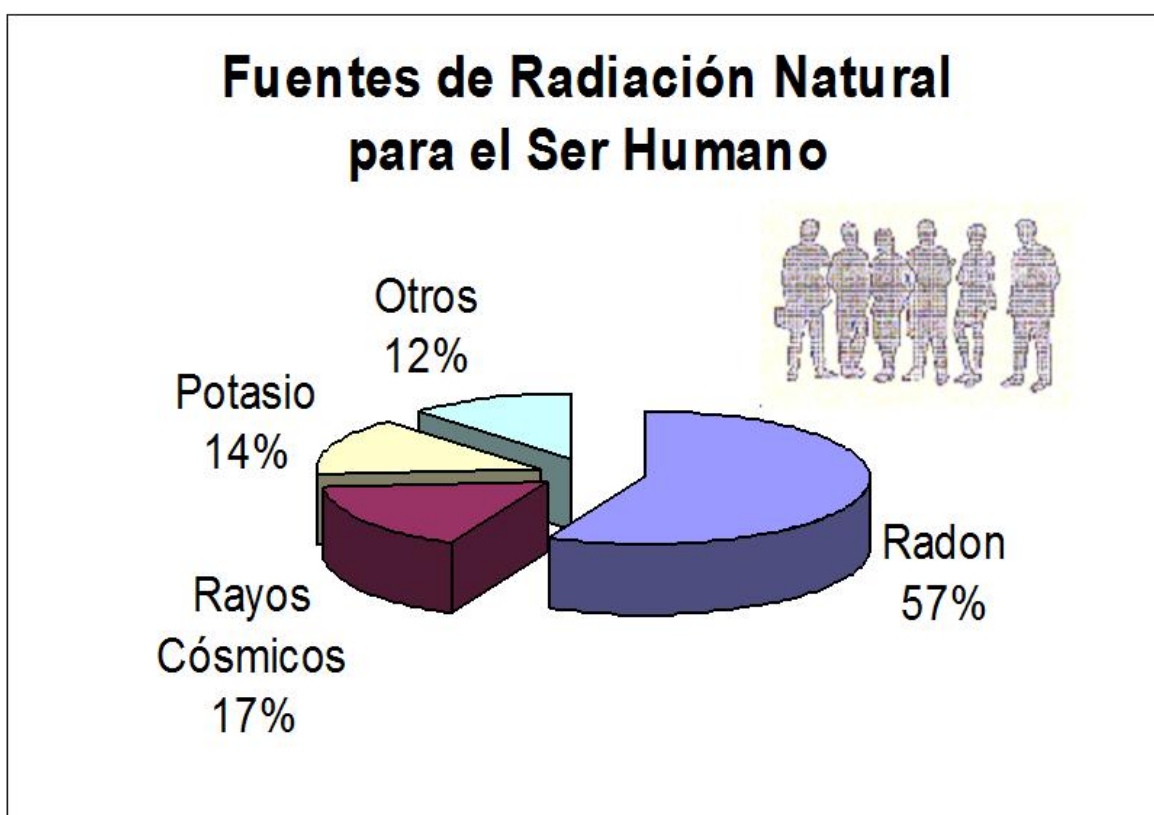


Figura 4. Fuentes de radiación natural (NCRP, 1987).

La toxicidad del radón se debe fundamentalmente a que es radioactivo, mientras que la probabilidad de que se metabolice es baja por ser un gas noble. Debido a que el radón es un emisor de partículas alfa, el riesgo potencial surge cuando penetra en el organismo, ya sea por inhalación, en donde se puede instalar en las paredes del tracto respiratorio o en el pulmón; o por ingestión adhiriéndose a las paredes del sistema digestivo, o bien, el radón puede atravesar los capilares sanguíneos y pasar al sistema circulatorio llegando a otros órganos del cuerpo. Las partículas alfa emitidas, depositan toda su energía en las células que están en

contacto, en cualquiera de los dos casos expuestos anteriormente. No obstante, el radón por sí mismo no presenta el más alto riesgo radiológico, sino que son los productos de decaimiento en equilibrio, descendientes sólidos de vida media corta, que son emisores de partículas alfa y beta. Para el caso del radón (^{222}Rn), son el polonio (^{218}Po), plomo (^{214}Pb), bismuto (^{214}Bi), polonio (^{214}Po), y plomo (^{210}Pb). En la figura 5 se muestra la gráfica del equilibrio del radón (^{222}Rn) con sus hijos.

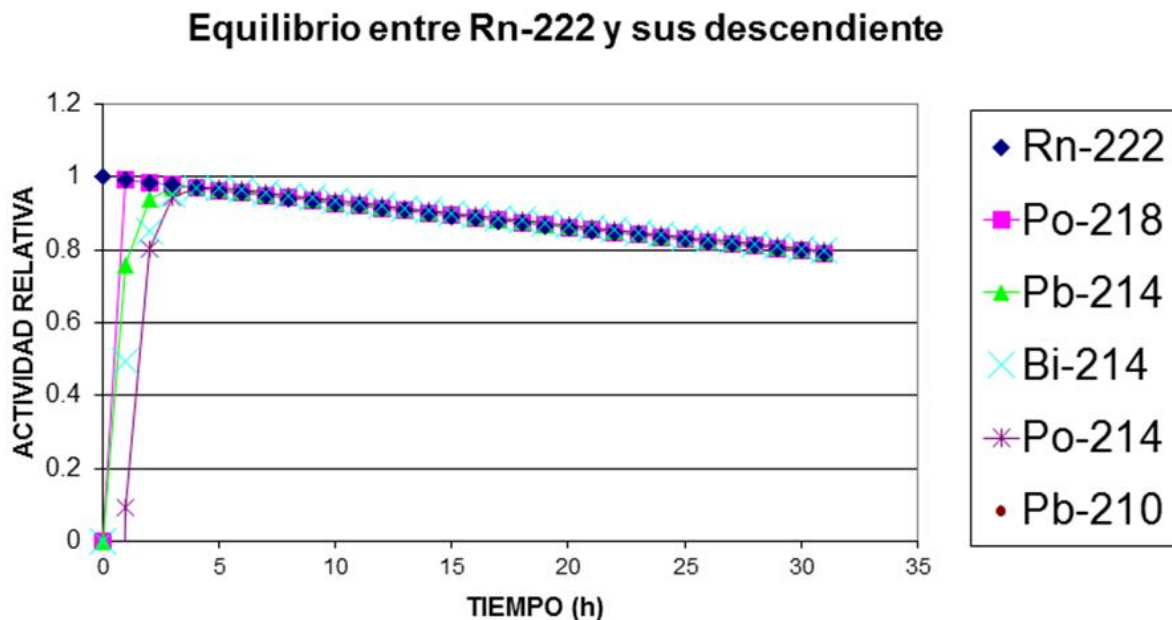


Figura 5.- Equilibrio radioactivo de radón-222 y la cadena de sus hijos.

Lo mismo ocurre para el radón (^{220}Rn), donde se tiene el polonio (^{216}Po), plomo (^{212}Pb), bismuto (^{212}Bi), polonio (^{212}Po), y plomo (^{208}Pb).

Como se mencionó, la vida media del ^{222}Rn es de 3.8 días, y la del ^{220}Rn de 55 segundos, por lo que la probabilidad de interacción e inhalación del ^{222}Rn , es mayor que la del ^{220}Rn . Hecho por el cual al ^{222}Rn , se le atribuye el mayor riesgo radiológico, y en ocasiones

solo se mide y evalúa éste. El ^{219}Rn , viene de la cadena de decaimiento del ^{235}U , cuya proporción en la naturaleza es de 0.72% con respecto al ^{238}U , debido a su baja abundancia natural, en general no se considera para efectos en salud pública. Como es sabido, las partículas alfa producen ionización en las células, creando radicales libres, rompimiento de moléculas como puede ser el ADN, ocasionando la muerte misma de la célula, favoreciendo esto la generación de cánceres en el pulmón, o en algún otro órgano del ser humano.

La exposición de los seres vivos al radón ambiental, es un evento cotidiano que ha ocurrido desde la creación del planeta Tierra; en este ambiente se han desarrollado las células, y se ha dado la evolución de las especies hasta nuestros días. Estudios recientes, han demostrado que ésta radiación ambiental, es esencial para la vida y presenta efectos benéficos (Casarett, 1968). El riesgo radiológico y a la salud, ocurre cuando las concentraciones o los niveles de radón son elevadas, debido a su acumulación en lugares cerrados, como son casas y edificios con poca ventilación, y por supuesto cuevas, tema principal de este libro.

I.2.- Acumulación de radón intramuros, en cuevas y en general en espacios cerrados.

I.2.1.- Casas, edificios y construcciones.

Como se mencionó anteriormente, el radón es un gas radioactivo que proviene del decaimiento natural de los uranios y del torio, encontrándose distribuido en suelos y subsuelo en todo el globo terráqueo. El gas radón - radioactivo, típicamente se desplaza, emigrando hacia la superficie, emanando con gran facilidad a través del suelo por fisuras, grietas, y áreas de subsuelo poroso. Acumulándose este radón en zonas cerradas como; cuevas e interiores de casas y edificios, entre otros, pudiendo llegar a ser un

peligro o riesgo radiológico en la salud de los humanos (cáncer pulmonar), y otros posibles efectos en seres vivos (Gammage et al., 1992). En la figura 6, se muestra un caso típico de ingreso de radón por el subsuelo en la zona habitacional.

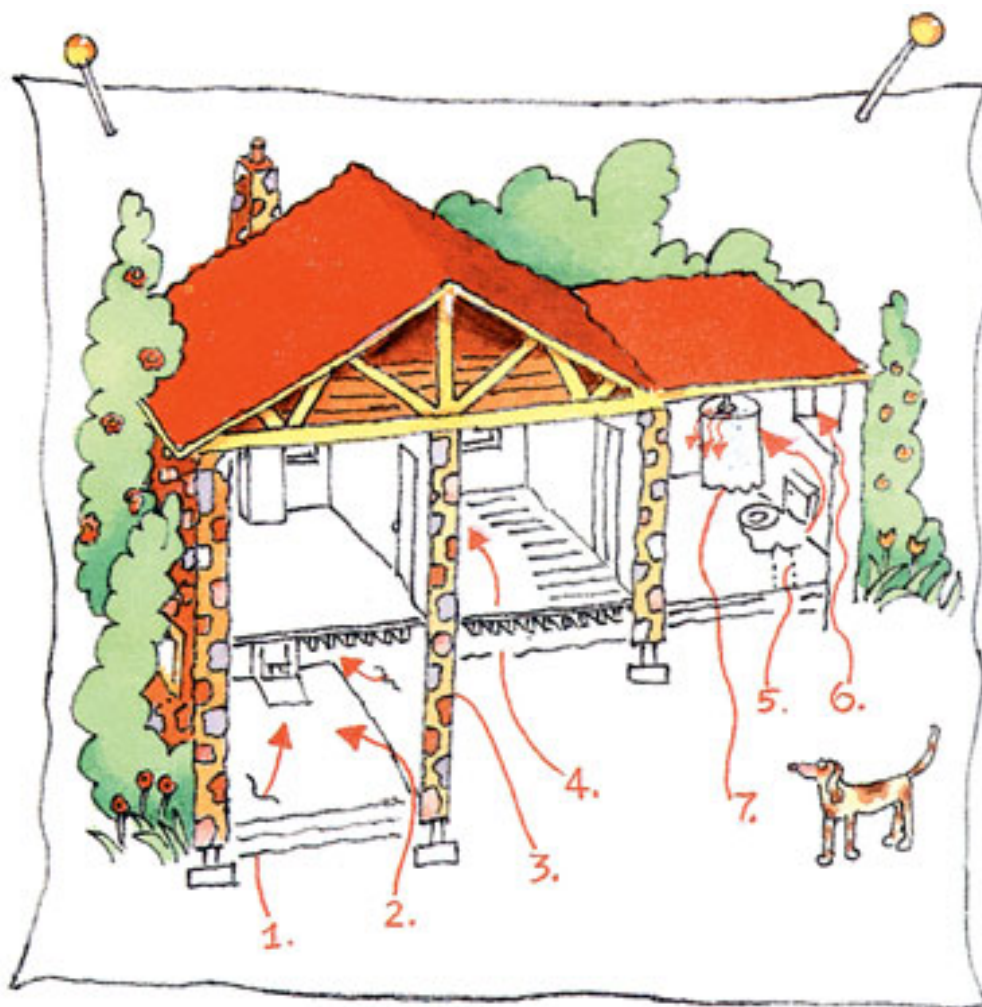


Figura 6.- Caminos por donde ingresa el gas radón en casas, edificios y zonas cerradas:

- 1) Grietas en suelos;
- 2) Juntas de construcción;
- 3) Grietas en paredes;
- 4) Espacios en pisos suspendidos;
- 5) Espacios alrededor de tubería de servicio;
- 6) Cavidades en paredes interiores;
- y 7) Suministro de agua

(<http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>)

I.2.2.- Cuevas, cavernas y grutas.

Como ejemplo de los diferentes tipos de cuevas, tenemos en la figura 7, una cueva donde la ventilación natural es pobre, y la acumulación de radón es importante.



Figura 7.- Cueva tipo, con ventilación pobre.

En otras, se pueden presentar chimeneas o respiraderos, como se muestra en la figura 8, haciendo este fenómeno de acumulación de radón menos severo.



Figura 8.- Cueva tipo, con circulación de aire a través de chimeneas o respiraderos

También en algunas cuevas, se presentan cuerpos de agua en su interior (Figura 9), los cuales podrán generar radón, incrementando las concentraciones en ellas.



Figura 9.- Cueva tipo con espejos de agua en su interior.
https://en.wikipedia.org/wiki/Cuevas_del_Drach#/media/File:Interior_de_las_Cuevas_del_Drach.jpg

Pero, por seguridad de los visitantes, guías, y toda persona que ingresa a una cueva, es necesario medir y conocer los niveles de concentración intramuros.

Como se verá en los capítulos posteriores, las concentraciones de radón en interiores de cuevas, es muy variable, dependiendo de factores internos, externos y regionales, de la localización de una cueva en partículas. En general los niveles de concentración de radón en casi todas, es muy alto con respecto a los de casas, edificios, lugares de trabajo, y escuelas, esto es, se pueden encontrar niveles de miles de Becquerels por metro cúbico (Bq/m^3).

Es claro que hoy en día, no se vive en “cuevas naturales”, pero sin embargo, algunas personas por sus actividades laborales, profesionales o deportivas, pasan tiempos importantes en el interior de cuevas o grutas, haciéndose necesario la medición de radón en ellas, por razones de salud y protección a estas personas.

Por otro lado, el radón puede ser un indicador importante, si se conoce su movilidad, pues puede orientar a los espeleólogos o personas dentro de una cueva, hacia posibles salidas al exterior, por lo que siempre es indicado el llevar un monitor de radón al ingresar en una cueva poco conocida, o no evaluada por personal calificado.

1.3. Como evitar riesgos radiológicos dentro de cuevas y espacios cerrados.

1.- Determinar los niveles de concentración de radón.

2.- Determinar tiempo de permanencia.

a) Por día.

b) Acumulado.

c) Integral de cada temporada de trabajo.

Recomendación: No pasar de 5 milisieverts al año (mSv/a). (Nivel de acción recomendado)

- 3.- Uso de sistemas de protección.
- a) Aire comprimido (tanques-personal).
 - b) Ventiladores.
 - c) Trajes herméticos, con suministro de aire.

I.4.- Riesgo radiológico y efectos biológicos debidos al radón intramuros.

Todos los seres vivos están continuamente expuestos a la radiación ionizante. Las radiaciones de fondo son de fuentes naturales, tales como el radón en el agua potable, el potasio en el medio y los alimentos, los elementos pesados radiactivos en rocas y pedernales, y la radiación cósmica. Estas radiaciones naturales de fondo pueden variar significativamente dependiendo de los factores del entorno y el lugar de residencia.

El radón es un elemento natural que no tiene sabor, color, olor y químicamente inerte, y es radioactivo. Se encuentra en todas partes de nuestro entorno, por ejemplo, en el aire que respiramos, en el agua que bebemos, y en el suelo que habitamos, o bien en el subsuelo. La cantidad de emanación de gas radón, dependerá de la composición geológica, variando de un lugar a otro.

Es un hecho bien conocido que el radón es un cancerígeno. La exposición a niveles altos de concentraciones de radón por períodos largos provoca un mayor riesgo de cáncer pulmonar, cánceres en el sistema respiratorio, estomago y leucemias.. No se conoce sobre los riesgos para la salud debidos al radón, al igual que muchos otros contaminantes ambientales.

Las altas concentraciones de radón dentro de las viviendas y lugares cerrados como cuevas, pueden representar un problema de salud importante, dando origen a cáncer pulmonar, cáncer en tráquea, o en alguna sección del sistema respiratorio, o bien a leucemias.

También, los productos de la desintegración del radón, se pueden adherir a las partículas del polvo del medio ambiente y ser inhaladas, depositándose en el tejido pulmonar como se muestra en la figura 10.

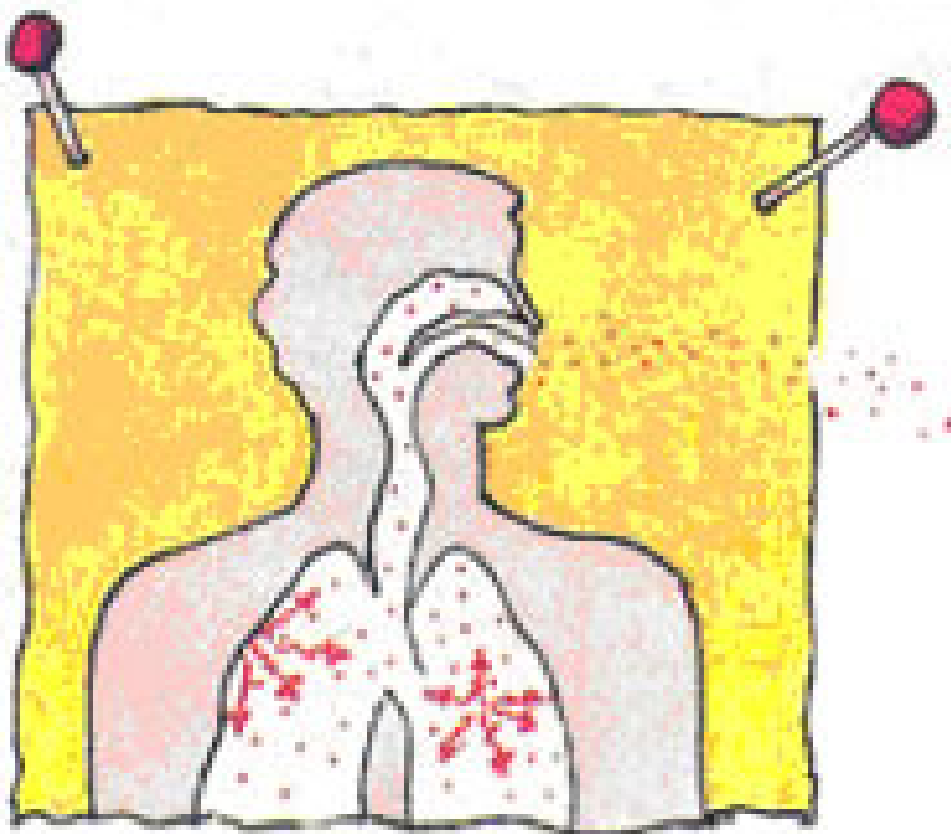


Figura 10.- Ingreso del radón en los pulmones
<http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>

I.5.- Efectos del radón en Salud Pública

Los primeros estudios se remontan al siglo XVI cuando en las poblaciones mineras Alemanas de Scheeberg, Bohemia, se dieron defunciones por cáncer de pulmón conocidas como "Schneebergefer Krankheit" (Harting y Hesse, 1879). Algunas décadas después una observación similar fue hecha por Joachimsthal en Checoslovaquia (Arnstein, 1913). En 1950, grupos de inventadores teóricos y experimentales trataron de establecer una correlación entre el radón

y el incremento de los casos de cáncer de pulmón observados en Europa y Estados Unidos (Nazaroff y Nero, 1988), sin embargo el papel etiológico (causa de la enfermedad) del radón y sus productos para producir el cáncer de pulmón no fue entendido hasta 1960 cuando en mineros de minas de uranio de Estados Unidos aparecieron casos de cáncer en pulmón que se asociaron a minerales radioactivos.

Esto confirmó los estudios realizados por Rajewsky que midió la actividad de partículas alfa en minas de Scheeberg y muestras tomadas para análisis histopatológicos de pulmón provenientes de mineros que habían muerto de cáncer de pulmón (Hueck, 1939; Rajewsky, 1940). Con base a estos estudios Rajewsky pudo establecer una causal entre el radón y el cáncer de pulmón, algunos años después se confirmó que la exposición a radón conlleva a un riesgo de salud pública.

También se ha encontrado, una correlación entre la incidencia de leucemias, melanomas, cáncer en menores y los niveles de radón en casas en varios países (Henshaw et al., 1990). Richardson et al. (1991) sugieren que el riesgo de leucemia está inducido por la exposición a radón. Otro riesgo a considerar se debe a la ingestión de radionúclidos por encima de los niveles aceptables, lo que presenta riesgo para la salud. En la naturaleza, se encuentran los isótopos ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th , los cuales son radioactivos y decaen en gas radón, antes de llegar a ser isótopos de plomo, estables.

El uranio es un elemento radiactivo natural, pesado y tóxico, se encuentra en casi todos los tipos de suelos, rocas, arenas y agua, bajo ciertos ambientes geológicos, el uranio se separa como un mineral discreto y forma depósitos, los compuestos de uranio están presentes en la corteza de la Tierra son solubles en agua y entran al cuerpo humano a través de la comida y al beber agua, las sales de uranio son altamente tóxicas. La combinación de estos compuestos con el grupo de los fosfatos sobre la superficie celular causa el bloqueo de los procesos metabólicos normales que son

esenciales para la supervivencia de la célula, también pueden causar daño al riñón impidiendo la eliminación normal de los desechos causando disfunción renal.

Las plantas toman el uranio del suelo y del agua, con lo que se incrementa el nivel de la concentración de este elemento, estos productos agro-alimenticios son la fuente de ingestión del uranio.

El radio es un elemento radioactivo que decae a radón emitiendo partículas alfa (α) seguidas por radiación beta (β) la concentración de radio rige cuantos átomos de radón se formarán. Pero estos átomos producidos se liberan en forma diferencial en base al medio por ejemplo: la emanación de radón de un grano de mineral o roca, entra al espacio poroso de éstos, dependiendo de donde estén situados los átomos de radio en el grano, la textura y el tamaño de éste, así como la permeabilidad, la temperatura, y la presión (Fleiseher, 1980 y 1982; Tanner, 1980; Arnstein, 1913; Durrani e Ilic, 1997). Por lo tanto, las mediciones de radón, necesitarán la estimación del contenido de uranio y radio como progenitores del radón, para hacer una evaluación confiable del riesgo en salud pública.

El radón, junto con todos sus isótopos es el único elemento natural que es un gas noble radioactivo, los gases son de interés especial; primero, porque son móviles y pueden recorrer grandes distancias tanto en la Tierra como en la atmósfera, y segundo, porque su inhalación o ingestión puede ser un problema de salud. El hecho de que el radón sea un gas noble, el cual no reacciona químicamente con los elementos del medio, da como resultado que el radón libre normalmente solo disminuye por su decaimiento radioactivo.

Como se mencionó anteriormente, el isótopo de mayor importancia del radón es el ^{222}Rn , dado que es el isótopo con mayor vida media, debido a esto y a sus propiedades como gas noble tiene la posibilidad de transporte en el subsuelo, en agua y en la

atmosfera hace que sea un trazador natural con aplicaciones geofísicas, geoquímicas, hidrológicas y atmosféricas, su aplicación en exploración de yacimientos de uranio, depósitos de hidrocarburo, además de la investigación en la predicción de sismos, y como premonitor de eventos volcánicos, lo hacen una herramienta muy empleada en aspectos y estudios cotidianos.

I.6.- El medir radón es un “Arte”.

Como se ha visto, el estudiar el radón, conocer los niveles de concentración de éste en lugares específicos, casas, edificios, lugares de trabajo, escuelas, guarderías, minas, y cuevas, entre otros; es vital para poder entender y calcular el posible riesgo en la salud de la población expuesta. Este es un compromiso de cada uno de los gobiernos, que redundan en la calidad de vida y salud de sus habitantes.

La existencia de recomendaciones, normas, y reglamentos para una nación o estado, son fundamentales y su cumplimiento genera un beneficio social, económico, y de salud pública.

Para medir radón, existen varios métodos, como se verá en el capítulo II, pero en cada caso hay que considerar la mejor opción de instrumentación, temporalidad, lugar de colocación de cada uno de los detectores, hábitos de ventilación, arquitectura de la casa o edificio, materiales de la construcción, geología de la zona y geofísica de la localización específica, presión atmosférica, entre otros. Haciendo que la medición de radón sea un arte.

Implicaciones de una evaluación de concentración de radón intramuros equivocada.

Es de suma importancia que se entienda, tanto en los medios científicos, como en los comerciales y de servicio, que la evaluación de concentración de radón intramuros, no deben ser solo datos

arbitrarios por cumplir el expediente, sin la necesaria calibración de los instrumentos o dispositivos de medición por laboratorios primarios y/o instituciones certificadas internacionalmente, un estudio estadístico consistente, un número de mediciones de detectores “in situ” importante, procedimientos y protocolos establecidos, con las verificaciones del proceso necesarias, y considerando la no homogeneidad de la distribución de concentración de radón en interiores (Espinosa and Tommasino, 2015). Pues hay que recordar y enfatizar que los valores de las concentraciones de radón intramuros determinadas, se usarán directamente para realizar los cálculos de la dosis de radiación, y que con estos valores de dosis, se determinará el riesgo radiológico de probabilidad de cáncer pulmonar y de los daños en salud. Nuestra tarea es hacer que las mediciones de radón intramuros tengan confiabilidad, sean precisas, oportunas, certificadas, con conocimiento científico, experiencia y calidad.

Radón y La Economía

El radón tiene una gran correlación con la economía de los países. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, las casas o edificios que no cuentan con un certificado de “Concentración de Radón menor a 148 Bq/m^3 ”, su valor comercial tienen un detrimento muy importante. En Europa, en algunos países, los seguros de vida y seguros de gastos médicos de su población, están condicionados a tener un “certificado de control de radón intramuros” otorgado por el Estado. Pues el costo de los tratamientos de los casos de cáncer pulmonar, leucemia, de otros canceres, y en general de salud, generados por inhalación o ingestión de radón, para un país son muy altos y de largo plazo.

Algunos de los aspectos experimentales que deben de considerarse para la medición de los niveles de concentración de radón intramuros

Protocolo experimental para la medición de radón intramuros:

- a) Selección de lugares a medir (en base a densidad poblacional, fallas geológicas, o zonas de interés).
- b) Selección del método de medición (en base a mediciones puntuales o mediciones integrales).
- c) Determinación de tiempos de medición (horas, días, meses o años).
- d) Calibración de los detectores en base al método de medición seleccionado (certificación).
- e) Verificación de protocolos de medición (verificación).
- f) Pruebas de los procedimientos con detectores testigo (verificación con detector testigo).
- g) Verificación de la calibración (controles).
- h) Selección del número de detectores en cada lugar, y su colocación.
- i) Colocación de los detectores, y controles de la zona donde se encuentren.
- j) Colocar 2 detectores en cada lugar de medición, para evitar pérdida de información.
- k) Selección de protocolos de medición y grabado químico.
- l) Selección de protocolo de lectura (manual o automático).
- m) Cálculo de actividad del radón intramuros (Bq/m^3)
- n) Preparación de reportes.
- o) Verificación de datos.
- p) Cálculo de dosis usando el código más apropiado para el tipo de medición.
(Actividad, tiempo de permanencia, y factor de equilibrio)
- q) Preparación de reporte en Dosis (horas/hombre).
- r) Evaluación del Riesgo Radiológico (a nivel familiar, municipal, estatal, o epidemiológico)

I.7.- Niveles de concentración de radón intramuros y su reglamentación internacional.

Internacionalmente se tienen recomendaciones para los niveles de concentraciones de radón intramuros, así como en minas (BEIR VI, 1999).

En países de la Unión Europea (Dixon et al., 1996) y Estados Unidos (US-EPA, 2004), existen leyes y reglamentos estrictos sobre las concentraciones de radón intramuros en casas, edificios, lugares de trabajo, y muy específicamente para guarderías infantiles, escuelas de educación preescolar, primaria y secundaria. La Unión Europea (EU) tiene como niveles de acción en casas y edificios de 200 Bq/m^3 , y en lugares de trabajo de 400 Bq/m^3 . En Estados Unidos, la US-EPA establece un nivel de referencia de 148 Bq/m^3 para casas y edificios, y de 400 Bq/m^3 en lugares de trabajo. Aunque hay que mencionar que en algunos países o regiones en particular, estos niveles se ven comprometidos, con los altos índices encontrados, por lo que se han reconocido valores en casas habitación de 400 Bq/m^3 , y de $1,000 \text{ Bq/m}^3$ en lugares de trabajo. Países como Israel (Akerblom, 1999) propone 14 Bq/m^3 como nivel obligado en guarderías y escuelas primarias, dado que se ha determinado un posible factor de riesgo 4 veces mayor para niños entre los 3 meses y 10 años, y de 2 veces para jóvenes entre los 10 y 20 años de edad, respecto a los adultos.

Todas estas recomendaciones y reglamentos se establecieron para disminuir el riesgo radiológico en salud pública y evitar muertes por cáncer pulmonar debidos al radón intramuros, que actualmente está considerado como la segunda causa de cáncer pulmonar. En México, no existen normas o reglamentos respecto a los niveles de radón intramuros oficialmente. Para fines prácticos, se consideran las normas del US-EPA, y actualmente dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México, y más específicamente en el Instituto de Física de la UNAM, se está trabajando para establecer

conjuntamente con la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, de la Secretaría de Energía, y las autoridades pertinentes, una norma Mexicana.

Para trabajadores en minas, se tiene la unidad “Working Levels” (WL), la cual está relacionada directamente con la inhalación de radón en minas y su riesgo radiológico, y en los países desarrollados se tiene un control estricto con los trabajadores mineros. Respecto a cuevas, no hay un reglamento, ni normas internacionales, pero espeleólogos, guías de turismo, visitantes, y en general personal que trabaja por un número importante de horas dentro de ellas, deben considerar el riesgo radiológico existente, y tomar las medidas precautorias pertinentes, como puede ser el uso de medidores personales de radón, o equipo especial para evitar la inhalación de el gas radón, entre otros elementos peligrosos existentes dentro de las cuevas.

En la tabla 1, se muestra una guía para la inspección de radón intramuros en algunos países. Haciendo la distinción de construcciones ya existentes, así como para construcciones nuevas. Mostrándose también en esta tabla, si se cuenta con un programa de control de radón intramuros oficial, y/o con niveles de acción establecidos.

	País	A	B	Construcciones existentes	Construcciones nuevas
1	Alemania	S	S	100 (250) Bq/m ³ (obligatorio)	100 Bq/m ³ (obligatorio)
2	Argentina	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
3	Australia	--	--	400 Bq/m ³	200 Bq/m ³
4	Austria	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
5	Brazil	S	N	---	---
6	Bélgica	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
7	Bielorusia			200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
8	Bulgaria	S	S	500 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
9	Canadá	S	S	800 Bq/m ³ (en revisión)	800 (200) Bq/m ³ (voluntario)
10	China	S	S	400 Bq/m ³ en casas; 1000 Bq/m ³ en lugares de trabajo	200 Bq/m ³
11	Corea	S	N	---	---
12	Comunidad Europea	--	--	200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
13	Dinamarca	S	S	200 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
14	Ecuador	N	--	400 Bq/m ³	Obligatorio
15	Eslovenia	S	S	400 Bq/m ³ obligatorio; 1000 Bq/m ³ para lugares de trabajo	Los mismos
16	España	S	N	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
17	Estados Unidos	S	S	148 Bq/m ³ (voluntario); 400 Bq/m ³ para lugares de trabajo.	148 Bq/m ³ (voluntario)
18	Estonia	--	--	200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
19	Finlandia	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
20	Francia	S	N	400 Bq/m ³	---
21	Georgia	S	S	200 Bq/m ³ (obligatorio)	100 Bq/m ³

22	Grecia	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
23	Holanda	S	S	---	30 Bq/m ³
24	Hong Kong	--	--	200 Bq/m ³	---
25	Irlanda	S	S	200 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
26	Israel	--	--	---	14 Bq/m ³ (guarderías)
27	Italia	S	N	---	---
28	Japón	S	N	---	---
29	Kirguistan (Kyrgyzstan)	S	S	< 200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
30	Letonia (Latvia)	S	S	200 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (obligatorio)
31	Lituania	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
32	Luxemburgo	--	--	200 Bq/m ³	150 (200) Bq/m ³
33	Marruecos	S	S	Limite de dosis como IAEA-BSS	---
34	Noruega	S	S	200 Bq/m ³	200 Bq/m ³ (obligatorio)
35	Paraguay	N	--	---	---
36	Perú	N	S	200-600 Bq/m ³ para casas,	200 Bq/m ³ (voluntario)
37	Reino Unido	S	S	200 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (obligatorio)
38	Republica Checa	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
39	Republica Eslovaca	--	--	500 Bq/m ³	250 Bq/m ³
40	Rumania	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
41	Rusia	S	S	400 Bq/m ³ (voluntario)	200 Bq/m ³ (voluntario)
42	Suecia	S	S	1000 Bq/m ³ (obligatorio)	400 Bq/m ³ (obligatorio)
43	Suiza	S	S	200 (400) Bq/m ³ (obligatorio)	200 Bq/m ³ (obligatorio)
44	Yugoeslavia	--	--	200 Bq/m ³	200 Bq/m ³
A= Tienen Programas; B= Tienen Nivel de Acción					

Tabla 1.- Niveles de acción de concentraciones de radón en diferentes países.

(Adaptado de: Survey on Radon guidelines, programs and activities. WHO/HSE/RAD/07.01; Genova, 2007)

*Como se ha demostrado en el libro de “Etica”,
los humanos están sometidos a los “afectos”*

*Baruj Spinoza
(Tratado político)*

CAPITULO II

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RADÓN INTRAMUROS.

Para la medición de niveles de concentración de radón intramuros, en general se pueden dividir en dos grupos: 1) Métodos dinámicos, y 2) Métodos pasivos.

II.1.- Métodos dinámicos o activos. (Características y condiciones de operación)

Los métodos dinámicos, se caracterizan por ser de lectura directa, y fundamentalmente para realizar medidas puntuales tanto en el tiempo, como en el espacio. Para medición de radón intramuros en cuevas, es recomendable seleccionar un dispositivo que sea portátil, que se alimente con baterías de alta duración, y de tamaño razonable, de tal forma que se integre al equipo básico de protección en cuevas. Este método servirá fundamentalmente para la evaluación personal o por zona de los niveles de radón, a los cuales están sometidos en esa visita en particular a una cueva.

En la actualidad hay una gran variedad de medidores dinámicos para radón intramuros, desde unos muy simples y baratos, hasta otros con mayores avances tecnológicos, sistemas digitales, computarizados y con programas más sofisticados. Por lo que es muy importante el seleccionar el instrumento adecuado para un uso en particular, ya sea en campo o en laboratorio. Pero sin dejar de considerar que lo más importante en un instrumento de medición de concentración de radón, es su calibración y certificación.

En la tabla 2, se mencionan algunos de los instrumentos dinámicos para medir radón, así como sus características básicas.

Tabla 2.- Instrumentos de medición de radón intramuros dinámicos

	Marca	Modelo	Compañía	Rango (Bq/m ³)
a	AlphaGUARD	PQ2000 PRO	Saphimo	2 - 2 M
b	Rad-7		Durridge	4 - 740 K
c	SARAD	RTM-1688	SARAD	1 - 10 M
d	Sun Nuclear	1027	Sun Nuclear Co	3.7 - 37 K
e	DOSEMAN		SARAD	0 - 4 M

II.1.1.- AlphaGUARD[®]. Este es un monitor de radón, basado en el conteo de impulsos de voltaje, teniendo una cámara de ionización como detector. Con este sistema, se pueden hacer mediciones continuas, las cuales quedan en la memoria del propio instrumento, pudiendo ser enviadas a una PC para su análisis. Este aparato simultáneamente mide presión atmosférica, temperatura ambiente, y humedad relativa. El intervalo de medición es de 2 a 2'000,000 Bq/m³, teniendo la opción para medición de radón en agua, emanación de radón en superficies, y en subsuelo. Las indicaciones del fabricante indican que el sistema opera en ambientes húmedos y no se afecta por vibraciones. En la figura 11, se muestra una fotografía del instrumento y sus aditamentos especiales.

II.1.2.- Rad-7[®]. El instrumento Rad-7, es uno de los más comunes en la mayoría de los laboratorios donde se estudia y mide radón intramuros, por sus características que no solo ofrece la medición de concentraciones de radón y torón continua, sino que además se tienen los espectros del radón (²²²Rn) y del torón (²²⁰Rn) simultáneamente. El Rad-7 tiene un detector de estado sólido, asociado a un microprocesador que analiza la información, la cual es acumulada en el propio instrumento y puede ser enviada y analizada a una PC o una laptop convencional. Este monitor cuenta con un filtro para evitar la humedad en las lecturas, y presenta un rango de

medición entre 4 y 740,000 Bq/m³. En la figura 12 se muestra el monitor Rad-7.



Figura 11. Monitor AlphaGUARD[®] modelo PQ-2000 PRO.

II.1.3.- Sarad RTM-1688.- El Sarad RTM-1688 es otro monitor de radón dinámico (Figura 13), que mide radón y torón simultáneamente con un intervalo de 1 a 1'000,000 Bq/m³, en ambientes húmedos o secos (de 0 a 100% de humedad relativa) y en temperaturas máxima de 40°C y presión de 1200 mbars. La detección es mediante un detector de estado sólido, con respuesta entre 5 a 150 minutos, y la capacidad de guardar información en una memoria propia. Se hace pasar el gas mediante un flujo continuo, realizándose la medición en una cámara de difusión.



Figura 12.- Monitor de radón marca DurrIDGE, modelo Rad-7[®].

II.1.4.- Sun Nuclear[®] 1027, Este es un equipo semi-portátil de medición de radón continua. Su operación es muy simple y amigable para cualquier usuario. El intervalo de medición va de 0.1 a 999 pCi/l (3.7 a 36,963 Bq/m³), pudiendo procesar la información en forma digital. Para la detección, emplea un diodo semiconductor, y la medición se realiza al interactuar las partículas alfa (α) con el detector, dentro de la cámara por donde circula el gas radón. El instrumento cuenta con memoria interna que almacena los datos para su procesamiento posteriormente en una PC o laptop personal (figura 14).



Figura 13. Monitor de radón marca SARAD, modelo RTM-1688



Figura 14.- Monitor de radón marca Sun Nuclear[®], modelo 1027.

II.1.5.- DOSEman[®] Este instrumento pretende ser un dosímetro personal de concentración de radón intramuros en el aire y calcular la dosis equivalente (Figura 15). Se basa en un detector semiconductor que mide las partículas alfa del ^{222}Rn , ^{218}Po , y ^{214}Po , convirtiendo esta información en pulsos de voltaje. Para la medición, el radón pasa a través de una membrana de difusión, acumulándose en una cámara, donde es detectado y evaluado mediante un procesador de altura de pulsos. Su límite inferior de medición es de 100 Bq/m^3 o múltiplos de éste.



Figura 15. Dosímetro de radón, modelo DOSEman

II.2.- Métodos Pasivos. (Características y condiciones de medición)

En la medición de radón existen varios métodos denominados pasivos, los más comunes son:

II.2.1.- Carbón activado.

II.2.2.- Electret (E-Perm).

II.2.3.- Trazas Nucleares en Sólidos (TNS).

II.2.4.- Termoluminiscencia (TL)

Los cuales se basan en la acumulación de los efectos de las partículas emitidas por el radón y su progenie, y la interacción de éstos. Los métodos pasivos no son de lectura directa; se usan para realizar mediciones a largo plazo, y mediciones de radón masivas. Esto es, mediciones de concentración de radón a nivel nacional o de regiones grandes con densidad de población importante. Esto último por su bajo costo, disponibilidad, facilidad de operación, no requiriendo el uso de energía eléctrica, y una distribución controlada pero simple.

Para la medición de niveles de concentración de radón en cuevas, se recomiendan los métodos pasivos de “carbón activado” (Espinosa and Silva, 2009) para períodos cortos, y el de “Trazas Nucleares en Sólidos” para valores integrados mensual, trimestral y/o anualmente (Espinosa, 1994). Estos son de tamaño pequeño y portable, no requieren de energía eléctrica, ni de un técnico o profesional especializado para su colocación o manejo; conserva la información permanentemente y se pueden poner múltiples detectores a través de la cueva, a lo largo y ancho de ésta.

II.2.1.- Carbón activado.

Este método se basa en la difusión del gas radón en el carbón activado, y la medición de los hijos de la cadena de decaimiento del

radón (^{222}Rn), que como se mencionan anteriormente es el fotopico del bismuto, con emisión gamma de 0.609 MeV, que es analizado generalmente mediante detectores de yoduro de sodio (NaI), o bien germanio hiperpuro (HPGe), el cual dará una mejor resolución; pero sin embargo, se puede usar cualquiera de los sistemas, ya sea con un analizador de altura de pulsos, mono o multicanal (MCA). Los tiempos de análisis son cortos, pero debe considerarse la vida media del bismuto, que es solo de 19.9 minutos. Los detectores de carbón activado se pueden fabricar en el laboratorio, o bien se puede usar un filtro comercial. En el artículo “Industrial commercial respiratory filter as indoor radon monitor” del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del IFUNAM, publicado en la revista Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, de la editorial internacional Springer, se presenta el estudio del filtro comercial Survivair’s NIOSH (National Institute for Occupational Health and Safety), modelo 100800, el cual ha sido evaluado como detector de radón intramuros, presentando linealidad de respuesta, desde los 15 hasta 47,000 Bq/m³, pudiendo hacer mediciones de un día hasta 8 días. Este filtro de aire comercial es compacto, se puede transportar fácilmente, siempre con el mismo contenido de carbón activado, presentado una muy buena reproducción de datos, y se puede reusar después de proceso controlado de deshidratación por temperatura (Espinosa and Silva, 2009). La figura 16 muestra este tipo de filtro de aire.



Figura 16. Mascara de filtro de aire comercial, que se puede usar como detector de radón, de carbón activado.

II.2.2.- Electret (E-PERM)

Otro sistema para medir concentraciones de radón intramuros es el “Electret E-Perm” (Electret passive environmental radon monitor). El Electret, tiene la característica de poder medir radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) con dispositivos diferentes, además de poder evaluar la concentración de radón intramuros, solo en períodos de tiempo determinados, como pueden ser durante los tiempos laborales, que un individuo esté en una zona o lugar determinado, en un edificio, casa, lugar de trabajo, etc.

Para cada aplicación, existe un modelo determinado con diferentes volúmenes en la cámara de exposición, y diferentes configuraciones (Kotrappa et al, 1990). En la figura 17 se muestran los diferentes tipos comerciales



Figura 17. Medidor Electret.

El principio de operación se basa en la pérdida de cargas de una superficie aislante, debida a la ionización producida por las partículas del radón y su progenie. Se mide la pérdida de carga, la cual es proporcional a la cantidad de radiación recibida, por el factor correspondiente. El período de integración de datos en los Electrets

va de 15 días a los 3 meses, considerando el valor de fondo debido a la radiación gamma, humedad relativa y descarga temporal del propio monitor.

II.2.3.- Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos (DTNS)

La metodología de detección por Trazas Nucleares en Sólidos, es recomendada para la medición de concentración de radón intramuros, por no ser sensible a cambios de temperatura, de presión atmosférica, de humedad, no requiere de energía eléctrica, los dispositivos de medición son de tamaño pequeño, se pueden transportar y cargar fácilmente en una mochila, su costo no es elevado, por lo que su pérdida no es honorosa, en casos de desastre, inundaciones, o simplemente desaparición del lugar.

Se pueden hacer mediciones cada 50 o 100 metros en el interior de una cueva, usando la cantidad de detectores que sean necesarios. Las mediciones se hacen por integración de tiempo de la acumulación del radón, esto puede ser de días para cuevas con concentraciones altas, y de meses para cuevas con concentraciones medianas o bajas, pudiendo así hacerse estudios de un ciclo anual, considerando las 4 estaciones del año.

Mecanismo de formación de traza

“El paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de la mayoría de los semiconductores sólidos, crea patrones finos de daño intenso, en la escala atómica”. Siendo éste el origen de lo que llamaremos “Traza Nuclear en Sólidos”.

Aún cuando las trazas se han formado en los materiales desde el principio de la creación, no fue hasta fin de los 50's y principios de los 60's cuando se tuvo un conocimiento científico de ellas. Young (1958), anuncia la posibilidad de formación de trazas de partículas nucleares en halogenuros alcalinos. Posteriormente Price y Walker (1962a) observaron mediante un microscopio electrónico de

transmisión que el diámetro de la región con daño intenso era de aproximadamente 50 Armstrong para mica expuesta a fragmentos de fisión.

Las trazas producidas por las partículas, son huellas estables formadas por “centros de tensión” que responden al ataque químico, estando estos centros de tensión formados básicamente por desplazamientos atómicos, más que por efectos electrónicos. También se ha demostrado que no se encuentran trazas en los materiales que son buenos conductores (Espinosa, 1994; Fleisher et al, 1975).

Dispositivo de medición

Existen una gran variedad de dispositivos para la medición de radón intramuros, algunos comerciales y otros desarrollados en él para uso de alguna institución o laboratorio dedicados a este tema en donde también se ofrece el servicio de medición de concentraciones de radón intramuros. En todos estos dispositivos se usa como material sensible a la radiación, un policarbonato (PADC) o bien, nitrato de celulosa.

En la Figura 18, se muestran algunos dispositivos para medición de radón intramuros comerciales: a) Landauer (USA); b) Terradex (USA); c) RadoSys (Hungría); d) Karlsruhe (Alemania); y e) ENEA (Italia).

En la Figura 19 se muestran los dispositivos desarrollados en el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM: a) Vaso cerrado con filtro (close-end-cup, en inglés)(330 ml); b) vaso cerrado con bolsa (con protector para humedad)(330 ml); y c) vaso de portapelícula fotográfica (30 ml).

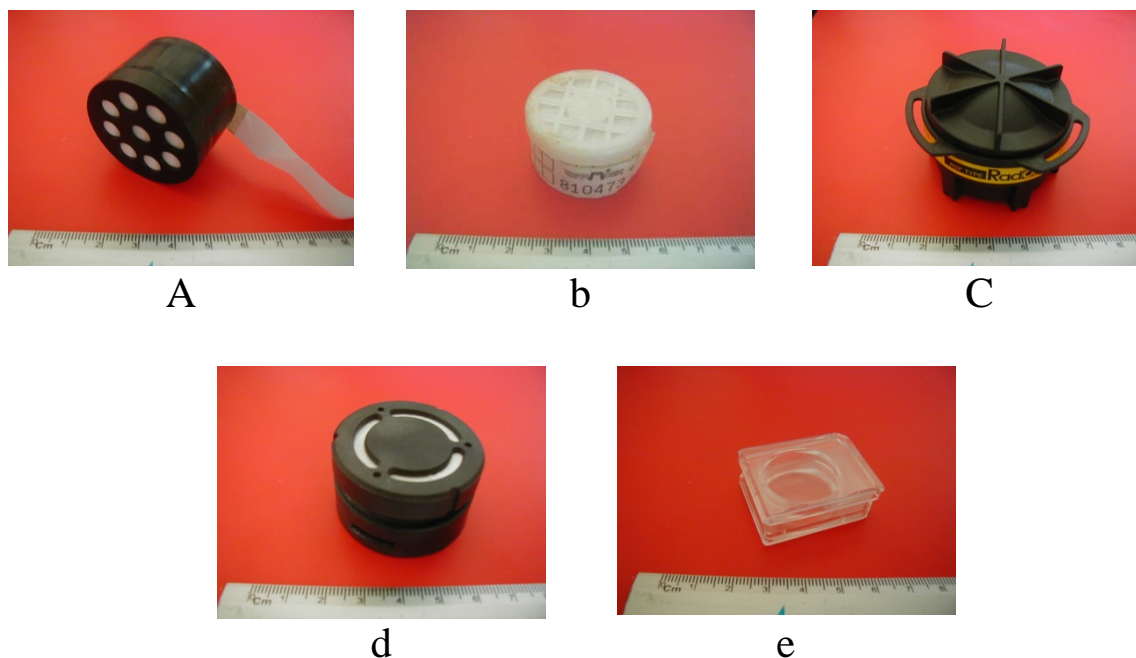


Figura 18.- Dispositivos para la medición de radón intramuros comerciales: a) Landauer (USA); b) Terradex (USA); c) RadoSys (Hungria); d) Karlsruhe (Alemania); y e) ENEA (Italia).

Se realizó un estudio comparando los diferentes tipos de dispositivos para la medición de radón intramuros, como resultado, de este estudio, se encontró que cada uno de ellos presenta diferencia en la eficiencia de detección. En donde el dispositivo con mayor volumen (vaso cerrado), presenta la mejor respuesta (Espinosa et al, 2013a).

En la figura 20, se puede observar la eficiencia de los dispositivos para la medición de radón intramuros, tanto los comerciales como los desarrollados en el PAD-IFUNAM. La aplicación o uso de cada uno de los diferentes dispositivos, presenta ventajas y desventajas, pero como se puede observar, cada laboratorio o institución puede desarrollar su propio dispositivo para la medición de radón intramuros, considerando siempre, que éste debe de ser calibrado en un laboratorio certificado y reconocido internacionalmente.



Figura 19.- Dispositivos para la medición de radón intramuros desarrollados en el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM: a) Vaso cerrado con filtro (close-end-cup, en inglés)(330 ml); b) vaso cerrado con bolsa (con protector para humedad)(330 ml); y c) vaso de portapelícula fotográfica (30 ml).

Sin olvidar que cualquier sistema de detección de radón debe estar calibrado en las mismas condiciones de medición que se usarán *in situ*. Además de la certificación de estos valores, con patrones o estándares internacionales y/o laboratorios reconocidos con certificación.

Al realizar mediciones de radón intramuros, sin estas dos condiciones, equivaldría a no haberlas realizado, y si se obtienen datos, éstos se pueden considerar mágicos sin validez científica.

II.2.4.- Termoluminiscencia (TL):

Entre otros métodos para la medición de radón, se encuentra el de Termoluminiscencia (TL), que por medio de mediciones de radiación gamma, emitidos por los hijos del radón, se pueden determinar las concentraciones de radón intramuros del medio ambiente. Siendo éste un método alternativo, pero que por su

complejidad para la discriminación de las gammas de la cadena del uranio, torio, radio y radón, ha quedado rezagado respecto a otros métodos mucho más simples y directos para la medición de radón intramuros. Sin embargo, hay que considerarlo como otra posibilidad para la medición y evaluación de radón. En la figura 21, se muestra el equipo lector de termoluminiscencia.

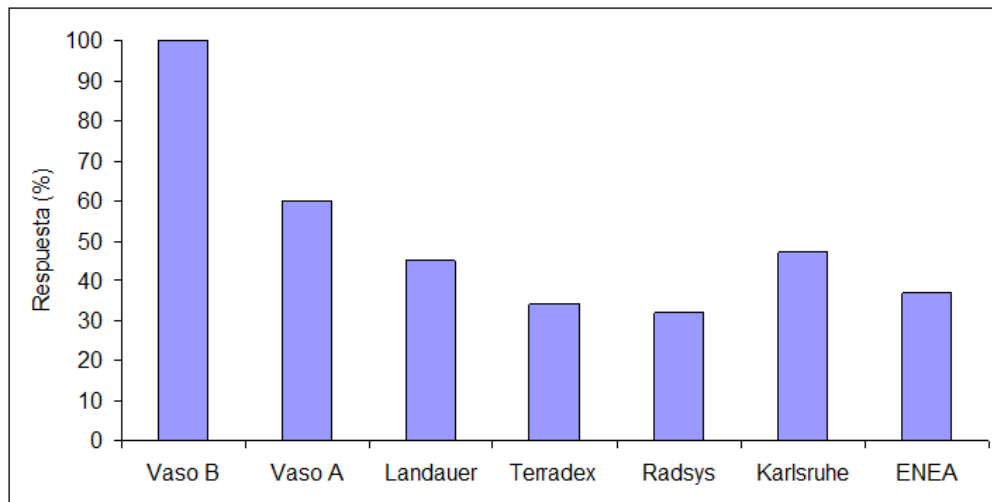


Figura 20.- Eficiencia de los dispositivos para la medición de radón intramuros.



Figura 21.- Equipo lector de Termoluminiscencia

*El triunfo es para quien busca
las circunstancias propicias, si las hay,
o las crea si no las encuentra.*

CAPITULO III

MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)

La medición de las concentraciones de radón en el interior de las cuevas a menudo presenta todo un desafío técnico y físico, en la colocación de los dispositivos de detección. Algunos lugares pueden ser difíciles de alcanzar o peligrosos por su situación en el interior de la cueva. Otros factores incluyen las bajas o altas temperaturas, alta humedad y la obscuridad del entorno. Bajo tales condiciones, la Metodología de Trazas Nucleares en Solidos (MTNS) es la más adecuada ofreciendo ventajas muy importantes sobre las otras alternativas para la medición de radón; como ya se mencionó, por no ser afectadas por cambios drásticos de temperatura o de humedad, ser insensibles a radiación gamma y beta del medio. Además de ser de fácil manejo, tamaño pequeño, y unos cuantos gramos de peso, fácil de transportar y colocar, y sobre todo de bajo costo.

III.1.- Dispositivo PAD-IFUNAM para la medición de radón intramuros

Para el estudio de radón en cuevas, se usó la Metodología de Trazas Nucleares por las razones mencionadas en éste capítulo. El dispositivo de medición llamado “Close-end-cup” (vaso cerrado), desarrollado en el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM, debido fundamentalmente a su alta eficiencia en la detección de las partículas alfa, bajo costo, tamaño pequeño y posibilidad de hacer medidas múltiples y en diferentes zonas de la cueva, entre otras. Este dispositivo es fácil de manejar y de instalar en el interior de áreas pequeñas como es el caso de las cuevas. Para la medición de radón intramuros, fue diseñado en el IFUNAM específicamente para el uso en cuevas, y está constituido de una bolsa plástica de protección que impide el ingreso de

partículas sólidas y humedad, pero que permita el paso del gas radón.

En la figura 22a se muestra el dispositivo para la medición de radón intramuros, tipo vaso cerrado (close-end-cup) desarrollado en el proyecto PAD-IFUNAM. En esta figura se muestra cada una de las partes integrantes del dispositivo, y en la figura 22b se muestra el dispositivo y cada una de sus partes por separado: volumen sensible (volumen constante para poder hacer una calibración del dispositivo), filtro de protección para evitar el ingreso de aerosoles suspendidos en el ambiente, el polímero sensible a las partículas alfa emitidas por el radón (CR-39 Lantrack[®]), y material desecante para evitar la concentración de humedad en el interior del volumen activo. En la figura 23 se muestra el dispositivo de medición (b) (vaso) y ésta dentro de una bolsa de plástico (a) dispositivo modificado para hacer mediciones en lugares con alta concentración de humedad, e inclusive goteras, empleado en cuevas), también desarrollado en el proyecto PAD-IFUNAM, que protege de la humedad al vaso (volumen sensible) y a su vez sirve como filtro de aerosoles.

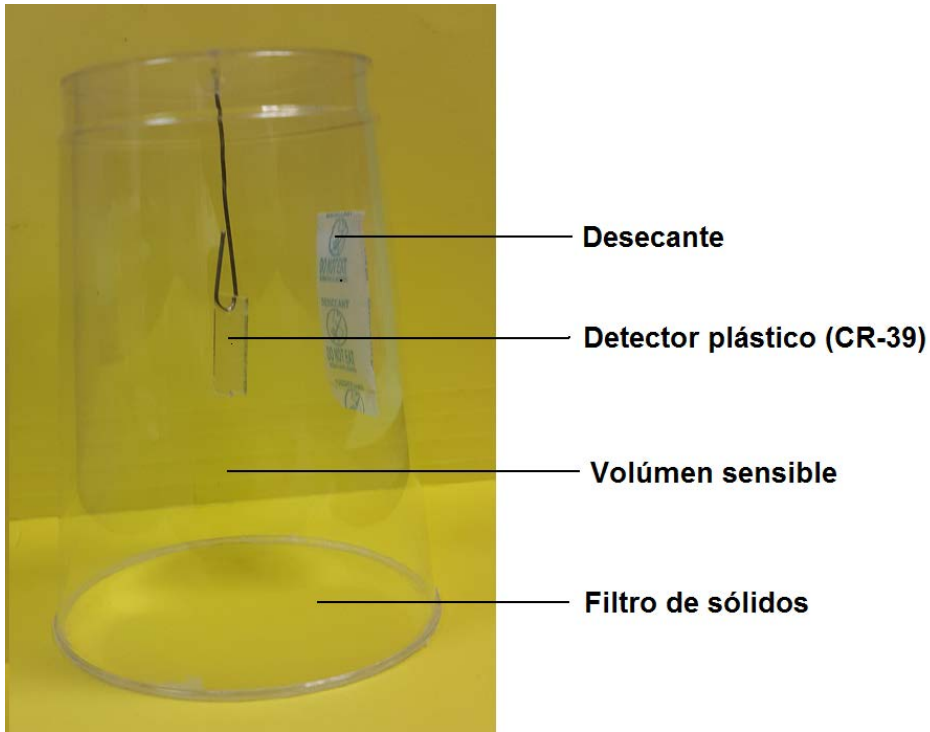


Figura 22a.- Dispositivo para la medición de radón intramuros (PAD-IFUNAM)

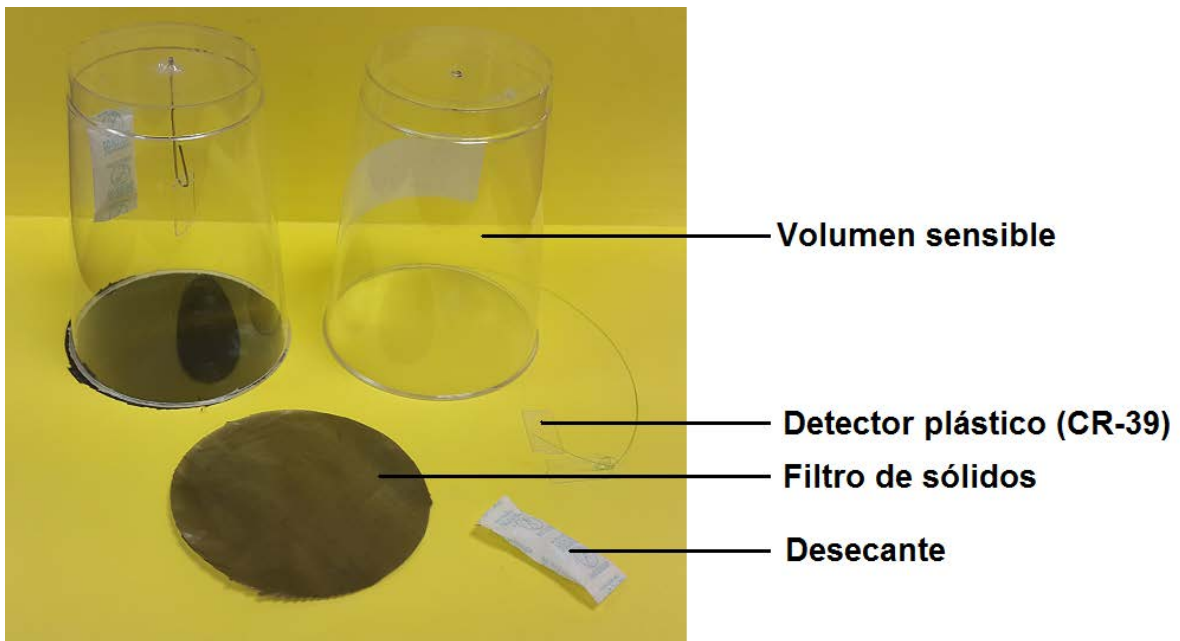


Figura 22b.- Dispositivo para la medición de radón intramuros, en donde se muestran cada uno de sus componentes



Figura 23.- Dispositivo para la medición de radón intramuros modificado para hacer mediciones de radón (a) y dispositivo sin bolsa de protección (b).

III.2.- CR-39 (PADC-Poly Allyl Diglicol Carbonate) como material detector

El material detector seleccionado para el dispositivo fue CR-39 Lantrack[®] (alil diglicol policarbonato) con un espesor de 500 μm , el cual viene cubierto con una capa protectora de 63 μm de espesor para su transporte a los lugares de medición (Espinosa and Gammage, 1993). El material CR-39 sensible a las partículas alfa del radón, es cortado y numerado mediante un laser, para evitar estrés mecánico en el material.

Éste es producido especialmente por Landauer Inc[®] para el proyecto PAD del IFUNAM (figura 25).

En la figura 24 se muestra otro prototipo de medición de radón, cuyo volumen sensible está dado por un recipiente porta-películas fotográficas, y consta de: a) volumen sensible; b) tapa de refresco porta detector; c) material sensible a la radiación; d) filtro; y e) tapa del volumen sensible perforada.



Figura 24. Vaso de portapelícula fotográfica, que consta de:
a) volúmen sensible; b) porta detector (tapa de refresco);
c) material sensible a la radiación; d) filtro;
y e) tapa del volumen sensible, perforada.

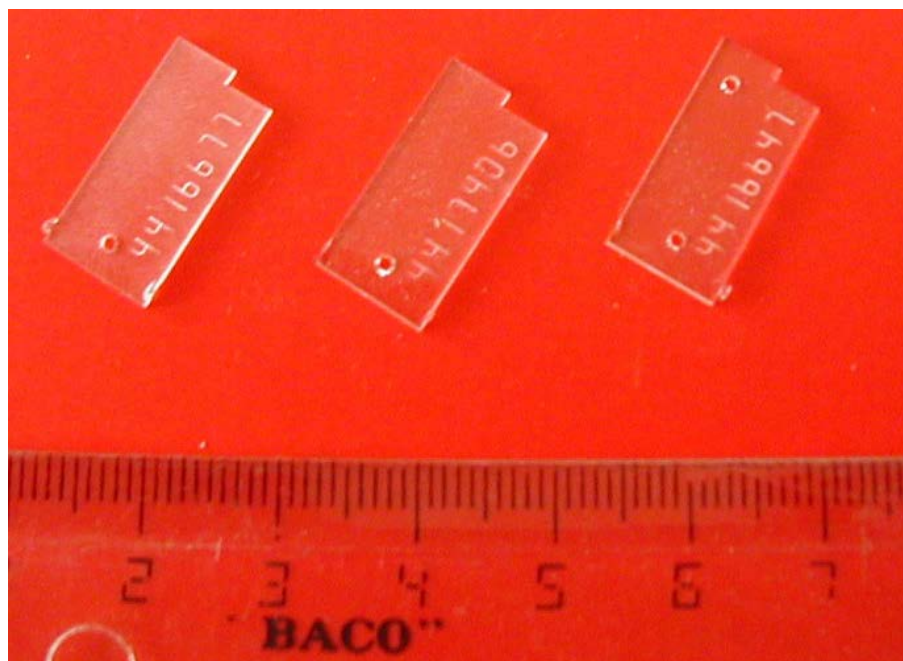


Figura 25. Detectores CR-39 (alil diglicol policarbonato), usados para la detección de radón.

III.3.- Procedimientos de grabado químico.

Después de la exposición a radón en el interior de las cuevas, los detectores se graban químicamente en una solución 6,25 M de hidróxido de potasio (KOH), a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en un baño de agua termo-regulado (Figura 26), para obtener las huellas de las partículas en el plástico, las cuales llamamos trazas.



Figura 26. Sistema para el grabado químico de los detectores plásticos, y los dispositivos para su manejo.

III.4.- Conteo y análisis de trazas nucleares

Dentro de la metodología por trazas nucleares en sólidos, uno de los “cuellos de botella” en el proceso, es el conteo del número de trazas (huellas) formadas en el polímero, producidas por la interacción de las partículas alfa emitidas por el radón. Y de esta forma poder determinar la densidad de huellas por centímetro cuadrado, y hacer el cálculo de la actividad, de dosis y del riesgo radiológico por radón. Estas trazas nucleares son microscópicas, entre 5 y 100 μm de diámetro, las cuales deben de ser contadas, para evaluar las diferentes concentraciones de radón. En la figura 27, se muestran trazas grabadas, para diferentes concentraciones de radón.

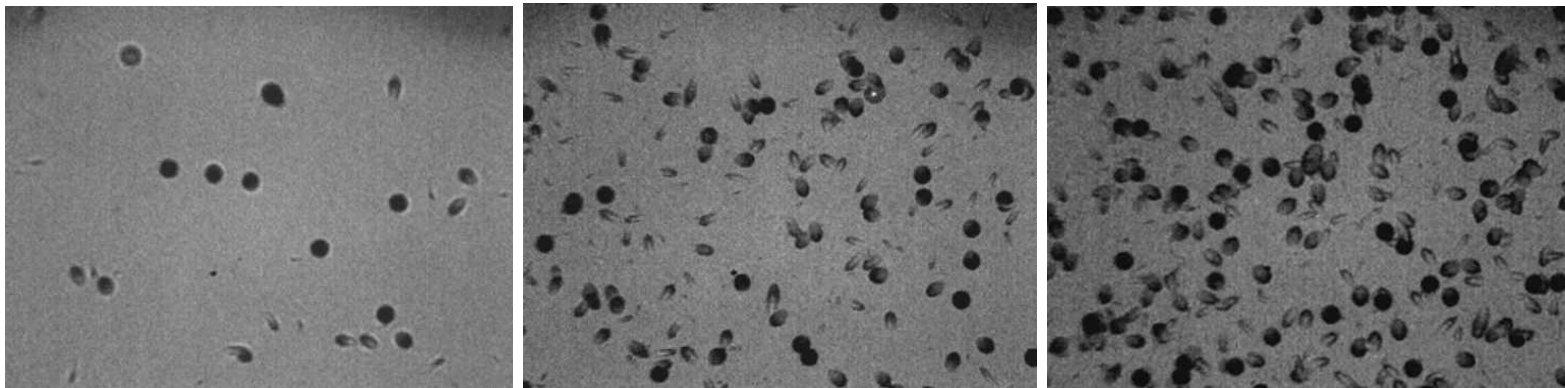


Figura 27. Microfotografías de los detectores, donde se pueden observar las trazas grabadas químicamente, para diferentes concentraciones de radón.

III.5.- Métodos de conteo

Los métodos de conteo de trazas nucleares, los podemos dividir en dos grupos: conteo manual y conteo automático. Para el conteo manual el uso del microscopio óptico es el más común, encontrándose al alcance de cualquier laboratorio. Para el conteo automático se han desarrollado diferentes procedimientos, a través del tiempo usando la tecnología existente, en la actualidad la digitalización de imágenes asociados a los sistemas de cómputo han resuelto el problema de automatización, con eficiencia, rapidez, precisión y de bajo costo.

III.5.1.- Microscopio óptico

El método más simple para el conteo de trazas nucleares manual, es el uso de un microscopio óptico, como el mostrado en la figura 28.



Figura 28.- Microscopio óptico para el conteo de las trazas nucleares.

III.5.2.- Sistema de Análisis Digital de Imágenes DIAS. (Digital Image Analysis System)

Para un número importante o muy grande de muestras, el conteo manual se vuelve tedioso, muy cansado, y con grandes posibilidades de errores humanos. Por lo que en el proyecto PAD del IFUNAM se han desarrollado métodos de conteo automático, como son el DIAS (1993) y el CADIS (2014).

En la figura 29, se muestra la fotografía del sistema de conteo automático DIAS; el cual consta de un microscopio óptico, una cámara CCD, una tarjeta digitalizadora, un monitor de control de imagen, una computadora personal, y un programa de análisis de imágenes comercial (Jandel MOCHA[®]). El cual fue desarrollado por el Oak Ridge National Laboratory de los Estados Unidos de América, y el proyecto PAD del Instituto de Física de la UNAM, en un convenio de colaboración (1993). Resolviendo el problema de conteo y análisis automático de trazas nucleares.

III.5.3.- Sistema de Conteo y Análisis Digital de Imágenes CADIS. (Counting and Analysis Digital Image System)

Posteriormente, y en base a los avances tecnológicos, tanto en computación como en digitalización, dentro del proyecto PAD-IFUNAM se desarrollo un nuevo sistema de conteo y análisis automático, denominado CADIS (Counting and Analysis Digital Image System) (Registrado por derechos de autor: Espinosa et al., 2014).



Figura 29.- Sistema de Análisis Digital de Imágenes (DIAS)

En este sistema de conteo automático, se pueden utilizar con un microscopio con digitalizador integrado marca Quasar[®] (de bajo costo), o con un microscopio de mejor óptica y una cámara fotográfica digital, con lo cual se obtiene una mejor resolución de imagen, para el análisis de la geometría de las trazas formadas. Las imágenes obtenidas con cualquiera de los microscopios, se llevan a una computadora personal o lap-top, y haciendo uso del programa de cómputo desarrollado en el IFUNAM, directamente se puede hacer el conteo o análisis de las trazas nucleares. En la figura 30, se muestra el sistema de conteo y análisis automático CADIS, con el microscopio marca Quasar[®] (a), y con un microscopio óptico y cámara fotográfica digital (b).

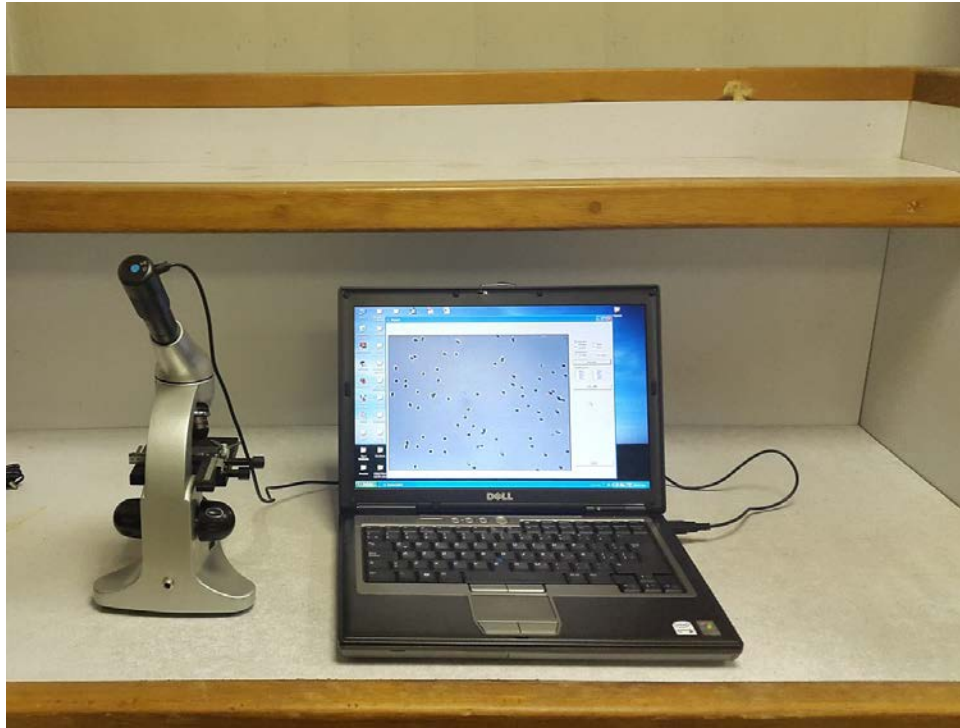


Figura 30 (a). Sistema CADIS para el conteo y análisis de las trazas grabadas: con microscopio de bajo costo, marca Quasar[®]

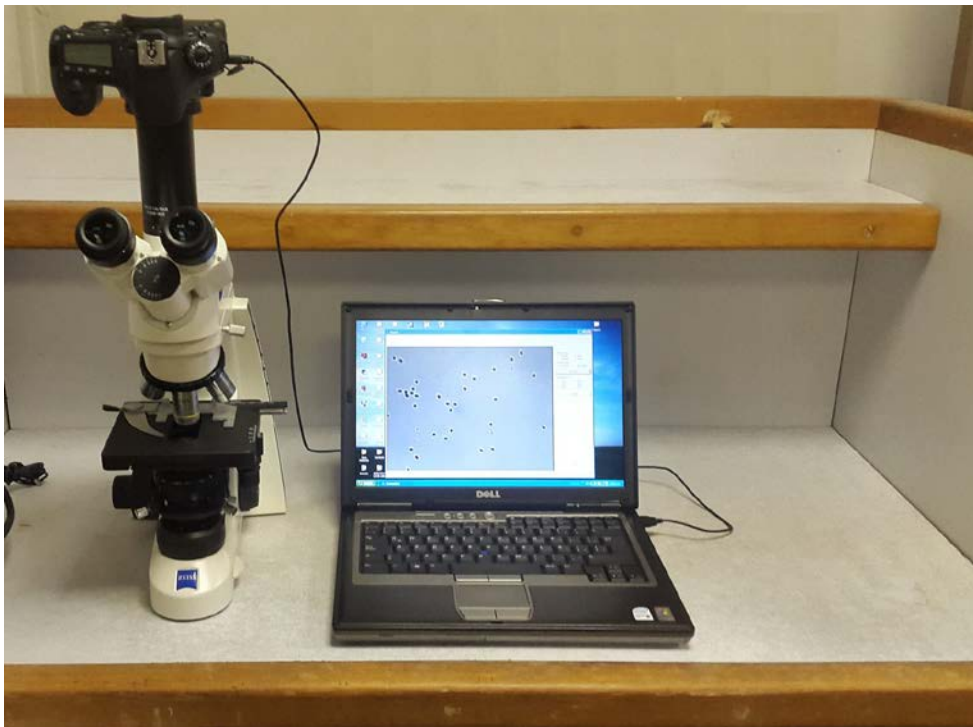


Figura 30 (b) Sistema CADIS para el conteo y análisis de las trazas grabadas con un microscopio óptico y cámara fotográfica digital

III.6.- Cámara de calibración de radón del Oak Ridge National Laboratory, USA.

El sistema de detección se calibra anualmente en el Oak Ridge National Laboratory (ORNL) en los Estados Unidos de América (USA), que se muestra en la figura 31. El factor de calibración es verificado sistemáticamente cada 6 meses y/o cuando se cambia a un nuevo lote de detectores, utilizando las facilidades de la cámara de Radón del IFUNAM.

III.7.- Cámara de verificación PAD-IFUNAM

En el laboratorio de Trazas Nucleares del proyecto PAD del IFUNAM, se cuenta con una cámara de verificación para la concentración de radón, que va desde los 60 Bq/m³ hasta los 60,000 Bq/m³, con flujo controlado de éste gas, y mediciones directas, como respaldo con sistemas dinámicos. Esta cámara tiene un volumen de 19,145 cm³ (casi 20 litros), en donde se pueden colocar, tanto los instrumentos para su verificación, como materiales, células, detectores de TNS, y/o cualquier objeto que se desee exponer a el gas radón. La figura 32, muestra la cámara de verificación, en donde la concentración de radón es controlada por llaves de paso esféricas, siendo la fuente radiactiva, material de uranio natural, extraído de minas.



Fig. 31.- Cámara de calibración de radón del Oak Ridge National Laboratory.



Figura 32.- Cámara de verificación de radón, del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del IFUNAM.

III.8.- Cámara de radón natural bajo tierra.

También se cuenta para la exposición a radón, con un salón bajo tierra, el cual por sus características peculiares geológicas, presenta concentraciones de radón-torón de hasta 900 Bq/m^3 , medidos y certificados a través de un año (Espinosa y otros, 2013a, 2013b). Este salón tiene un volumen de 30 m^3 , pudiéndose controlar la concentración de radón, desde 20 Bq/m^3 , hasta los 900 Bq/m^3 , por

tiempos definidos. Esto es, mediante el dispositivo de mitigación de radón desarrollado y patentado (MX/E/2012/084398) en la UNAM por el proyecto PAD del IFUNAM.

Este salón es ideal para la calibración de detectores e instrumental para la medición de radón. Para estudios de la dinámica del radón y torón (Espinosa y Tommasino, 2015), así como para cualquier experimento controlado de exposición a radón intramuros.

Todas estas facilidades, métodos de medición, y dispositivos para el estudio y análisis de radón, han hecho que el laboratorio de TNS y Radón del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) del Instituto de Física de la UNAM, sea uno de los más completos en equipamiento y facilidades, reconocido internacionalmente. Esta cámara para la exposición a radón, se muestra en la figura 33.



Figura 33.- Cámara natural de radón.

*Lo falso consiste en la privación de conocimiento,
y envuelve ideas incompletas y confusas.*

*Baruj Spinoza.
(Etica)*

CAPÍTULO IV

CUEVAS ESTUDIADAS

IV.1.- Estudios y mediciones de radón en cuevas Mexicanas

En México, se han realizado una serie de estudios y mediciones de concentración de radón en cuevas por el Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM (PAD-IF-UNAM), en colaboración con la Facultad de Ciencias de la UNAM (Borau et al., 1997; Espinosa et al, 2013), y con la Universidad Autónoma Metropolitana, plantel Xochimilco (Espinosa et al, 2008). Para estos estudios se usó la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, los dispositivos con detectores pasivos, los protocolos establecidos, así como el sistema de conteo automático DIAS y CADIS, también desarrollados dentro del proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del IFUNAM.

Cuevas estudiadas:

IV.1.1.- Grutas de Aguacachil (Zacatecolotla) ($18^{\circ}36'26''\text{N}$; $99^{\circ}33'45''\text{O}$), Guerrero, México.

IV.1.2.- Cueva de Pozas Azules ($18^{\circ}37'26''\text{N}$; $99^{\circ}32'55.7''\text{O}$), Guerrero, México.

IV.1.3.- Gruta de San Jerónimo ($18^{\circ}40'11''\text{N}$; $99^{\circ}30'36''\text{O}$), Guerrero, México.

IV.1.4.- Cueva Gabriel ($18^{\circ}27'25''\text{N}$; $96^{\circ}40'34''\text{O}$), Oaxaca, México.

IV.1.5.- Cueva de los Riscos ($21^{\circ}11'38''\text{N}$; $99^{\circ}30'50''\text{O}$), Queretaro, México.

IV.1.6.- Cueva del Judío ($21^{\circ}11'38''\text{N}$; $99^{\circ}30'50''\text{O}$), Queretaro, México.

IV.1.7.- Cueva Coyozochico ($19^{\circ}57'00''\text{N}$; $97^{\circ}34'54''\text{O}$), Puebla, México.

IV.1.8.- Cueva Karmidas ($19^{\circ}58'10''\text{N}$; $97^{\circ}38'36''\text{O}$), Puebla, México

Además de un estudio en

IV.1.9.- Gruta de Cuevas el Pirul, ($19^{\circ}42'00''\text{N}$, $98^{\circ}47'00''\text{O}$), en Teotihuacán, Estado de México.

IV.1.10.- La Gruta Cueva de las Varillas ($19^{\circ}41'00''\text{N}$, $98^{\circ}48'00''\text{O}$), en Teotihuacán, Estado de México.

IV.1.11.- Túnel realizado por los ancestros de Teotihuacán (en el siglo VIII d.c.), de la Pirámide del Sol ($19^{\circ}41'30''\text{N}$, $98^{\circ}50'30''\text{O}$), Estado de México.

En la figura 34, se muestra la localización de cada una de estas cuevas y grutas en la República Mexicana.



Figura 34. Ubicación de los estados donde se encuentran las cuevas, en que se realizaron los estudios de concentración de radón.

IV.1.1.- Gruta de Aguacachil (Zacatecolotla), Guerrero.

El resumidero de “Zacatecolotla”, en el Estado de Guerrero ($18^{\circ}36'26''\text{N}$; $99^{\circ}33'45''\text{O}$), es y sigue siendo una cavidad “escuela” para alumnos de cursos relacionados a la espeleología.

En términos generales, el desarrollo del pasaje principal se orienta en dirección NE. En base al recorrido “clásico”, éste presenta algunas desescaladas fáciles y, según la época, puede encontrarse mayor o menor cantidad de agua, sin gran dificultad técnica para su visita. En muchos puntos es posible contemplar formaciones calcáreas de muchos tipos, desde las tradicionales estalactitas y estalagmitas, las coladas, gours, hasta excéntricas (Montiel-Castro, 2012).

Esta gruta también tiene el nombre de “Aguacachil”, estando en la cercanía de la ciudad de Taxco, Guerrero. En una región con una altitud de 1500 m respecto al nivel del mar, en la cadena de los ríos Balsas-Mezcala, limitando al norte con el Eje Neovolcanico y al sur con la sierra de Guerrero, como se puede observar en la Figura 35.



Figura 35.- Mapa aéreo de la ubicación de las Grutas de Zacatecolotla (Aguacachil), en el estado de Guerrero.
(www.googlemaps.com)

Esta zona se encuentra en la provincia biótica del bajo Balsas con un clima semi-húmedo y una temperatura media de 18°C. El esquema de la gruta Zacatecolotla (Aguacachil), se muestra en la figura 36. Esta gruta tiene 1618 metros en su recorrido y 169 metros de profundidad máxima, y la presencia de 5 tiros estructurados a lo largo de ella.

Los datos obtenidos de la medición de concentración de radón, en las 4 posiciones de medición, se muestran en la tabla 3. Estas se realizaron con tiempos de integración de un mes, durante 3 meses. Los puntos de medición 1 y 2, son secos y los 3 y 4 húmedos. El valor máximo encontrado fue de 1.25 kBq/m³, con variaciones mensuales. Las variaciones mensuales de la concentración de radón intramuros en estos 3 meses fueron pequeñas, conservándose por arriba de los 1,000 Bq/m³ durante el tiempo del estudio.

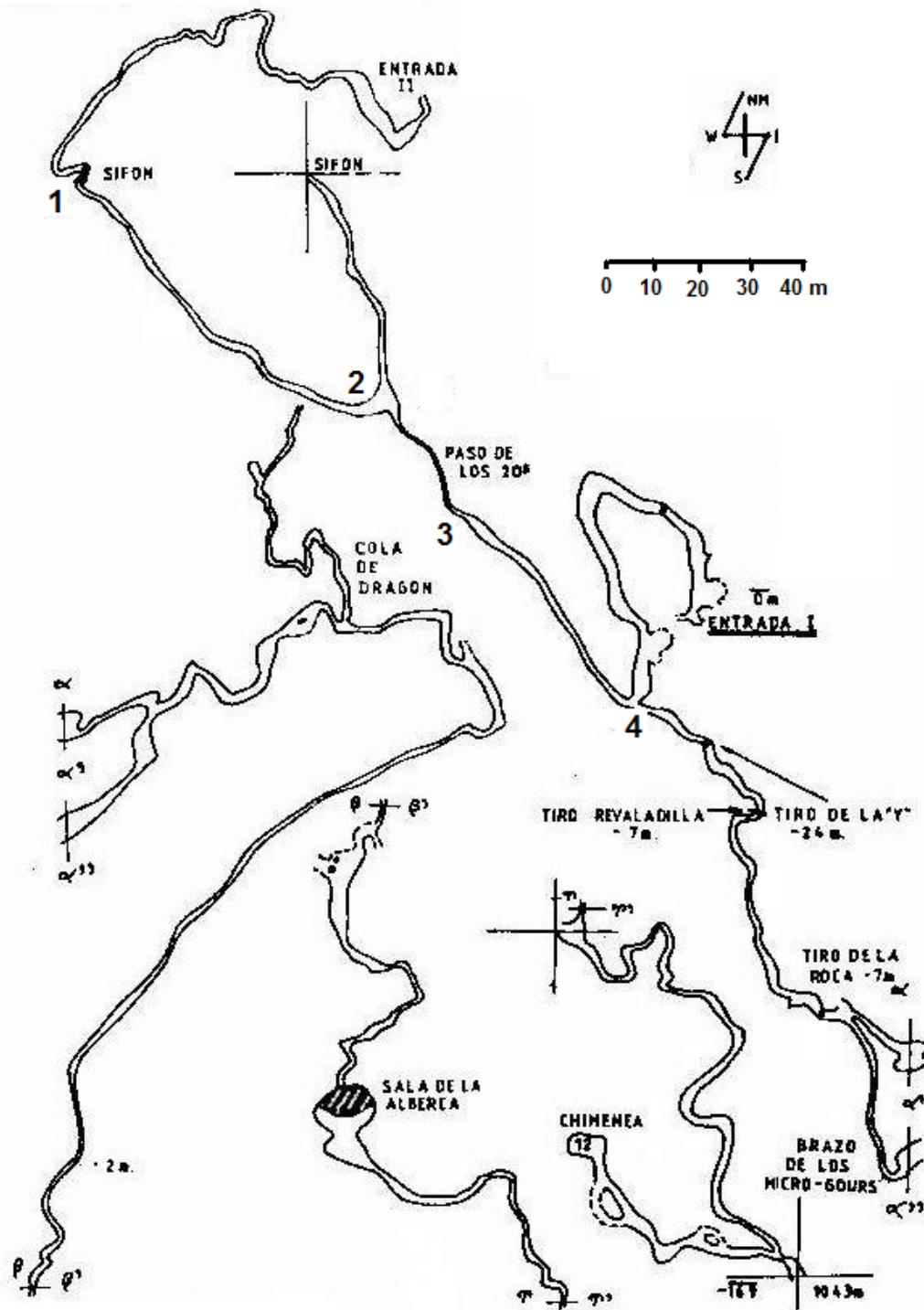


Figura 36.- Esquema de las Grutas de Aguacachil, Guerrero.

<http://3.bp.blogspot.com/-5GGihWwjUT4/TXvy4p97pRI/AAAAAAAAAPw/3dyK3-PxAc/s1600/Zacatecolotla.jpg>

Tabla 3.- Concentración media de radón, en la cueva Zacatecolotla

Posición	Condiciones de la cueva	Concentración de radón			Promedio (3 meses)	Presencia de murciélagos
		KBq/m ³			KBq/m ³	
		Mes 1	Mes 2	Mes 3		
1	Seco	1.12	1.11	1.18	1.14±0.04	SI
2	Seco	1.11	1.02	1.15	1.09±0.06	SI
3	Húmedo	1.03	1.22	1.24	1.16±0.11	NO
4	Húmedo	1.28	1.14	1.33	1.25±0.10	NO

IV.1.2.- Cueva de Pozas Azules, Guerrero.

La Cueva de las Pozas Azules, está situada en Acuitlapan, estado de Guerrero ($18^{\circ}37'26''\text{N}$; $99^{\circ}32'55.7''\text{O}$) (Figura 37), con una longitud de 1649 metros y una profundidad de (-)197 m en dirección norte, formada por un suelo de arena y piedra caliza. En la figura 38, se muestran la topografía y planta de la cueva, y en la tabla 4 se muestran los valores de concentración de radón encontrados en la cueva, los cuales oscilan alrededor de los mil Bq/m^3 , encontrándose la presencia de murciélagos.

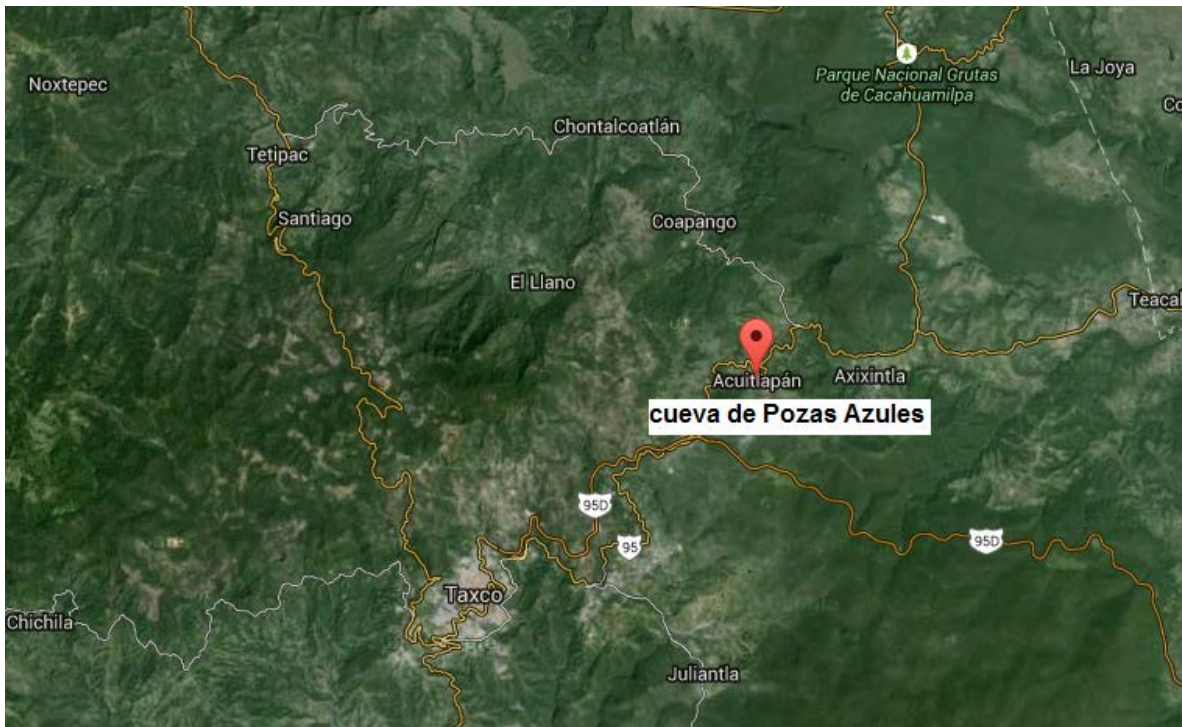


Figura 37.- Mapa de la ubicación de la cueva de Pozas Azules, Guerrero. (www.googlemaps.com)

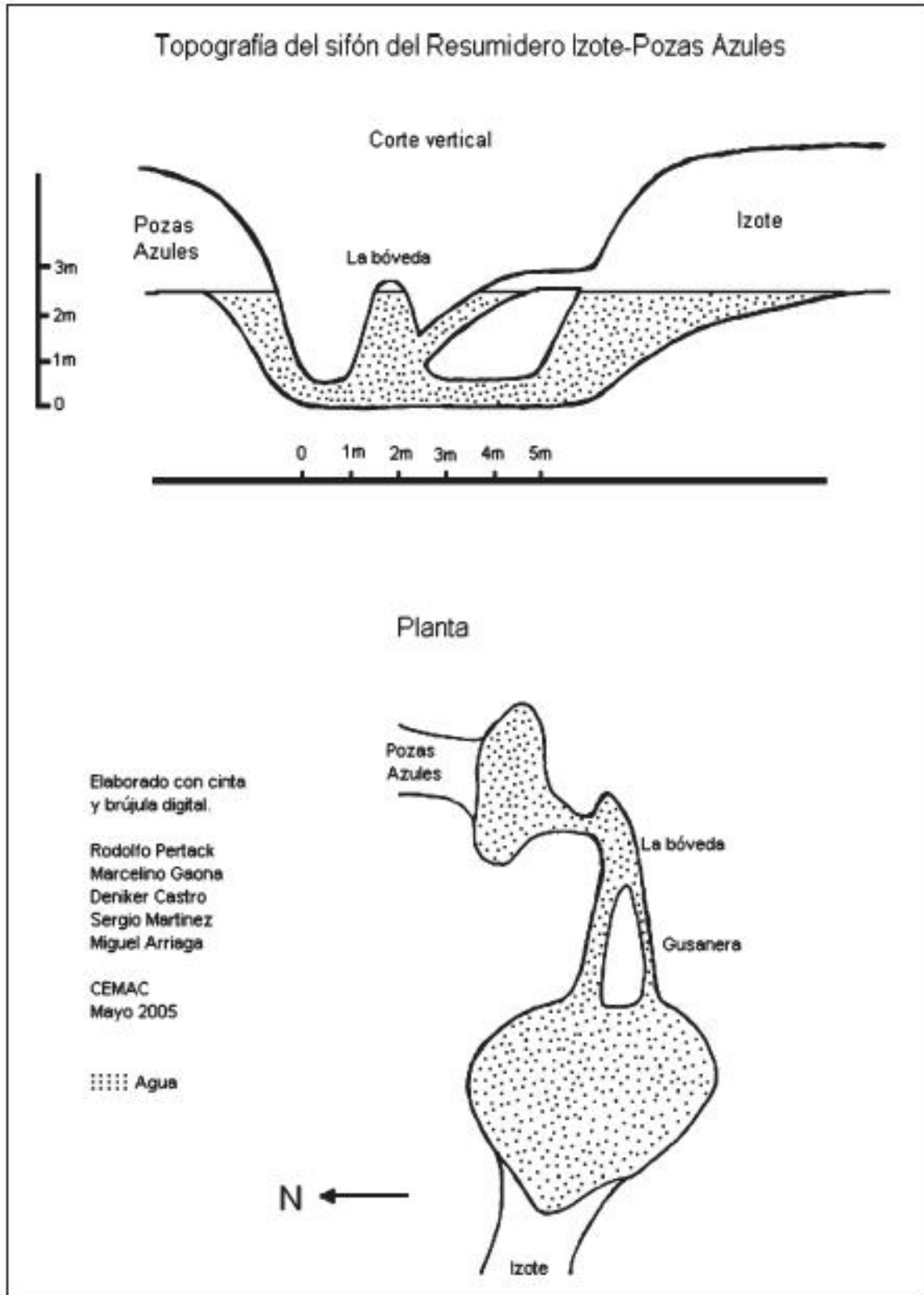


Figura 38.- Esquema de la cueva de Pozas Azules, Guerrero.
<http://www.amcs-pubs.org/maps/1421.pdf>

Tabla 4. Concentración media de radón, en la cueva de Pozas Azules

Posición	Condiciones de la cueva	Concentración de radón			Promedio (3 meses)	Presencia de murciélagos
		KBq/m ³			KBq/m ³	
		Mes 1	Mes 2	Mes 3		
1	Seco	1.05	1.18	1.21	1.15±0.09	SI
2	Seco	1.12	1.25	1.29	1.22±0.09	SI
3	Seco	1.10	1.09	1.12	1.10±0.02	SI
4	Seco	1.14	1.01	1.19	1.11±0.09	SI

Las Pozas Azules, también son un balneario natural en la parte superficial, como se puede ver en la figura 39, en donde se muestra una fotografía de la entrada de la cueva, siendo un espectáculo natural muy atractivo.



Figura 39.- Imágenes de la entrada a la cueva de las Pozas Azules.

IV.1.3.- Gruta de San Jerónimo, Guerrero.

Las Grutas de San Jerónimo, localizadas cerca de Tenancingo, en el estado de Guerrero ($18^{\circ}40'11''\text{N}$; $99^{\circ}30'36''\text{O}$), están formadas en la zona de varios arroyos que vienen del Nevado de Toluca, como se puede ver en la toma aérea (figura 40). Por estas grutas corre el río San Jerónimo, que se origina en los manantiales de San Pedro Zictepec, estado de México. Pasa en su recorrido por Tenancingo, el pueblo de San Jerónimo de donde toma su nombre, y se interna en la barranca de San Gaspar, todos estos lugares en el estado de México. De aquí se interna en el cerro del Jumil cerca del rancho del Resumidero, subterráneamente sigue corriendo y se interna en el cerro de Otlaltepec, uno de los puntos límites del Parque Nacional Grutas de Cacahuamilpa, en cuyos niveles inferiores, corre el Río San Jerónimo a través de 5,600 metros.

En la figura 41, se muestra el plano del interior de la gruta de San Jerónimo, y en la tabla 5 los valores de concentración de radón encontrados en ésta, en sus 4 posiciones de medición. El estudio se realizó en un período de 3 meses, con mediciones de un mes cada una. El valor máximo fue de 1.72 kBq/m^3 (promedio), habiéndose mantenido dentro de la cueva valores alrededor de 1.5 kBq/m^3 durante todo el período de tiempo estudiado, no habiéndose observado la presencia de murciélagos.

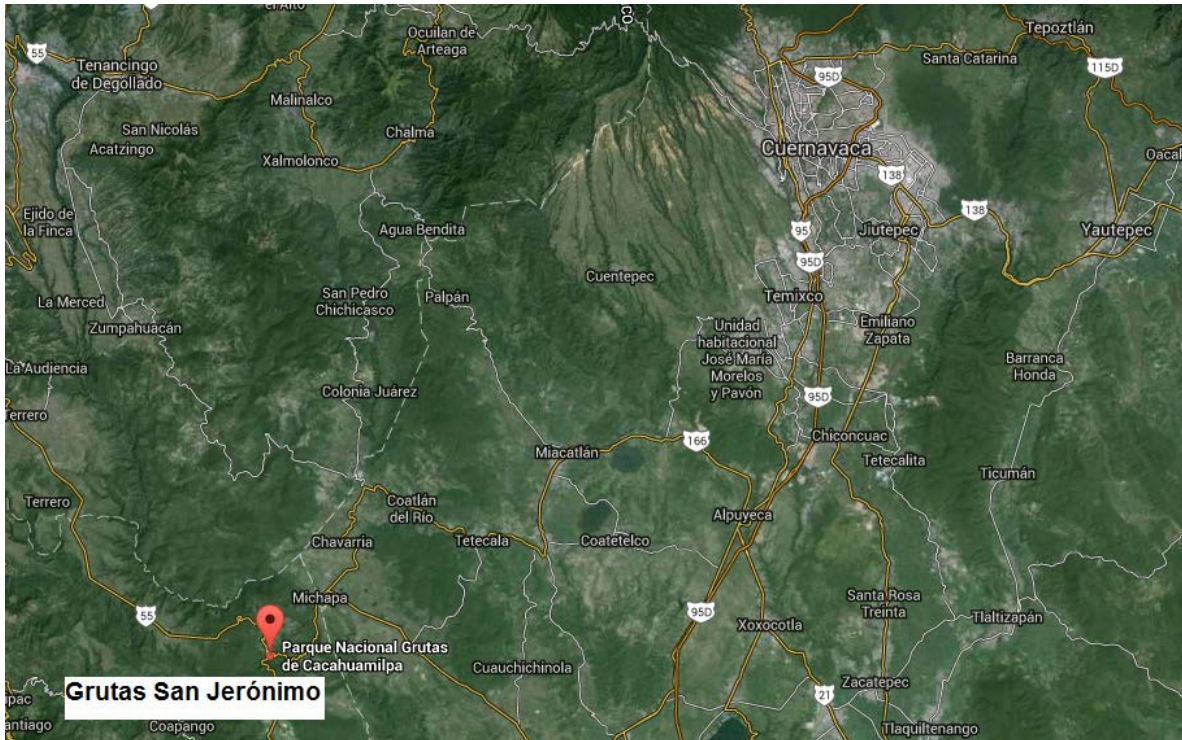


Fig 40. Mapa de la ubicación de la Gruta de San Jerónimo, Guerrero. (www.googlemaps.com)

Tabla 5.- Concentración media de radón, en la cueva San Jerónimo

Posición	Condiciones de la cueva	Concentración de radón			Promedio (3 meses)	Presencia de murciélagos
		KBq/m ³			KBq/m ³	
		Mes 1	Mes 2	Mes 3		
1	Húmedo	1.41	1.28	1.49	1.39±0.11	NO
2	Seco	1.53	1.33	1.55	1.47±0.12	NO
3	Seco	1.49	1.52	1.60	1.54±0.06	NO
4	Seco	1.73	1.62	1.80	1.72±0.09	NO

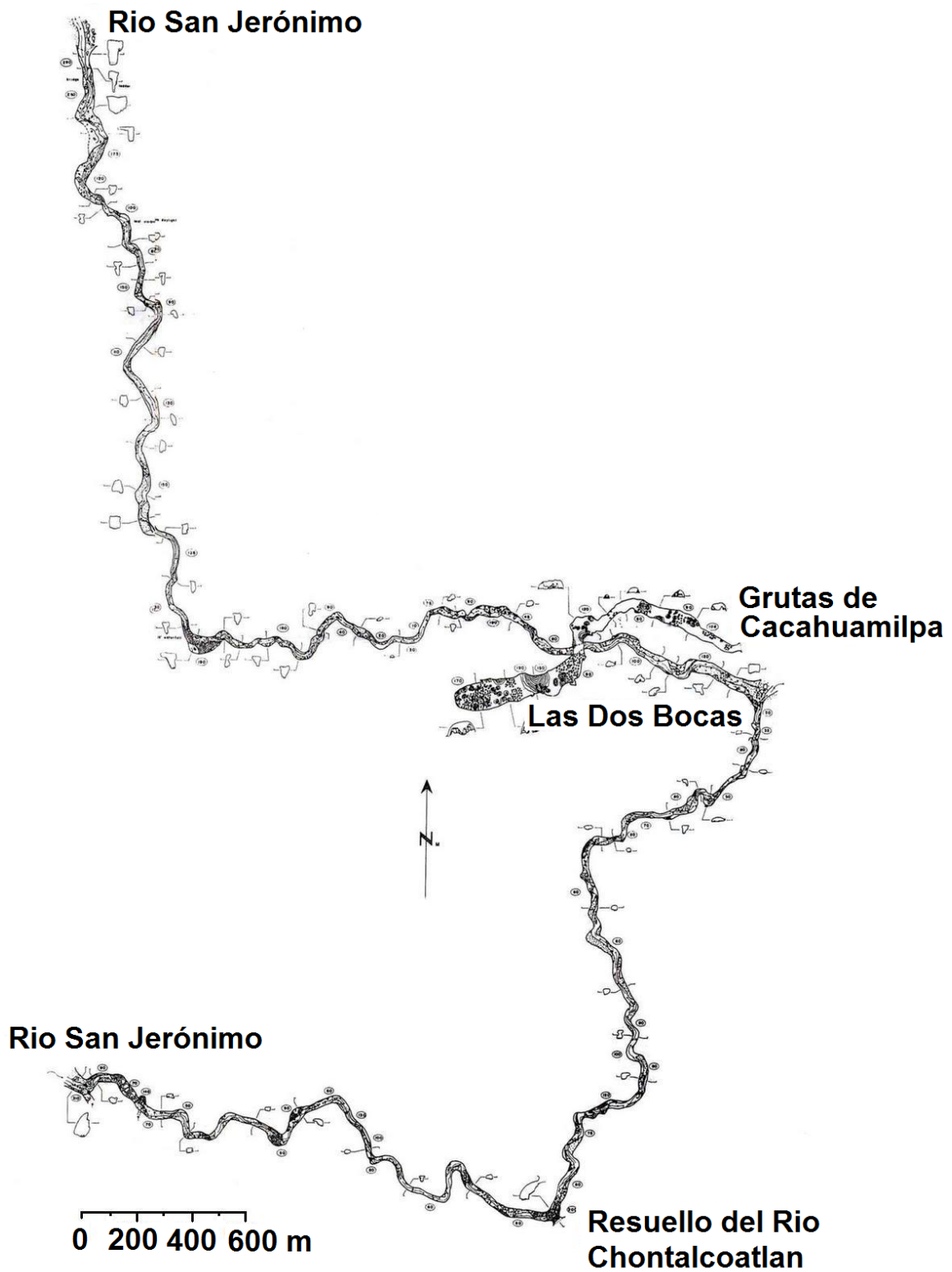


Fig 41. Esquema del rio San Jerónimo, Guerrero.
<http://www.mexicancaves.org/maps/0976.pdf>

IV.1.4.- Cueva Gabriel, Oaxaca.

La cueva Gabriel fue seleccionado para su estudio y se encuentra en el "Cerro Mojarra" (18°27'25"N, 96°40'34"O) a una altitud de 110 m snm, en el municipio de "Acatlan", en el estado de Oaxaca, (Mejía-Ortíz, et al, 2003); sobre la formación geológica llamada "Sierra Madre del Sur" (Figura 42), con origen kárstico que data del período superior creastic.

El clima en esta región es tropical, cálido sub-húmedo, con lluvias altas que caen en verano, y lluvia muy bajas en invierno (menos del 5% del total de lluvia anual), con una temperatura media de 25.2°C, con una máxima en verano de 30.5°C, y un mínimo de 17.2°C en invierno. La entrada de la cueva es de aproximadamente 20 m de altura y 30 m de ancho, con un desarrollo casi horizontal (Figura 43), de 1500 m de longitud, con corredores que tienen de 5 a 10 m de altura, y con cúpulas de 25 m de ancho y 50 m de largo. El suelo está cubierto de barro y lodo, y esta capa aumenta al final de la cueva.

A 250 m de la entrada de la cueva se encuentra una chimenea con una altura de aproximadamente 30 m, a través de la chimenea del flujo de aire dentro o hacia fuera dependiendo de la época del año y las condiciones meteorológicas sobre la superficie de la cueva. A lo largo de la cueva entre los 500 m a 700, hay una zona muy rica en estalactitas y estalagmitas que denotan una humedad relativamente alta. A partir de los 1,000 m hasta los 1,500 m, la superficie del suelo de la cueva está llena de barro y en los 1500 m existe un río subterráneo, con una profundidad de 1,2 m en los primeros 200 m. Después de este punto, la cueva está sin explorar (Mejía-Ortíz, et al, 1997; Cruz-Hernández, et al, 2002 y Mejía-Ortíz, et al, 2003.) En la temporada de lluvias, un pequeño arroyo nace desde el final de la cueva a la entrada, y desaparece en la estación seca. Probablemente, esto se puede

explicar por la proximidad a una presa hidroeléctrica. Los niveles de radón encontrados en la cueva Gabriel, se muestran en la tabla 6, los cuales van de $1,500 \text{ Bq/m}^3$ a $4,400 \text{ Bq/m}^3$, con importantes variaciones mensuales, en función a la estación del año. No se observaron murciélagos durante todo el tiempo que duró el estudio, en ninguna de las diferentes posiciones de medición en el interior de la cueva.



Figura 42.- Mapa de localización de la Cueva Gabriel, Oaxaca.
(www.googlemaps.com)

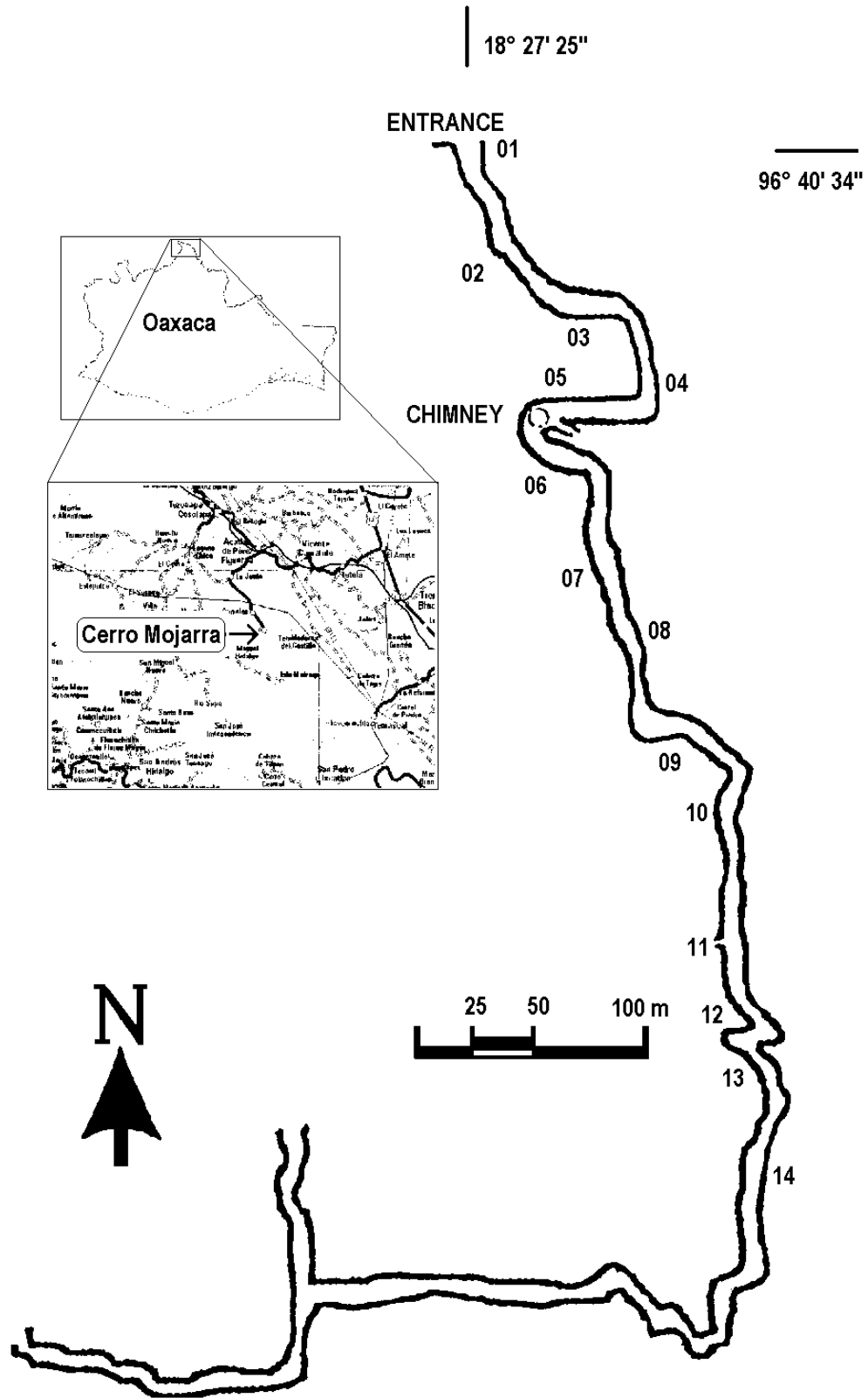


Fig 43.- Esquema de la cueva Gabriel, Oaxaca, México.

Tabla 6. Concentración media de radón, en la cueva Gabriel, Oaxaca

Posición	Concentración de radón			Promedio (3 meses)	Presencia de murciélagos
	KBq/m ³			KBq/m ³	
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3		
1	0.98	0.96	2.62	1.52±0.95	NO
2	1.60	1.25	2.28	1.71±0.52	NO
3	1.26	1.23	2.10	1.53±0.50	NO
4	1.29	1.21	1.89	1.46±0.38	NO
5	1.16	1.10	1.55	1.27±0.26	NO
6	1.49	1.42	2.08	1.66±0.36	NO
7	1.42	1.22	2.29	1.64±0.57	NO
8	2.22	2.14	4.16	2.84±1.14	NO
9	1.39	2.02	4.68	2.69±1.75	NO
10	3.06	2.68	4.21	3.31±0.80	NO
11	3.21	2.96	4.52	3.56±0.84	NO
12	ND	2.33	2.91	2.62±0.41	NO
13	ND	2.62	3.82	3.22±0.85	NO
14	ND	3.11	4.93	4.02±1.29	NO
15	ND	ND	4.43	4.43±1.43	NO

IV.1.5.- Cueva de Los Riscos, Querétaro

La cueva de los Riscos está en una formación fundamentalmente de piedra caliza, situada en la Sierra Gorda de la región en Jalpan de la Serra, en el Estado de Querétaro, en lo que se puede considerar el centro geográfico de México ($21^{\circ}11'38''\text{N}$, $99^{\circ}30'50''\text{O}$). La cueva está situada a una altitud de 1,122 m sobre el nivel del mar (Figura 44). Este entorno subterráneo es un sistema mixto con pasajes horizontales y verticales, incluyendo túneles y galerías, con una profundidad de 35 m y una longitud total de 550 m (Espino del Castillo et al., 2009). Tiene una temperatura promedio de 18°C y 85% de humedad relativa.

Las concentraciones de radón se midieron en varias posiciones dentro de la cueva de Los Riscos. Colocando dos detectores en cada uno de los lugares de medición con el fin de tener una adecuada estadística en las mediciones realizadas. Estas mediciones se hicieron a lo largo de 6 meses, en dos períodos de 3 meses cada uno.

El primer período de mediciones fue de octubre a diciembre del 2006 y el segundo de enero a marzo del 2007. Estos 6 meses corresponden a la temporada de estío en esta región. Se debe que considerar que durante la temporada de lluvias no es posible acceder a algunas de las posiciones de medición en la cueva. La figura 45, muestra el esquema de la cueva de “Los Riscos” estudiada, en donde se señalan las estaciones de medición (posiciones), y las zonas en donde se confirmó la existencia de colonias de murciélagos.

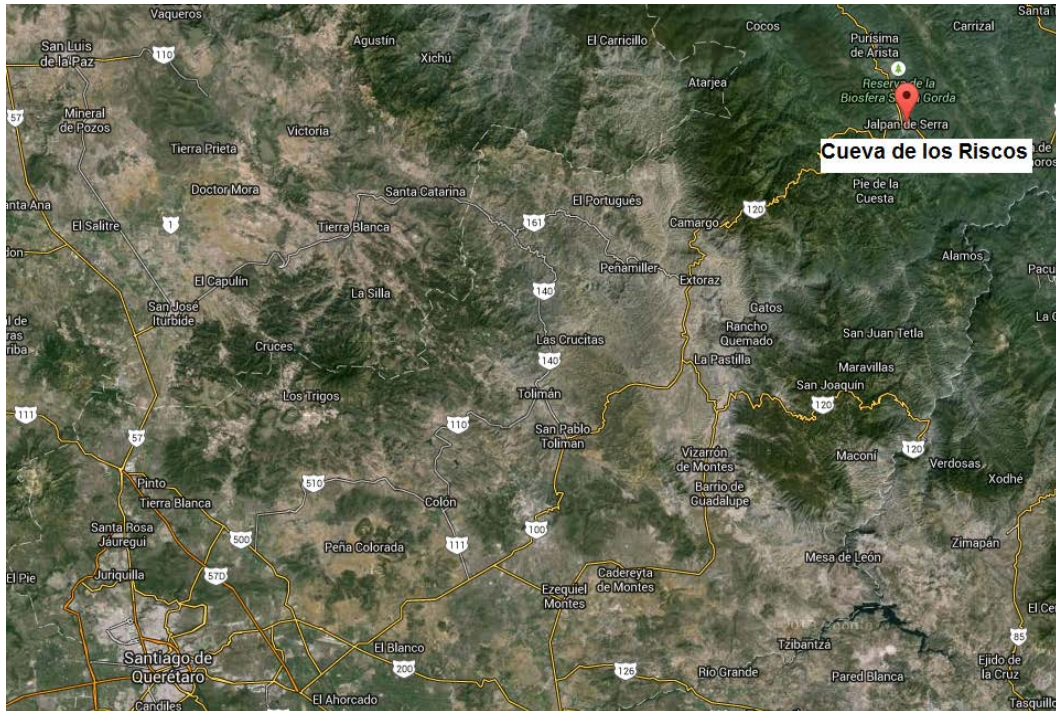


Fig 44. Mapa aéreo de la ubicación de la Cueva de los Riscos, Querétaro. (www.googlemaps.com)

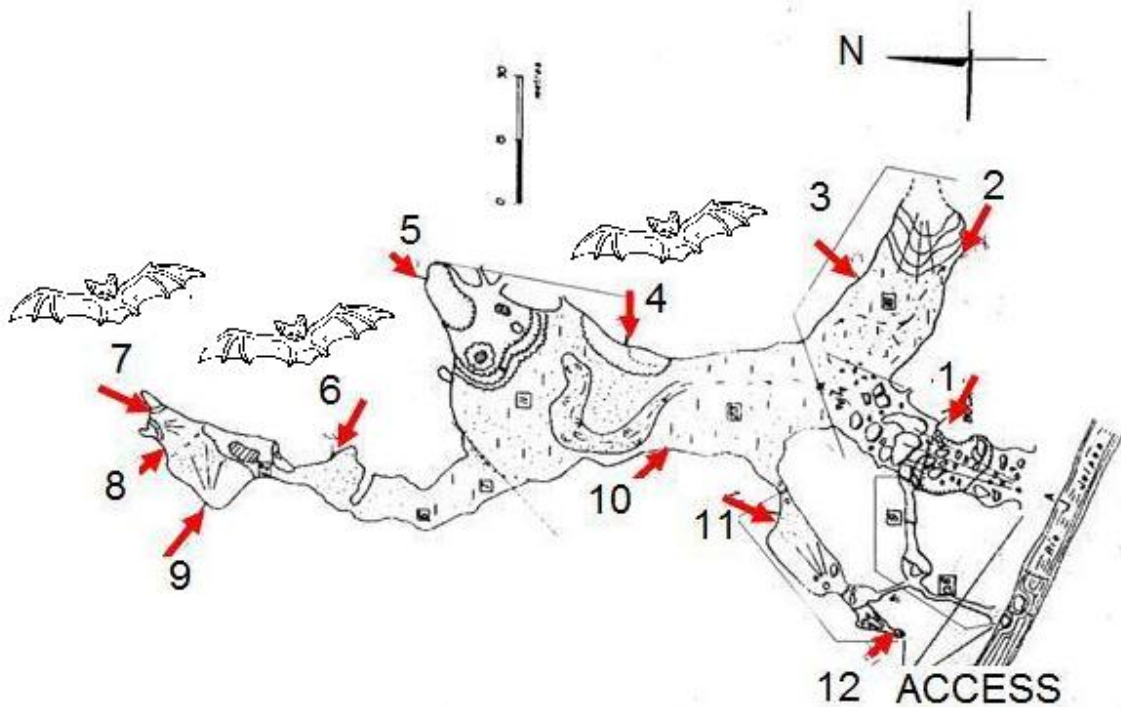


Figura 45.- Localización de los puntos de medición de radón en la cueva de los Riscos, y la distribución de colonias de murciélagos.

En la tabla 7 se muestran los niveles de concentración de radón, en donde se puede observar una gran variación de concentraciones de radón a lo largo de la cueva, con estaciones de medición con más de mil Bq/m³, y otras de 80 Bq/m³. Esto suele ser muy común en el estudio de radón en cuevas, dado que la concentración de radón intramuros en cuevas está asociada directamente a la ventilación puntual, en cada estación de medición.

El promedio de la concentración de radón está por arriba de los 300 Bq/m³, encontrándose colonias de murciélagos solo en 3 posiciones de medición, que coinciden con los 2 niveles más bajos de concentración de radón, y un tercero con promedio de 356 Bq/m³.

Por lo anterior, es muy importante el realizar los estudios de radón a todo lo largo y ancho de las cuevas, y así conocer los puntos donde la concentración de radón dentro de ellas es mayor, evitando permanecer largos períodos de tiempo en éstas, y así disminuir un posible daño en salud y reducir el riesgo de cáncer pulmonar.

Los niveles de radón en cuevas, no son predecibles, sino que tienen que medirse. Muchos factores intervienen en la generación de concentraciones importantes de radón en cuevas, como son: aspectos geológicos de la región en donde se encuentra ubicada la cueva, específicamente acumulaciones de materiales que generen prioritariamente radón (uranio y granito, entre otras); chimeneas y sistemas de ventilación en las cuevas; ríos subterráneos o acumulación temporal de agua dentro de la cueva; composición de los materiales que constituyen la cueva y su densidad; temperaturas tanto exteriores como interiores de las cuevas; vientos dominantes y régimen de lluvias en las regiones de las cuevas.

Tabla 7.- Niveles de radón intramuros medidos, y referencia de la localización de los murciélagos en la cueva de los Riscos, Querétaro.

Posición	Concentración de radón		Promedio (3 meses)	Presencia de murciélagos
	Bq/m ³			
	1er período	2o período		
1	348.9	417.6	383.3±48.6	NO
2	367.1	415.0	391.1±33.9	NO
3	286.0	311.8	298.9±18.2	NO
4	62.3	103.8	83.1±29.3	SI
5	1149.5	1282.5	1216.0±94.0	NO
6	97.6	117.1	107.4±13.8	SI
7	312.5	401.1	356.8±62.6	SI
8	399.9	465.3	432.6±46.2	NO
9	336.2	395.2	365.7±41.7	NO
10	296.5	299.4	298.0±23.1	NO
11	283.7	330.8	307.3±13.3	NO
12	341.4	412.1	376.8±50.0	NO

Cálculo de dosis y riesgo radiológico en la cueva “Los Riscos”.

La dosis efectiva se calculó para la cueva de Los Riscos, utilizando el valor mayor y menor de las concentraciones de radón encontradas (1,216 y 83.1Bq/m³). Utilizando el código de dominio público “WISE” (<http://www.wise-uranium.org/rdcnrh.html>).

Para este cálculo se consideró un factor de equilibrio de 0.4, para el radón (²²²Rn) y sus hijos, productos de la desintegración. Analizándose el caso para un visitante con 10 horas máximas de estancia, y un trabajador (profesor-investigador, espeleólogo, o guía

de turistas, entre otros) que permaneciera dentro de la cueva; 8 horas diarias por 5 días a la semana, y 50 semanas al año (2,000 horas). En la tabla 8, se dan los valores de dosis calculados para cada caso.

Tabla 8.- Razón de dosis y dosis acumulada para individuos expuestos a concentraciones de radón de 83.1 y 1,216 Bq/m³, considerando tiempos de permanencia de 10 y 2000 horas.

	83.1 Bq/m³	83.1Bq/m³	1,216 Bq/m³	1,216 Bq/m³
Tiempo de ocupación	10 h	2,000 h	10 h	2,000 h
Razón de dosis	626.3 nSv/h	626.3 nSv/h	9.165 μSv/h	9.165 μSv/h
Dosis acumulada	6.26 μSv	1.252 mSv/año	91.65 μSv	18.33 mSv/año

Como referencia de los datos dados en la tabla 8, se puede considerar que el nivel promedio de radiaciones ionizantes naturales, debidas al medio ambiente, que recibe una persona del Público en General (todas las personas, que no están expuestas a radiaciones ionizantes, fuera de las ambientales, debido a sus actividades cotidianas), es de 3 mSv al año (Purnell et al., 2004).

IV.1.6.- Cueva del Judío, Querétaro

La cueva del Judío es de piedra caliza y se encuentra en la Sierra Gorda en Pinal de Amoles en el estado de Querétaro, región del estado ($21^{\circ}11'38''\text{N}$, $99^{\circ}30'50''\text{O}$), en el centro de México (Figura 46), es una pequeña galería con 48 m de largo, y una profundidad de 25 m, con dos entradas, tiene una temperatura promedio de 21°C y 50% de humedad relativa. Esta cueva tiene un bajo índice de biodiversidad, sólo tiene insectos, arácnidos y sólo una especie de murciélago. Seis lugares fueron elegidos a lo largo de la cueva para mediciones de radón, y sólo unos pocos murciélagos encontrados de la especie *Corynorhinus townsendi* justo en la pared cerca de la entrada principal de la cueva (Figura 47). En la tabla 9 se muestran los valores de concentración de radón en la cueva del Judío.

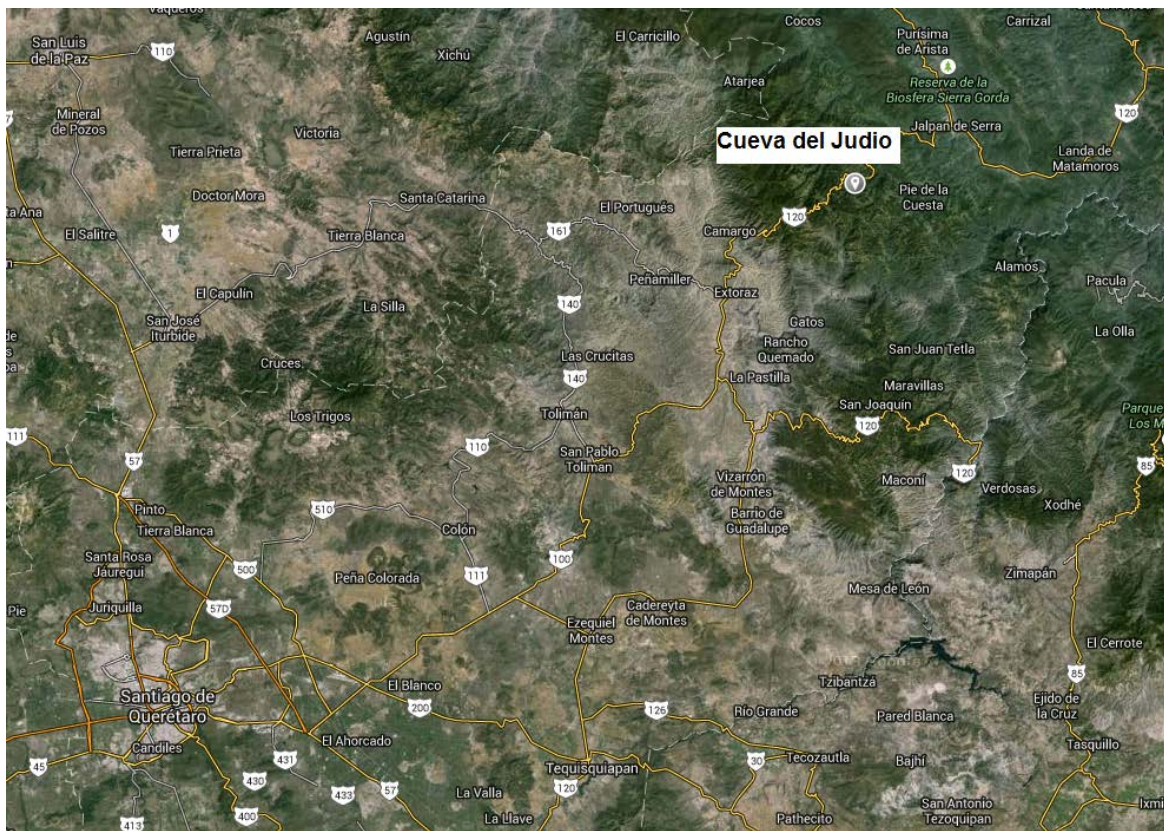


Fig 46. Mapa aéreo de la ubicación de la Cueva del Judío, Querétaro.

(www.googlemaps.com)

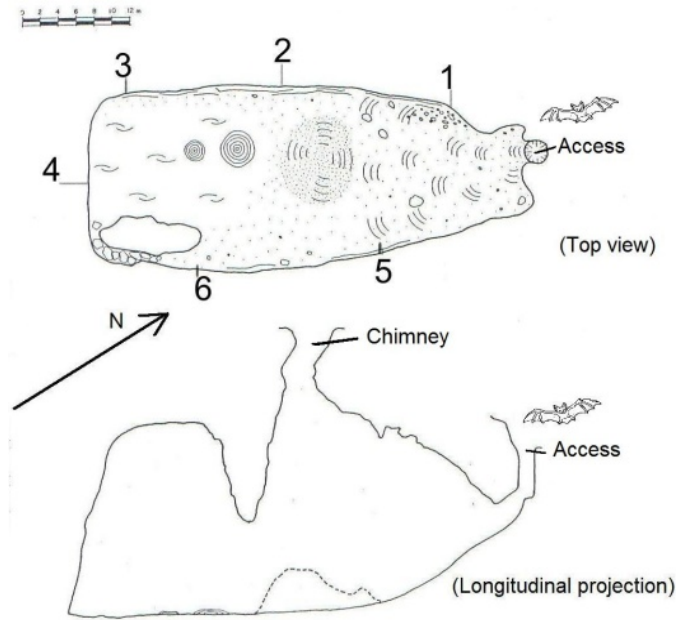


Figura 47.- Diagrama de la cueva del Judío, que muestra las ubicaciones de los detectores de radón y la colonia de murciélago.

Tabla 9.- Niveles de radón intramuros medidos, y referencia de la localización de los murciélagos en la cueva del Judío.

Posición	Concentración de radón (Bq/m ³)		Promedio (Bq/m ³)	Presencia de murciélagos
	1er período	2o período		
1	474.9	563.3	519.1±62.5	NO
2	393.8	412.1	403.0±12.9	NO
3	371.5	464.5	418.0±65.8	NO
4	441.1	511.2	476.2±49.6	NO
5	528.4	692.4	610.4±116.0	NO
6	413.3	392.9	403.1±14.4	NO

IV.1.7.- Cueva Coyozochico, Puebla.

La cueva de Coyozochico es una cueva de piedra caliza y se encuentra cerca de Cuetzalan, en la Sierra Norte del estado de Puebla ($19^{\circ}57'00''\text{N}$, $97^{\circ}24'36''\text{O}$), en el este de México, como se muestra en la figura 48. Cuenta con 170m de largo, con una temperatura promedio de 19°C y 68% de humedad relativa. Esta cueva tiene un bajo índice de biodiversidad, sólo tiene algunos insectos, arácnidos unos pocos y diplópodos, y sólo una especie de murciélago. Siete lugares fueron elegidos a lo largo de la cueva para mediciones de radón, y sólo en 4 lugares se encontraron murciélagos (Figura 49). En la tabla 10, se muestran los niveles de radón encontrados en la cueva de Coyozochico.

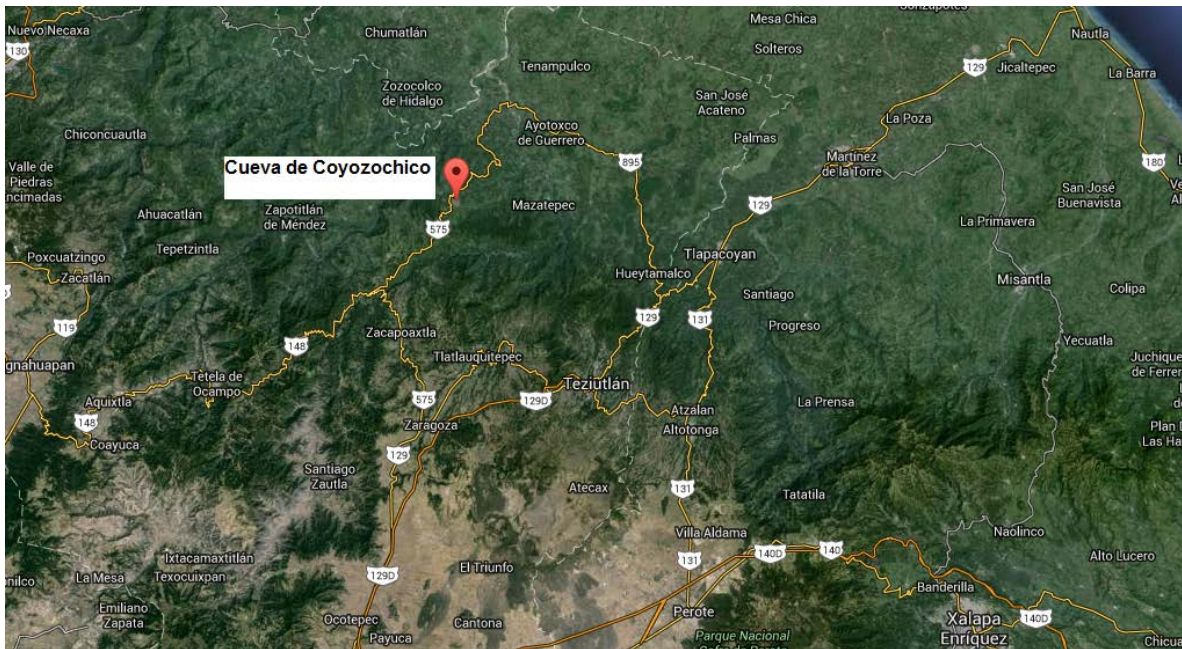


Figura 48. Mapa de posición geográfica de la cueva Coyozochico.
(www.googlemaps.com)

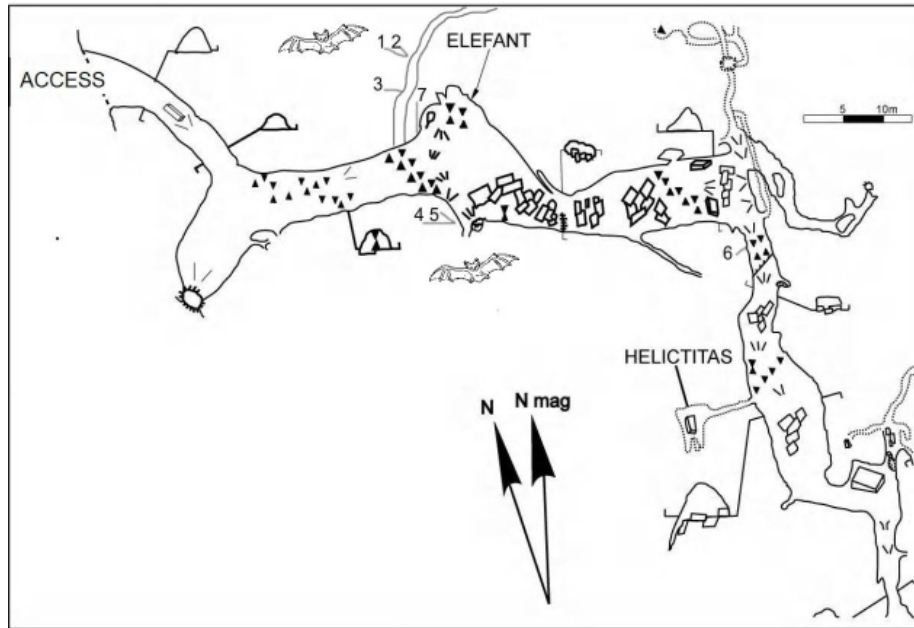


Figura 49 -. Diagrama de la cueva de Coyozochico que muestra las ubicaciones de los detectores de radón y las colonias de murciélagos.

Tabla 10.- Niveles de radón y localización de murciélagos en la cueva de Coyozochico

Posición	Condiciones de la cueva	Concentración de radón (Bq/m ³)		Promedio (Bq/m ³)	Presencia de murciélagos
		1er período	2o período		
1		459.2	482.7	471.0±16.6	SI
2		505.2	545.5	533.5±19.1	SI
3		525.8	549.2	543.8±12.1	NO
4		552.1	548.6	548.9±7.9	SI
5		621.2	614.4	600.1±20.9	SI
6		462.9	489.9	466.8±19.3	NO
7		411.5	398.2	391.4±16.7	NO

IV.1.8.- Cueva Karmidas, Puebla.

La Cueva Karmidas, es de piedra caliza mezclada con lutita y pedernal, y se ubica en Zapotitlán de Méndez, en el estado de Puebla (19°58'10"N, 97°38'36"O) (Figura 50), en el este de México, es 260 m de longitud, con una temperatura promedio de 18 ° C y 65% de humedad relativa. Esta cueva tiene un bajo índice de biodiversidad, sólo tiene algunos insectos, arácnidos unos pocos como Amblypygids, y en la corriente de agua de algunos crustáceos, también se encontraron algunas colonias de algas en las paredes y el techo justo cerca de la entrada de la cueva, y sólo una especie de murciélagos filostómidos. Nueve lugares fueron elegidos a lo largo de la cueva para hacer las mediciones de radón, y solo se encuentran los murciélagos cerca de la entrada. (Figura 51).

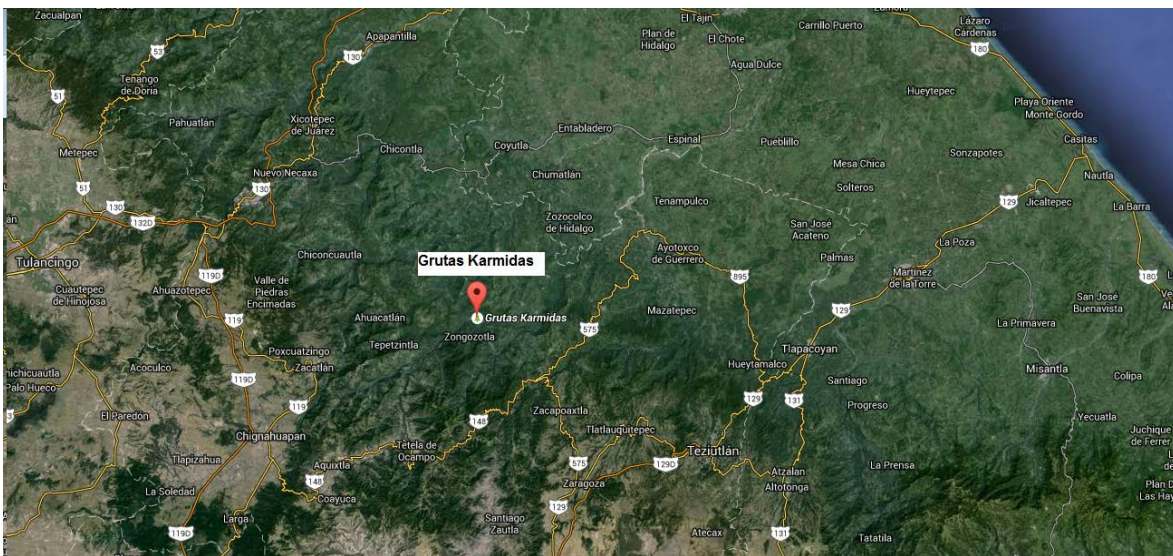


Figura 50. Mapa de ubicación de las Grutas Karmidas, en el estado de Puebla. (www.googlemaps.com)

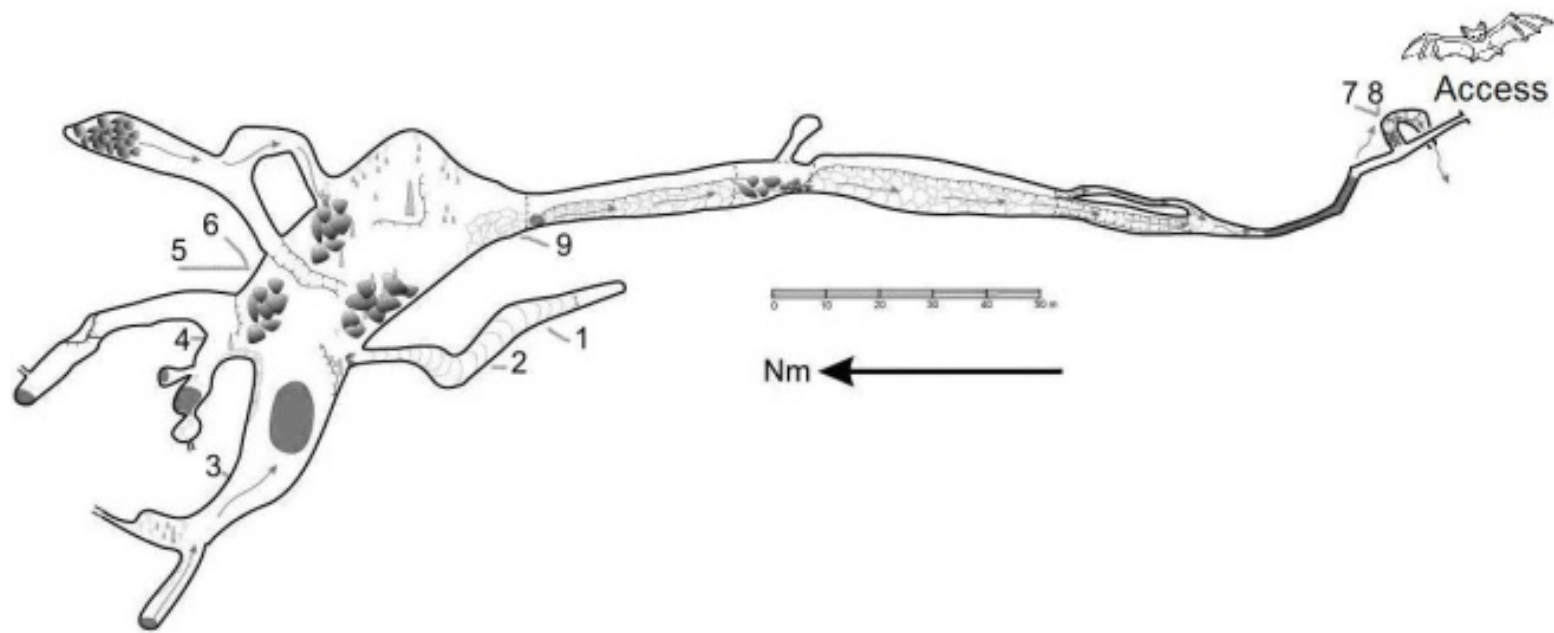


Figura 51 -. Diagrama de la Cueva Karmidas que muestra las ubicaciones de medición de radón (del 1 al 9).

La Tabla 11 muestra los niveles de radón durante los dos periodos de medición de tres meses, el nivel de radón promedio durante todo el período de seis meses.

Tabla 11.- Niveles de radón y localización de murciélagos en la cueva Karmidas.

Posición	Condiciones de la cueva	Concentración de radón (kBq/m ³)		Promedio (KBq/m ³)	Presencia de murciélagos
		Primer período	Segundo período		
1		61.39	58.92	60.16±1.7	NO
2		58.45	56.35	57.40±1.5	NO
3		36.45	38.25	37.35±1.3	NO
4		29.37	27.14	28.25±1.6	NO
5		25.29	24.14	24.71±0.8	NO
6		27.38	29.21	28.30±1.3	NO
7		1.24	1.08	1.16±0.1	NO
8		1.43	1.22	1.32±1.5	NO
9		10.24	9.84	10.04±0.3	NO

Cálculo de dosis

Para la cueva Karmidas, se calculan las dosis para los valores mínimo y máximo de concentración de radón; 1,160 y 60,160 Bq/m³. Este cálculo fue realizado usando el código WISE de la página web “Uranium Project”, del Servicio Mundial de Información de Energía (<http://www.wise-uranium.org/rdcnrh.html>). Estos cálculos se realizaron para 10 horas al año, que puede ser un turista que visitó la cueva en repetidas ocasiones, y de 2,000 horas

de permanencia al año, que puede corresponder a alguien que trabaja dentro de la cueva o que tiene visitas frecuentes, como puede ser un guía de turista o un espeleólogo. En la tabla 12 se dan los datos de la radón de dosis por hora, y la dosis acumulada anual.

	1,160 Bq/m³	1,160Bq/m³	60,160 Bq/m³	60,160 Bq/m³
Tiempo de ocupación (por año)	10 h/año	2,000 h/año	10 h/año	2,000 h/año
Razón de dosis	8.743 μ Sv/h	8.743 μ Sv/h	464.3 μ Sv/h	464.3 μ Sv/h
Dosis annual	87.43 μ Sv/año	17.48 mSv/año	4.64 mSv/año	928.6 mSv/año

Tabla 12 -. Tasa de dosis por hora y la dosis anual para un individuo expuesto a la concentración de radón mínimo (1,160 Bq/m³) y máximo (60,160 Bq/m³), medidos en la cueva Karmidas, considerando 10 y 2,000 horas al año.

IV.1.9.- Cuevas de la Varilla y Cueva del Pirul, en Teotihuacán, Estado de México

En el este de la plataforma de la Pirámide del Sol, hay dos grandes depresiones formadas por las escorias volcánicas, donde se construyó la pirámide ($19^{\circ}42'00''\text{N}$, $98^{\circ}47'00''\text{O}$). Excavaciones posteriores se realizaron en las cuevas: "De la Varilla" (túnel 1, en 1993 y 1994), y la "Cueva del Pirul" (túnel 2, en 1994 y 1995) (Manzanilla et al, 1989; Manzanilla et al, 1994). En cada uno de estas cuevas se realizaron mediciones de radón. En la figura 52, se muestra la vista aérea de la zona de Teotihuacán y su vecindad con otras vecindades. En la Figura 53, se muestra la ubicación de las cuevas de la Varilla y del Pirul, en relación con la Pirámide del Sol, así como en la figura 54, se muestra el esquema de cada una de estas cuevas.

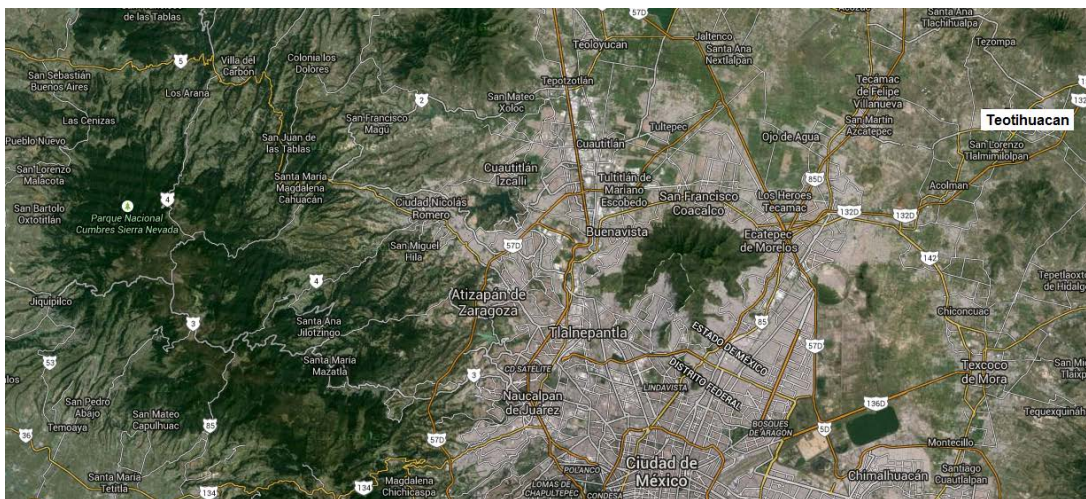


Figura 52.- Ubicación de la zona de Teotihuacán, y su vecindad con otras entidades.

(www.googlemaps.com)

La cueva de Las Varillas tenía 50 m de longitud; con una cámara de gran entrada de 18 m de diámetro, con siete pequeños nichos, y un túnel que cruza tres pequeñas cámaras. Su lado sur está conectado a otra cámara que tenía contextos funerarios y de almacenamiento bien conservados

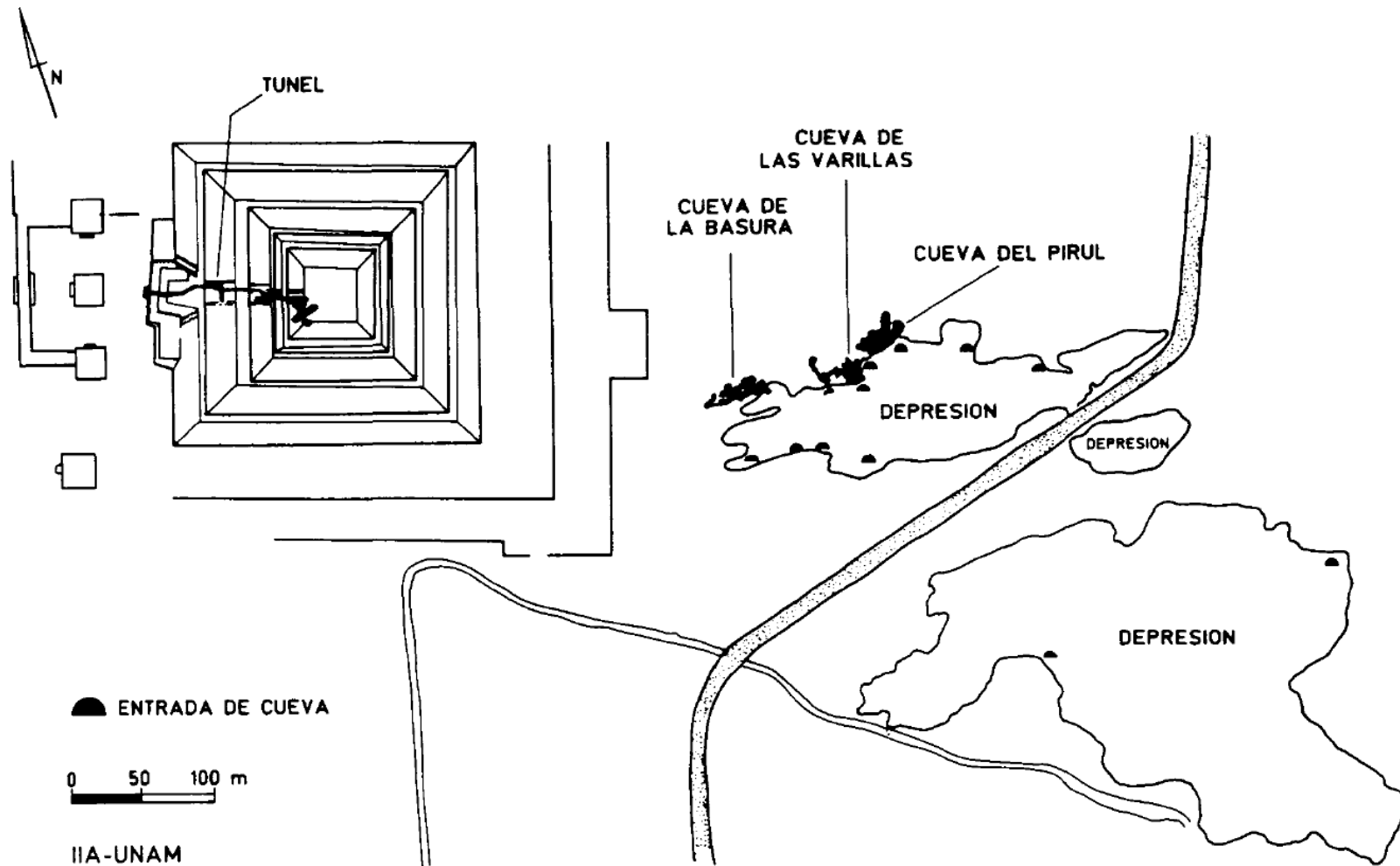


Figura 53. Plano de localización de las Cuevas de las Varillas y del Pirul, en Teotihuacán, Estado de México.

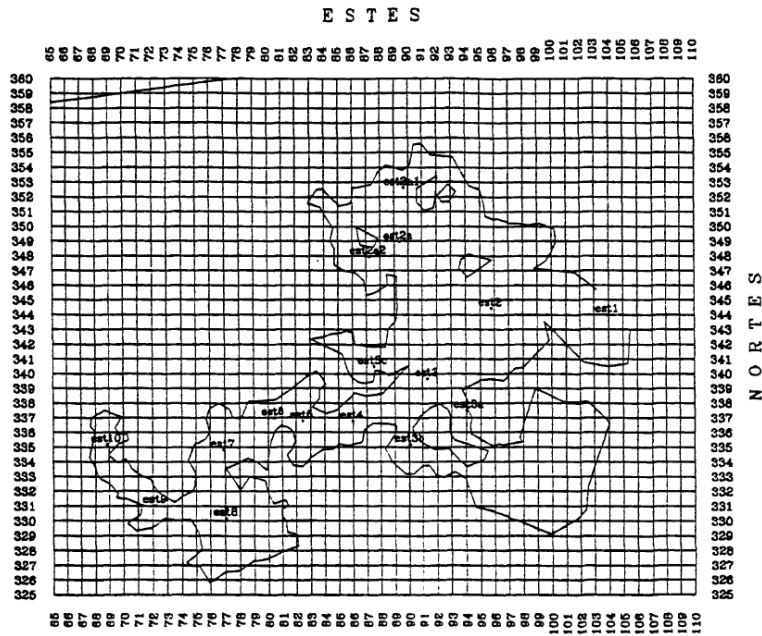


Figure 6. Map of the Cueva de las Varillas.

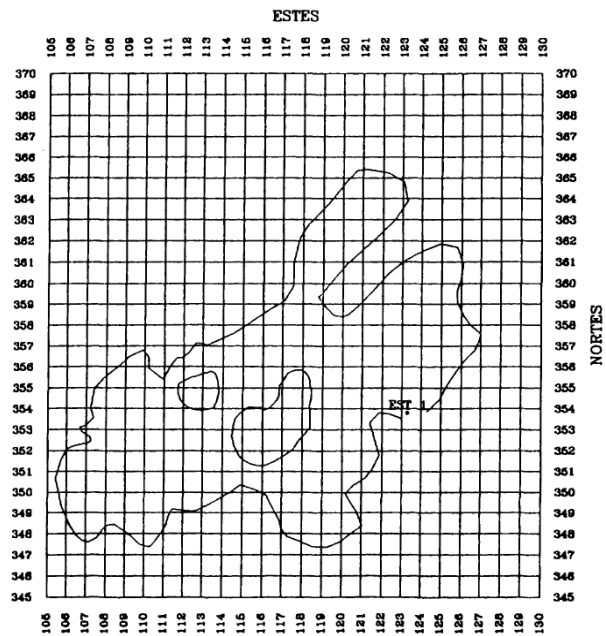


Figure 16. Map of the Cueva del Pirul.

GERARDO
GUTIERREZ
MENDOZA
ABRIL 1985.

Figura 54. Esquemas de las Cuevas de las Varillas y del Pirul

Los niveles de concentración de radón en el período del estudio (3 meses), fueron de $149 \pm 17 \text{ Bq/m}^3$ para la cueva de Las Varillas, y de $89 \pm 14 \text{ Bq/m}^3$ para la cueva del Pirul (Espinosa et al., 1997). Estos estudios fueron realizados durante el tiempo de la excavación de éstas cuevas por los arqueólogos. Esto es, que éstas fueron las concentraciones de radón, que se expusieron los investigadores y técnicos, durante este trabajo. Para el cálculo de dosis recibida, se puede usar el código WISE, evaluando cada caso de los trabajadores en particular, pues la dosis está en función al tiempo de exposición individual. Los valores de las concentraciones de radón encontradas, están por debajo del límite de acción recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para lugares de trabajo. Sin embargo, en estos casos, las concentraciones de radón pueden implicar un menor riesgo en salud, si consideramos la posibilidad de inhalación de partículas suspendidas (aerosoles) entre 2 y 10 μm , y/o por la inhalación de esporas y hongos de las tumbas encontradas (Manzanilla et al., 1996).

IV.1.10.- Gruta de la Pirámide del Sol, en Teotihuacán

Teotihuacán (a 50 km de la ciudad de México) fue la ciudad más importante de Mesoamérica en el período clásico. Está situado en la parte central del Valle de Teotihuacán, como se muestra en la figura 55. El valle se encuentra en la parte noreste de la cuenca de México ($19^{\circ}41'30''\text{N}$, $98^{\circ}50'30''\text{O}$), una meseta de más de 2000 metros de altura, con un clima semiárido templado. Esta ciudad fue bien planeado como un centro de fabricación y de comercio, un modelo del cosmos mesoamericanas. La construcción de grandes monumentos de la Ciudad Santa parece haberse dado cuenta de que las fases Tzacualli Miccaotli (100-200 DC). La construcción se extendía sobre $22,5 \text{ km}^2$ durante la fase Xolalpan (400-500 DC), cuando su población se estima que eran alrededor de 125,000 habitantes.



Figura 55.- Zona arqueológica de Teotihuacán.
(www.googlemaps.com)

La construcción individual más grande, la Pirámide del Sol, se encuentra en medio de la sección norte de la Avenida de los Muertos, siendo la principal estructura en la ciudad.

La Pirámide del Sol, fue construida originalmente de aproximadamente 215 x 215 metros en su base, y 63 metros de altura, pero fue ampliada al menos 2 veces en períodos posteriores, lo que resultó en un área final de 225 x 225 metros de base.

Esta pirámide fue un templo probablemente dedicado al dios Tláloc (Dios de la Lluvia) en su advocación de Theocatecutli, señor de sustento y la fertilidad que de acuerdo a las fuentes del siglo XVI que se encontraba en su parte superior.

Su fachada principal está al oeste y sus lados tienen una desviación de 15°25' este de la actual norte astronómico, la pirámide se encuentra en la latitud 19°41'30" norte y longitud 98°50'30" oeste.

Los materiales de construcción son básicamente tierra comprimida y restos volcánicos. Además de su centralidad geográfica, la cueva situada bajo la estructura indica la importancia de la pirámide. Este túnel, fue excavado en tiempos prehispánicos en el comienzo de la edad Cristiana. La entrada a esta cueva es por el frente de la pirámide, teniendo una longitud de 102 metros.

Se realizó de oeste a este, bajo la estructura por debajo del nivel del suelo (6,30 m) y fue excavada en la toba, bloques de basalto, y piroclástico volcánica, y termina como una flor dividida en cuatro lóbulos. Cada lóbulo es una cámara de 2 metros de altura y 3 m de ancho (figuras 56 y 57). Las cuevas han desempeñado un papel integral en la religión mesoamericana por ser el lugar del nacimiento de los dioses, así como el portal al inframundo. En la cueva había algunas piedras que funcionaban como canales para el agua que fluye.

El nivel de concentración de radón en el túnel de la Pirámide del Sol, fue de $177 \pm 13 \text{ Bq/m}^3$ (Espinosa et al., 1997). Indicándonos esto que existe una difusión de radón hacia la parte superior de la pirámide.

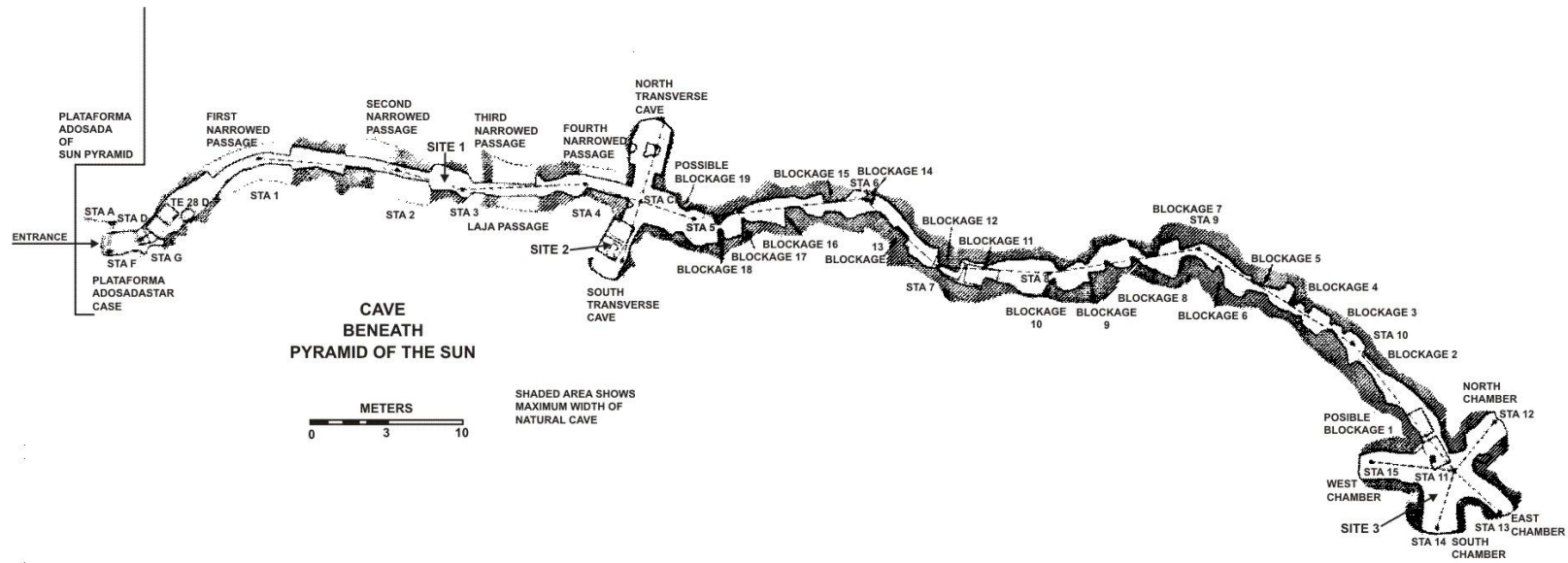


Figura 56. Túnel prehispánico en la Pirámide del Sol, en Teotihuacán, Estado de México.

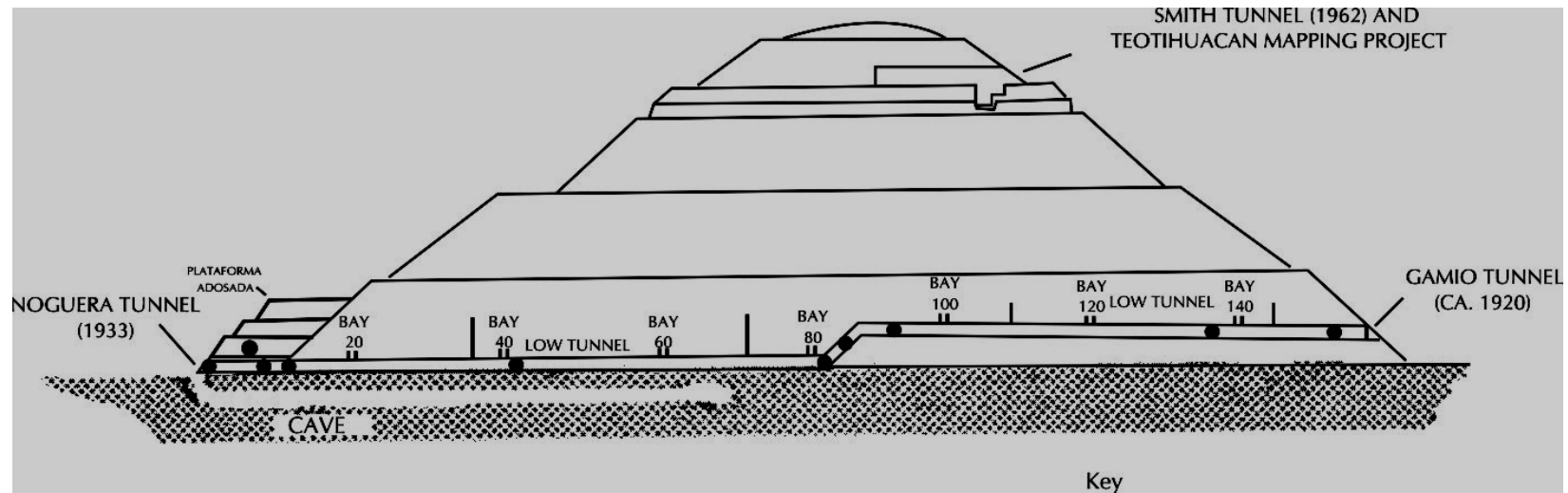


Figura 57. Vista lateral del túnel prehispánico en la Pirámide del Sol, en Teotihuacán, Estado de México.

La zona de Teotihuacán y sus pirámides constituyen una de las evidencias del alto grado de desarrollo de la civilización Teotihuacana (Mexico). En la Figura 58, se muestra la Pirámide del Sol.



Figura 58.- Vista de la Pirámide del Sol, en Teotihuacán, México.

IV.2.- Comparación de niveles de radón (^{222}Rn) intramuros en cuevas en diferentes regiones del mundo.

Haciendo una revisión de trabajos publicados por otros grupos de investigación (Tabla 4), en referencia a la concentración de radón en cuevas de diferentes regiones en el mundo, como: Arabia Saudita, Estados Unidos, Grecia, India, Reino Unido, Turquía y Venezuela, se encontró que existe una enorme variedad de concentraciones de radón en cuevas en el mundo, y como se mencionó anteriormente, y que no existe una norma o generalidad para ello, sino que dependerá de las características específicas de la región donde se encuentren las cuevas. (Al-Mustafa et al., 2005; Aytakin et al., 2006; Buecher, 1999; Choubey et al., 2005; Sajo-Bohus et al., 1997), pues se puede tener desde unos cuantos Becquerels ($70\text{-}80\text{ Bq/m}^3$), hasta niveles de más de $85,000\text{ Bq/m}^3$. Por lo que se hace necesario, por razones de salud pública, el estudio y la medición de radón en cuevas en todo el mundo, y sobre todo si hay presencia humana o de seres vivos en éstas.

Localización	Niveles de Radón (Bq/m ³)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
Abu-Sakheel-1, Arabia Saudita	48	201	10399
Abu-Sakheel-2, Arabia Saudita	72	191	114
Bin-Gazi, Arabia Saudita	46	128	74
Al-Ferry, Arabia Saudita	47	111	81
Abu-Wrken, Arabia Saudita	66	625	451
Kartchner, Arizona, Estados Unidos	---	---	3330
Cueva Pleistocenic, Grecia	190	88,060	---
Rio Pindar, India	4700	12,200	6967
Cueva Mendips, Reino Unido	68	12,552	---
Cueva Gokgol, Turquía	20	4,478	1919
Cehennemagzi, Turquía	304	885	657
Yellow Creek, Venezuela	100	80,000	1000
El Indio, Venezuela	1400	3,000	---
El Mirador, Venezuela	300	1,200	---
Guachiro, Venezuela	80	3,200	---

Table 4.- Nivel de concentración de radón reportado en cuevas en diferentes regiones del mundo

IV.3.- Relación del nivel de concentración de radón en cuevas y espacios cerrados, y colonias de murciélagos y otras especies.

Todos los organismos dentro de cuevas, están naturalmente expuestos a la radiación, y actualmente no hay duda de los efectos de la radiación ionizante sobre los sistemas biológicos, ya sean benéficos (Hormé시스), o de riesgo a la salud y generadores de enfermedades. Esto siempre en base, y dependiendo de la cantidad de radiación (dosis de radiación) recibida por los organismos. Estos hechos están referenciados y documentados desde el siglo XIX (Harting y Hesse, 1879; Arnstein, 1913; Pirchan and Sikl, 1932; Casarett, 1968; Sigala-Regalado et al., 2011).

Por lo que la medición y evaluación de concentración de radón en cuevas y lugares cerrados es una obligación estatal y/o privada, en cualquier país.

Como resultado del estudio de radón en cuevas, se encontró un hecho, que puede dar origen a considerar a los murciélagos que habitan en cuevas como “biomarcadores” de concentración de radón, pues se observa que las colonias de murciélagos solo se encuentran en las zonas con niveles medios ($\sim 1,000 \text{ Bq/m}^3$) y bajos (~ 200 a 400 Bq/m^3) de radón, pudiendo ser éste un indicador, para espeleólogos, guías de turistas, turistas, y todo el público que se adentre en una cueva.

*El humano, puede disfrutar a Dios,
como Dios puede disfrutar al humano,
pues ambos tienen por encima de sí,
principios y normas.*

*Y seres como Dioses.
Erick Fromm*

COROLARIO

Deseamos que este libro sea de utilidad a los jóvenes y no tan jóvenes profesionistas, espeleólogos, guías de turistas, físicos, biólogos, químicos, médicos, y en general a todo público interesado en el medio ambiente, las radiaciones ionizantes, radón intramuros, y sus posibles efectos en la evolución de las especies y la salud de los seres humanos. Pues ha sido el medio ambiente donde hemos vivido (los primeros organismos unicelulares) desde la creación de la Tierra, vivimos, y viviremos hasta la desaparición de nuestro planeta.



Efecto de una particular alfa en un polímero - (arborescencia)
producida en el laboratorio PAD y símbolo del
Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD-IFUNAM)

*Ser exitoso es estar realizado
con las actividades cotidianas, laborales
y el tipo de vida que se ha logrado.*

G. Espinosa G.

REFERENCIAS

Akerblom G (1999). Radon legislation and national guidelines. Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm; ISSN 0282-4434

Al-Mustafa, H., Al-Jarallah, M.I., Fazal-ur-Rehman, Abu-jarad, F., (2005). Radon concentration measurements in the desert caves. *Radiation Measurements* 40, 707-710.

Armstein, A. (1913). On the so-called "Schneeberg Lung Cancer". *Verhandl di deutsch path Gesellsch* 16, 332-342.

Aytekin, H., Baldik, R., Celebi, N., Ataksor, B., Tasdelen, M., Kopuz, G. (2006). Radon Measurements in the caves of Zonguldak (Turkey). *Radiat. Prot. Dosim.* 118, 117-121.

BEIR-VI. (1999). Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) VI Report: "The Health Effects of Exposure to Indoor Radon". National Academy Press, Washington, D.C., ISBN 0-309-056454-4.

Borau J, Gonzalez A, Espinosa G, Golzarri JI., (1993). Measurements of Radon Levels Inside Mexican Caves. *Nucl Tracks Radiat Meas* 22, 287-288

Buecher, R. (1999). Microclima study of Kertchner caverns, Arizona. *J. Cave Karst Stud.*, 61, 108-120.

Casarett AP (1968). *Radiation Biology*. Prentice-Hall, Washington, DC.

Choubey, V.M., Bartarya, S.K., Ramola, R.C., (2005). Radon variations in an active landslide zone along the Pindar River, in Chamoli District, Garhwal Lesser Himalaya, India. *Environmental Geology*, 47, 745-750.

Cruz-Hernández, J., Mejía-Ortíz, L. M., Signoret-Poillon, M. & Viccon-Pale, J. A., (2002). Distribution and abundance of *Diacyclops sp.* (Crustacea: Copepoda) in Gabriel Cave, Oaxaca, México. In: Escobar-Briones E. & Alvarez-Noguera, F. (Ed). Modern Approaches to Study of Crustacea. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisher.

Dixon, D.W., Gooding, T.D., McCready-Sea, S. (1996). Evaluation and significance of radon exposures in British workplace building. *Environment International*. 22, S1079-S1082.

Durrani, S.A., Ilic, R. (1997) Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment, World Sci Publ. Co., Ltd, London.

Espino del Castillo A, Castaño-Meneses G, Dávila-Montes M, Miranda-Anaya M, Morales-Malacara JB, Paredes-León R (2009) *J Cave Karst Stud* 71, 24–31

Espinosa, G. (1994). *Trazas Nucleares en Solidos*, UNAM. ISBN 968-36-4219-5.

Espinosa, G., Gammage, R.B., (1993). Measurements Methodology for Indoor Radon Using Passive Track Detectors. *Applied Radiation and Isotopes*. 44, 719-723.

Espinosa, G., Moreno, A., Golzarri, J.I. (1981) Uranium Determination in Water using Solid State Nuclear Detectors. *Nuclear Tracks. Methods, Instruments and Applications*. 1, 591.

Espinosa, G., Golzarri, J.I., Chavarría, A.C., Castaño, V.M. (2013a). Indoor radon measurements via Nuclear Track Methodology: a comparative study. *Radiat. Meas.* 50, 127-129.

Espinosa G, Golzarri JI, Gammage G, Sajo-Bohus L, Viccon-Pale J, Signoret-Paillon M (2008). Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method. *Radiat Meas* 43:S364–S368

Espinosa, G., Golzarri, J.I., Gaso, I., mena, M., Segovia, N. (2013b) . An intercomparison of indoor radon data using NTD and different dynamic recording systems. *Radiat. Meas.* 50, 112-115.

Espinosa, G., Golzarri, K. Lopez, J. Rickards. (2011). Long term Indoor Radon Measurements in the Pelletron Laboratory at the UNAM Physics Institute. *Revista Mexicana de Física.* S-57 (1), 50-54.

Espinosa, G., Golzarri, J.I., Vega-Orihuela, E., Morales-Malacara, J.B. (2013). Indoor radon concentration levels in Mexican caves, using Nuclear Track Methodology, and the relationship with living habits of the bats. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 296, 43-48.

Espinosa, G., Manzanilla, L., Gammage, R.B., (1997). Radon Concentrations in the Pyramid of the Sun at Teotihuacan. *Radiation Measurements.* 28, 667-670.

Espinosa, G., Silva, R.J. (2009). Industrial commercial available respiratory filter as indoor radon monitor. *J. Radioanalytical Nucl. Chem.* 282, 405-408.

Espinosa, G, Tommasino, L. (2015). Surface-deposition and distribution of Radon (^{222}Rn and ^{220}Rn) decay products indoors. *Journal of Environmental Radioactivity.* 143, 80-84.

EURATOM. (1990). Protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/EURATOM). *Official Journal of the European Communities* L80/26.

Fleischer, R. L., Price, P. B., & Walker R. K. (1975). Nuclear Tracks in Solids, Principles and Applications . Berkeley, California: University of California.

Gammage, R.B., Dudney, C.S., Wilson, D.L., Saultz, R.J., Bauer, B.C., (1992). Subterranean transport of radon and elevated indoor radon in Hill Karst Terrains. Atmospheric Environment, 26A, 2237-2246.

Harting, H.H. and Hesse, W. (1879). Der Lungenkrebs, die bergkrankheit in den schneeberger gruben. Viertel Gerichtl Med Oeff Sanitaestswes. 31, 102-132 y 313-337.

Hensshaw, D.L., Eatough, J.P., Richardson, R.B.”Radon as a causantive factor in induction of myeloid leukaemia and others cancers. “ Lancet, 355, 1008, 1990.

Hueck, W. (1939) Kurzer Bericht uber die Ergebnisse anatomischer Untersuchungen in Schneeberg. Z. Kerbsforsch., 47,108.

Husar, R., 1976. Physics and Chemistry of Atmospheric Aerosols. Cours of Dept of Meterology. University of Stockholm Sweden.

IAEA (1989) Regional workshop on environmental sampling and measurements of radioactivity for monitoring purpose, Kalpakkam, India, vol 9., pp 85–92

IAEA. Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies. Proceeding Series (2012).

ICRP. (1993). International Commission on Radiological Protection, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, Publication 65, Annals of the ICRP Volume 23/2, ISBN-13: 978-0-08-042475-0, ISBN-10: 0-08-042475-9.

Kendall, G.M. and Smith, T.J. (2002) Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection* 22: 389-406.

Kotrappa, P., Dempsey, J.C., Ramsey, R.W., Stieff, L.R. (1990). A practical E-PERM system for indoor radon measurements. *Health Physics*, 58, 461-467.

Luckey, T.D. *Radiation Hormesis*. CRC Press, London, 1991.

Manzaniila, L., Barba, L., Chfivez, R., Arzate J. and Flores, L. (1989), El inframundo de Teotihuacan, geofisica y arqueologia, *Ciencia y Desarrollo*, XV, 85, 21-35.

Manzanilla, L. (1994). Geografia sagrada e inframundo en Teotihuacan, *Antropológicas*. 11, 53-56.

Manzanilla, L., Barba, L., Chfivez, R., Tejero, A., Cifuentes G. and Peraita, N. (1994), Caves and geophysics; an approximation to the underworld of Teotihuacan, México, *Archaeometry* 36, 141-157.

Manzanilla, L., López, C., Freter, A. (1996). Dating results from excavations in quarry tunnels behind the Pyramid of the Sun at Teotihuacan. *Ancient Mesoamerica*. 7, 245-266.

Mejía Ortíz, L. M., Palacios Vargas, J. G., Cardona, L. y Viccon Pale, J. A., 1997. Microartrópodos de la Cueva Gabriel y la Cueva del Nacimiento del río San Antonio, Oaxaca, México. *Mundos Subterráneos*, (ISSN 0188-6215) No. 8: 21-28.

Mejía-Ortíz, L. M., Hartnoll, R. G. & Viccon-Pale, J., 2003. A new stygobitic crayfish from México, *Procambarus cavernicola* (Decapoda: Cambaridae), with a review of cave dwelling crayfishes in México. *J. Crustacean Biol.* 23(2): 391-401.

Montiel Castro, José (2012) Resumidero de Zacatecolotla o Gruta de Aguacachil: Atracción al oscuro desconocido al explorar el interior de la Tierra. <http://zacatecolotla.blogspot.mx/2012/03/resumidero-de-zacatecolotla-o-gruta-de.html>)

Nazaroff, W.W., Nero, A.V. "Radon and its decay products indoor air". Wiley-Interscience, New York, 1988.

NCRP. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. (NCRP Report No 93), National Council of Radiation Protection and Measurements. 1987.

NCRP. Ionizing Radiation Exposure of the population of the United States. NCRP Report 160. 2009

Pirchan, A. and Sikl, H. (1932). Cancer of the lung in the miners of Jachymov. Am. J. Cancer, 16, 681-722.

Purnell, C.J., Frommer, G., Chan, K., Auch, A.A. (2004). Development and management of a radon assessment strategy suitable for a underground railway tunnelling project. Radiat. Prot. Dosim. 108 (4), 353-364.

Rajewsky, B.(1940) Bericht uber die Schneeberger Untersuchungen. Z. Kerbsforsch., 49,315.

Richardson, R.B., Eatough, J.P., Henshaw,D.L. (1991) Dose to read bone Marrow from natural radon and thoron exposure." British. J. Radiol., 64, 608.

Sajo-Bohus, L., Greaves, E.D., Palfalvi, J., Urbani, F., Merlo, G., (1997). Radon concentration measurements in Venezuela caves using SSNTDs. Radiation Measurements, 28, 725-728.

Sigala-Regalado I, Mayén-Estrada R, Morales-Malacara JB (2011). Spatial and temporal distribution of protozoa at Cueva de los Riscos, Querétaro, México. *J Cave Karst Stud* 73, 55–62

Tanner, A.B., 1980. Radon migration in the ground: a supplementary review. In: Gessel, T.F., Lowder, W.M. (Eds.), *Natural Radiation Environment III, Symposium Proceedings*, vol. 1, pp. 5–56.

UNSCEAR (2000), United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations.

UNSCEAR, 2009. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. New York: United nations, 2009.

US-EPA Environments Division (6609J). (2004). A Citizen's Guide to Radon: the Guide to protecting yourself and your family from radon, Washington, DC 20460 US EPA 402-K-02-006.

Vázquez-López, C , Zendejas-Leal, B.E., and Golzarri, J.I., Espinosa, G. (2011) A Survey of Radon-222 in drinking water in México City. *Radiation Protection Dosimetry*. 145, 320-324.

WISE (2009) <http://www.wise-uranium.org/rdcnrh.html> Accesado el 14 de octubre del 2014.

WHO. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon; a public health perspective. ISBN 978-92-4-154767-3, 2009.

World Health Organization, (2007) International Radon Project: Survey of Radon Guidelines, Programmes and Activities, Rep. WHO/HSE/RAD/07.01, WHO, Geneva.

Young, D.A. (1958) Etching of radiation damage in lithium fluoride. Nature, 185, 375-377.

ANEXO 1
Definiciones
(Cerde, 2012)

Actividad (A): Corresponde a una cantidad de radionúclido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado. Numero de decaimientos por unidad de tiempo.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Átomo: es la unidad más pequeña de un elemento químico.

Dosis: Medida de la radiación recibida o absorbida por un blanco. Se utilizan, según el contexto, las magnitudes denominadas dosis absorbida, dosis equivalente, dosis efectiva, dosis equivalente comprometida o dosis efectiva comprometida.

Dosis absorbida: Energía impartida a la materia por radiación ionizante por unidad de masa en el lugar de interés del material irradiado.

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Dosis equivalente ($H_{T,R}$): Se define como:

$$H_{T,R} = D_{T,R} w_R$$

Expresión en la que $D_{T,R}$ es la dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R .

Cuando el campo de radiación se compone de diferentes tipos de radiación con diferentes valores de w_R , la dosis equivalente es:

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Elemento: materia constituida por átomos de la misma clase. En su forma más simple posee un número determinado de protones en su núcleo, haciéndolo pertenecer a una categoría única clasificada por su número atómico.

Exposición: Exposición de personas a la radiación o a sustancias radiactivas, la cual puede ser externa (irradiación causada por fuentes situadas fuera del cuerpo humano), o interna (irradiación causada por fuentes existentes dentro del cuerpo humano). La exposición puede clasificarse en normal o potencial; ocupacional, médica o del público; así como, en situaciones de intervención, en exposición de emergencia o crónica. También se utiliza el término exposición en dosimetría para indicar el grado de ionización producido en el aire por la radiación ionizante.

Fuente radiactiva: Cualquier material que pueda causar exposición a la radiación, ya sea emitiendo radiación ionizante o liberando sustancias o materiales radiactivos.

Fuente radioactiva: Cualquier material que contenga isotopos de la cadena de desintegración del radio.

Gas noble: son gases monoatómicos inodoros, incoloros y presentan una reactividad química muy baja. Los seis gases nobles que se encuentran en la naturaleza son helio (He), neón (Ne), argón (Ar), kriptón (Kr), xenón (Xe) y el radón (Rn).

Isótopos: átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en masa.

Límite de dosis: Valor de la dosis efectiva o de la dosis equivalente causada a los individuos por prácticas controladas, que no se deberá rebasar.

Molécula: conjunto de al menos dos átomos enlazados que forman un sistema estable y eléctricamente neutro.

Nivel de acción: Nivel de la tasa de dosis o de la concentración de la actividad por encima del cual deberían adoptarse acciones reparadoras o acciones protectoras en situaciones de exposición crónica o de exposición de emergencia.

Radiación ionizante: Energía capaz de producir pares de iones en la materia.

Vida media: tiempo requerido para que un isótopo decaiga la mitad de la cantidad original, siendo característico para cada isótopo radiactivo.

ANEXO 2

Unidades

Dimensión	Unidad	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Temperatura	Kelvin	K
Volumen	Litro	L
Tiempo	Segundo	s
	Año	y

Cantidad	Unidad	Símbolo	Unidades Base
Actividad	Bequerel	Bq	s^{-1}
Dosis absorbida	Gray	Gy	$J\ kg^{-1}$
Dosis Equivalente	Sievert	Sv	$J\ kg^{-1}$

Equivalencias.

Actividad:

1 Bequerel (Bq) = 1 desintegración/s

1 Curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq/s

Concentración de actividad:

$$1 \text{ Bq/m}^3 = 0.001 \text{ Bq/L}$$

Dosis equivalente:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} * Q$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Donde,

- Sv = Sievert
- Q = factor de calidad que depende del tipo de radiación incidente en el tejido. Por ejemplo $Q_{\alpha} = 20$
- rem=Roentgen Equivalent Man (J/kg)

UNIDADES DE RADIACION (Tradicionales)

NOMBRE	DEFINICION	UNIDAD	DEFINICION
ACTIVIDAD (A)	Número de desintegraciones nucleares que ocurren en una cantidad determinada de material, por unidad de tiempo.	Curie (Ci)	3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.
EXPOSICION (X)	Cantidad de iones de uno y otro signo producidos por radiación X o gamma en un volumen de aire.	Roentgen (R)	Cantidad de exposición a la radiación X o gamma, necesaria para que pueda producirse una carga de una unidad electrostática, en iones de uno y otro signo por 0.001293 gr. de aire (1 cm^3) ($2.58 \times 10^{-4} \text{ coul/Kg}$).
DOSIS ABSORBIDA (D)	Medida de la energía impartida por la radiación ionizante en forma de energía cinética, por unidad de masa.	Rad (rad)	Energía de 100 ergs transferida a un medio de 1 gramo de masa. (100 ergs/gr).

KERMA (K)	Transferencia de energía de la radiación ionizante en forma de energía cinética, por unidad de masa.	Rad (rad)	Energía de 100 ergs transferida a un medio de 1 gramo de masa. (100 ergs/gr).
DOSIS EQUIVALENTE HUMANO	Producto de la dosis absorbida en rads, por factores de modificación, tales como el factor de calidad (Q).	Rem (rem)	Energía de 100 erg transferida a un gramo de materia (tejido) por el factor de calidad (Q). (100 ergs/g x Q).
	Efecto biológico de un tipo de radiación.		Cantidad de energía necesaria para producir en 0.012 grs. de materia, el mismo daño biológico que una radiación de referencia.

DOSIS EQUIVALENTE FISICO	Cantidad de iones producidos por cualquier tipo de radiación en un volumen dado de material, referidos a la cantidad de iones producidos por radiación X o gamma (tomados como referencia).	Rep (rep)	
	Efecto físico de un tipo de radiación.		Cantidad de energía necesaria para producir en 0.01 gr. de materia, el mismo grado de daño físico (pares de iones) que la radiación de referencia.

Equivalencia con las nuevas unidades (ICRP).

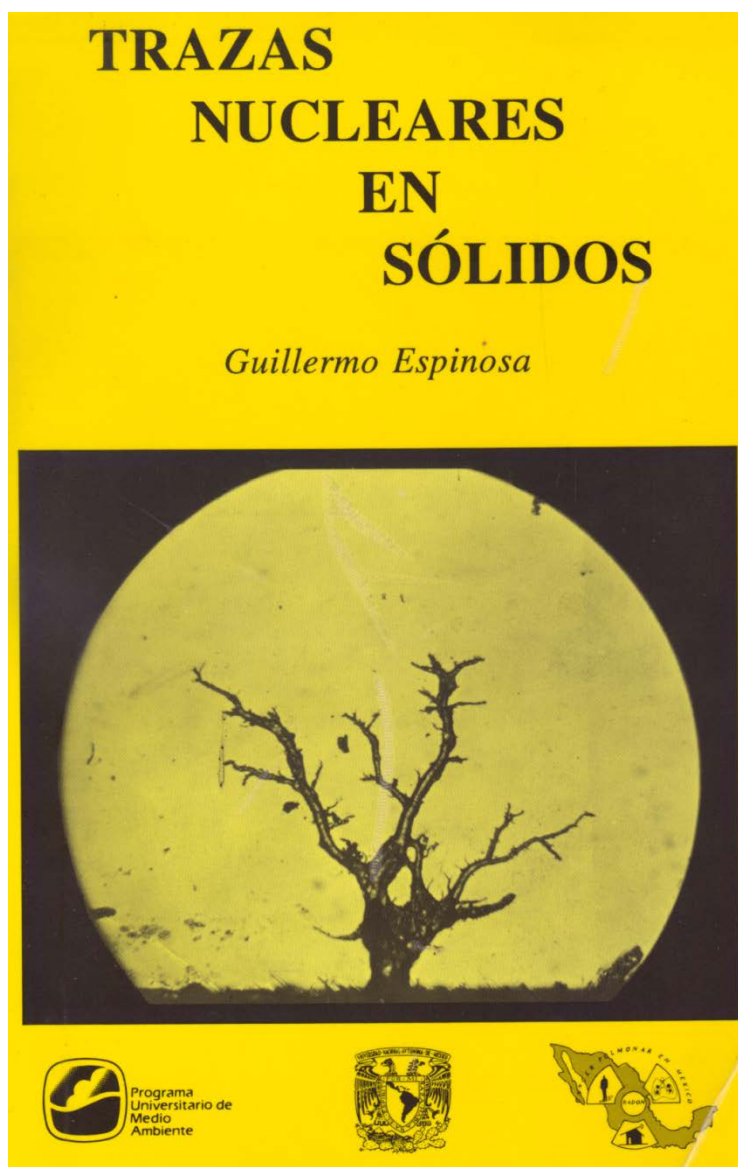
CANTIDAD	NOMBRE	UNIDADES DEL S.I.	EQUIVALENCIA	DIMENSIONES
ACTIVIDAD	Bequerel	Segundo-1	1 Bq = 2.703×10^{11} Ci	s^{-1}
EXPOSICION	- - -	Coulombs por Kilogramo	1 C Kg ⁻¹ = 3876 R	C Kg ⁻¹
RAPIDEZ DE EXPOSICION		Ampere por Kilogramo o Coulomb por Kilogramo segundo	1 C Kg ⁻¹ s ⁻¹ = 3876 Rs ⁻¹	a Kg ⁻¹ C Kg ⁻¹ s ⁻¹
DOSIS ABSORBIDA	Gray	Joule por Kilogramo	1 Gy = 100 rad = 1 J Kg ⁻¹	J Kg ⁻¹
KERMA	Gray	Joule por Kilogramo	1 Gy = 100 rad = 1 J Kg ⁻¹	J Kg ⁻¹
RAPIDEZ DE DOSIS ABSORBIDA	Gray / seg	Watt por segundo o Joule por Kilogramo segundo	1 Gy s ⁻¹ = 100 rad s ⁻¹	W Kg ⁻¹ J Kg ⁻¹ s ⁻¹
DOSIS EQUIVALENTE	Sievert	Joule por Kilogramo	1 Sv = 100 rem = 1 J Kg ⁻¹	J Kg ⁻¹
RAPIDEZ DE DOSIS EQUIVALENTE	Sievers / seg		1 Sv/seg = 100 rem/seg = 1 J Kg ⁻¹ /seg	1 J Kg ⁻¹ /seg

La tabla nos muestra los efectos biológicos de la radiación y nos marca los límites para las diferentes aplicaciones.

Exposición	Efectos
50 Gy (5000 R)	De cuerpo entero Dosis Letal. (Muerte instantánea, 100% de casos)
5 a 10 Gy (500 a 1000 R)	Dosis letal, muerte de 100% casos
4 a 5 Gy (400 a 500 R)	Dosis letal media, muerte 50% de casos
1 Gy (100 R)	Promedio de tratamiento médico
0.1 Gy (10 R)	Accidentes menores

Libro de consulta sobre el tema de Trazas Nucleares en Sólidos y su metodología

(http://www.fisica.unam.mx/personales/espinosa/files/1994-LIBRO-Trazas_Nucleares_en_Solidos.pdf)



Trazas Nucleares en Sólidos.

(Primer libro en español sobre Trazas Nucleares en Sólidos)

UNAM, 1994. (ISBN-968-36-4219-5).

ANEXO 3

Trabajos publicados por nuestro grupo de investigación en el IFUNAM, sobre Radón (1990-2015).

a) Artículos publicados en revistas internacionales con arbitraje.

- 1.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.,
Radon Levels inside Residences in México City.
Radiation Protection Dosimetry. 34, 183 (1990).
- 2.- **Espinosa, G.**, Castaño, V, Golzarri, J.I.
Permeability of Some Materials to Radon Gas.
Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 19, 307 (1991).
- 3.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I, Cortés, A.
Radon Measurements of Groundwater in México.
Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 19, 305 (1991)
- 4.- **Espinosa, G.**, Ramos, S.
Indoor Radon Measurement Methodology by Solid State
Nuclear Track Detectors.
J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 161, 307 (1992)
- 5.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
Measurements Methodology for Indoor Radon Using
Passive Track Detectors.
Applied Radiation and Isotopes. 44, 719 (1993).
- 6.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Gammage, R.B..
Comparative Studies of Polymer Materials as Radon
Protection Coating.
Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 22, 329 (1993).

- 7.- Borau, J., Gonzalez, A., **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I.
Measurements of Radon Levels Inside Mexican Caves.
Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 22, 287 (1993).
- 8.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
Radon Levels Survey at the Underground Transportation Metro
System
in México City.
Radiation Protection Dosimetry, 59, 145 (1995)
- 9.- **Espinosa, G.**, Dudney, C.S., Gammage, R.B.
Intercomparison of Response Characteristics of Seven CR-39
Materials During
Radon Calibration.
Radiation Measurements. 25, 611 (1995)
- 10.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
Long-Term Radon Survey in México City and other Regions of
the Country.
Radiation Measurements. 28, 663 (1997)
- 11.- **Espinosa, G.**, Manzanilla, L., Gammage, R.B.
Radon Concentrations in the Pyramid of the Sun at
Teotihuacan.
Radiation Measurements. 28, 667 (1997)
- 12.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
Indoor Radon Concentration Survey in México.
J. Radioanal. and Nuclear Chem. 236, 227 (1998)
- 13.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
Radon Distribution Inside Dwellings in México.
Radiation Protection Dosimetry. 85, 325 (1999).

- 14.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Rickards, J., Gammage, R.B.
Distribution of Indoor Radon Levels in México.
Radiation Measurements. 31, 355 (1999)
- 15.- Canoba, A., López, F.O., Arnaud, M.I., Oliveira, A.A., Neman, R.S., Hadler, J.C., Iunes, P.J., Paulo, S.R., Osorio, A.M., Aparecido, R., Rodríguez, C., Moreno, V., Vazquez, R., **Espinosa, G.**, Golzarri, JI., Martínez, T, Navarrete, M., Cabrera, L., Segovia, N., Peña, P., Tamez, E., Pereyra, P., López, M.E., Sajo-Bohus, L.
Indoor radon measurements and methodologies in Latin American countries.
Radiation Measurements. 34, 483 (2001).
- 16.- Canoba, A., López, F.O., Arnaud, M.I., Oliveira, A.A., Neman, R.S., Hadler, J.C., Iunes, P.J., Paulo, R.S., Osorio, A.M., Aparecido, R., Rodríguez, C., Moreno, V, Vasquez, R, **Espinosa, G.**, Golzarri, JI, Martínez, T, Navarrete, M., Cabrera, I., Segovia, N., Peña, P., Taméz, E., Pereyra, P., López, M.E., Sajo, L.
Indoor radon measurements in six Latin American countries.
Geofísica Internacional, 41, 453-457 (2002)
- 17.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.
A representative survey of indoor radon in the sixteen regions in México City.
Radiation Protection Dosimetry. 103, 73-76 (2003).
- 18.- **Espinosa, G.**, Golzarri, JI., Gammage, RB.
Comparative measurements between NTD and GEL detectors for radon gas.
Radiation Measurements 36, 179-181 (2003)

- 19.- **Espinosa, G.** Silva, R.J.
Gel detectors for ^{222}Rn gas.
J. Radioanal. And Nuclear Chemistry, Vol. 264, 333-336
(2005).
- 20.- Martínez, T., Martínez, G., Juárez, F., Navarrete, M., **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Cabrera, L., González, P.
Indoor radon and thoron concentration in the pyramids of Teotihuacan.
J. Radioanal. And Nuclear Chemistry, Vol. 264, 511-516
(2005).
- 21.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Martínez, T., Navarrete, M., Bogard, J., Martínez, G., Juárez, F.
Indoor ^{220}Rn and ^{222}Rn concentration measurements inside the Teotihuacan pyramids using NTD and E-PERM methodologies.
Radiation Measurements, 40, 646-649 (2005)
- 22.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Rickards, J., Gammage, R.B.
Study of gel materials as radioactive ^{222}Rn gas detectors.
Radiation Protection Dosimetry. 119, 425-429 (2006).
- 23.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Bogard, J.
Radon and progeny alpha-particle energy análisis using nuclear track methodology.
J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 277, 131-135 (2008)
- 24.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Bogard, J., Gaso, I., Ponciano, G., Mena, M., Segovia, N.
Indoor radon measurements in México City.
Radiation Measurements. 43, S431-S434 (2008)

- 25.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Gammage, R., Viccon, J., Signoret, M.
Seasonal variation measurements of radon levels in caves using NTM.
Radiation Measurements. 43, S364-S368 (2008).
- 26.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Angeles, A., Juarez, F., Martinez, T., Navarrete, M.
Radon concentration levels in 16th and 17th century churches and convents.
J. Radioanalytical Nucl. Chem. 280 (2), 419-422 (2009)
- 27.- **Espinosa, G.**, Silva, R.J.
Industrial commercial available respiratory filter as indoor radon monitor.
J. Radioanalytical Nucl. Chem. 282, 405-408 (2009)
- 28.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Angeles, A., Griffith, R.
Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in México using Nuclear Track methodology.
Radiation Measurements, 44, 1051-1054 (2009)
- 29.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Ponciano, G., Gaso, I., Mena, M., Segovia, N., Vazquez, C., Sajo-Bohus, L.
Population vulnerability due to the exposure to radon and airborne particulate matter (PM₁₀), in México City.
Radiation Measurements, 44, 1028-1031 (2009)
- 30.- Trazas Nucleares en Sólidos y Mediciones de Concentración de Radón Intramuros.
Zendejas-Leal, B.E., Meza-López, C.D., Vázquez, C., Golzarri, J.I., **Espinosa, G.**
Memorias del XX Congreso Anual de la SNM
Puerto Vallarta, Jalisco, México, del 5 al 8 de julio 2009

- 31.- Tommasino, L., **Espinosa, G.**, Tommasino, M.C.
Radon film-badges on Radon-sorption in solids: A new field for solving long-lasting problems.
Revista Mexicana de Física. S-56 (1), 1-4 (2010)
- 32.- Rickards, J., Golzarri, J.I., **Espinosa, G.**
A Monte Carlo study of radon gas detection.
Journal of Environmental Radioactivity. 101, 333-337 (2010).
- 33.- **G. Espinosa**, J.I. Golzarri, K. Lopez, J. Rickards.
Long term Indoor Radon Measurements in the Pelletron Laboratory at the UNAM Physics Institute.
Revista Mexicana de Física. S-57 (1), 50-54 (2011)
- 34.- Vázquez-López, C , Zendejas-Leal, B.E., and Golzarri, J.I., **Espinosa, G.**
A Survey of Radon-222 in drinking water in México City.
Radiation Protection Dosimetry. 145 (2-3), 320-324 (2011)
- 35.- **Espinosa, G.**, Gammage, R.B.
An indoor radon survey in three different climate regions in México, and the influence of climate in the obtained values.
Journal of Environmental Protection. 2, 1143-1148 (2011)
- 36.- **Espinosa, G.**, Chavarría, A., Golzarri, J.I.
A study of indoor radón in greenhouses in México City.
J. Radioanal. Nucl. Chem. 296, 37-41 (2013)
- 37.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Vega-Orihuela, E., Morales-Malacara, J.B.
Indoor radon concentration levels in Mexican caves, using Nuclear Track Methodology, and the relationship with living habits of the bats.
J. Radioanal. Nucl. Chem. 296, 43-48 (2013)

- 38.- L. Tommasino and **G. Espinosa**
Neutrons, radon, nanoparticles, and nanoholes - Everything comes to a full circle with track detectors.
Radiation Measurements. 50, 22-25 (2013).
- 39.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Gaso, I., Mena, M., Segovia, N.
An intercomparison of indoor radon data using NTD and different dynamic recording systems.
Radiation Measurements. 50, 112-115 (2013)
- 40.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Chavarría, A., Castaño, V.M.
Indoor radon measurements via Nuclear Track Methodology: A comparative study.
Radiation Measurements. 50, 127-129 (2013).
- 41.- Cortes, A., Cardona, A., Pérez-Quezadas, J., Inguaggiato, S., Vazquez, C, Golzarri, J.I., **Espinosa, G.**
Radon (^{222}Rn) in groundwater studies in two volcanic zones of central México.
AIP Conference Proceedings. 1544, 41-48 (2013).
- 42.- Juarez, F., Reyes, P., **Espinosa, G.**
An indoor radon survey of the X-ray rooms of México City hospitals.
AIP Conference Proceedings. 1544, 86-94 (2013).
- 43.- Tommasino, L., **Espinosa, G.**
From the similarities between neutrons and radon to advanced radon-detection and improved cold fusion neutron-measurements.
AIP Conference Proceedings. 1607, 5-15 (2014).

- 44.- Angeles, A.*, **Espinosa, G.** (* Estudiante de Doctorado.)
Study of epidemiological risk of lung cáncer in México due
indoor radon exposure.
AIP Conference Proceedings. 1607, 48-54 (2014).
- 45.- Navarrete, J.M., **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Muller, G.,
Zuñiga, M.A., Camacho, M.
Marine Sediments as a radioactive pollution repository in the
world.
J. Radioanal. Nucl. Chem. 299, 843-847 (2014).
- 46.- Angeles, A.*, **Espinosa, G.** (* Estudiante de Doctorado.)
Study of epidemiological risk of lung cáncer in México due
indoor radon exposure.
AIP Proceedings. 1607, 48-54 (2014).
- 47.- **Espinosa, G.**, Tommasino, L.
Surface-deposition and distribution of Radon (^{222}Rn
and ^{220}Rn) decay products indoors.
Journal of Environmental Radioactivity. 143, 80-84 (2015)
- 48.- **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I., Chavarría, A. A preliminary study
of the radon and thoron concentration distribution inside a
cellar using Nuclear Track Detectors (NTD).
Solid State Phenomena. 238, 127-133 (2015).
- 49.- Angeles, A*. **Espinosa, G.** (* Estudiante de Doctorado.)
Lung cancer mortality from exposure to indoor radon (^{222}Rn)
in México.
Advances in Research. 5 (3) 1-9, AIR-17736 (2015) (2015)
- 50.- **Espinosa, G.**, Tommasino, L.
Surface-deposition and distribution of the radon (^{222}Rn) and
(^{220}Rn) decay products indoors.
Physics Procedia. 80C, 100-103 (2015)

- 51.- Rickards, J., Golzarri, J.I., **Espinosa, G.**
Radon detection in conical diffusion chambers: Monte Carlo
Calculations and experiment.
AIP Proceedings. 1671, 020011 (2015)

b) Informes técnicos.

- 1.- “Guía Ciudadana para el Radón”
G. Espinosa, J.I. Golzarri
Reporte Interno, IFUNAM (1996)
- 2.- “Evaluación de niveles de radón ambiental en el Instituto de
Investigaciones
Antropológicas, UNAM”. **Espinosa, G.**, Golzarri, J.I.
(Proyecto en colaboración con L. Manzanilla, del IIAUNAM)
Informe entregado en noviembre del 2001.
- 3.- “Metodología para la determinación de los niveles de radón
(²²²Rn) intramuros mediante Trazas Nucleares en Sólidos”.
G. Espinosa, J.I. Golzarri.
Reporte Interno IFUNAM FE-050 (2010)
- 4.- “Estudio del radón (²²²Rn) del agua de los pozos de Ciudad
Universitaria”
Espinosa, G., Golzarri, J.I., Cerda, M., Vazquez, C., Zendejas,
B., Hernandez, C.
Reporte Interno IFUNAM FE-059 (2012)
- 5.- “Estudio de radiación ambiental del radon-222 intramuros y
radón en agua de la Cantera Oriente”.
Espinosa, G., Golzarri, J.I., Chavarría, A.C.
Reporte Interno IFUNAM. FE076 (2015)

El autor:

Guillermo C. Espinosa García, nació en la Ciudad de México. Su formación académica fue poco convencional, tanto para un ingeniero, como para un físico. Terminó la carrera de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN; la Maestría en Sistemas, en la Universidad Iberoamericana, en sus 2 vertientes: Investigación de Operaciones y Desarrollo Organizacional; y el Doctorado en Ciencias (Física de Materiales), en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), y terminó los estudios del Doctorado en Administración Pública en la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM.

Investigador Titular del Instituto de Física de la UNAM y Profesor de la Facultad de Ciencias de la UNAM desde 1968. Y ha hecho su carrera académica y científica en las áreas de interacción de las radiaciones con los materiales, y efectos en el humano, estudio y manejo de radioisótopos, radiación ambiental y radón intramuros. Contaminantes radioactivos en aire, agua, suelos y alimentos, estudio de nuevos materiales para la detección y dosimetría de la radiación, termoluminiscencia, seguridad radiológica, trazas nucleares en sólidos, instrumentación nuclear y sus aplicaciones en beneficio de la sociedad. Esta experiencia, ha dado lugar a 3 patentes, un certificado de derecho de autor por un programa de cómputo, y el desarrollo de dispositivos para la medición de radón intramuros, su metodología y su análisis, reconocidos internacionalmente.

Ha publicado a la fecha 178 artículos de investigación en revistas arbitradas de circulación internacional, con más de 800 citas (*Science Citation Index*), 5 libros y más de 10 capítulos de libros. Editor de revistas de circulación internacional en el tema de radiaciones (*Radiation Measurements* y *Journal of Nuclear Physics, Material Science, Radiation and Applications*), y revisor de artículos

científicos para más de 12 revistas internacionales; además de haber sido consultor y profesor visitante en los laboratorios de *Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)* y *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, en los Estados Unidos, la *Energia Nucleare ed Energie Alternative (ENEA)* de Italia; además del *Technion Institute Technology*, el *Weizman Institute of Science* y el *Nahal Sorek Nuclear Research Center*, de Israel. Y en lo referente a la formación de recursos humanos, el autor ha dirigido más de 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, teniendo entre sus ex-estudiantes que un buen número de ellos se han destacado como investigadores, directivos de instituciones de ciencia y tecnología, así como funcionarios universitarios.

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1984 y ha formado parte de comités consultivos y de evaluación del CONACYT, ININ, IFUNAM, FCUNAM, UAEMex, entre otras instituciones.

El Dr. Espinosa es miembro fundador del *International Nuclear Track Society* y Presidente de ésta sociedad dos veces, de 1983 a 1985 y de 2011 a 2014. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, del Colegio de Ingenieros, de la *Health Physics Society (Emeritus)*, de la Sociedad Mexicana de Física, y de la Sociedad Mexicana de Seguridad Radiológica, entre otras sociedades.

Desde 1985, ha sido responsable del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM.