

68

2 Eje



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**DETERMINACION DE RADON EN CASAS HABITACION  
EN LA ZONA ORIENTE DE COYOACAN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
ULISES ARTURO MARTINEZ VELAZQUEZ



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1994



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE.**            *PROF.: MANUEL NAVARRETE TEJERO*

**VOCAL.**                *PROF.: GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA*

**SECRETARIO.**        *PROF.: TRINIDAD MARTINEZ CASTILLO*

**1er. SUPLENTE**        *PROF.: LUIS CABRERA MOSQUEDA*

**2do. SUPLENTE**        *PROF.: MARTIN JESUS SOBERON MOBARAK*

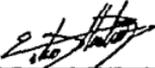
**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA.**

**FACULTAD DE QUIMICA, EDIFICIO "D". SECCION QUIMICA NUCLEAR.**

**ASESOR DE TEMA.**  
**M en C. TRINIDAD MARTINEZ CASTILLO**

  
\_\_\_\_\_  
**FIRMA**

**SUSTENTANTE.**  
**ULISES ARTURO MARTINEZ VELAZQUEZ**

  
\_\_\_\_\_  
**FIRMA**

## *A mi familia eterna*

### *El único camino a la felicidad*

*Estoy agradecido al Señor me haya concedido el gran privilegio y la oportunidad de terminar la licenciatura.*

*Deseo agradecer y expresar mi cariño a mi madre Guadalupe Veldzquez Ríos que con todo amor me guió y enseñó a caminar rectamente delante del Señor.*

*Agradezco a mis hermanos David, Fidel, Miriam, Yazmin por ser tan especiales, por brindarme, aliento, alegría, compañía y amor. A Ricardo León por su apoyo y a cada uno de los integrantes de mi familia por sus estímulos.*

*Agradezco a mis amigos José, Sergio M., Lauro, Erick, Anguiano, Pablo, Raúl, Sergio y a Toni que tan desinteresadamente me brindaron su amistad y todas aquellas personas que me impulsaron a seguir adelante y fueron parte de mi vida.*

*A mis maestros mi más profundo aprecio y por ser partícipes en mi formación académica y estar en su propósito la preparación de profesionales.*

*Agradezco a la M. en C. Trinidad Martínez la revisión, forma y contenido de esta tesis, así como su aportación de comentarios, ideas, paciencia y a todo el personal de la sección de Química Nuclear.*

*Estoy agradecido por todas las cosas que he padecido en la carne, las cuales han sido bendiciones que me han enseñado, paciencia, resignación, fe y a ser sensible a las necesidades de todas las personas. He aprendido en la vida que las pruebas son bendiciones ocultas si aceptamos con humildad, con fe y fortaleza. Todo lo que padezcamos y resistamos con paciencia edificará en nuestro interior una persona más preparada.*

# **DETERMINACION DE RADON EN CASAS HABITACION EN LA ZONA ORIENTE DE COYOACAN**

## **1. Introducción**

## **2. Radiactividad**

- 2.1 Los tres principales tipos de radiación
  - 2.1.1 La radiación alfa
  - 2.1.2 La radiación beta
  - 2.1.3 La radiación gamma
- 2.2 Unidades de medición
- 2.3 Desintegración radiactiva
- 2.4 La radiactividad y el hombre
  - 2.4.1 La radiactividad en la corteza terrestre
  - 2.4.2 Series radiactivas naturales
  - 2.4.3 Radiosótopos cosmogénicos
  - 2.4.4 La radiación en la atmósfera
  - 2.4.5 Radiación interna
  - 2.4.6 Los efectos del radón en los seres vivos

## **3. El radón**

- 3.1 Antecedentes del radón
- 3.2 Propiedades químicas y físicas del radón
- 3.3 El radón y sus productos de decaimiento
- 3.4 Niveles de trabajo "Working Levels"

## **4. Estudio geográfico de la zona oriente de Coyoacán**

- 4.1 Situación, extensión y límites
- 4.2 Geología
  - 4.2.1 Generalidades
  - 4.2.2 Vulcanismo
  - 4.2.3 Petrografía
  - 4.2.4 Sedimentos
    - 4.2.4.1 Sedimentos anteriores al vulcanismo del mioplioceno

4.2.4.2 Sedimentos contemporáneos al vulcanismo del mioplioceno

4.2.4.3 Sedimentos posteriores al vulcanismo del mioplioceno

4.3 Clima

4.3.1 Temperatura

4.3.2 Lluvias

4.3.3 Heladas

4.4 Análisis de muestras de suelo del oriente de Coyoacán

**5. Relación de la radiactividad con respecto a los análisis del suelo del oriente de Coyoacán**

5.1 Radiactividad de las rocas volcánicas

5.2 Radiactividad de las rocas sedimentarias

5.2.1 Formación de las rocas sedimentarias

5.2.2 Uranio y torio en las rocas sedimentarias

5.2.3 Rocas calcáreas

5.2.4 Rocas fosfatadas

5.2.5 Rocas arcillosas

5.3 Radiactividad de las rocas del oriente de Coyoacán

**6. Procedencia del radón del medio ambiente e interiores**

6.1 Generalidades

6.2 Radón en las rocas

6.3 Radón en los suelos

6.4 Radón en el agua

6.5 Radón en los materiales de construcción

6.6 Radón en casas habitación

6.7 Variaciones en la concentración de radón en una misma casa

**7. Efectos a la salud producidos por el radón**

7.1 Generalidades

7.2 Radiación ionizante

7.3 Etapas de los efectos biológicos de la radiación

7.3.1 Efectos a nivel celular

7.4 Los emisores alfa

7.5 Irradiación interna

7.5.1 Ingestión de radón

- 7.5.2 Inhalación del radón
- 7.6 Cáncer pulmonar debido al radón
- 7.7 Evaluación del riesgo por radón en los pulmones
- 7.8 Concentración estándar recomendada para la radiación en casas habitación
- 7.8.1 Concentraciones estándar de radón recomendadas
- 7.8.2 Niveles de radiaciones gamma encontrados habitualmente en casa habitación

### **8. Medidas correctivas para reducir los niveles de radón**

- 8.1 Construcción de nuevas casas
  - 8.1.1 Selección del sitio
  - 8.1.2 Modificación del sitio
  - 8.1.3 Construcción
- 8.2 Ventilación
- 8.3 Medidas para reducir los niveles de radón en casas habitación

### **9. Parte experimental. Metodología, resultados y análisis de resultados.**

- 9.1 Método seleccionado. Monitor continuo de niveles de trabajo
- 9.2 Selección del sitio y condiciones de trabajo.
- 9.3 Forma de inspección
- 9.4 Resultados del monitoreo en las viviendas
- 9.5 Control de calidad
  - 9.5.1 Calibración de la eficiencia de conteo del detector
  - 9.5.2 Calibración del flujo
  - 9.5.3 Medidas por duplicado y blanco
- 9.6 Medición de la radiación gamma en el oriente de Coyoacán
  - 9.6.1 Termoluminiscencia
  - 9.6.2 Resultados de las mediciones con dosímetros termoluminiscentes
- 9.7 Análisis de los resultados de las mediciones de radón y radiación gamma
- 9.8 Características de la construcción, hábitos y costumbres de los moradores

### **10. Conclusiones**

### **Bibliografía**

## INTRODUCCION

La radiactividad natural en el lugar donde se vive puede sufrir alguna modificación, y esto se debe principalmente a los cambios en los hábitos y costumbres del ser humano. Afortunadamente existe cada vez más conciencia sobre la importancia de conocer los contaminantes que rodean nuestra vida, y, en el caso de la radiactividad natural, se están estudiando los alcances y riesgos que ésta implica para los seres vivos. Aún cuando se trata de dosis bajas de radiación, éstas pueden ser importantes porque afectan a toda la población, y si no se toman las medidas pertinentes en algunos lugares donde las concentraciones sean altas, pueden causar graves problemas. En recintos cerrados, como son casas habitación, oficinas, etc, la radiación proviene principalmente del radón y su descendencia.

La EPA (Environmental Protection Agency) estima que 5000 a 20,000 muertes por cancer de pulmón por año, son debidas potencialmente al radón; ésto es en los Estados Unidos. Por lo que respecta a México, es necesario detectar que peligros potenciales existen. En esta tesis se pretende hacer una contribución estudiando los niveles de radón y radiación gamma en la zona oriente de la delegación Coyoacán, y así mismo dar algunas posibles soluciones a los casos donde existieran altos niveles de radón así como de su progenie.

El Radón es un gas radiactivo que se encuentra en la naturaleza, incoloro, inodoro e insípido, por lo que se necesitan equipos especiales para detectarlo. El aparato que se utilizó en este estudio, fue un monitor continuo de niveles de trabajo "Continuous Working Level Monitor" (CWLM).

El radón proviene del decaimiento natural del uranio y torio, y se puede encontrar en altas concentraciones, en tierras y rocas que contengan uranio, granito, fosfatos y brea, así como en tierras contaminadas con desperdicios industriales, tales como subproductos del uranio y minerales de fosfatos.

En el aire del medio ambiente exterior el radón se encuentra en bajas concentraciones, y usualmente, no representa ningún problema. Sin embargo, en un espacio cerrado (como una casa habitación) el radón puede acumularse. En estudios realizados últimamente se ha observado que las personas en general pasan cada vez más tiempo en interiores; los empleados y las amas de casas pasan 85 y 90% del día, respectivamente.

El Radón siendo un gas puede moverse a través de pequeños espacios en la tierra y rocas sobre las cuales las casas estan construídas y de ahí pasar por grietas, uniones, poros, etc. y entrar a las casas, también puede entrar por el agua provenientes de pozos y manantiales.

En este trabajo también se indica los efectos que puede producir a la salud. Únicamente se conocen efectos a la salud asociados con exposiciones a altos niveles de radón (minas), que incrementan los riesgos del desarrollo del cancer pulmonar. Toda persona expuesta a niveles elevados de radón puede desarrollar cancer pulmonar, aún cuando esto también depende del tiempo que estén expuesto. Por lo cual hay que analizar cuantitativamente los daños que pudieran tener.

Aunque no todas las casas tienen problemas de radón, es importante localizar los lugares donde existan altos niveles de concentración.

Se hace también un estudio geográfico de la zona y en base a esto mostrar la potencialidad de niveles altos de radón, (por estar relacionado con el uranio y torio). El uranio es mucho más abundante en la naturaleza que otros elementos comunes; se encuentra en una proporción 40 veces mayor a la plata, por lo que nos da una idea del peligro que representan sus descendientes.

## 2. LA RADIATIVIDAD

### 2.1 Los tres principales tipos de radiación

Una sustancia radiactiva emite un haz de rayos que al ser canalizados y sometidos a la acción de un campo magnético intenso, se divide en tres partes netamente distintas.

- los rayos alfa ( $\alpha$ ) cargados positivamente se desvían en un sentido.
- los rayos beta ( $\beta$ ) cargados negativamente, se desvían en otro sentido.
- los rayos gamma ( $\gamma$ ) sin carga, no sufren ninguna desviación.

#### 2.1.1 La radiación alfa

Al someter los rayos alfa a la acción de un campo magnético, y de un campo eléctrico, según el método clásico, se ha podido determinar la relación  $q/m$  de su carga  $q$  a su masa  $m$  y por otra parte, su velocidad  $v$ . Se ha demostrado así que los rayos alfa son átomos de helio que han perdido sus dos electrones exteriores. Están, pues, constituidos por dos protones y dos neutrones. Su carga es igual a dos cargas elementales positivas y su número de masa es cuatro. Su velocidad, muy variable, está comprendida entre 14000 y 25000 Km/s y depende del emisor de la partícula. En efecto, cada elemento radiactivo, con radiactividad alfa, emite esta partícula con una energía y velocidad características. Así el radio emite radiaciones con velocidad de 19200 Km/s, lo cual corresponde a una energía de 7.65 millones de electrón-voltios (7.65 MeV).

La radiación alfa es rápidamente absorbida por pequeños espesores de materia. La radiación del Polonio, por ejemplo, se detiene bruscamente en el aire, a 4 cm de su origen. Las trayectorias de las partículas alfa son rectilíneas y de iguales longitudes si el elemento radiactivo ha sido depositado en una capa lo suficientemente delgada como para no producir la absorción

parcial de los rayos. El recorrido de los rayos alfa depende, naturalmente, de la velocidad y de la energía de la partícula y del medio que haya de atravesar.

El poder de penetración de los rayos alfa es pues, muy débil.

Los rayos alfa son ionizantes, es decir que ellos liberan a su paso a través de gases u otros materiales, una gran cantidad de pares iónicos formados por los electrones arrancados a los átomos y por los iones positivos residuales. La producción de un par iónico absorbe una energía de alrededor de 35 eV.

El frenado de las partículas alfa por la materia se debe a la ionización.

#### 2.1.2 La radiación beta

La desviación de los rayos beta por el campo magnético muestra que la carga de estos rayos es negativa. La medición de su relación  $e/m$  ha permitido verificar que están formados por electrones. La radiación beta es, por lo tanto, semejante a la radiación catódica, formada también por electrones, aunque los rayos beta tienen una energía muy superior a la de los rayos catódicos pues su velocidad puede acercarse a la de la luz, es decir  $c=3.10^{10}$  cm/s.

Mientras que las partículas alfa son frenadas por algunos milímetros de aire o algunas decenas de micrones ( un micrón es un milésimo de milímetro) de aluminio, los rayos beta tienen en el aire recorridos del orden de varios metros, y en aluminio de varios milímetros. Son por lo tanto, mucho más penetrantes que los rayos alfa. Su absorción se debe como la de los rayos alfa, a la ionización y la pérdida de energía es de aproximadamente 35 eV por cada par de iones formado. Las partículas sufren sensibles cambios de dirección al pasar por las vecindades de los núcleos y sus trayectorias se presentan en forma de líneas sinuosas. El

recorrido varía con la relación  $v/c$  entre la velocidad de los rayos y la de luz, como lo indica la tabla ( 2. 1 )<sup>a</sup>

La medición sistemática de la energía de un gran número de partículas beta por el estudio de la curvatura de la trayectoria provocada por un campo magnético conocido, muestra que estas partículas son emitidas con una distribución continua de energía.

Tabla 2.1<sup>a</sup>

$v/c$	E (en keV)	en aluminio ( $g/cm^2$ )	Recorrido en aire (en cm)
0.1	2.55	0.000005	0.04
0.5	79.1	0.008	7.3
0.9	662.0	0.260	217.0
0.99	3114.0	1.57	1300.0

Referencia No. 3

### 2.1.3 La radiación gamma.

La radiación gamma no es desviada ni por el campo eléctrico ni por el magnético y está formada por ondas electromagnéticas análogas a las de la luz y de los rayos X, pero sus longitudes de onda son muy cortas, del orden de  $1/100$  de  $\text{Å}$ .

Los rayos gamma provienen de la energía que se libera al pasar el núcleo de un nivel de excitación a un nivel inferior. Este último puede muy bien no ser el nivel fundamental sino un nivel intermedio, lo cual puede dar lugar a varias emisiones sucesivas de rayos gamma diferentes.

Los rayos gamma, mucho más penetrantes que los rayos alfa o beta, no son completamente absorbidos, sino cuando el espesor de aluminio alcanza varios centímetros.

La disminución de intensidad de la radiación gamma se debe a causas diversas (producción de pares, efecto fotoeléctrico y Compton).

Se puede verificar que los rayos gamma emitidos por una fuente radiactiva poseen energías discontinuas diferentes.

## 2.2 Unidades de medición

UNIDAD	DEFINICION DE LA UNIDAD.	$\approx$
Curie (Ci)	= $3.7 \cdot 10^{10}$	des/min
Picocurie (pCi)	= $10^{-12}$	curies
	= 2.22	des/min
	= 0.037	Bq
Bequerel (Bq)	= 1	desintegración por segundo
Roentgen (R)	= $2.58 \cdot 10^{-4}$	Coulombs/Kg (en aire)
Rad	= 0.01	J/Kg
	= $62.4 \cdot 10^5$	MeV/g
	= 100	ergs/g
Gray	= 1	J/Kg
	= 100	rads
1 Joule (J)	= $6.24 \cdot 10^{12}$	MeV (millon de electrón volts)
	= 10 000 000	ergs
1 Working level (WL)	= 100	pCi/l de Rn en equilibrio con su progenie.
1 WL	= 200	pCi/l niveles de Rn en el aire con un factor de equilibrio de 0.5
	= $1.3 \cdot 10^5$	MeV de energía potencial alfa por litro de aire Working Levels hora
1 Working level mensual ( WLM )	= 680	
100 pCi de Rn-222	= $1.3 \cdot 10^5$	MeV
1 Sievert	= 100	rem
	= 1	J/Kg
1 cal	= 4.18	J
1 eV	= $1.6 \cdot 10^{-19}$	J

### 2.3 Desintegración radiactiva

Los átomos de un isótopo radiactivo desaparecen obedeciendo en su conjunto a las leyes de la estadística. El número  $dN$  de átomos que desaparecen durante un tiempo  $dt$  es proporcional al número  $N$  de átomos presentes, lo que se representa por

$$dN = -\lambda N dt$$

$\lambda$  es la probabilidad de decaimiento de un átomo por unidad de tiempo. La solución de esta ecuación diferencial es una exponencial de coeficiente negativo

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N_0$  es el número de átomos presentes en el origen, en un instante cero y la  $N$  el número de átomos presentes en el instante  $t$ .

Se calcula a menudo el tiempo  $T_{1/2}$  (vida media) necesario para que el número de átomos decaiga a la mitad. Basta escribir

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

ecuación de la que se deduce

$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda$$

$\lambda$  es una constante radiactiva absolutamente característica de un radisótopo. Resulta también que  $T_{1/2}$  es una característica del isótopo. El período o vida media de un radisótopo es, pues, el tiempo necesario para que éste pierda la mitad de sus átomos; es decir su actividad se reduzca a la mitad; es independiente del número de átomos iniciales. Teóricamente, un elemento radiactivo jamás puede ser totalmente destruido, pero prácticamente se admite una destrucción casi completa ( hasta aproximadamente 1% ) al cabo de un tiempo igual a una decena de períodos.

El período de un isótopo radiactivo varía mucho según la naturaleza del elemento, como lo demuestra la tabla ( 2. 2 )<sup>3</sup>

Tabla 2.2<sup>3</sup>

---

Uranio.....	4.5 10 <sup>9</sup> años
Torio.....	1.39 10 <sup>10</sup> años
Radón.....	3.82 días
Radio.....	15.9 años
Potasio( <sup>40</sup> K)	1.42 10 <sup>9</sup> años

---

Para evaluar exactamente el decrecimiento de un isótopo radiactivo durante un tiempo  $t$ , es necesario calcular la exponencial, pero a menudo habrá que contentarse con una aproximación y las matemáticas demuestran que para períodos muy largos:

$$N \approx N_0 e^{-\lambda t} \cong N_0 (1 - \lambda t) = N_0 - \lambda N_0 t$$

lo que equivale a admitir que el número de átomos destruidos es  $\lambda N_0 t$  es decir, proporcional a  $\lambda$ , a  $t$  y a  $N_0$ .

Ciertos elementos radiactivos derivan unos de otros: el primero o elemento padre da nacimiento a un segundo elemento que se desintegra a su vez, para dar nacimiento a un tercero y así sucesivamente hasta la aparición de un elemento estable no radiactivo.

Cuando un elemento padre tiene un período más prolongado que toda su descendencia se establece una relación constante entre las cantidades de la descendencia y la cantidad del elemento padre; se dice que hay un equilibrio radiactivo, y en este caso, el número de los átomos de las diversas especies que se desintegran durante la unidad de tiempo es la misma. Durante estas transformaciones, el elemento padre disminuye y el último término estable aumenta. Este equilibrio radiactivo no se alcanza sino después de un tiempo que varía con la naturaleza del elemento padre: 10<sup>6</sup> años para el uranio, 10<sup>5</sup> años para el actinio, 10<sup>2</sup> años para el torio. Cuando un átomo se transforma por emisión alfa el elemento que de ello resulta, tiene una carga disminuida en dos

unidades, y se encuentra que ha retrocedido 2 casillas en la tabla periódica, además su número de masa ha disminuido en cuatro unidades. Así el radio-226 ocupa la casilla 88 de la tabla periódica y su número de masa es 226. Su composición nuclear es pues: 88 protones y  $226-88=138$  neutrones. Si emiten una partícula alfa, pierde dos protones y dos neutrones y quedan, por lo tanto 86 protones y 136 neutrones. Se obtiene entonces, el elemento que ocupa la casilla 86 de la tabla periódica, es decir, el radón con masa (de  $86+136 = 222$ ).

Cuando un átomo se transforma emitiendo una partícula beta ( $\beta^-$ ), el elemento que de ello resulta tiene el mismo número de masa y su número atómico aumenta en una unidad. Se obtiene entonces un elemento que se adelanta una casilla en la tabla periódica. Esto se puede explicar, considerando que un neutrón se transforma en protón por pérdida de un electrón, lo que no es más que una manera cómoda de representar las cosas.

Así el plomo-212 que contiene 82 protones y  $212-82=130$  neutrones.

Si se admite la transformación de un neutrón en protón por pérdida de un electrón, habrá 83 protones y 129 neutrones. El número de masa es siempre 212, pero el número atómico es igual a 83.

Existen tres grandes series radiactivas naturales: la familia del uranio-238, la del uranio-235, y la del torio-232 finalizando cada una de ellas con plomo-206, plomo-207, y plomo-208 respectivamente.

Los elementos padres de estas tres series tienen un período muy prolongado. El uranio-235 tiene el período más corto (700  $10^6$  años); se necesitan por lo tanto, 700 millones de años para que la mitad de uranio-235 se desintegre. Para los tiempos geológicos es ésta una duración relativamente corta. Si se admite que los terrenos más antiguos tienen 3 mil millones de años.

## 2.4 La radiactividad y el hombre

La radiación natural a la que está expuesta la población proviene de la desintegración de isótopos radiactivos en la corteza terrestre, de la radiación cósmica y de los isótopos radiactivos que forman parte de los seres vivos, también llamada radiación interna. La primera depende del tipo de rocas que existen en el lugar, la segunda, de la altura sobre el nivel del mar, y la tercera, de la edad del ser humano y su dieta. Existen además otras fuentes de radiación que afectan a la población: las que utiliza el equipo médico, o bien las que provienen de concentraciones muy elevadas de radisótopos en recintos cerrados y, en general, del extenso uso que se ha dado en este siglo a los energéticos nucleares. Es importante conocer el origen, la concentración y los efectos de las radiaciones nucleares, ya que producen modificaciones en la materia que atraviesan y por lo tanto, pueden afectar el desarrollo y la estructura de las células vivas. En particular, la radiación que recibe la población en forma continua y no aquella que se debe a accidentes derivados del uso de la energía nuclear o a la aplicación de tratamientos médicos.

Actualmente se realizan nuevas investigaciones sobre el efecto de las radiaciones naturales en los seres vivos.

A diferencia de la radiación artificial, la natural se consideró durante décadas como un fenómeno normal que existía en la naturaleza, de manera que el hombre estaba condicionado a ignorarla. Aunque en la literatura especializada aparecían en ocasiones informes de altas intensidades de radiación en casas y en ciertas zonas habitadas, éstos se consideraban como curiosidades de conversación. Esta forma de pensar cambió al finalizar la década de los setenta, pues la radiación natural se había duplicado, y ciertos laboratorios, preocupados por sus efectos, iniciaron estudios en particular sobre los daños provocados por la radiación de los descendientes del radón en los pulmones.

#### 2.4.1 Radiactividad en la corteza terrestre

Los elementos radiactivos naturales se encuentran distribuidos en forma bastante uniforme en las rocas y suelos de la corteza terrestre, la cual está constituida principalmente por basalto y granito. La mayor parte de esta radiactividad proviene de las series radiactivas naturales, tiende a escapar de la corteza terrestre y puede ser arrastrada por el agua o algún fluido para migrar a la superficie terrestre y pasar finalmente a la atmósfera. El uranio es mucho más abundante en la naturaleza que otros elementos comunes; se encuentran en una proporción 40 veces mayor que la plata y 800 veces mayor que el oro. En la corteza terrestre, los granitos contienen una concentración de uranio que varía de 2 a 6 ppm aproximadamente y una concentración de torio de tres a cinco veces mayor. Existen regiones en las que, por distintas causas geológicas y geoquímicas las concentraciones de los elementos radiactivos son anormalmente altas; es en los yacimientos de minerales radiactivos donde existen las mayores cantidades de uranio y torio.

#### 2.4.2 Las series radiactivas naturales

Los materiales radiactivos naturales se pueden clasificar en tres categorías. La primera categoría está formada por los radisótopos primordiales o primarios, que se llaman así por existir desde que se formó la Tierra, hace cinco mil millones de años, y son aquellos que tienen una vida media muy larga quizás como la edad de la Tierra o más. El potasio tiene un isótopo radiactivo de vida muy larga y es parte importante de la radiactividad natural; el rubidio, el samario y lutecio también tienen isótopos radiactivos y contribuyen a la radiactividad natural, pero en menor escala.

El torio y el uranio se encuentran en cantidades variables tanto en el suelo como en las rocas. Cerca de los yacimientos de uranio y torio la radiactividad se encuentra en concentraciones

muy superiores a la normal. La mayoría de los radisótopos primarios provienen del uranio-232, el torio-232 y finalmente, el uranio-235.

Ya desde 1900 se había descubierto que los compuestos de uranio recién preparados eran sólo débilmente radiactivos, pero su radiactividad aumentaba con el tiempo. Fueron Ernest Rutherford y su colaborador Frederick Soddy quienes encontraron que cuando un átomo de uranio emite una partícula alfa su naturaleza cambia. Se convierte en un nuevo tipo de átomo, con diferentes características radiactivas, produciendo radiaciones más intensas que las del propio uranio.

Este segundo átomo decae a su vez formando un tercer tipo de átomo, y así sucesivamente. Mostraron que existen cadenas de núcleos emparentados entre diversas fuentes radiactivas, que un átomo se desintegra y da lugar al nacimiento de uno o varios átomos de especies diferentes. Estos átomos radiactivos son los radisótopos que pertenecen a la segunda categoría; se denominan radisótopos secundarios y se van formando por el decaimiento de otros isótopos radiactivos. Como tienen vidas medias muy cortas comparadas con la edad de la Tierra no podía explicarse su existencia si no fuera porque se están formando continuamente por desintegración de los isótopos primarios.

Las investigaciones sobre las desintegraciones sucesivas han permitido agrupar las sustancias radiactivas en series o familias. Gracias a la observación de estos átomos y sus productos de decaimiento se han podido conocer varios elementos desconocidos hasta hace relativamente poco.

En general, las sustancias que son la cabeza de estas series tienen una masa muy elevada. Una serie radiactiva completa se inicia con el *progenitor*, o cabeza de serie y termina en el isótopo estable; los isótopos generados por la desintegraciones sucesivas son los descendientes.

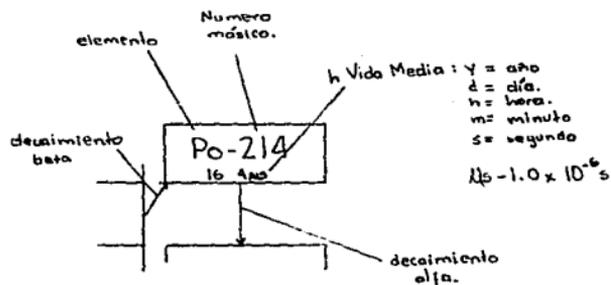
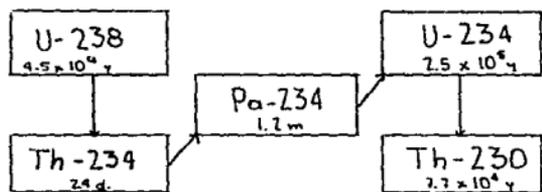
El uranio-238 tiene una vida media enorme, de cuatro mil quinientos millones de años; en toda la historia de la Tierra, sólo una parte de la reserva original de uranio ha tenido posibilidades de desintegrarse. Este isótopo del uranio es el progenitor o cabeza de una de las series radiactivas naturales que incluye el radio y el polonio y acaba finalmente con el plomo, que no es radiactivo. Ahora se sabe que la "radiación uránica" observada por Becquerel se debe a la inestabilidad del uranio-238. Al desintegrarse, se emite una partícula alfa y se transforma en torio-234; éste origina un núcleo inestable, y así sucesivamente fig. ( 2.1 )<sup>20</sup>

La vida media del radio-226 es poco menor de mil seiscientos años. Al cabo de varios miles de años no quedaría nada de radio en la corteza terrestre de no ser porque se forma constantemente a través de la desintegración del uranio. Esto mismo es cierto para otros productos del decaimiento del uranio cuyas vidas medias equivalen en algunos casos a fracciones de segundo solamente.

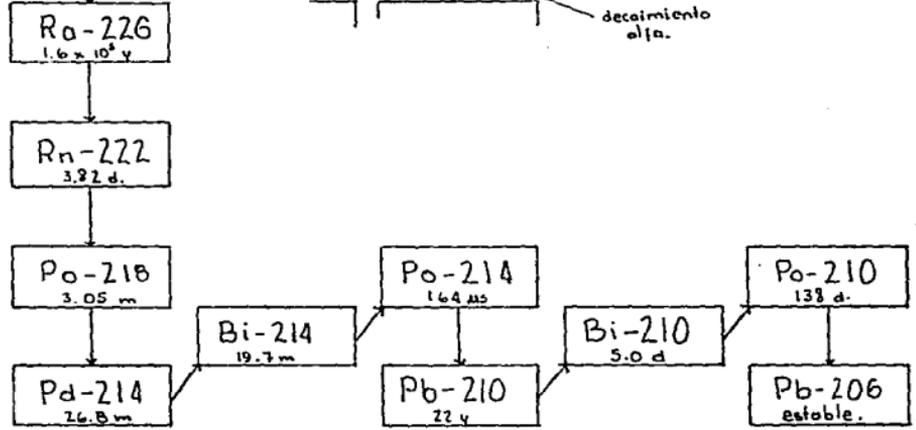
Ademas del uranio-238, con una vida media muy larga, existe un isótopo radiactivo del elemento torio, el torio-232, que se desintegra aún más lentamente que el uranio-238, siendo su vida media de catorce mil millones de años, mientras que el torio-234, que pertenece a la serie del uranio-238, tiene una vida media de sólo 24 días. Con el torio-232, precisamente empieza también una segunda serie radiactiva. El Torio-232 encabeza esta segunda serie radiactiva conocida como la serie del torio, cuyo último miembro es el plomo de masa 208, que es estable fig. ( 2. 2 ).<sup>20</sup>

El uranio-235, de una vida media de sólo 700 000 000 de años, encabeza una tercera serie y su último miembro de la familia es también otro isótopo estable del plomo, de masa 207 fig ( 2. 3 ).<sup>20</sup>

En cada una de las series radiactivas existe un isótopo de gas noble radón que escapa de la materia natural y se incorpora a la atmósfera. Estos gases radiactivos son el radón-220, el radón-222, y el radón-219.

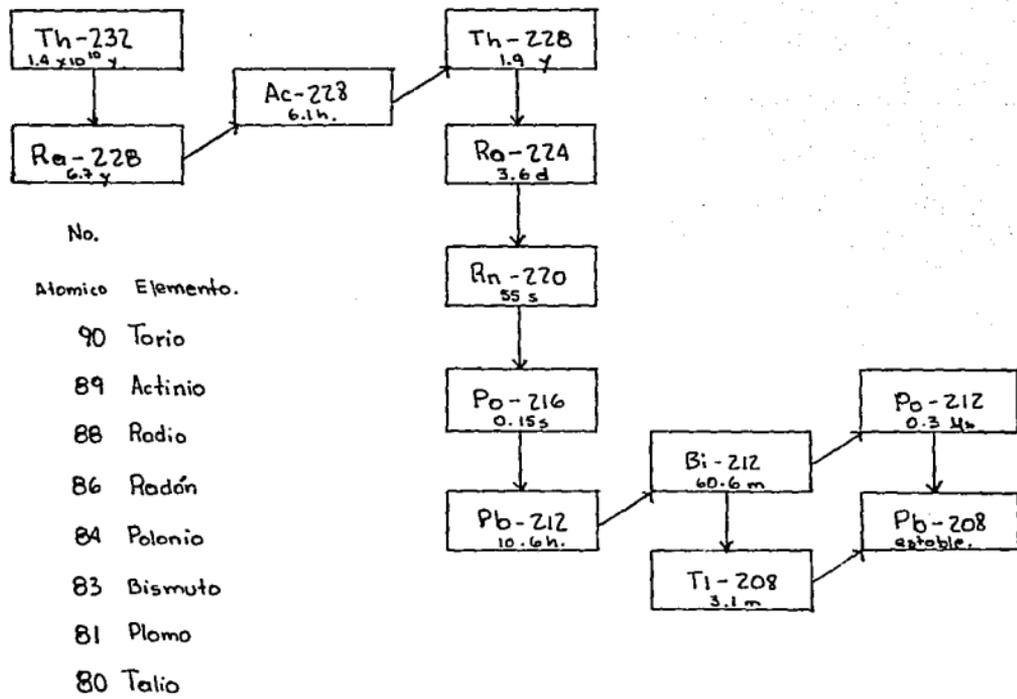


Número Atómico	Elemento
92	Uranio
91	Protactinio
90	Torio
88	Radio
86	Radón
84	Polonio
83	Bismuto
82	Plomo



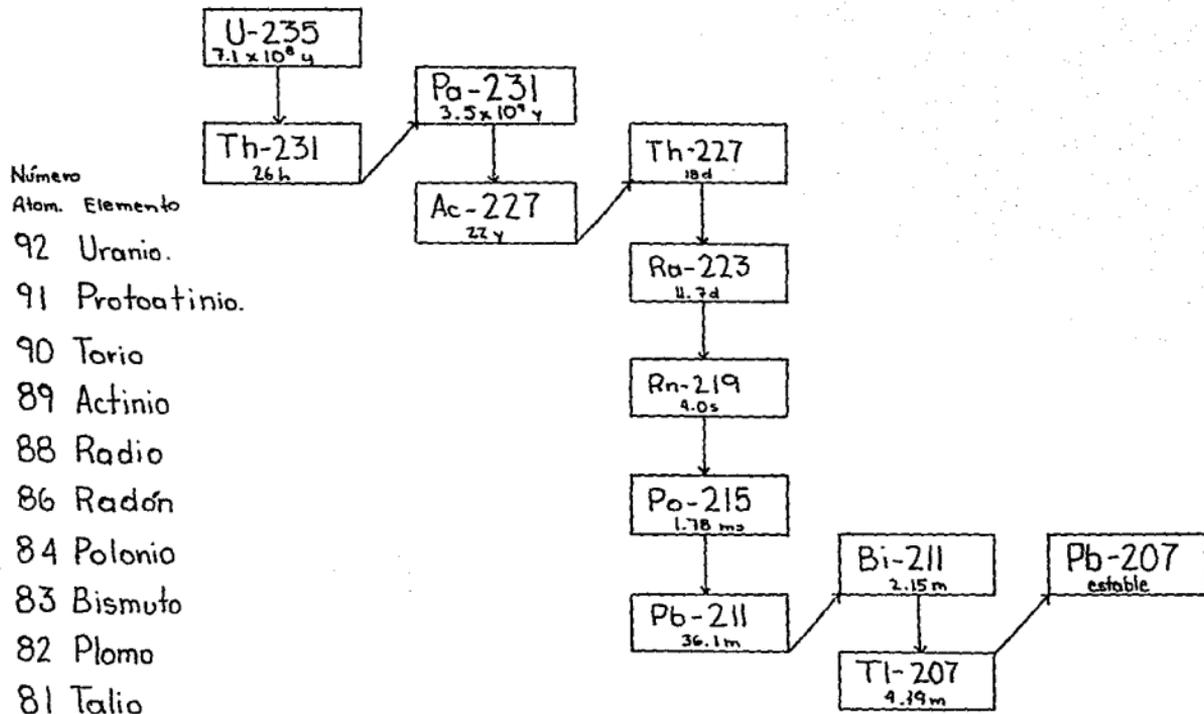
Serie de desintegración Natural del Uranio 238.

Fig. 2.1



Serie de desintegración del Torio.

Fig. 2.2



Serie de desintegración de Uranio-235

### 2.4.3 Radisótopos cosmogénicos

Finalmente, la tercera categoría de radisótopos pertenecen a los radisótopos cosmogénicos, los cuales se están produciendo continuamente en la atmósfera por medio de las reacciones nucleares. Ahora sabemos que un fenómeno que se repite continuamente en la naturaleza es la producción de isótopos radiactivos. Los radisótopos inducidos se producen en la atmósfera por el efecto de la radiación cósmica sobre los elementos en ella. Entre los isótopos radiactivos formados por la interacción de los rayos cósmicos con diversos elementos se encuentra el carbono-14.

El carbono-14 es un isótopo radiactivo inducido. Desde la formación de la Tierra, el carbono-14 se ha creado en la atmósfera superior a causa de la transformación del nitrógeno por la acción de los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos producen un gran número de partículas al entrar a la atmósfera; entre ellas, neutrones muy energéticos, los cuales reaccionan con los elementos existentes en la Tierra. Este carbono reacciona con el oxígeno de la atmósfera y se convierte en dióxido de carbono, y a medida que el carbono-14 se desintegra nuevamente, transformándose en nitrógeno-14, se alcanza un estado de equilibrio entre las velocidades de producción y de desintegración.

Cada gramo de materia viva contiene suficiente carbono radiactivo para dar alrededor de 16 desintegraciones por minuto. Al morir, el organismo deja de asimilar carbono-14 y el existente en el organismo, decae con una vida más de 5000 años. Otro isótopo cosmogénico importante es el tritio.

### 2.4.4 Radiación en la atmósfera

Los elementos radiactivos que se encuentran en la atmósfera se originan en la corteza terrestre y en el espacio exterior. Ya se ha visto que aquellos que provienen de la corteza terrestre son básicamente los isótopos del radón, que son gases que se incorporan a la atmósfera.

Además del radón, que emanan continuamente de la superficie terrestre, existen fenómenos como las erupciones volcánicas que pueden arrastrar hacia la atmósfera grandes cantidades de gases radiactivos provenientes del magma. Los gases se incorporan a la atmósfera y se dispersan en mayor o menor grado dependiendo de las condiciones meteorológicas imperantes; al difundirse en el aire el material radiactivo se desintegra y origina una serie de hijos, en muchas ocasiones también radiactivos, que se fijan en partículas suspendidas en la atmósfera. En los recintos cerrados como casas habitación, la dosis de radiación proviene principalmente del radón y de sus hijos. Ver fig ( 2. 4 ).<sup>2o</sup>

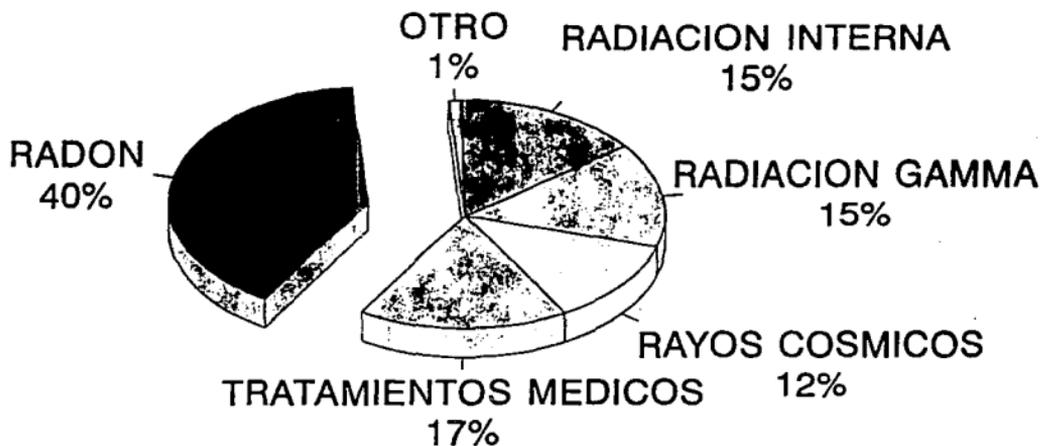
#### 2.4.5 Radiación interna

La radiación interna proviene de las sustancias radiactivas presentes en los alimentos, en el agua y en el aire, las cuales, al ser ingeridas o inhaladas, se absorben en los tejidos vivos. Los principales isótopos radiactivos que contienen el cuerpo humano son el Potasio-40, Carbono-14 y el Tritio, pero también pueden encontrarse cantidades menores de algunos elementos pesados como el radio, el plomo o el uranio.

#### 2.4.6 Los efectos del radón en los seres vivos

La radiación que recibe el ser humano se encuentra clasificada en forma esquemática en la fig ( 2. 4 ).<sup>2o</sup> En ésta se puede apreciar que el mayor porcentaje de dosis de radiación que recibe la población la proporciona el radón y sus descendientes, y

# PORCENTAJES DE DOSIS



Segovia y Bulbulian, *Ciencia y Desarrollo* 70, p.41, 1986

Fig. 2.4

El radón o cualquiera de sus descendientes al ser inhalados se adhieren a las paredes y membranas del sistema respiratorio de los seres vivos y su desintegración es una fuente de radiación en el epitelio pulmonar. El radón es un gas, por lo tanto puede eliminarse por exhalación y solo su descendencia metálica se desintegra dentro del pulmón y, podrán producir algún efecto en el ser humano. Aunque las concentraciones promedio del radón en la atmósfera no son particularmente dañinas, cuando este elemento queda atrapado en algún recinto cerrado como una cueva, una mina, un sótano o una casa, su concentración puede aumentar considerablemente y causar daño a los seres vivos.

Las minas de uranio son las que generan la mayor cantidad de radón; pero aún en otros tipos de minas pueden quedar atrapado, en los túneles subterráneos, gran cantidad de este elemento. Así en países como Suecia, antes de iniciar la industria minera de uranio, se consideró necesario imponer normas de seguridad para evitar que los trabajadores de las minas recibieran exceso de radiación emitida por la descendencia del radón.

### 3. EL RADÓN

#### 3.1 Antecedentes del radón

El sexto y último de los gases nobles es el radón, cuya trayectoria histórica ha sufrido numerosas evoluciones, hasta el punto de que incluso su nombre ha cambiado en varias ocasiones. El elemento fue descubierto por Dorn, como gas radiactivo procedente de la desintegración del radio, por lo que primeramente fue denominado *emanación del radio*, nombre que se convirtió en emanación (símbolo Em), cuando se comprobó que gases semejantes se producían en la desintegración del Actinio y Torio. Para diferenciar la procedencia, durante un cierto tiempo el radón fue conocido con el nombre de *nitrón* y las emanaciones del actinio y torio fueron llamadas *actinón* (número másico 219) y *torón* (número másico 220). Finalmente se comprobó que los tres gases anteriores no eran sino isótopos del mismo elemento, al que se llamó *radón*. Puesto que Rutherford fue el primero en descubrir el isótopo  $\text{radón-220}$  (emanación del torio, torón) en 1900, un año antes del trabajo de Dorn, debería en Justicia ser reconocido como el descubridor del elemento. Sin embargo, esta distinción se le asigna generalmente a Dorn, aunque fue Ramsay quien estudió el espectro y realizó los primeros intentos de medición de sus propiedades físicas.

El radio es un elemento químico aislado de la pechblenda (un mineral de uranio) por los esposos Curie en el año 1898. Si una disolución de una sal de radio se almacena en un recipiente cerrado durante varias semanas el radón formado se disuelve en el agua pues su solubilidad es del 50 por 100 en volumen.

A la luz de nuestros conocimientos actuales, sabemos que el  $\text{radio-226}$  (número másico 226) se desintegra a  $\text{radón-222}$  mediante la emisión de una partícula alfa. El radio tiene un período de semidesintegración de 1622 años lo que significa que cada vez que transcurre un tiempo igual a ese, una masa de radio determinada se reduce a su mitad. El radón formado decae mucho más rápidamente (período de 3.83 días) y tras una serie de desintegraciones en cadena, arriba finalmente al plomo-206, un isótopo estable del

plomo. En alguno de los pasos de la cadena de desintegración se emiten partículas alfa, lo que constituye la razón de la existencia de helio en minerales radiactivos.

El radón 219 y el 220 (actinón y torón) proceden de la desintegración respectivamente del actinio y del torio, y tras un proceso de desintegración en cadena decaen a plomo-207 y 208. Incidentalmente, la existencia de isótopos estables del plomo de distintas masas explica el hecho, de que a través de los años varios investigadores encontraron distintos valores del peso atómico del plomo, a pesar, de haber realizado la medida en condiciones de gran precisión, pues dependiendo del punto de procedencia del plomo, su composición isotópica variaba, resultando más pesado si procede de la desintegración de la cadena del torio que de la del radio.

Aunque los gases nobles forman un grupo de elementos de actividad química muy pequeña o incluso nula, han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la química moderna. La existencia del radón y sus isótopos ha contribuido a aclarar los procesos de desintegración radiactiva y ha demostrado la existencia de un cuadro completo de transmutación de unos elementos en otros.

### 3.2 Propiedades químicas y físicas del radón

El radón es directamente producido por el radio como parte de su decaimiento radiactivo. Cuando un radionúclido produce otro radionúclido y el proceso continúa hasta un elemento finalmente estable se dice que forman una serie. Como ya mencionamos hay tres series radiactivas que ocurren naturalmente, y que son la del uranio-238, la del uranio-235, y torio-232 y finalizando con plomo-206, plomo-207, plomo-208, respectivamente.

Todos los radionuclidos intermedios provienen del decaimiento radiactivo.

Con la excepción del radón, que es un gas, todos los elementos radiactivos involucrados en el decaimiento radiactivo son metales. Sin embargo siendo un gas, especialmente un gas inerte, el radón puede difundirse a través de la tierra y entrar en los hogares.

Los isótopos del radón son producidos en las tres series de decaimientos y son el radón-222 (vida media igual a 3.82 días), el radón-220 (vida media igual a 55 seg), el radón-219 (vida media igual a 4 seg). Si los isótopos son producidos en la tierra la oportunidad para el radón-220 y el radón-219 para migrar al interior de los hogares es más bien pequeña a causa del período corto con que se desintegraran pasando a otros elementos metálicos. Como el radón-222 tiene una vida media más larga, dura más en el ambiente interior que los otros isótopos.

El número atómico del radón es 86, su símbolo es Rn, en la tabla periódica de los elementos el radón está en la familia de los gases nobles o gases inertes que son el helio, neón, argón, kriptón y xenón. El átomo del radón raramente reacciona con otro átomo para formar moléculas; por ser químicamente inerte, el radón puede fluir libremente a través de todo material permeable a cualquier gas. Puede fluir libremente a través de espacios muy pequeños, tal como entre partículas de tierra y roca. El radón es incoloro, inodoro, sin sabor e indetectable por los sentidos humano o por métodos químicos. La detección del radón está asociada a su decaimiento radiactivo y sus productos de decaimiento. El radón es también moderadamente soluble en agua y por lo tanto, puede ser absorbido por el agua que fluye a través de rocas y arenas que contienen radón. Su solubilidad depende de la temperatura del agua; en agua fría es más soluble. El coeficiente de solubilidad del radón está definido, como la proporción de la concentración del radón en agua con respecto a la del aire. A temperaturas más elevadas, hay mayor liberación de radón del agua y por lo tanto el coeficiente de solubilidad disminuye. El máximo coeficiente de solubilidad del radón es alrededor de 0.5 a una temperatura de 0 °C, decreciendo exponencialmente cuando la temperatura se incrementa; a 20 °C el coeficiente de solubilidad es de 0.25 y a 90 °C el coeficiente de solubilidad es de 0.1. El agua subterránea usualmente contiene una alta concentración de radón.

El radón es altamente soluble en tolueno. Debido a esto el tolueno es comunmente usado para la extracción del gas radón del

agua

El carbon activado es un buen medio para colección del radón ya lo que adsorbe.

### 3.3 El radón y sus productos de decaimiento

Como el radón proviene de las series radiactivas, produce polonio, el cual, se transforma a su vez produciendo plomo, bismuto, hasta llegar al isótopo estable del plomo. Todos los radionuclidos entre el radón y los isótopos terminales estables son llamados *progenie del radón* ó *hijos del radón*; algunas de las propiedades físicas de radón y su progenie son resumidos en la tabla ( 3.1 ).<sup>10</sup>

TABLA 3.1<sup>10</sup> RADON Y SU PROGENIE

Serie	elemento	simbolo	vida media	principal radiación
U-238	Radón	Rn-222	3.82días	alfa
	Polonio	Po-218(RaA)	3.05min	alfa
	Plomo	Pb-214(RaB)	26.8min	beta, gamma
	Bismuto	Bi-214(RaC)	19.7min	beta, gamma
	Polonio	Po-214(RaC')	164µseg	alfa
	Plomo	Pb-210(RaD)	22años	beta, gamma
	Bismuto	Bi-210(RaE)	5.0días	beta
	Polonio	Po-210(RaF)	138días	alfa, gamma
	Plomo	Pb-206	estable	
U-235	Radón	Rn-219	4.0seg	alfa
	Polonio	Po-215(AcA)	1.78mseg	alfa
	Plomo	Pb-211(AcB)	36.1min	beta, gamma
	Bismuto	Bi-211(AcC)	2.15min	alfa, gamma
	Talio	Tl-207(AcC')	4.79min	beta
	Plomo	Pb-207	estable	
Th-232	Radón	Rn-220	55seg	alfa
	Polonio	Po-216(ThA)	0.15seg	alfa
	Plomo	Pb-212(ThB)	10.6hr	beta, gamma
	Bismuto	Bi-212(ThC)	60.6min	beta, gamma
	Polonio	Po-212(ThC')	0.3µseg	alfa
	Plomo	Pb-208	estable	

Un nivel dado de concentración de radón en el aire producirá una cierta cantidad de átomos de polonio de acuerdo con la ecuación:

$$N = N_0 e^{-0.693 t/T_{1/2}}$$

pero a causa de que el polonio es también radiactivo, algunos átomos del mismo se desintegran rápidamente. Por lo tanto el polonio no se acumula indefinidamente, pero sí, puede alcanzar un equilibrio después de un cierto tiempo.

La cantidad de polonio puede ser deducida de la siguiente manera. Como algunos átomos de polonio decaen, mientras algunos más son producidos, el incremento deberá ser la diferencia entre la actividad de radón y la actividad del polonio. La cantidad de polonio se incrementa hasta que su actividad sea igual a la actividad del radón. Después de que esto fue alcanzado, el polonio está en equilibrio con el radón. Por ejemplo, si el radón-222 con una actividad de 100 pCi, se encierra en un recipiente, producirá 3.7 átomos por segundo de polonio-218. Al equilibrio, el polonio también deberá decaer, en la misma cantidad. Si se usa la ecuación

$$A = (0.693/T_{1/2}) * N$$

para determinar el número de átomos de polonio

$$N = (A * T_{1/2}) / 0.693$$

$$N_p = (3.7 * 3.05 \text{m} * 60 \text{s/m}) / 0.693$$

$$N_p = 977 \text{ átomos}$$

los 3.05 minutos es la vida media de polonio-218 y 60 es factor de conversión para cambiar de minutos a segundos. La cantidad al equilibrio de plomo-214 puede ser calculado de una manera similar. Después de que el polonio-218 alcanza el equilibrio (con 100pCi de Rn), se producen 3.7 átomos de Pb-214 por segundo. Si la vida media del Pb-214 es de 26.8 min, la cantidad del equilibrio del Pb-214

con 100 pCi de Rn-222 debe ser.

$$N_{Pb} = (3.7 \times 26.8m \times 60s/m) / 0.693$$
$$N_{Pb} = 8,585 \text{ átomos}$$

Similarmente, se pueden obtener la cantidad en el equilibrio del bismuto-214, siendo éste de 6,311 átomos y de Po-214, siendo éste de 0.00088 átomos por cada 100pCi de Rn-222. La vida media del Bi-214 y del Po-214 son respectivamente 19.7min y 164 microsegundos ( $164 \times 10^{-6}$ seg). Al equilibrio el Po-214 es muy poco, y debido a que los átomos de éste se desintegran rápidamente produciendo otro tipo de átomo (Pb-210), por lo cual no hay acumulación apreciable del Po-214.

El Plomo-210 es algo diferente al resto de la progenie del Rn-222. Por su vida media es muy larga (22 años), en el aire difícilmente se desintegrará en semanas o meses. Así que la concentración del Pb-210 se incrementará proporcionalmente con el tiempo. La figura número (3.4)<sup>10</sup> muestra la acumulación de varios productos de decaimiento del Rn-222 como un resultado del decaimiento de 100pCi de radón en un lugar cerrado. La cantidad inicial de la progenie del radón es asumida como cero; como lo demuestra la figura, la concentración al equilibrio del Po-218, se alcanza en 20min, mientras que para los otros debido a su vida media corta se alcanza en alrededor de tres horas.

Resumiendo, cuando toda la progenie con vida media corta está en equilibrio con cierta cantidad de radón, se dice que se ha alcanzado un equilibrio secular. En ese momento por cada 100 pCi de Rn-222, habrá 977 átomos de Po-218, 8,585 átomos de Pb-214, 6,311 átomos de Bi-214, y una cantidad insignificante de átomos de Po-214. En la tabla (3.2)<sup>10</sup> se muestran algunas de las propiedades físicas de la progenie de vida media corta del radón-222.

**TABLA 3.2<sup>o</sup> PROPIEDADES FISICAS DE LA PROGENIE DE VIDA MEDIA CORTA  
DEL RADON-222**

Elemento	vida media	radiación principal Energía (MeV)	No de átomos por 100pCi de radón-222
Po-218	3.05min	alfa (6.0)	977
Pb-214	26.8min	beta, gamma (1.0 max)	8,585
Bi-214	19.7min	beta, gamma (3.3 max)	6,311
Po-214	164μseg	alfa (7.7)	10 <sup>-7</sup>
	energía potencial alfa por átomo (MeV)	energía potencial alfa por 100pCi de radón (MeV×10 <sup>5</sup> )	
Po-218	13.7	0.134	
Pb-214	7.7	0.661	
Bi-214	7.7	0.486	
Po-214	7.7	7.68×10 <sup>-7</sup>	
		----- Total = 1.281×10 <sup>5</sup> MeV	

### 3.4 Niveles de trabajo "Working levels (WL)"

El *Working Level* (WL) nivel de trabajo es definido para medir la concentración de los productos de decaimiento del radón. Esta unidad es equivalente a  $1.3 \times 10^5$  MeV de energía potencial alfa de sus productos de vida corta por litro de aire. Se mide en energía potencial alfa porque está directamente relacionada con el daño a los tejidos pulmonares, causado por la ionización producida por las partículas alfa.

Un "working level" es igual a la energía potencial alfa liberada por toda la progenie de vida media corta del radón en un litro de aire y en equilibrio con 100 pCi de Rn-222. Para 100 pCi de Rn-222, habrá 977.0 átomos de Po-218 con una energía potencial alfa de 13.7MeV cada uno, 8,585 átomos de Pb-214 y 6,311 átomos de

Bi-214, con una energía potencial alfa de 7.7MeV cada uno. Cuando toda ésta energía potencial se suma para una concentración 100pCi de Rn-222, se tendrá  $1.28 \times 10^5$  MeV, por lo tanto, un working level es equivalente a  $1.3 \times 10^5$  MeV (a presión y temperatura ambiente) como lo ilustra la tabla ( 3. 2 )<sup>10</sup>

En perfecto equilibrio secular, 1WL de, la progenie de vida media corta del Rn, está en balance con 100pCi/l de Rn-222; sin embargo, a causa de que la progenie del Rn producida en el aire no es electricamente neutra, rápidamente se adhieren en muros, paredes, pisos y aerosoles y por lo tanto su concentración es mucho menor de lo calculado. La proporción actual o real de la concentración (en WL) de la progenie del Rn y la concentración (pCi/l) del Rn se expresa comunmente en términos de fracciones de equilibrio, o factor, F, como se muestra:

$$F = 100 \times (\text{conc. de la progenie(WL)}/\text{conc.del Rn(pCi)})$$

En equilibrio perfecto, F es igual a 1.

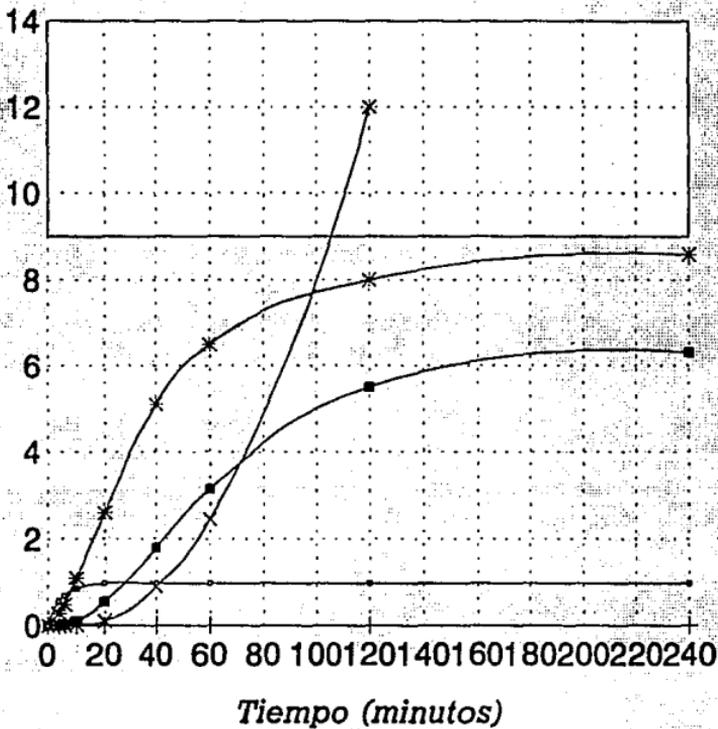
El equilibrio perfecto no existe en el interior de las casas, por lo que se han colectado datos de casas típicas en las que el Rn y su progenie fueron medidos, tomando 100pCi/l de Rn resulta que el factor osciló entre 0.2 y 0.7 WL.(Holub et al. 1985).<sup>19</sup>

En la conversión de niveles de concentración de la progenie del radón el factor de equilibrio utilizado es un promedio, F=0.5. de esta manera, 1WL de la progenie del radón se asume como equivalente a 200pCi/l de radón. Este número es comunmente usado en la práctica, para la valoración de los efectos a la salud en interiores.

# ACUMULACION DE LA PROGENIE DEL RADON

100 pCi de Rn-222

Número de átomos por 1000



○ Po-218 + Po-214 \* Pb-214 ■ Bi-214 × Pb-210

Fig. 3.1

#### 4. ESTUDIO GEOGRAFICO DE LA ZONA ORIENTE DE COYOACAN

##### 4.1 Situación, extensión y límites

La delegación de Coyoacán forma parte de la entidad política de la República Mexicana que se conoce con el nombre de Distrito Federal y se encuentra situada al sur de la ciudad de México. Está comprendida entre los paralelos  $19^{\circ} 17'06''$  y  $19^{\circ} 21'08''$  de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Coyoacán se encuentra a 2241 metros sobre el nivel del mar; su superficie no es extensa, es una delegación pequeña con  $62.26\text{km}^2$ .

La delegación de Coyoacán colinda al norte con la delegación Benito Juárez y la delegación de Iztapalapa; al este con la misma delegación de Iztapalapa; al sur con la delegación de Tlalpan y al oeste con la delegación de la Magdalena Contreras y Villa Alvaro Obregón.

Al norte sirve de límite el río Churubusco y la calzada Ermita Iztapalapa; al este, el canal Nacional desde Mexicaltzingo siguiendo todas las inflexiones del mencionado canal hacia el sureste hasta, el lugar en que se inicia la calzada del Hueso, al sur la calzada antes mencionada sirve de límite entre Tlalpan y Coyoacán, desde el canal Nacional hasta encontrar el antiguo cauce del río San Juan de Dios, continúa el límite hacia el sureste por este accidente hasta la calzada de Tlalpan; el límite cruza la calzada y se prolonga por la orilla norte de la calzada del pedregal hasta encontrar el canal de salida de las aguas de la antigua fábrica de Peña Pobre, desde este lugar, el límite rodea el muro de la fábrica para dejarla fuera de la delegación Coyoacán.

##### 4.2 Geología

###### 4.2.1 Generalidades

El terreno que abarca la superficie de la delegación de Coyoacán, se asienta en rocas de origen sedimentario en las partes bajas y en las partes más elevadas en rocas de origen volcánico.

Como la delegación se encuentra al sureste de la cuenca de

México, sus características geológicas están íntimamente relacionadas con la geología general de la región.

Se debe notar que el relieve general de la delegación de Coyoacán, no es uniforme sino que se encuentra un poco elevado al suroeste, región, que corresponde a las faldas del Ajusco y por lo tanto es accidentada; en cambio la zona baja que corresponde a la parte norte, es casi plana, pues forma parte del relleno sedimentario de la cuenca de México.

Sobre el fondo de la cuenca que es andesita se depositaron los sedimentos lacustres, constituidos por arcillas, margas, arcillas margosas y margas arcillosas intercaladas de diferentes maneras. Entre las capas anteriores se hallan también tobas detriticas arcillosas y arenosas, aluviones constituidos de matatenas de andesita, de hiperestena y capas de arena de grano fino o grueso. El espesor de los anteriores sedimentos es mayor en el centro y su posición es casi horizontal.

En el relleno se encuentran capas casi impermeables, las arcillas margosas; capas poco permeables las arcillo-arenosas y de tobas; capas muy permeables las de arena de grano grueso y las de aluvión.

Los mantos acuíferos según la opinión de Juan D. Villarejo,<sup>27</sup> contenidos en el subsuelo de la planicie están constituidos en los espacios vacíos comprendidos entre los granos de arena y entre las mantatenas andesíticas, en las capas de arena y aluvión.

#### 4.2.2 Vulcanismo

La zona llamada actualmente cuenca de México fue antes del vulcanismo del mioceno y plioceno, una cuenca de escurrimiento hacia la cuenca del río Amacuzac, pero con la efusión de lavas al sur de la cuenca, se obstruyó la salida de las aguas y se transformó en una cuenca cerrada como lo fue hasta hace algunos años, antes de que se hicieran las obras de desagüe.

Esta región volcánica es la continuación de una gran fractura que se localiza a los 19° de latitud norte en las regiones

centrales del país.

#### 4.2.3 Petrografía

En esta región sur se encuentran diversos tipos petrográficos, según estudios hechos por Ezequiel Ordóñez<sup>22</sup>, entre los cuales se encuentran rocas de origen ígneo como las andesitas, los basaltos y rocas sedimentarias.

La andesita de hornoblenda es la roca más antigua que data del mioceno y aflora en el cerro de Zacatepec. Este afloramiento está rodeado por la corriente basáltica reciente del Xitle pues por su relativa altura quedó a salvo de la corriente.

La roca más abundante es el basalto de reciente formación, corresponde a la erupción del Xitle volcán adventicio del Ajusco ocurrido hace unos 2400 años "según determinaciones hechas por el método de Libby a base del contenido de carbono 14 en muestras de carbón vegetal sepultado por la lava " descubierto en las excavaciones que se han hecho en Copilco y Cuicuilco.

Las lavas según la descripción de Ezequiel Ordóñez escurrieron hacia el norte donde llegaron rápidamente a la planicie de la cuenca, disminuyendo poco a poco de velocidad y espesor a la vez que se ensanchaban. La gran fluidez de las lavas dió un aspecto rugoso en la parte superior e inferior de la capa, al enfriarse por el desprendimiento de gases, presenta curvas concéntricas en las direcciones parciales de escurrimiento conforme a las pendientes. La longitud de la corriente se estima en 13 Km y la mayor anchura en 5 Km . El espesor de la lava cerca del centro de Coyoacán varía de 5 a 10 metros.

Las lavas de esta región son de color negro-grisáceo o grises compactas; son ampollosas, su magma vítreo contiene una fuerte proporción de hierro y algunas veces de hiperestena; el olivino en grandes fragmentos es abundante en los basaltos de Xitle.

Estos basaltos cubren la región suroeste de Coyoacán y abarcan los siguientes puntos: Peña Pobre, Cuicuilco, Ciudad Universitaria y Copilco, hasta las inmediaciones de Coyoacán mas o

menos a la altura de la avenida Taxqueña o M.A.Quevedo; hacia el este a unos cientos de metros de la avenida División del Norte, cerca de la calzada de Tlalpan.

En los contornos de donde se han explotado la cantera basáltica se observa una capa de suelo de color rojizo resultado de la metamorfosidad de la arcilla del suelo por la influencia de la lava candente que cubrió esta región. El color rojizo y amarillento se produjo por la combustión en presencia de oxígeno y donde hubo poco oxígeno la materia vegetal se carbonizó.

La parte cubierta de rocas eruptivas es la más elevada y accidentada de Coyoacán; el resto del territorio de la delegación es bajo y uniforme siendo parte integrante de la cuenca sedimentaria.

Las rocas sedimentarias que ocupan la parte baja se componen de materiales diversos como arenas, gravas, tobas, cenizas volcánicas, lodos, arcillas, aluviones, limos, etc.

El relleno de la parte baja de Coyoacán es muy profundo como lo prueba el pozo perforado en Xotepingo que alcanza aproximadamente unos 1000m.

Según Alberto R.V.Arellano<sup>27</sup>, estos sedimentos no son producto exclusivo del desgaste de los volcanes que aún se observan y cuya formación corresponde al mioceno y plioceno, él cree que su origen se debe al desgaste de las rocas de un vulcanismo más antiguo que fué cubierto por el vulcanismo de las etapas ya enunciadas ( mioceno y plioceno ).

Tabla 4.1 Tabla estratigráfica para la cuenca de México.

PERIODO	FORMACIONES Y SERIES	DURACION APROXIMADA
Holoceno y pleistoceno	series aluvial y fluvial serie basáltica Chichinautzin.	1 millon de años
Plioceno	formación de tarango ( abanicos aluviales )	1 - 12 millones de años

Mioceno	Series volcánicas Xochitepec	12 - 26 millones de años
Oligoceno	?	26 - 34 millones de años

#### 4.2.4 Sedimentos

Para el estudio de los sedimentos éstos dividirán en tres grupos.

##### 4.2.4.1 Sedimentos anteriores al vulcanismo del mioplioceno

Su existencia se determina por el espesor tan grande del relleno de la cuenca. En el pozo perforado en Xotepingo donde se llegó a una profundidad cercana a los mil metros, estos sedimentos alcanzan los 600m y su formación se calcula como correspondiente al oligoceno y finales del mioceno.

##### 4.2.4.2 Sedimentos contemporaneos al vulcanismo del mioplioceno

Bryan nombró a estas capas Tarango y les asignó un espesor de 300 a 400m. en los flancos de las tierras de las cruces y en la zona de las lomas; en Xotepingo se calcula en 250 a 300m y están constituidas por una capa de brecha pómez, de material aluvial, eólico y lacustre, intercaladas con arena y gravas de distintas dimensiones y aparentemente mejores mantos acuíferos se encuentran en las capas más bajas de esta formación.

El principio de la formación de Tarango data de fines del mioceno y su formación terminó a fines del plioceno o sea hace un millón de años.

##### 4.2.4.3 Sedimentos posteriores al vulcanismo del mioplioceno

Este grupo lo constituyen tres formaciones:

- a) Tacubaya.
- b) Becerra.
- c) Noche buena.

a) Tacubaya es la más antigua y se reconoce por el color café amarillento, amarillento o rojizo.

b) Becerra se distingue de la Tacubaya por su menor consolidación y presenta colores grises, a veces ligeramente amarillentos o francamente blanquiscos; al final de la formación de Becerra se le atribuye una edad de unos 7000 años A.C.

c) Sobre la formación de la Becerra se localiza una capa de aluviones y depósitos lacustres denominados Noche buena; los suelos de esta formación son suaves, poco endurecidos y en ellos se han encontrado cerámicas como testimonio de las primeras culturas, como en Copilco y Cuicuico. La formación de esta capa se inició hace más o menos 2500 a 3000 años A.C. Estos sedimentos están cubiertos, en parte por las lavas que arrojó el Xitle hace 2400 años.

Por último, en la delegación se distinguen dos regiones principales en lo que respecta a la distribución geográfica de las formaciones geológicas a saber.

1) La del suroeste, que corresponde a las corrientes de lavas conocidas con el nombre Pedregal de San Ángel.

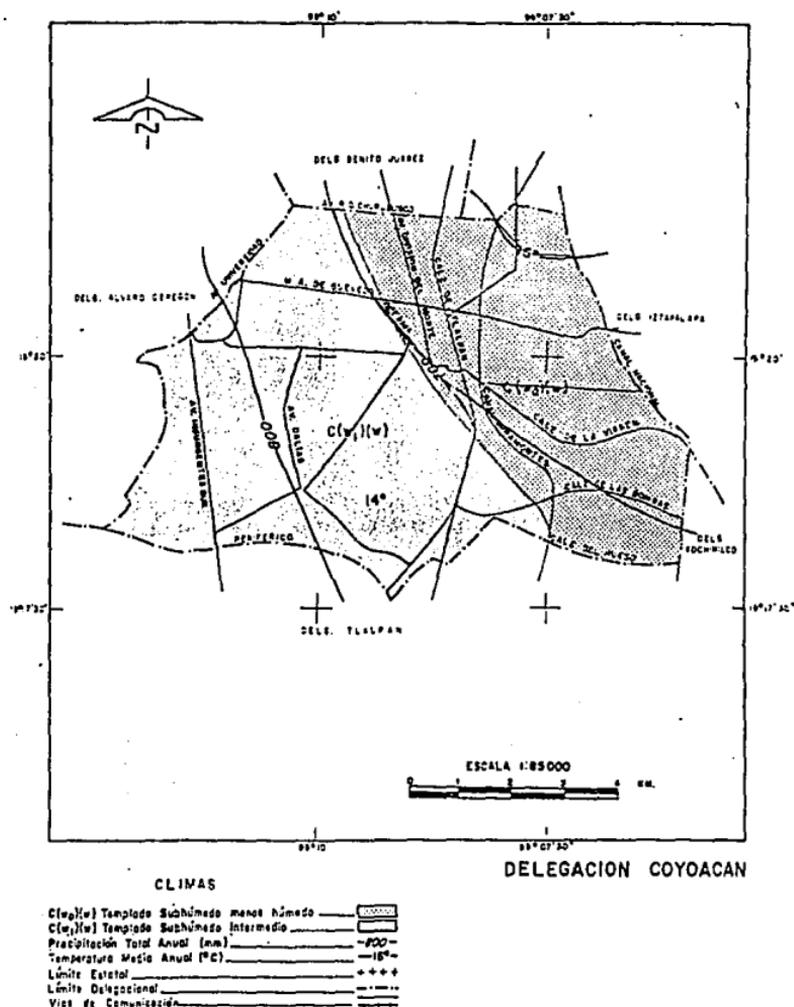
2) La del norte y este en las que predominan rocas sedimentarias formadas a expensas de materiales de origen volcánico.

#### 4.3 Clima

Coyoacán corresponde a la parte más baja de la vertiente de la cordillera volcánica transversal o neovolcánica y es parte integrante de la gran cuenca de México lo cual nos indica que el clima de Coyoacán debe ser el clima dominante del sur de la cuenca.

Debido a la diferencia de alturas existen en la cuenca una variedad de tipos climáticos locales diferentes entre sí. En términos generales podemos decir que la delegación de Coyoacán tiene un clima templado con lluvias en verano y parte del otoño. Fig. ( 4. 1)

## CARACTERISTICAS CLIMATICAS

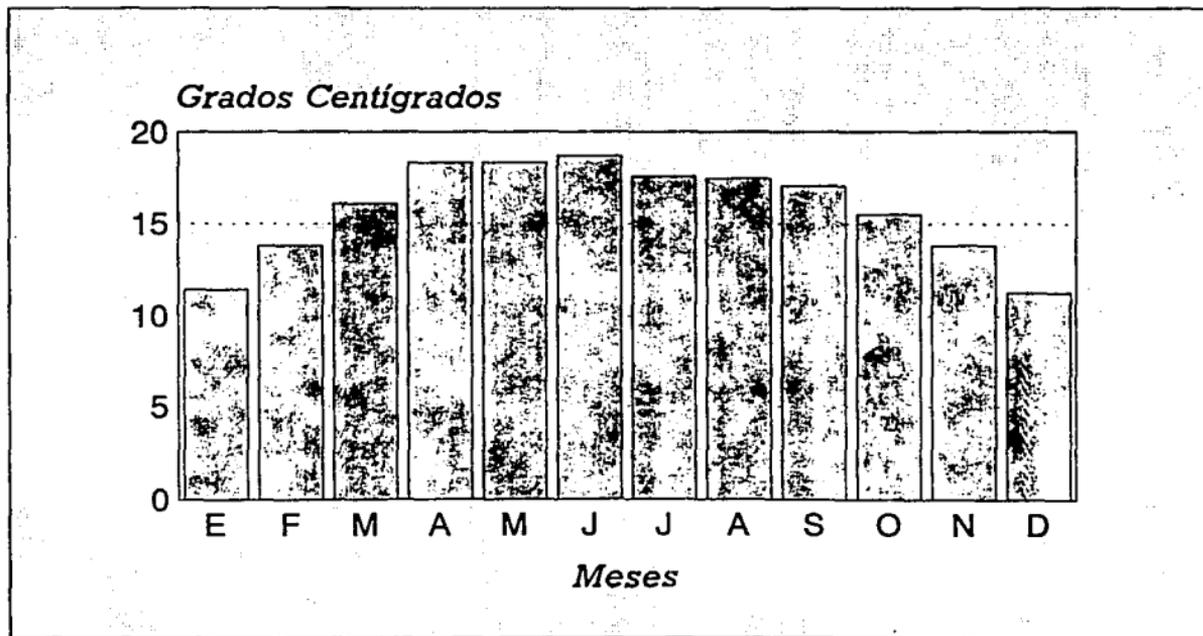


NOTA: Con lluvias en verano e invierno. Lluvias en invierno menores de 5%.  
 FUENTE: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, DGG, Atlas de Medio Físico.

Fig. 4.1

# TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

En el área de Coyoacán



Deducida de 7 años de observación

Fig. 4.2

#### 4.3.1 Temperatura

Se señala una diferencia de temperatura entre el mes más caliente y el mes más frío, de  $7.3^{\circ}\text{C}$ , es decir, los cambios estacionarios de la temperatura no son muy grandes; la media anual es de  $15.6^{\circ}\text{C}$ . Fig. ( 4. 2 )<sup>27</sup>

#### 4.3.2 Lluvias

El régimen pluviométrico es tropical como lo indica la curva de precipitaciones, pues el período más importante de lluvias abarca las estaciones de verano y otoño y un período seco que corresponde a las estaciones de primavera e invierno; estas estaciones que solo llegan a tener lluvias ocasionadas por la perturbaciones atmosféricas que se originan en el norte, las lluvias son aisladas. En esta región se manifiestan varios tipos de lluvias como las de relieve, las de convección local, las ciclónicas y las de frente. La precipitación media anual es de 715.6 mm.

Los meses más lluviosos son los de julio, agosto, septiembre (verano) y los meses más secos son los de diciembre, enero, febrero, y marzo.

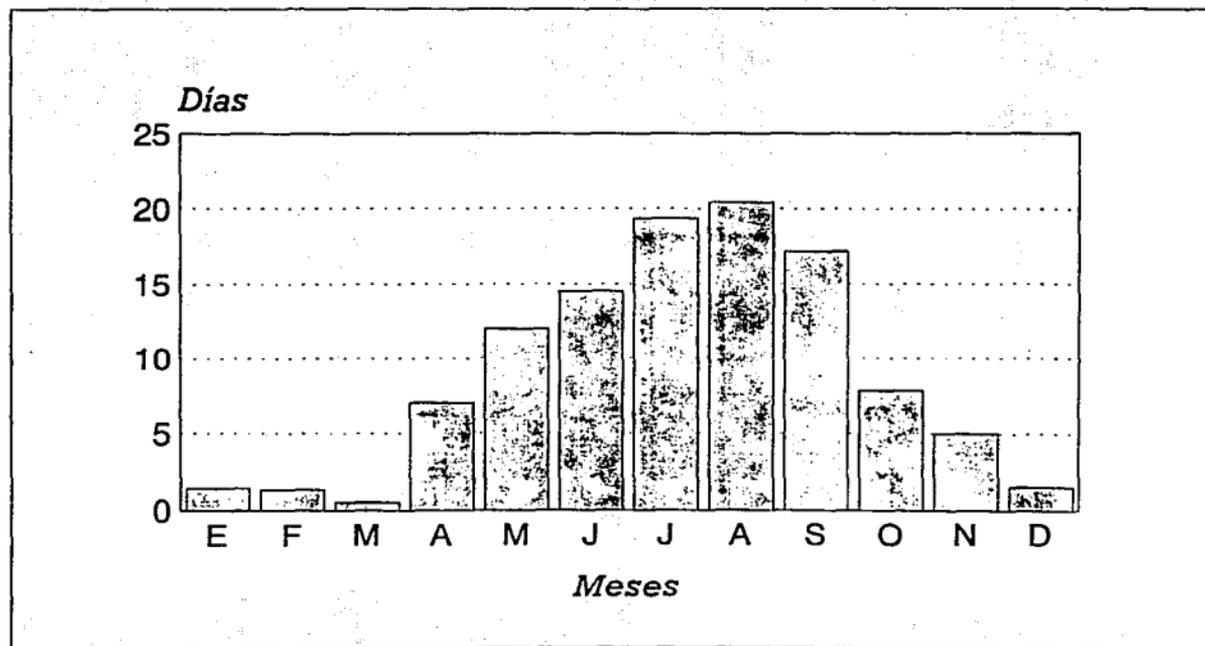
De los datos que se conocen, la delegación de Coyoacán tiene mayores lluvias que algunas otras zonas del Distrito Federal, caso concreto es el del centro de la ciudad que tiene un promedio de lluvia de 578mm. en tanto que en Coyoacán es de 715.6mm, hecho que se atribuye a la influencia del relieve de las montañas del Ajusco y la influencia de los vientos dominantes del valle que son del noreste al suroeste, lo que hace de esta zona del Ajusco más húmeda y lluviosa, extendiéndose estas condiciones a la delegación de Coyoacán. Figuras ( 4. 3 )<sup>27</sup>, ( 4. 4 )<sup>27</sup>

#### 4.3.3 Heladas

En estas zonas se registra un promedio de 69 días de heladas, siendo más frecuentes en los meses de noviembre, diciembre y enero. Además se registran algunas llamadas "heladas tempraneras " en octubre. Fig. ( 4. 5 )<sup>27</sup>

# DIAS CON LLUVIAS APRECIABLES POR MES

En el área de Coyoacán

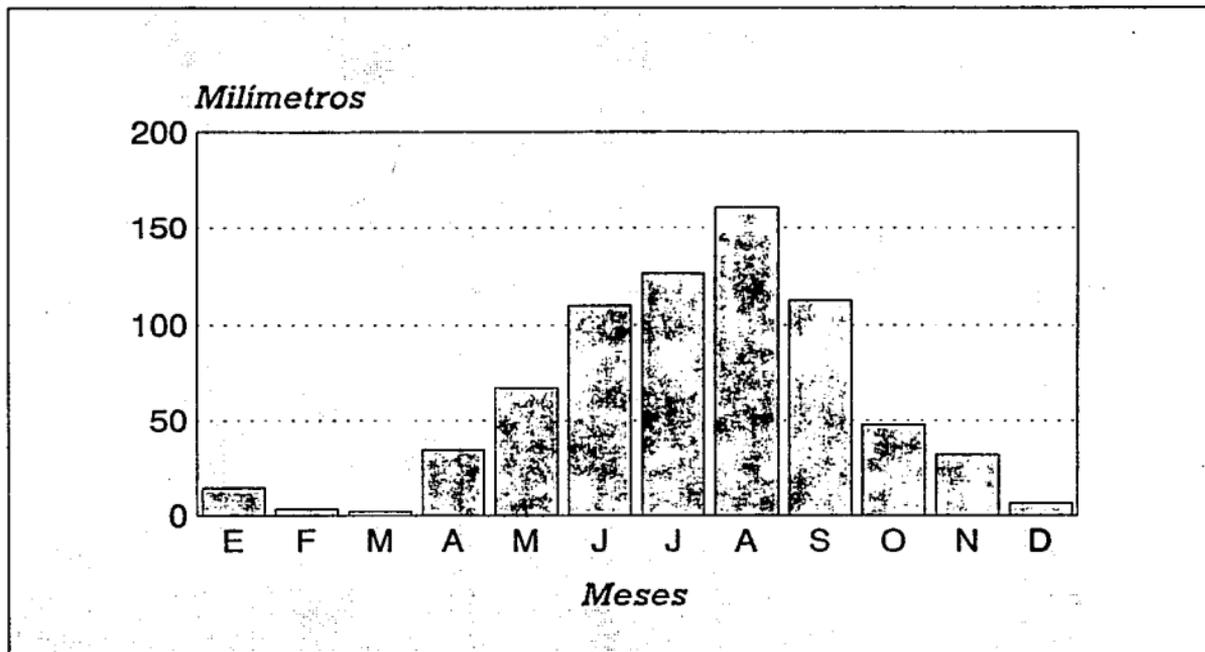


Deducida de 7 años de observación

Fig. 4.3

# PRECIPITACION TOTAL EN MILIMETROS POR MES

En el área de Coyoacán

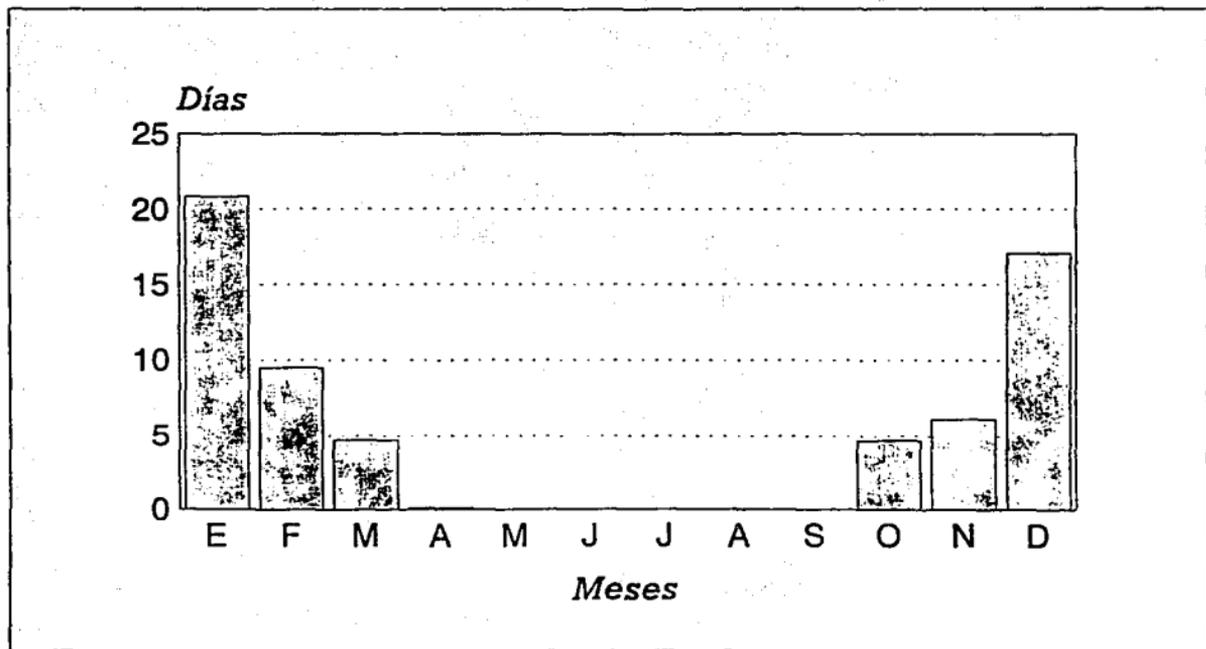


Deducida de 7 años de observación

Fig. 4.4

# DIAS CON HELADAS POR MES

En el área de Coyoacán



Deducida de 7 años de observación

Fig. 4.5

#### 4.4 Análisis de muestras de suelo del oriente de Coyoacán<sup>30</sup>

La muestra No 1 corresponde a la colonia Prado Churubusco.

La muestra No 2 corresponde a la colonia San Francisco Culhuacán.

La muestra No 3 corresponde a la colonia San Antonio Coapa (sobre la calzada del Hueso ).

La muestra No 4 corresponde a la colonia San Antonio Coapa (cerca de la calzada del hueso ).

La muestra No 5 corresponde a la colonia El Reloj.

La muestra No 6 corresponde a la colonia Santo Domingo.

No de muestra	1	2	3
Profundidad en cm	0-30	0-30	0-30
Color	café claro	casí negro	negro
Espacios vacíos %	47.710	57.640	64.000
Grava gruesa %	0.000	0.000	0.000
Arena %	47.920	29.580	40.580
Limo %	21.660	25.280	22.280
Arcilla %	30.420	45.140	37.140
Capacidad de retención de agua %	21.970	39.960	43.620
Agua disponible %	15.920	33.510	34.320
Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) %	0.000	0.170	0.096
$\text{CaCO}_3$ %	0.310	0.420	0.380
Materia orgánica %	1.740	6.550	7.550
$\text{Na}_2\text{CO}_3$ %	0.009	0.000	0.000
$\text{NaCl}$ %	0.018	0.047	0.047
$\text{Na}_2\text{SO}_4$ %	0.056	0.026	0.039
Nitrógeno total %	0.100	0.370	0.390
Fósforo disponible ppm	70.000	90.000	80.000
Potasio disponible ppm	350.000	500.000	350.000
Calcio disponible ppm	12000.000	18000.000	12000.000
Magnesio disponible ppm	45.000	43.000	50.000
pH	7.200	7.200	7.500

No de muestra	4	5	6
Profundidad en cm	0-30	0-30	0-30
Color	negro	café claro	café claro
Espacios vacíos %	64.000	64.000	64.000
Grava gruesa %	0.000	0.000	0.000
Arena %	45.580	38.860	40.860
Arcilla %	32.140	28.780	27.800
Capacidad de retención de agua %	37.960	31.960	37.950
Agua disponible %	26.510	24.860	33.610
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O %	0.000	0.000	0.159
CaCO <sub>3</sub> %	0.450	0.310	0.350
Materia orgánica %	8.360	4.350	11.380
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> %	0.014	0.021	0.004
NaCl %	0.088	0.024	0.014
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> %	0.115	0.073	0.041
Nitrógeno total %	0.270	0.200	0.720
Fósforo disponible ppm	90.000	80.000	50.000
Potasio disponible ppm	500.000	500.000	250.000
Calcio disponible ppm	5000.000	18000.000	5000.000
Magnesio disponible ppm	50.000	45.000	50.000
pH	7.500	7.300	6.300

## 5. Relación entre el contenido de radiactividad en las rocas y los análisis del suelo del oriente de Coahuacán

### 5.1 Radiactividad de las rocas volcánicas

Las rocas volcánicas son proyectadas por los volcanes. Se presentan comunmente bajo la forma de coladas, pero aparecen también como productos de proyección ( bombas, lapilli o cenizas...), resultantes de la explosión de materiales sólidos, o como cráteres de chimeneas volcánicas.

Las rocas volcánicas son en realidad muy numerosas y su contenido en sílice permite clasificarlas bastante arbitrariamente desde las riolitas hasta los basaltos, en rocas ácidas y básicas. Por otra parte es muy difícil evaluar su contenido medio en uranio y en torio, porque las proporciones de estas rocas no son iguales, pues las lavas básicas son con mucho, las más abundantes. En conjunto, el contenido de material radiactivo de las rocas básicas es relativamente bajo por lo común, no mayor a 1 ppm de uranio.

Las rocas ácidas son en su conjunto, más ricas, pero su contenido varía considerablemente conforme a su origen y no es posible establecer una regla general.

He aquí a título de ejemplo, los resultados obtenidos con vidrios volcánicos (J.A.S. Adams, en Fault Nuclear geology, pp 91).

Tabla 5.1<sup>a</sup>

---

Lipari (Italia).....	15.4 ppm de Uranio.
Corbitz (Alemania).....	7.9 "
Lake County (California).....	7.6 "
Mono Craters (California).....	5.9 "
Gotterfelsen, Meissen (Alemania)....	5.3 "
Magdaleno (México).....	4.6 "
Nueva Zelanda.....	3.9 "
La Piedad (México).....	3.2 "
Stromboli (Italia).....	3.1 "
Shizuoka (Japon).....	0.8 "

Estas medidas y otras que no citamos dan un promedio de 5.6 ppm, con una elevada proporción de resultados comprendidos entre 4 y 8 ppm. Como las muestras proceden de distintas partes del mundo, se pueden considerar que estos datos son bastante representativos y que el contenido medio en uranio de las rocas volcánicas ácidas no supera las 5 ó 6 ppm.

Análisis precisos han mostrado una relación neta entre las proporciones de sílice y la de los óxidos alcalinos de sodio y potasio. Cuando crece la cantidad de sílice la de  $\text{Na}_2\text{O}$  también crece, pasando por un máximo poco acentuado y luego decrece. Por lo contrario, la de potasio aumenta con regularidad y, por otra parte de un modo sorprendente la relación entre el contenido en  $\text{K}_2\text{O}$  y en U es lineal.

## 5.2 Radiactividad de las rocas sedimentarias

### 5.2.1 Formación de las rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman generalmente en el agua; están compuestas sobre todo por elementos denominados clásticos o detriticos, que provienen de la desagregación de rocas preexistentes a consecuencia de los diferentes fenómenos de erosión a los que se agregan, a veces, elementos resultantes de transformaciones en el lugar.

La erosión puede deberse a fenómenos físicos y mecánicos o a fenómenos químicos u orgánicos.

Las acciones físicas se deben sobre todo a las aguas corrientes, ya sean superficiales o subterráneas, cuya destrucción es intensa y muy amplia. Las variaciones de temperatura y los vientos actúan igualmente de manera muy general en ciertos lugares, los glaciares y el mar producen también considerable erosión.

Los materiales arrancados a las rocas del suelo son luego llevados por las aguas, el hielo y los vientos y sufren durante este transporte un desgaste que, según su duración, puede ser

superficial o producir una desaerogación muy marcada.

La acción química se hace sentir igualmente por intermedio del agua. El agua pura no disuelve en realidad sino un número reducido de sales minerales alcalinas, en particular el cloruro de sodio y las sales de potasio. Por el contrario, si contiene ya en solución ciertas sales o anhídrido carbónico proveniente de la atmósfera, puede disolver otros compuestos. Por último el agua puede producir numerosos fenómenos de oxidación y de hidratación.

Los sedimentos así formados, blandos al principio, podrán sufrir transformaciones químicas (oxidación, hidratación) o físicas (disolución, recristalización) y hasta dinámicas y se convertirán a veces rápidamente en rocas compactas duras.

### 5.2.2 Uranio y torio en las rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se formaron a partir de rocas que existían antes que ellas en la superficie de la tierra: rocas eruptivas, sedimentarias o metamórficas. El uranio y el torio de las rocas sedimentarias proviene entonces, directa o indirectamente, de las rocas eruptivas. Son arrancados por la erosión y se depositan parcialmente a causa de su densidad elevada al pie de la roca madre o durante el transporte y aún alcanzan las cuencas de sedimentación. Al dispersarse así los elementos radiactivos, las rocas sedimentaria contienen generalmente menos uranio y torio que la roca madre. Una roca sedimentaria atacada por la erosión dá a su vez, sedimentos menos activos y cada ciclo de sedimentación proporciona por lo general, rocas cada vez más pobres en elementos radiactivos. Se obtiene además una dispersión cada vez mayor de estos elementos. De ello resulta que el uranio y el torio de las rocas sedimentarias se halla en la mayoría de los casos, al estado difuso y que, excepción hecha de ciertos "pláceres" que se mencionan enseguida, no se encuentran por lo común, entre las rocas sedimentarias yacimientos uraníferos y de torio de gran concentración.

Las rocas ígneas contienen uranio y torio ya sea bajo forma de inclusiones microscópicas cuyos contenidos varía desde algunas

unidades por mil hasta algunas decenas de unidades por ciento, o bien al estado difuso en los minerales esenciales probablemente en reemplazo isomorfo de las tierras raras, de calcio o de algunos otros elementos, o para finalizar también, en fracturas intersticiales, llevados sin duda por inyecciones hidrotermales que son, por fuerza, posteriores a la cristalización de la roca.

Estas rocas ígneas sufren la erosión y se desmenuzan por la acción de los fenómenos que en forma somera se acaban de describir. Las inclusiones radiactivas y los compuestos que contienen uranio y torio, son arrancados del conjunto de la roca. Una parte del uranio y del torio puede ser también disuelta por las aguas, y todo ésto será arrastrado y depositado con los otros materiales.

### 5.2.3 Rocas calcáreas

Las rocas calcáreas son, tal vez, las rocas sedimentarias más comunes y cuya utilización se halla más extendida. La mayor parte de ellas está formada por elementos provenientes de rocas ígneas o sedimentarias cuyo calcio es arrastrado en forma de carbonato ácido de calcio por los cursos de aguas superficiales ó por aguas subterráneas, cargadas de anhídrido carbónico. La liberación de este anhídrido carbónico por variación de condiciones físicas o por ciertos organismos, tales como, bacterias o algas, provoca deposición de carbonato de calcio, que puede o no soldar entre sí elementos detríticos calcáreos, ó formar depósitos calcáreos de origen completamente químico.

Se hace notar que la presencia del ion carbonato obstaculiza considerablemente la precipitación o la adsorción del uranio.

Las medidas que se han hecho, muestran, en efecto, que los contenidos en uranio no pasan de 4 ó 3 ppm.

### 5.2.4 Rocas fosfatadas

El uranio que en 1934 fue descubierto en los fosfatos de Argelia, se encuentran por lo general en todos los fosfatos,

siendo así que el torio prácticamente no existe en ellos. Los fosfatos marinos son más ricos que los de origen continental. Estos, por otra parte figuran en número reducido y no están constituidos más que por el guano y algunos depósitos residuales.

El uranio se encuentra en ellos en estado difundido.

Generalmente se observa que el contenido en uranio crece con el contenido en materia fosfatada, pero con todo, no hay una proporcionalidad perfecta. Ensayos efectuados con nódulos fosfatados franceses demostraron que el uranio parecía estar contenido en la materia fosfatada, pero con concentraciones variables en un mismo nódulo.

El contenido en uranio varía igualmente en razón inversa del contenido de carbonato de calcio y parecería ligado estrechamente al contenido de materia orgánica, sin haber tampoco, proporcionalidad. Es posible, por otra parte, que el uranio sea atraído por una forma determinada de materia orgánica y no por todas, y los análisis solo miden el contenido total de materia orgánica.

El contenido medio global de uranio en los fosfatos varía en gran proporción según su origen, y he aquí, algunos valores extremos:

Tabla 5.2<sup>a</sup>

---

Marruecos.....	200	a	350 ppm
Túnez.....	90	a	250 ppm
Argelia.....	200	a	250 ppm
Egipto.....			100 ppm
Florida.....	10	a	1500 ppm
Francia.....	20	a	150 ppm

---

También hay que hacer notar que, en un mismo yacimiento, los contenidos no son constantes.

### 5.2.5 Rocas arcillosas

Las muestras de arcilla roja obtenidas en las grandes profundidades marinas han mostrado un sensible contenido radiactivo. Estudios más cuidadosos han probado que el equilibrio radiactivo no se cumplía y se encontró un contenido de radio anormal, del orden de los  $10^{-11}$  g de radio por gramo. Medidas de contenido de radio en agua de mar han dado valores entre 8 y 12  $10^{-17}$  g de radio por gramo de agua, siendo variables según el lugar de obtención y su profundidad.

La cantidad de uranio (medida con precisión por fluorimetría) es de orden de  $1.3 \times 10^{-9}$  g de uranio por gramo de agua y esta cantidad varía igualmente, pero en forma menor, según el lugar y la profundidad. De acuerdo con este valor, la cantidad de radio que debería existir en el agua de mar sería aproximadamente  $5 \times 10^{-16}$  g de radio por gramo de agua. Ahora bien, no se encuentra sino que  $0.8 \times 10^{-16}$  g por gramo de agua, es decir más o menos 1/5 ó 1/6. Hay entonces una gran parte del radio que se deposita en los sedimentos.

Se han efectuado búsquedas de contenido de radio, en función de la distancia a la superficie, pero, en lugar de encontrar como se esperaba valores regularmente decrecientes, se encontró, que la cantidad de radio crece hasta cierta profundidad para disminuir después. También, a veces, señala varios máximos, pero termina siempre por decrecer lentamente y bastante lejos de la superficie.

A 80 cm ó 1m de la superficie, por ejemplo, los contenidos en radio no pasan de  $10^{-13}$  g de radio por gramo de sedimento lo que corresponde, aproximadamente, a la cantidad de radio en equilibrio con el uranio que ahí se puede encontrar.

### 5.3 Radiactividad de las rocas del oriente de Coyoacán

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo cuatro, la delegación de Coyoacán en las partes bajas, norte y sureste se asienta en rocas de origen sedimentario; en las partes más elevadas, suroeste en rocas de origen volcánico. Dado lo anterior

y relacionandolo con lo explicado en este capítulo se puede decir que la concentración de uranio y de torio en las rocas sedimentarias es, en conjunto, extremadamente variable y resulta además, muy difícil de dar valores medios, algunas son muy pobres y su contenido en elementos radiactivos no alcanza 1ppm, mientras que otras, mucho más ricas, alcanzan valores de varias centenas de ppm. Estas variaciones se deben a un número muy grande de factores. En efecto, hay que tener en cuenta la naturaleza de la roca madre, su actividad, su distribución y la naturaleza de sus productos radiactivos, las distancias y dificultades de transporte, las condiciones físico-químicas existentes durante la sedimentación y, en fin, los aportes de radioelementos que han podido efectuarse por adsorción o remplazo isomórfico después de la deposición de los materiales clásticos.

Sin querer dar conclusiones demasiado generales, se puede sin embargo admitir que en conjunto, y exceptuando algunos depósitos excepcionales, las rocas sedimentarias son poco radiactivas y contienen uranio y torio en estado difuso.

## 6. PROCEDENCIA DEL RADÓN DEL MEDIO AMBIENTE E INTERIORES

### 6.1 Generalidades

El principal origen de la radiación natural es la gran distribución de los elementos radiactivos como el uranio y torio en la tierra. Todo tipo de rocas y suelos contienen estos elementos radiactivos en muy baja concentración.

La exposición a bajos niveles de radiación no producirá un inmediato riesgo a la salud, la exposición a altos niveles o exposiciones prolongadas, es probable que produzcan serios problemas de salud, como el cáncer pulmonar. No existe una rápida señal de advertencia de cáncer y éste se podrá desarrollar en el transcurso de 10 o 20 años posteriores a la exposición de un individuo.

Cuando el radio decae a radón, el rumbo y movimiento de éste a través de las rocas y suelo es totalmente libre hacia la superficie, ya que no es atraído por los otros elementos para formar compuestos.

El radio-226 (o más distante aún el uranio-238) se encuentra en todas las rocas y tierra. En el aire exterior la concentración del radón oscila entre 1 pCi/l a concentraciones típicas menores a 0.5pCi/l. Concentraciones mayores se pueden observar durante periodos breves, así como durante las inversiones térmicas, cuando una masa caliente de aire atrapa una capa más fría debajo de ella. En ciertos lugares se han encontrado, cerca de 4pCi/l. La concentración de radón en el aire en el interior de la casas, puede variar de 0.5 pCi/l a 2000pCi/l. El rango promedio aceptable de radón en los hogares es de 1 a 2 pCi/l El radón se encuentra en algunos materiales de construcción y en el agua. Los factores principales que afectan la concentración del radón en los hogares son las características de la construcción y los factores geológicos.

### 6.2 Radón en las rocas

Se ha estimado que la concentración promedio de uranio en la corteza terrestre es de 2 a 4 ppm o 0.7 a 1.7pCi/g. Existen variaciones del contenido de uranio en un mismo tipo de roca o

dentro de una misma roca, en la cual se pueden encontrar depósitos de uranio en una concentración de 1000 ppm. Las rocas comunmente enriquecidas en uranio son las rocas graníticas, carbonosas, fosfóricas y rocas contaminadas con uranio y localizadas cerca de las minas. Las concentraciones de uranio en las rocas de granito, son comunmente de 2 a 10 ppm, con un promedio, de 3-4 ppm. La relación entre el uranio y los niveles de radón en el granito, no ha sido establecida. En general, los esquistos negros (rocas carbonosas) tienen mayor probabilidad de contener uranio que otros esquistos a causa del contenido de carbón y de las condiciones de oxidación. Los esquistos negros uraniferos en promedio tienen 20 ppm de uranio, pero pueden llegar a contener más de 250 ppm. Estos esquistos negros, especialmente los esquistos fosfóricos, pueden producir altas concentraciones de radón, debido a su amplia distribución y contenido de uranio. En general contienen gran cantidad de uranio, y 4ppm debe de ser considerada como la concentración mínima, la cual da origen a un moderado nivel de radón.

A causa de que su comportamiento químico el uranio tiene afinidad por los fosfatos y las rocas fosfóricas frecuentemente contienen elevadas concentraciones de uranio, por lo que es común encontrar en promedio 100 ppm de uranio.

Las rocas carbonosas (calizas y dolomitas) usualmente tienen en promedio 2 a 3 ppm de uranio.

En general la arena no contiene compuestos uraniferos.

Las rocas que contienen menor cantidad de uranio son las lavas basálticas o sus equivalentes metamórficas y las rocas que tienen composiciones similares.

Las fracturas o fallas de las rocas pueden aumentar potencialmente la concentración de radón por tener más vías de ascenso. Las fracturas o fallas se asocian algunas veces con concentraciones elevadas de radón, por la relación entre el uranio con los depósitos de fluidos en el interior de las fracturas. Las fracturas pueden afectar tanto a los suelos como a los pozos, y las rocas.

### 6.3 Radón en los suelos

Los suelos juegan un importante rol en la ocurrencia del radón, porque muchos provienen inmediatamente de las rocas por lo que tienen composiciones similares a ellas. La asociación de suelo-roca, puede ser un origen potencial para el radón.

Los suelos contienen de 1 a 3 ppm de uranio y una cantidad similar de radiactividad, pero estos niveles pueden variar, dependiendo de que roca fue formado y de las condiciones ambientales durante el tiempo de su formación.

Los niveles de radio, en los Estados Unidos, son de alrededor de 1 pCi/g, sin embargo esta cantidad de radio puede causar problemas.

Se ha calculado considerando una concentración normal de 1 pCi/g de radio en el suelo que ésta es capaz de producir de 200 a 1000 pCi/l de radón en él, en condiciones típicas. En resumen, el radón es transportado a través del suelo dependiendo de la humedad del mismo.

La permeabilidad del suelo, juega también un papel importante en los niveles de concentración del radón en interiores, ya que pasa a través de él. La alta permeabilidad del suelo produce altos niveles de radón en interiores; mientras que la baja permeabilidad retarda el transporte de radón al interior de las casas. Las concentraciones altas de radio en el suelo tiende a incrementar los niveles de radón. Teóricamente es posible que una fractura produzca tal vez, bastante radón en el interior de las casas en áreas con baja permeabilidad.

### 6.4 Radón en agua

Otra fuente de radón al interior de las casas es el agua. Se estima que el agua contribuye únicamente con un 7% del radón que se encuentra en el aire del interior de las casas.

Algunas actividades que utilizan agua en una casa liberan radón, tales como, la ducha, lavado de ropa, y w.c.

En casas que son abastecidas por agua de la red pública ésta debe ser aireadas (por tratamientos fáciles) antes de llegar y por lo tanto tienen niveles relativamente bajos de radón. Casas con

otra fuente de agua como por ejemplo, pozos privados, pueden contener niveles extremadamente elevados de radón.

En los Estados Unidos la concentración de radón en las tomas de agua para la población es cerca de 240 pCi/l. Los niveles más altos se han encontrado en pozos privados, donde alcanzan una lectura de 2,000,000 pCi/l.

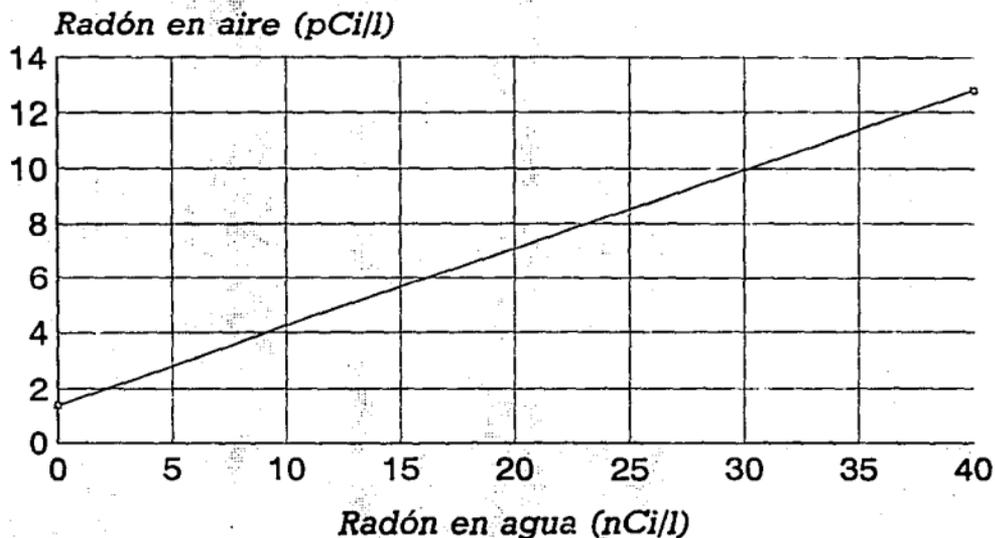
Se han desarrollado, modelos que relacionan la concentración de radón en agua con los niveles de radón en aire. Los modelos estiman que 10,000 pCi/l de radón en agua conducen a 1 pCi/l de radón en el aire interior de una casa, lo cuál es un nivel normal. Fig. ( 6. 1 )<sup>20</sup>

### 6.5 Radón en los materiales de construcción

El radón en interiores está también relacionado con los materiales de construcción, (normalmente bajos niveles). La madera tiende a emitir los más bajos niveles de radón, mientras el cemento, los ladrillos y bloques emiten más, (han sido pocos los casos en que se han encontrado niveles altos de radón en materiales de construcción en los Estados Unidos). En la tabla (6.2)<sup>34</sup> se muestran los niveles típicos de Ra-226 en roca, arena y arcilla. El Ra-226 es la fuente de las emisiones gaseosas de Rn-222. La tabla (6.2)<sup>34</sup> muestra la tasa de emanación de Rn-222 (pCi/m<sup>2</sup>s) para una concentración dada de Ra-226 (pCi/m<sup>2</sup>). La difusión del Rn-222 desde los materiales de construcción está influida por el contenido de humedad del material, su densidad, la presencia de selladores, la naturaleza del material en sí y la naturaleza de las sustancias con las que esté mezclado. El escape fraccionario (pCi que se escapan por pCi producido) es otra manera de medir la liberación del Rn-222, y, es usualmente del orden del 1% para los materiales de construcción de las paredes. Tanto la tasa de emanación como el escape fraccionario son función del espesor del material. El radón se puede difundir también a través del terreno, los muros de los sótanos y los pisos en contacto con suelos que contengan materiales radiactivos. La tasa promedio de emanación del Rn-222 para el suelo es de 0.42 pCi/m<sup>2</sup>s con una variación de  $6 \times 10^{-3}$  a 1.4 pCi/m<sup>2</sup>s.

# RADON EN AIRE CONTRA RADON EN AGUA

En 70 casas de Maine



( Hess et al. 1983. J.Health Physics Society )

Fig. 6.1

TABLA 6.1<sup>34</sup> Concentración de Ra-226 en materiales de construcción

<u>Tipo de material de construcción</u>	<u>País</u>	<u>No de muestras</u>	<u>Concentración promedio Ra-226pCi/g de material</u>
Ladrillos	Alemania	132	2.6
Ladrillos	Suecia	21	2.6
Ladrillos rojos	U.R.S.S.	55	1.5
Ladrillos de arcilla	Reino Unido	23	1.4
Ladrillo de limo rojo	Alemania	23	7.6
Concreto	Alemania	69	1.8
" pesado	Suecia	15	1.3
" aerado sin esquistos	"	22	1.5
" de alumbre			
" pesado	U.R.S.S.	87	0.9
" ligero	U.R.S.S.	16	2.0
" ligero	Reino Unido	5	2.0
Cemento	Reino Unido	19	1.2
Cemento	Suecia	8	1.5
Cemento	U.R.S.S.	7	1.2
Masilla natural	Alemania	23	<0.5
Masilla natural	Suecia	4	0.09
Masilla	U.R.S.S.	1	0.25
Masilla natural	Reino Unido	69	0.6
Yeso fosfatado			
" de la apatita	Alemania	2	1.5
" de la fosforita	Alemania	39	16.0
Yeso fosfatado	Reino Unido	6	21.0
Yeso fosfatado	U.S.A.	-	40.0
Granito	Alemania	54	2.6
Granito	U.R.S.S.	2	3.0
Adoquines	Reino Unido	7	2.4
Piedra pómez	Alemania	20	3.0

Toba	U.R.S.S.	13	2.8
Caliza y mármol	Reino Unido	20	<0.5
Agregado de roca	Suecia	296	1.3
Agregado de roca	Reino Unido	3	1.4
Grava y arena	Alemania	50	<0.4
Arena natural	U.R.S.S.	32	0.63
Escorias de altos hornos	U.R.S.S.	29	1.8
Madera o leña	Suecia	1	-
Lana de roca o sílice	Suecia	2	0.4
Lana de roca o sílice	Reino Unido	2	despreciable
Agregado de peso ligero	Suecia	10	3.9
Cenizas ligeras	Alemania	28	5.7

(1977)

TABLA 6.2<sup>34</sup> Tasa de emanación del radón para diversos materiales

Material	Tasa de emanación del Rn-222 por concentración unitaria de Ra-226 (pCi/m <sup>2</sup> s por pCi/g)	Observaciones
Derivados del yeso	0.01	Tabiques interiores de 76mm de espesor
Derivados del yeso	0.001	Plafones de 13 mm de espesor
Concreto	0.005	De 10mm de espesor
Suelos	0.5	Espesor "infinito"
Concreto ligero	0.02	20cm de espesor
Concreto pesado	0.01	8cm de espesor

En realidad hay pocas casas que han sido construidas con materiales con cantidades significativas de radio. Ejemplo de esta situación, son casas construidas con materiales contaminados de radio o uranio, con fosfatos y uraniferosos.

En algunas casas, donde hay rocas en la construcción que contengan radio, se incrementarían drásticamente los niveles de radón cuando circula el aire caliente proveniente de los sistemas de calefacción o por la chimenea.

El contenido de radio de las rocas que se utilizan para las chimeneas fue de 0.35pCi/g con una tasa de emanación de 16pCi/l. Sin embargo, se debe hacer notar que los resultados de esta observación fueron encontrados en viviendas típicas de los Estados Unidos sin acumulación de calor en las capas de las rocas.

### 6.6 Radón en casas habitación

La gran mayoría de los materiales que el hombre utiliza en la construcción de casas habitación proceden de elementos que existen en la corteza terrestre, los cuales son radiactivos en mayor o menor grado, dependiendo de su naturaleza y procedencia. Los isótopos radiactivos presentes en los materiales de construcción son principalmente los del uranio, del torio, los descendientes de ambos y el potasio-40. Como consecuencia, el hombre que habita en el interior de edificios, se haya sometido a radiación, cuyo valor depende del tipo de materiales empleados. A través del tiempo, el ser humano ha aumentado su tiempo de permanencia en los edificios. Estudios recientes realizados muestran que los empleados y las amas de casa pasan 85 y 90% del día, respectivamente, en interiores de edificios. En los países con climas extremos, donde se aíslan los recintos para evitar cambios de temperatura, el radón se incorpora al ambiente del recinto no ventilado y aumenta la concentración de sus descendientes. Las fuentes de radón en el interior de casas son como ya se dijo, el suelo y rocas sobre las cuales esta contruida la vivienda, en el agua, el gas doméstico y los materiales de construcción.

El radón del suelo puede entrar a la vivienda por dos mecanismos de transporte: difusión molecular, y convección. Estudios científicos han mostrado que de los mecanismos, la

convección es la que hace que las viviendas muestren niveles elevados de radón en su interior.

La difusión molecular es el movimiento de una especie molecular que va desde una área de alta concentración a una de baja concentración a presión constante. El movimiento en sí mismo es causado por el movimiento térmico de las moléculas. Esto es una indicación de que la difusión no es la causa probable de altos niveles de radón en interiores.

La convección de gases, es el movimiento de una especie molecular de una área de alta presión a una de baja presión. Por esta razón el movimiento de convección es también referido como el empuje o flujo de la presión. Como la presión dentro de una casa es más baja que la presión fuera de ella, el radón en el suelo entrará a la casa por el empuje o flujo producido por la presión.

El flujo de la presión está influenciado principalmente por la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior así como por el uso de mecanismos de ventilación, como ventiladores y sopladores. En invierno cuando al calentarse la casa, la temperatura interior es más alta que la temperatura en el exterior, la ligereza del aire más caliente en el interior crea una tendencia a que el aire del interior sea desplazado por el aire más frío del exterior. Esta tendencia es llamado efecto chimenea por ser este efecto, similar al movimiento del aire que ocurre en una chimenea. A causa del efecto chimenea el radón que se encuentra en el suelo es atraído al interior de la casa por la baja presión en los muros y pisos.

Algunas veces los equipos de ventilación de la vivienda provocan una presión diferencial entre el exterior y interior. Los ventiladores en las cocinas, los baños y los closets atraen el aire que está fuera de la casa. El efecto neto de este proceso es bajar la presión en el interior lo que ocasiona que el radón del suelo sea atraído hacia dentro.

La presión barométrica es otro factor natural que puede afectar el flujo del gas del suelo al interior de la estructura.

El gas del suelo puede entrar a una casa, por donde quiera que existan aberturas; en toda construcción existen aberturas. En general, el radón puede colarse al interior de la casa a través del piso, grietas en los pisos y paredes huecas. Resumiendo, la

ruta principales de entrada de radón en una casa son:

- A: Grietas en la losa de concreto
  - B: Espacios entre los ladrillos en las paredes o en la unión de los bloques huecos en la cimentación de la casa
  - C: Poros y grietas en bloques de concreto
  - D: Por la unión entre muros y pisos
  - E: Pisos de tierra
  - F: Por el drenaje que esté abierto
  - G: Uniones entre los tabiques y la mezcla de cemento
  - H: Por huecos provocados por la entrada de la tubería
  - I: Aberturas de las estructuras de paredes huecas
  - J: Materiales de construcción, como el uso de algunas rocas
  - K: Por el agua
- Ver la figura ( 6. 2 )<sup>20</sup>

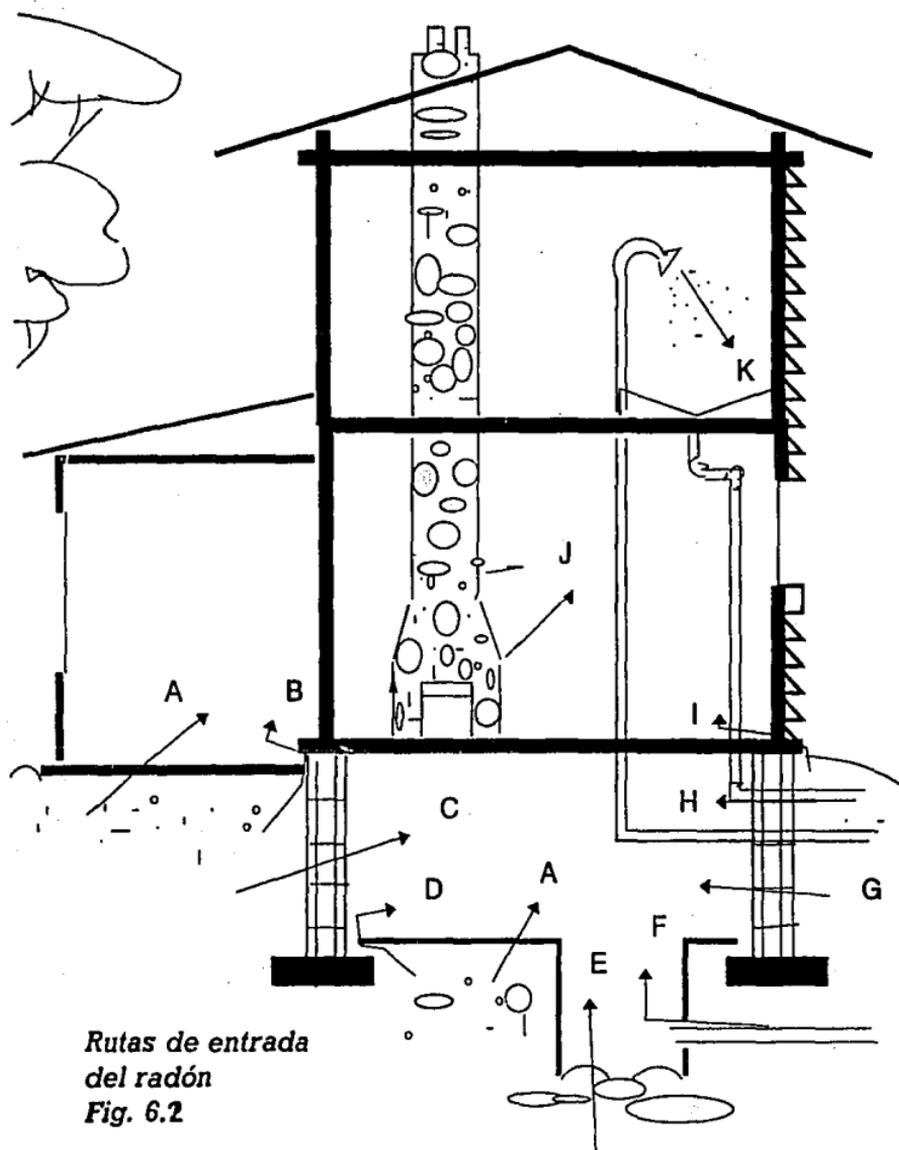
#### 6.7 Variaciones en la concentración de radón en una misma casa

A causa de que el gas proveniente del suelo es el mayor contribuyente de radón en interior de las viviendas, usualmente en los sótanos se encuentran concentraciones más altas (en la Ciudad de México casi no se encuentran sótanos). En la tabla ( 6. 3 )<sup>20</sup> se muestran las concentraciones de radón en una casa típica.

Comparación entre las concentraciones de radón,

Tabla 6.3<sup>20</sup> en diferentes lugares de una misma casa, en pCi/l

Lugar	No de mediciones	Promedio	Media
Estancia	280	1.7	1.18
Cocina	177	2.5	1.0
Comedor	68	1.8	1.30
Recámaras	189	3.4	9
Sótanos	417	7.1	3.19
Vestíbulo	36	2.7	1.23
Cuarto de recreo	286	2.7	1.52



*Rutas de entrada  
del radón  
Fig. 6.2*

## 7. EFECTOS A LA SALUD PRODUCIDOS POR EL RADON

### 7.1 Generalidades

El principal peligro para la salud, es el incremento en el riesgo de cancer pulmonar. El riesgo más significativo proviene de dos de los cuatro productos del decaimiento del radón, ya sea cuando son directamente inhalados hacia los pulmones o cuando son transportados por las partículas de aire. El principal riesgo se debe a las partículas alfa, que tienen corto alcance; estas partículas depositan más energía en una corta sección del tejido humano causando un incremento en el riesgo de cancer. Los productos de decaimiento del radón cuando se respiran ya dentro de los pulmones pueden depositarse en los tubos bronquiales; las partículas radiactivas pueden introducirse al torrente sanguíneo o bien ser tragadas y causar exposiciones en otros órganos.

Se ha encontrado relación entre la exposición al radón y el cancer pulmonar y estomacal en los mineros de los Estados Unidos. Los datos de las exposiciones de los mineros en las minas subterráneas, han permitido la estimación de las muertes en exceso por cancer pulmonar. Se han estimado valores de 6 a 19 muertes por millon de personas al año/WLM. Se suman a las muertes de los mineros las de ocupantes de construcciones habitacionales hechas de piedra.

Asumiendo una incidencia de 5 por millon de personas/WLM y una exposición acumulada de 10 WLM, en Estados Unidos con una población de más 200 millones es posible que se encuentren 10,000 casos de cancer de pulmón por año debidas a la exposición al radón.

Tabla 7.1<sup>24</sup> Exposición al radón y su descendencia

<u>Localización</u>	<u>Exposición (WLM)</u>
Mineros de uranio	100-1000
Interiores	10
Exteriores	<1

## 7.2 Radiación Ionizante.

Las radiaciones ionizantes, son las emisiones radiactivas y algunas otras radiaciones de alta energía que ionizan la materia que encuentran en su trayectoria; los iones son partículas cargadas en las que el número de electrones no es igual al número de protones. El calor y la luz visible no están consideradas como radiaciones ionizantes pero los rayos X y gamma sí.

Cuando partículas de alta velocidad u ondas electromagnéticas pasan a través de un medio, golpean a los electrones de los átomos y moléculas, a lo largo de sus orbitales. Los átomos neutros o la molécula que han perdido sus electrones son llamados iones positivos. Los electrones perdidos pueden unirse a los átomos neutros o a moléculas convirtiéndose en iones negativos o bien causar una ionización adicional en un proceso secundario de ionización.

Una partícula beta con 2 MeV de energía pueden penetrar cerca de 1 cm en tejido humano. A lo largo de este centímetro, la partícula beta produce regularmente 60,000 pares de iones. Sin embargo, las partículas más ionizantes son las partículas alfa.

Una típica partícula alfa de 5.5 MeV de energía puede penetrar cerca de 40 micrones, o 4 milésimas de centímetro, en un tejido suave. Esta corta distancia representa la longitud de 4 células de un tejido. La partícula alfa pierde toda su energía, habiendo producido cerca de 160,000 pares de iones. Esto es alrededor de 40,000 pares de iones por cada célula comparado con 60 pares iónicos producidos por la partícula beta de 2 MeV.

La energía depositada por unidad de longitud es también referida como la transferencia lineal de energía (Linear Energy Transfer) o LET. Las partículas alfa, protones y neutrones son clasificados como radiaciones de alto-LET por su alta producción de pares de iones.

### 7.3 Etapas de los efectos biológicos de la radiación

El mecanismo de los procesos de interacción de la radiación ionizante con la materia viva es complejo. La serie de reacciones causadas por las radiaciones ionizantes al producir un efecto biológico puede ser descrita en cuatro etapas: la primera tiene una duración del orden de una cuatrillonésima de segundo ( $10^{-24}$ ) después de la incidencia de la radiación. En esta etapa ocurren los fenómenos físicos de ionización y excitación de los átomos del cuerpo humano debido a la absorción de energía de la radiación y se le denomina efecto primario. En la ionización, un electrón es expulsado del átomo mientras que en la excitación, el electrón gana energía pasando a una órbita más energética. Durante la segunda etapa, llamada fisicoquímica, se rompen los enlaces químicos de las moléculas dando lugar a la formación de radicales libres. Esta etapa también tiene una duración corta, del orden de una millonésima de segundo ( $10^{-6}$ ). La tercera etapa tiene una duración variable, desde algunos segundos hasta semanas, y es una etapa química durante la cual los radicales libres que se formaron en la etapa anterior, los cuales son muy reactivos, se ligan con importantes moléculas de ADN y otras dañándolas. En la cuarta etapa ocurren efectos bioquímicos y fisiológicos que producen alteraciones morfológicas y/o funcionales, y su duración también es variable desde horas hasta años.

#### 7.3.1 Efectos a nivel celular

La irradiación de las células puede dar lugar a cualquiera de los siguientes efectos (Sanders and Kathren, 1983).<sup>23</sup>

- muerte celular por mitosis anormal
- muerte celular previa a la mitosis (muerte en la interfase)
- mitosis anormal seguida por reparación
- mitosis anormal subletal con replicación del daño en generaciones subsecuentes

- síntesis retardada del ADN o mitosis prolongada
- cambios en el protoplasma celular durante la mitosis

La parte más sensible de las células es el material cromosómico que se encuentra en el núcleo. La radiación puede producir rompimientos cromosómicos letales o diversos reacomodos o aberraciones tales que incapacitan a las células para reproducirse o inducen mutaciones genéticas o somáticas las cuales pueden causar enfermedades o efectos teratogénicos (anomalías de formación)

#### 7.4 Los emisores alfa

En su decaimiento radiactivo muchos radionúclidos emiten partículas alfa. Son emisores alfa el radón y su descendencia. Su vida media y la energía de emisión de sus partículas alfa son enlistados en la tabla ( 7. 2 )<sup>20</sup>

Tabla 7.2<sup>20</sup> Emisores alfa, partiendo de la progenie del radón

<u>Serie</u>	<u>Elemento</u>	<u>Vida media</u>	<u>Energía alfa (MeV)</u>
U-238	Rn-222	3.82 días	5.49
	Po-218	3.05 min	6.00
	Po-214	164 $\mu$ seg	7.69
U-235	Rn-219	4.0 seg	6.82
	Po-215	1.78 mseg	7.38
	Bi-211	2.15 min	6.62
Th-232	Rn-220	55.0 seg	6.29
	Po-216	0.15 seg	6.78
	Bi-212	60.6 min	6.05
	Po-212	0.3 $\mu$ seg	8.78

Para penetrar la piel las partículas alfa necesitan por lo menos 7.5 MeV de energía. Esto es, porqué en la superficie de la epidermis se forman hojuelas por la muerte de células sin núcleo.

Entre los emisores alfa enlistados en la tabla ( 7. 2 )<sup>20</sup> únicamente el Po-214 (7.69 MeV) y el Po-212 (8.78 MeV) emiten partículas alfa con suficiente energía para penetrar la piel. En la minas de uranio donde los niveles son muy altos, se sospecha que el Po-214 es la causa del cancer en la piel entre los mineros.

Siendo un efectivo agente ionizante una partícula alfa, pierde también energía fácilmente, en el aire cerca de 1 MeV por centímetro. Debido a que nuestro tejido es impermeable la energía de las partículas alfa apenas penetra 1 cm de la superficie de la piel. Debido a esto, y por no haber bastante Po-214 no hay riesgo en el medio ambiente de que se produzca cancer en la piel.

Se requieren únicamente 5.5 MeV de energía para penetrar un espesor típico de 40 micrones. Todos los emisores de partículas alfa enlistados en la tabla ( 7. 2 )<sup>20</sup> pueden dañar, si el decaimiento radiactivo ocurre dentro del cuerpo.

### 7.5 Irradiación interna.

La irradiación externa no afecta al tejido del cuerpo excepto, cuando, la concentración de emisores alfa es muy grande, como en las minas de uranio. Sin embargo, cuando los emisores alfa son ingeridos o inhalados, ocurre una irradiación interna. El suave tejido gastrointestinal y el pulmonar pueden ser dañados por las partículas alfa emitidas por el radón. En interiores, solo el Rn-222 es considerado un riesgo a la salud. Esta consideración se debe principalmente a que las vidas medias del Rn-219 y Rn-220 son cortas y no tienen mucha oportunidad de entrar al interior de las casas antes de desintegrarse.

### 7.5.1. Ingestión de radón

Los emisores alfa son usualmente ingeridos, cuando agua rica en radón, es consumida. En sistemas públicos de abastecimiento de agua las concentraciones del radón son generalmente bajas, con un promedio de cerca de 200 pCi/l (EPA 1985),<sup>7</sup> y ésta es relativamente inofensiva. La concentración de radón en pozos privados es generalmente más alta. Se ha encontrado en varios estados de los Estados Unidos, como Nueva Inglaterra y Main, concentraciones de cerca de 6000 pCi/l (EPA 1985)<sup>7</sup>.

Cuando el agua con radón es consumida, algo del radón se difunde a través de las paredes del estómago y del intestino y encuentra un camino al torrente sanguíneo. Eventualmente, el radón es acarreado al pulmón y exhalado.

Con la ingestión del radón, las células del pulmón son irradiadas por partículas alfa por dos vías: cuando el radón alcanza el tejido del pulmón después de ser acarreado a través de las vías gastrointestinales, y, cuando es arrojado fuera del tejido pulmonar y el interior del espacio alveolar durante el ciclo respiratorio. Sin embargo esto no es de gran importancia comparado con la cantidad de radón inhalado. Con un modelo teórico se calculó la dosis por ingestión de radón y fue de 2 a 3 órdenes de magnitud más bajos que las resultantes por la inhalación de la progenie del radón (Crawford-Brown 1987).<sup>4</sup> Una de las razones es que la cantidad de agua consumida es mucho menor que la cantidad de aire inhalado.

La exposición de las paredes del estómago al radón y su descendencia se considera como no peligrosa por la presencia de la comida; una partícula alfa puede ser fácilmente frenada por una capa de comida de un espesor de 2 milésimos de pulgada. Aunque puede haber riesgos para algún órgano interno, sin embargo, no hay evidencia directa conocida de que el radón o su descendencia aumente la incidencia de cancer gastrointestinal.

### 7.5.2. Inhalación del radón

Se piensa que la inhalación de radón y su descendencia es la causa del cancer de pulmón en los mineros. En el sistema respiratorio, el aire es llevado a través de la traquea a la ramificación del árbol bronquial y de ahí a los alvéolos pulmonares. El hombre inhala 400 a 500 litros de oxígeno por día y elimina de 400 a 450 de anhídrido carbónico; por los pulmones pasan alrededor de 8000 litros de sangre y 10,000 litros de aire. Mucho del aire que entra, contiene partículas con la progenie de radón. Esto es porque la progenie del radón no es eléctricamente neutra cuando se produce en el aire y por lo tanto, tiene una tendencia a agregarse a las partículas del mismo y a otras superficies; ésta es la forma como la descendencia del radón es transportada al pulmón.

El epitelio bronquial está formado principalmente por células ciliares cuyo espesor constituye numerosas glándulas secretoras de "mucus" y bajo de ellas las células basales. El mucus es usado para limpiar las sustancias extrañas depositadas en el tejido. Las células basales del pulmón son consideradas por algunos científicos, como el blanco de las partículas alfa. Estas observaciones se basan en mineros con cancer pulmonar.

El espesor del epitelio bronquial es de 15 a 80 micrones y el de la capa de mucus de cerca de 7 micrones. Si la combinación del epitelio incluyendo al mucus y células ciliares es de 40 micrones, la célula basal puede ser alcanzado por una partícula alfa de 5.5 MeV. La vulnerabilidad de las células basales depende del espesor del epitelio y también de la talla de las partículas inhaladas, de su localización en los bronquios y de la acción del mucus que afectará la vulnerabilidad de las células basales.

Se piensa que todas las partículas alfa emitidas por el Rn-222, Po-218, y Po-214 son capaces de penetrar un espesor de 40 micrones en el tejido, pero únicamente los dos isótopos del polonio son los de mayor efecto. El Rn-222, se cree que es el

menos peligroso porque el radón es inerte y su vida media es más larga comparada con la de los otros. Además la mayor parte del radón al ser inhalado y habiendo atravesado los tejidos para llegar al torrente sanguíneo, es rápidamente exhalado antes de que dañe las células basales. En contraste la descendencia del radón es de corta vida, por lo tanto tiene muy buena oportunidad de emitir partículas alfa antes de que sea eliminada por el mucus.

## 2.6 Cáncer pulmonar debido al radón

Hay fuerte evidencia que enlaza el cáncer pulmonar y la inhalación del radón y su progenie. Estas evidencias provienen de estudios epidemiológicos en mineros trabajando en tneles subterráneos y de estudios experimentales usando animales.

Hace tiempo entre los mineros del uranio en las montañas de Erz cerca de Schneeberg en Alemania y Joachimsthal en Checoslovaquia se conoció del sufrimiento y muerte a causa de una enfermedad llamada, *enfermedad de las montañas*. A fines de 1800 y ya cerca de 1900, ocurrieron alrededor de 400 muertes por cáncer de pulmón entre los mineros de Schneeberg; el promedio del nivel de radón en la mina, fué estimado en 2,900 pCi/l y en ocasiones más alto. Los niveles de la progenie del radón, fueron estimados en un rango de 10-180 WL. Entre 1929-1940 los reportes de las autopsias mostraron que cerca del 50% de las muertes de los mineros de Joachimsthal fueron a causa de cáncer de pulmón. En el período 1939-1943, fueron diagnosticados 180 casos más de cáncer de pulmón. Los niveles de radón en Joachimsthal fueron estimados similares a los de las minas de Schneeberg. Al principio la incidencia de cáncer pulmonar no fué achacada al radón sino hasta el año de 1924.

Al inicio de los años 1950, las muertes por cáncer pulmonar fueron estudiadas sistemáticamente entre los mineros y se identificó a la progenie del radón en el aire de las minas como la causa de la alta proporción de cáncer pulmonar. En la tabla

(7.3)<sup>20</sup> se muestran los datos de algunos grupos representativos. Los casos menos serios se pueden ver claramente de la relación entre las muertes observadas y las esperadas.

Tabla 7.5<sup>20</sup> Mortalidad por cancer pulmonar entre mineros

Acumulados WLM	No de muertes		Relación observado/esperado
	observado	esperado	
Colorado E.U. (minas de uranio)			
<119	3	3.96	0.76
120-239	7	2.24	3.13
240-359	9	2.24	4.01
360-599	19	3.33	5.71
600-839	9	2.62	3.44
840-1,799	40	5.35	7.46
840-1,399	115	3.7	30.7
>1399	45	1.0	43.6
Checoslovaquia (minas de uranio)			
<50	6	3.0	2.0
50-99	39	12.5	3.1
100-199	157	37.1	4.2
200-299	104	18.5	5.6
300-399	57	9.5	6.0
400-499	42	7.2	5.8
500-599	33	4.1	8.0
>599	46	5.5	8.4
Noruega (mineros)			
0	0	1.73	0
1-38	3	0.53	6.0
40-158	4	0.58	6.9
160-238	2	0.07	28.6
>238	3	0.08	37.5

(Lao 1990)<sup>20</sup>

En esta tabla el número esperado de muertes por cancer pulmar fué calculado como si el mismo grupo de mineros no trabajara en las minas y hubiera vivido en un lugar de ambiente normal como la población en general. En la misma tabla se puede ver que una dosis acumulada alta en un grupo, dará una alta relación entre lo observado y lo esperadó; ésto es una evidencia sólida del papel del radón en el aumento de la incidencia de cancer pulmonar. Se debe hacer notar que en la tabla en los E.U. y Checoeslovaquia se trata de minas de uranio y en Noruega son minas que no son de uranio.

Evidencia de la relación entre el radón en el medio ambiente, y el incremento de cancer pulmonar fué encontrada en los estados de Maine, E.U. especialmente en la parte sur en donde el agua subterránea, y por tanto los pozos contienen usualmente altos niveles de radón y radio debido a la formación geológica.

## 7.7 Evaluación del riesgo por radón en los pulmones

Si de las mediciones experimentales resulta una concentración de más de 200 pCi/l o 1 WL se deberán hacer más muestreos para corroborar, los valores obtenidos y si estos dan las mismas concentraciones se deberán tomar medidas correctivas inmediatamente (mencionadas en el capítulo ocho).

Si la concentración de radón está entre los 20 y 200 pCi/l, las medidas correctivas de mitigación deberán ser tomados dentro de los siguientes seis meses.

Este rango es considerado por arriba del promedio de la exposición a radón en estructuras residenciales.

Si la concentración está entre 4 y 20 pCi/l, las exposición en este rango es considerada por arriba del promedio para estructuras residenciales y se deberán tomar medidas de mitigación dentro de los siguientes doce meses. Si la concentración está abajo de los 4 pCi/l, las exposición en este rango es muy pequeña, aún cuando puede presentar algún riesgo para la salud.

Se recomienda que se realice una medición por año.

En la siguiente tabla se muestra como el radón afecta las personas que han vivido 70 años en una casa con una concentración determinadas de radiación.

Muertes por radón <sup>a</sup>		
WL	pCi/l	Muertes
0.02	4	entre 1 a 5 de 100
0.1	20	entre 6 a 21 de 100
1.0	200	entre 44 a 77 de 100

En 100 individuos que hubieran vivido durante 70 años en una casa con niveles de radón de cerca de 200 pCi/l el número de muertes por cancer pulmonar sería de 44 a 77.

Otra vía para evaluar el riesgo de muerte por cancer asociado con las exposición al radón, es comparar este con el peligro que representa otras actividades. En la tabla siguiente se muestra una comparación del riesgo de muerte por cancer pulmonar a diferentes niveles de radón, con el riesgo de desarrollar cancer de pulmón por fumar y por exposición a rayos X.

### Evaluación de riesgos por radón a los pulmones<sup>a</sup>

WL	pCi/l	Estimación de muertes por cancer de pulmón debidas a las exposición a Rn (de 1000)	Peligro comparable
1.0	200	440-770	más de 60 cigarros/día 4 cajetillas/día
0.5	100	270-630	20,000 tomas de Rayos X/año
0.2	40	120-380	2 cajetillas/día
0.1	20	60-210	1 cajetilla/día
0.05	10	30-120	5 cigarros/día
0.02	4	13-50	200 tomas de Rayos X/año
0.01	2	7-30	
0.005	1	3-13	
0.002	0.2	1-3	20 tomas de Rayos X/año

## 7.8 Concentraciones estándar recomendadas para la radiación en casas habitación

### 7.8.1 Concentraciones estándar de radón recomendadas

En la tabla<sup>2</sup> siguiente se muestran las concentraciones recomendadas por varias organizaciones internacionales.

#### Concentración estándar de radón recomendada para casas habitación

Organización	Recomendación de niveles		Radón	Comentarios
	máximos de radón			
National Council on Radiation, Protection and Measurement.	0.04	WL	8 pCi/l	Recomendado para la población en general.
Bonneville Power Administration.	0.025	WL	5 pCi/l	Recomendado para residencias.
Environmental Protection Agency.	0.02	WL	4 pCi/l	Para interior de casas.
American Society of Heating, Refrigeration, and Air conditioning Engineers (ASH-RAE).	0.01	WL	2 pCi/l	Recomendado para construcciones comerciales y residenciales.
Sweden.	0.11	WL	22pCi/l	Construcciones ya existentes.
	0.05	WL	11pCi/l	Para casas remodeladas.
	0.02	WL	4 pCi/l	Para casas nuevas.

### 7.8.2 Niveles de radiaciones gamma encontrados habitualmente en casas habitación

Para la radiación gamma se ha encontrado que los niveles normales en el ambiente son de 12-16  $\mu\text{R}/\text{h}$  o de 8.64-11.52mR/mes.

## 8. MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LOS NIVELES DE RADON

### 8.1 Construcción de nuevas casas

El riesgo potencial de tener niveles elevados de radón puede ser reducido probablemente, por el dueño y los constructores de una nueva casa tomando algunas decisiones al seleccionar un sitio en particular y al utilizar ciertas técnicas durante la construcción que minimizen la entrada del radón.

#### **8.1.1 Selección del sitio.**

Un hecho importante en la selección de un posible sitio para la construcción o no construcción es conocer las características geológicas de la tierra; por ejemplo, se puede esperar un alto potencial de contaminación en casas construidas sobre depósitos de uranio o torio. Adicionalmente, se puede esperar una contaminación más alta en terrenos que tienen una alta permeabilidad, por lo que es muy importante hacer un estudio geológico del terreno. Las rocas de granito son las que tienen mayor concentración de uranio y como ya se mencionó el uranio tiene afinidad química por los fosfatos y las rocas fosfóricas, así como por las rocas de carbonato. La construcción sobre sitios con subsuelo de arcilla es garantía de que los niveles de radón estarán dentro de los rangos aceptables; es probable que este tipo de subsuelo tenga un potencial significativamente más bajo de emanación de radón que un subsuelo de arcilla/grava. Adicionalmente, se deben evitar suelos inestables que estén propensos a agrietarse por no tener una alta capacidad de retraerse e hincharse.

#### **8.1.2. Modificación del sitio**

La modificación del sitio seleccionado antes de efectuar la construcción de una nueva vivienda puede ayudar a limitar la entrada de radón.

Rogers y colaboradores y Fitzgerald y colaboradores han

desarrollado algunas recomendaciones para la construcción de nuevas viviendas sobre minas agotadas de uranio o cerca de ellas y en terrenos con fosfatos<sup>p.24</sup>. Ellos mencionan que removiendo enteramente la tierra, remplazándola y recubriéndola se pueden abatir los niveles de emanación de la tierra, y la efectividad depende de la profundidad o espesor del relleno. El efecto de esta medida en un sitio con fosfatos puede ser observado en la figura (8.1)<sup>23</sup>. Un relleno de 10 pies por ejemplo, causa una reducción del 80% de la emanación.

### 9.1.3. Construcción

La exposición al radón puede ser reducida por una buena elección del tipo de estructuras de cimentación. Se ha encontrado por ejemplo en Florida que en terrenos con fósforo las casas con sotano tienen un promedio de 0.2 WL, las casas con cimientos de losas o gradas tienen un promedio de 0.014 WL y aquellas con cimientos de espacios deslizables 0.010 WL y 0.008 WL. Aún cuando estos datos no son significativos existen razones teóricas para explicar esto. Los sótanos, por ejemplo, tienen una gran área en íntimo contacto con la tierra, contrario de las casas móviles que al no tener cimientos, tienen un contacto mínimo con la tierra. En las casas con cimientos con losas o gradas el contacto con la tierra está limitado. De los tres tipos de cimientos son los de espacios deslizables los que tienen menos contacto con la tierra y teóricamente menor potencial de conducir el gas que viene de la tierra. El potencial de emanación de radón está en función del grado de ventilación natural existente. Como los espacios deslizables son completamente cerrados, restringen el flujo de aire pero se puede formar una vía por la que el radón entra a la casa. Los cimientos con espacios deslizables se recomiendan como un término medio para la reducción de la entrada de radón por estar naturalmente ventilados. Scott y Findlay han observado que la progenie del radón decrece en interiores, cuando se utilizan

## EFFECTOS DEL RELLENO EN LA REDUCCION DE LOS NIVELES DE RADON

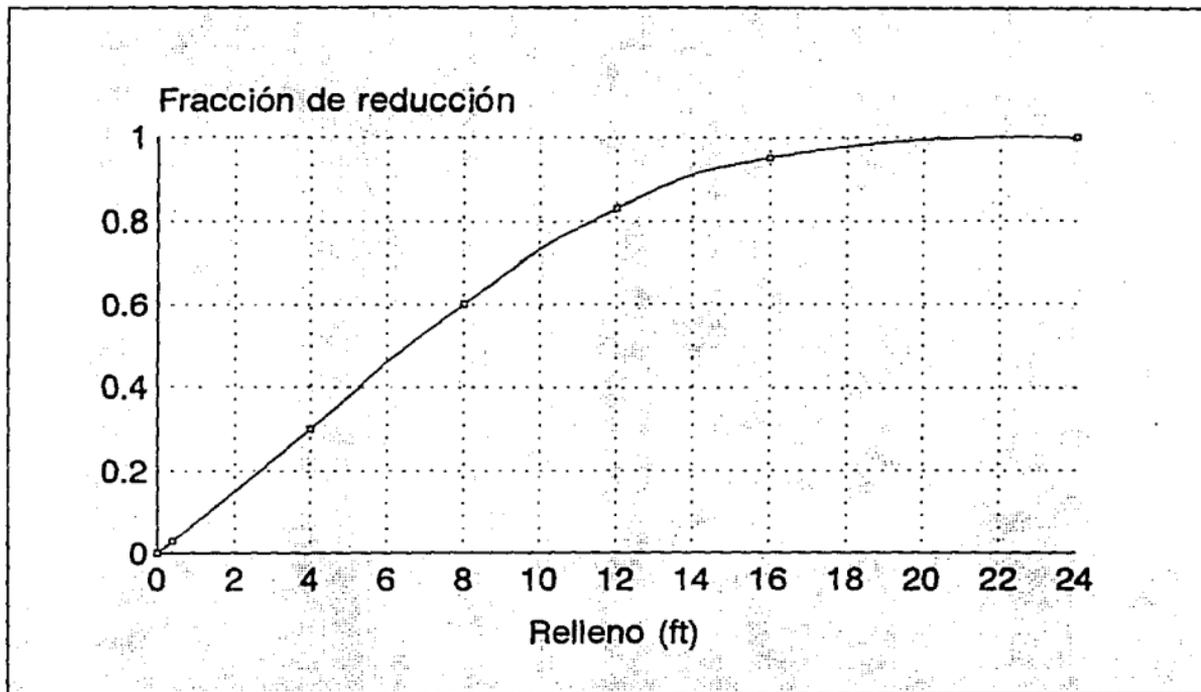


Fig. 8.1

THad Godish "Indoor Air Pollution Control" 1991

cimientos con espacios deslizables ventilados. Nazaroff y colaboradores observaron que las concentración del radón descendía en aproximadamente 50 %, cuando fueron abiertos los espacios deslizables para su ventilación. Las casas de Suecia contruidas en áreas ricas en uranio son equipadas con ventilación forzada, por el uso de ventiladores llegando así a niveles aceptables. Los costos de construcción de viviendas en sitios con altos niveles de radón fueron reducidos utilizando ventilación mecánica.

Si, por alguna razón el dueño de la casa o los constructores optaron por tener sótanos o cimientos de losas o gradas, éstos se pueden contruir de tal manera que minimizen la entrada de radón y faciliten la instalación de sistema de ventilación en los cimientos. Se recomienda las medidas siguientes en las construcciones:

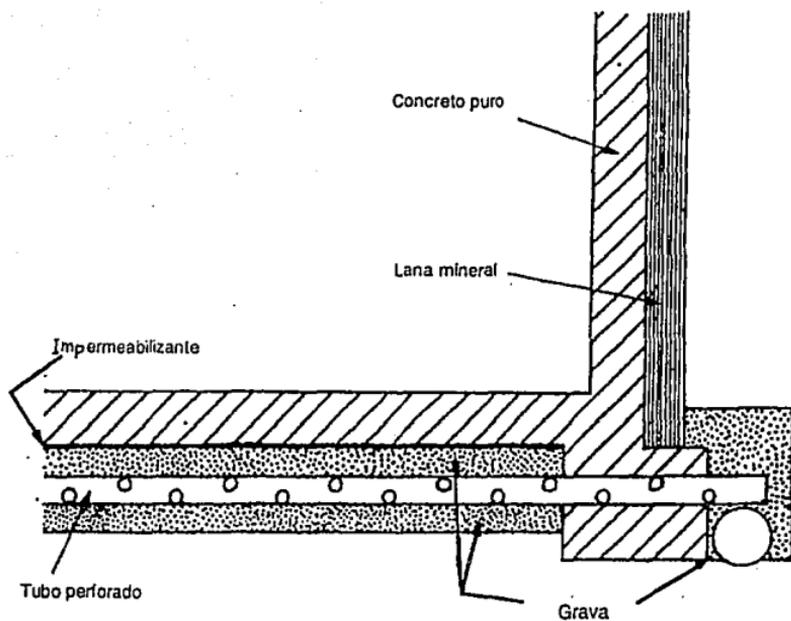
- 1.- Uso de concreto reforzado para el sótano y losas.
- 2.- Uso de un buen concreto así como mezcla.
- 3.- Uso de un espesor adecuado y buena calidad en las losas.
- 4.- Uso de una barrera de impermeabilizante plástico entre las losas y agregado de grava, arcilla, etc.
- 5.- Uso de un sistema completo de drenaje alrededor del perímetro del sistema.
- 6.- Mantener tanto como sea posible, la estructura como un monolito para evitar las penetraciones y sellar todas las entradas de los servicios.
- 7.- Poner tapa a todas las cisternas.
- 8.- Evitar el calentamiento por los ductos de las losas.
- 9.- Es conveniente impermeabilizar las paredes del sótano.

Harrje y Gadsby han sugerido un diseño mostrado en la figura (8.2)<sup>33</sup>. Se recomienda concreto puro con mallas de alambre en pisos y paredes incluyendo las esquinas entre pared y piso. Se coloca bajo el piso una membrana de baja permeabilidad y bajo ésta una capa de grava. Se coloca un tubo perforado en todo el

Fig. 8.2

SISTEMA PARA MITIGACION DE RADON EN LOS CIMIENTOS  
EN LOS CIMENTOS

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



perímetro de la construcción entre la capa de grava, para asegurar que el gas emanado de la tierra entre en el tubo y no al concreto. El aislamiento con lana mineral en el exterior de las paredes del sótano se utiliza para desviar el agua del suelo y la presión del gas de la tierra a la cama de grava. Este diseño ayuda a mitigar el efecto del agua con un potencial alto de radón sobre los muros y paredes.

La elección del sistema de calefacción también puede afectar los niveles de radón y su progenie. Los aparatos de combustión colocados en el interior de la casa pueden contribuir significativamente a la despresurización de la misma siendo ésta causa del flujo del gas del suelo interior. La colocación en el sótano de instrumentos de desahogo puede ser de significativa ayuda.

La despresurización mencionada ocurre, por los sistemas de combustión consumen aire para producir la misma combustión y también por el movimiento de los gases dentro del tubo de escape y las chimeneas. En teoría se deben esperar niveles bajos de radón en casas que son calentadas por sistemas eléctricos. Si no se dispone de este tipo de calefacción será una alternativa la colocación de los sistemas de combustión en el garaje o en el exterior de las casas. Si se utilizan chimeneas estas deberán de abastecerse para la combustión con el aire exterior y además serán necesarios tubos de escape.

## 9.2 Ventilación

La ventilación es usada para controlar la contaminación en el interior de la casa, ya que impide la entrada de los contaminantes al interior. Este es el caso del radón y otros gases, que son llevados al interior por la fuerza de succión. La salida de gases del suelo debajo y alrededor de las subestructuras, puede ser reducida a niveles aceptables usando métodos que ataquen directamente la procedencia de los mismos y son mencionados a continuación.

Henschel y Scott evaluaron en el sureste de Pennsylvania con tres sistemas diferentes de ventilación (para el gas proveniente del suelo) en casas con sótanos hechos con bloques de concreto. Estos sistemas fueron aplicados en sótanos de concreto, en sistemas de almacenamiento de agua y en un sistema de control del gas proveniente de la tierra y se muestran en las figuras ( 8.3, 8.4, y 8.5 )<sup>22</sup>.

En la figura (8.3)<sup>22</sup> la presión es reducida en las paredes por uno o dos puntos de succión en cada pared. Este sistema arrastra el aire que pasaría através de las grietas y poros de los bloques, previniendo así la entrada de gas en el sótano. Para que haya una succión efectiva se deben cerrar todas las grietas de las paredes y pisos.

Los resultados de este método se muestran en la tabla (8.1)<sup>23</sup> en la que se observa una reducción sustancial (84-99%) en los niveles de radón.

Eficacia en la reducción de la concentración de radón en Tabla 8.1<sup>23</sup> casas con un sistema de succión en las paredes de bloque

Verano (1985)				Invierno (1985-86)	
WL-SIN SISTEMA		WL-CON SISTEMA		WL-CON SISTEMA	
Rango	Media	Rango	Media	Reducción %	Rango
4.2-7.4	6.2	0.005-0.01	0.005	99	0.005-0.01
0-0.01	0.008	0.014-0.25			
0.14-0.24	0.20	0.01-0.05	0.032	84	0.30-0.35
0.02-0.70	0.28	0.01-0.06	0.02	93	0.54-2.5
0.26-0.80	0.44	0.005-0.02	0.010	98	0.01-0.02



La aplicación de la succión a sistemas de almacenamiento de agua se muestra en la figura ( 8.4 )<sup>33</sup>, este sistema se diseñó para atraer el gas proveniente del suelo y que pasa a través de todas las conexiones, grietas etc. en los cimientos y paredes de la cisterna. Se instala un extractor y una trampa de agua. El porcentaje de reducción estuvo entre 85 y 88 %. Se recomienda hacer esto cuando el nivel de radón es alto (>100 pCi/l). En general esta técnica de extracción es la más barata de todas. Otra técnica de control del gas proveniente del piso, es instalar puntos de succión en cada losa; los resultados de esta técnica se muestran en la tabla ( 8.2 )<sup>33</sup>. Como puede verse la utilización de este sistema de ventilación bajo las losas fué generalmente menos efectivo y más variable que los otros dos sistemas. El mejor resultado se obtuvo cuando se tenía una adecuada homogeneidad en la tierra en la cual está cimentada la casa.

Eficacia en la reducción del radón por  
Tabla 8.2<sup>33</sup> succión bajo los pisos

Verano (1985)				Invierno (1985-86)	
<u>WL-CON SISTEMA</u>		<u>WL-SIN SISTEMA</u>		<u>WL-CON SISTEMA</u>	
<u>Rango</u>	<u>Media</u>	<u>Rango</u>	<u>Media</u>	<u>Reducción %</u>	<u>Rango</u>
0.63- 1.1	0.7	0.54- 0.94	0.7	0	
0.44- 2.5	1.2 0.29	0.15-	0.17	86	
0.44- 2.5	1.2	0.06- 0.23	0.15	88	1.8-7.4
4.2- 7.4	6.2	2.5- 2.8	2.6	58	
0.2		0.03		85	

En la casa donde no hubo una adecuada homogeneidad en la tierra debajo de los pisos, la reducción fué de 0 % (el piso variaba demasiado).

**Fig. 8.4 SISTEMA PARA LA SUCCION DE RADON EN CISTERNAS EN CISTERNAS**

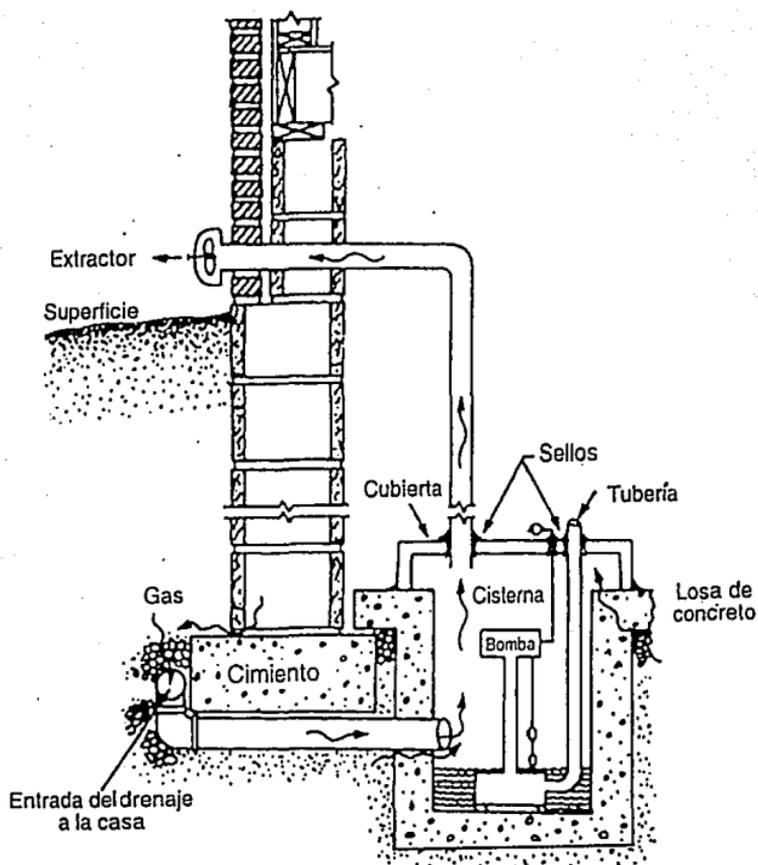
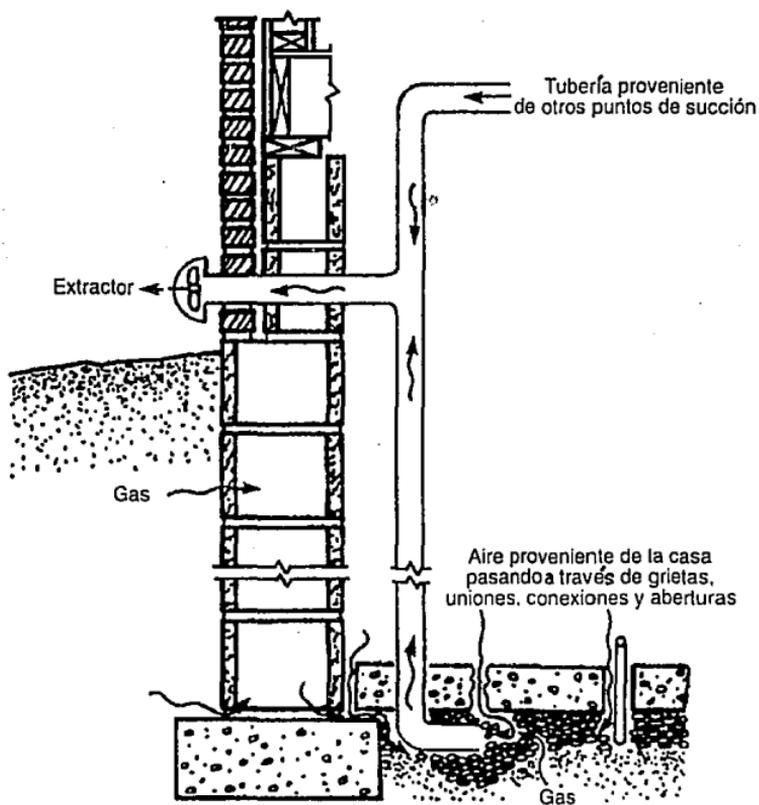


Figura 8.5 SISTEMA PARA EL CONTROL DE RADÓN  
CON SUCCIÓN EN PISOS



En otro estudio Henschel y Scott utilizando la misma técnica aumentaron los puntos de succión y estos se colocaron en el perímetro de la unión entre la base del cimiento y el piso. El resultado fué una reducción en el nivel de radón generalmente mayor al 90 % (en casas con alto nivel). El número y localización de los puntos depende de la permeabilidad, localización de la entrada del radón y la presencia de aberturas que no pudieran ser cerradas.

Para la aplicación de las técnicas de ventilación del suelo es importante que todas las rutas de entrada del radón en las paredes y pisos sean cerradas. Son necesarias trampas de agua. Son obtenidos mejores resultados cuando la succión de los extractores es de 170 Pa con una tasa de emanación del suelo entre los 20 y 70 l/seg.

La EPA ha estimado que el costo de instalación de los sistemas de ventilación en las paredes de bloques y en los cimientos de losas, es alrededor de los \$2,500 dólares. El costo para los sistemas de control del gas emanado de los suelos que utilizan una red de tubería, está entre los \$2,000 a \$7,500 dólares, dependiendo de la extensión de red.

### 8.3 Medidas para reducir los niveles de radón en casas habitación

Las acciones correctivas pueden ser tomadas de inmediato y son económicas. Las mencionadas a continuación pueden ayudar a bajar los niveles peligrosos de radón o prevenir la entrada al interior:

- 1.- Ventilar la casa, abriendo ventanas y puertas (ventilación natural) o uso de sistemas de ventilación (ventilación forzada).
- 2.- Asegurar que exista venteo en todos los lugares de la casa, abriendo y limpiando.

- 3.- Cerrar las grietas en la base de la casa a lo largo de las paredes del sótano si lo hay, y de los pisos.
- 4.- Cerrar adecuadamente las tuberías que no estén bien empotradas
- 5.- Hacer venteos periódicos con bombas.
- 6.- Pintar el sótano, paredes y pisos.

Está demostrado que en una construcción donde se usen estas técnicas ayuda a reducir la penetración del radón al interior de la casa.

Las técnicas para controlar el radón en interiores se fundamentan en lo siguiente.

- a.- Disminución del radón en su origen.
- b.- Reducción del transporte de radón de su origen al interior.
- c.- Remoción del radón y su descendencia en el interior.
- d.- Buena ventilación.

## 9. Parte experimental, Metodología, resultados y análisis de resultados

### 9.1 Método seleccionado, Monitor continuo de niveles de trabajo

Un monitor continuo en niveles de trabajo (CWLM) mide la concentración de la progenie del radón en el aire. Para ello se hace pasar aire del medio ambiente a través de un filtro que se encuentra en el monitor por medio de una bomba (el flujo de aire varía de 0.12 l/m a 0.14 l/m) El conteo de las partículas alfa emitidas por la progenie del radón y/o torón atrapados en el filtro se efectúa con el detector de silicio. El detector normalmente detecta las partículas cuya energía oscila entre los 2 y 8 MeV.

El CWLM se programa normalmente para que trabaje en forma continua, y mida los niveles de la progenie del radón cada hora.

Para que los datos sean representativos, se programan periodos de muestreo de 24 hrs y 4 horas más para obtener los valores al extremo.

Las ventajas del CWLM son:

- a) Relativamente los periodos de muestreo son muy cortos
- b) Puede detectar las variaciones horarias de la concentración en las casas habitación
- c) Tiene una muy buena precisión. El máximo error introducido en casos de desequilibrio extremo es de 5 %
- d) Los resultados pueden estar disponibles en el mismo sitio

Las desventajas son:

- a) Tiene alto costo
- b) Requieren de un operador entrenado

El monitor continuo en niveles de trabajo (CWLM, Marca Eberline) está compuesto de tres partes:

- Unidad lectora (Modelo WLR = 1A)
- Unidad Muestreadora (WLM - 1A)
- Unidad recargadora de batería BC - WLM

La unidad muestreadora (WLR-1A) está compuesta por un microprocesador modelo CMOS, un detector semiconductor de silicio de barrera superficial, bomba de succión.

EL WLM - 1A tiene las siguientes especificaciones:

- Modelo : WLM - 1A
- Peso : 5 - 3/9 lbs. ( 2.6 kg )
- Dimensiones : 5 - 3/4" Altura x 4 - 5 /8" Ancho x 8" Largo.  
( 14.6 cm x 11.75 cm x 20.3 cm )
- Energía : Batería interna, 6V, 6Ah celda gel.
- Sensibilidad :  $2 \times 10^{-4}$  WL a un nivel de confianza del 99 % basado en un fondo de 0.1 cpm y 168 horas de tiempo de muestreo
- Temperatura : 0°C a 43°C
- Humedad : 90 % no condensada
- Velocidad de flujo : Ajustable de 0.12 a 0.18 l/m

Las características para operar cada una de las partes del equipo usado así como los manúes de uso, las especificaciones del detector y tiempos de recarga se tomaron del trabajo de García Reséndiz J.J. (Tesis 1994) Monitoreo de radón en casa habitación.

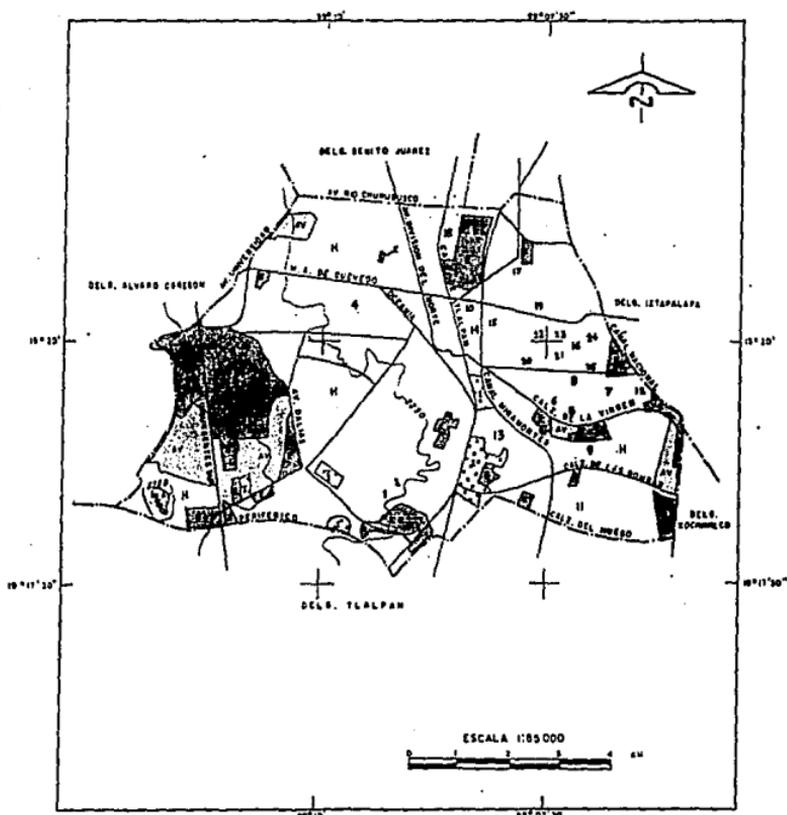
## 9.2 Selección del sitio y condiciones de muestreo

El muestreo se efectuó en la delegación de Coyoacán cuyas características, geográficas, climáticas, urbanas etc ya se describieron en el capítulo 4.

Se muestrearon 25 casas habitación cuya ubicación se muestra en la Fig 9.0. Las medidas de investigación se llevaron a cabo en condiciones de casa abierta o sea en condiciones normales de ocupación y durante 24h con mediciones cada hora con la bomba

funcionando y cuatro horas con la bomba apagada efectuándose mediciones cada media hora, para determinar los intervalos al extremo y estimar el % de torón. Las primeras diez casas se muestrearon en el mes de agosto (verano), las demás se muestrearon en el mes de diciembre con excepción de la casa 20 que fué muestreada en febrero. El aparato se colocó entre 50 y 70 cm de distancia del piso y siempre en la sala. Las unidades en la que se obtuvo el resultado fué en unidades de trabajo WL (working level). El equipo además da la lectura de fondo, y el porcentaje estimado de torón. Además en el modo predictivo da el valor que puede esperarse en la vivienda y la significación de los niveles de torón. Al mismo tiempo se llenó una forma de inspección para conocer las características de las casas y las costumbres y hábitos de sus moradores (cap. 9.3).

# USO DEL SUELO



DELEGACION COYOACAN

USO DEL SUELO

HABITACIONAL		LIMITE ESTATAL	
EQUIPAMIENTO (SERVICIOS PUBLICOS O PRIVADOS)		LIMITE DELEGACIONAL	
INDUSTRIAL		VIAS DE COMUNICACION	
AREA VERDE		LIMITE DE USO DEL SUELO	
		CURVA DE NIVEL ACOTADA	

NOTA: Datos obtenidos mediante identificación fotográfica y cartográfica.  
 FUENTE: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, DGG, Atlas Cd. de México, DDF-COLMEX.

Fig. 9.0

### 9.3 Forma de inspección

#### FORMA DE INSPECCION

##### DIAGNOSTICO DEL ORIGEN DEL RADON INSPECCION DE LA CONSTRUCCION

Nombre \_\_\_\_\_ Casa inspeccionada \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_  
Dirección \_\_\_\_\_ Hora de entrada \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Hora de partida \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ No telefónico \_\_\_\_\_

Técnico de inspección \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### I. CARACTERIZACION BASICA DE LA CONTRUCCION Y DE LA SUBESTRUCTURA

##### SITIO

1. Edad de la casa \_\_\_\_\_
2. Construcción básica del edificio  
Materiales en el exterior \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
Materiales en el interior \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
3. Materiales del piso de la construcción \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
4. Origen del agua doméstica
  - a. Municipal de origen exterior
  - b. Municipal de pozos

- c. Pozo privado
  - d. Otro \_\_\_\_\_
5. Tasa de ventilación (mecánica)
- a. Recubrimiento-grueso, moderado, ligero
  - b. Deterioro \_\_\_\_\_
  - c. Exteriores de la construcción
    - 1. Arboleda espesa
    - 2. Arboleda ligera u otra construcción cercana
    - 3. Terreno abierto (sin construcciones cercanas)
  - d. Ventilación mecánica
    - 1. Ventilación en la casa
    - 2. Ventilación en la cocina
    - 3. Ventilación en el baño
    - 4. Otros
    - 5. Frecuencia de uso
  - e. otra ventilación mecánica
6. Existen medidas de mitigación para el radón
- Tipo \_\_\_\_\_
- Donde \_\_\_\_\_
- Cuando \_\_\_\_\_
7. Localización-descripción \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
8. Actividades inusuales en el exterior
- Granja \_\_\_\_\_
- Construcción \_\_\_\_\_
- Fábricas \_\_\_\_\_
- Tráfico pesado \_\_\_\_\_

#### SUBESTRUCTURA

- 1. Sótano
- 2. Casa elevada sobre muelles
- 3. Cimientos
- 4. Otros-Especifique \_\_\_\_\_

## OCUPANTES

1. Número de ocupantes \_\_\_\_\_ Número de niños \_\_\_\_\_  
2. Número de fumadores \_\_\_\_\_ Tipo de Cigarros \_\_\_\_\_  
Frecuencia \_\_\_\_\_

## CALIDAD DEL AIRE

1. Quejas acerca del aire (problemas de respiración, irritación de ojos, olores, sofocación , etc.) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
2. Existen problemas de Humedad, condensación \_\_\_\_\_  
Desde cuando \_\_\_\_\_  
3. Padecen de problemas respiratorios Si ( ) No ( )

## II. CONSTRUCCION DE LA PLANTA BAJA Y SOTANOS

1. Uso de la planta baja: Recreación, Doméstico, Almacén, Local de servicio, otro \_\_\_\_\_  
2. Construcción de las paredes  
a. Bloques huecos: concreto  
b. Bloque rellenos de \_\_\_\_\_  
c. Bloques sólidos:concreto  
d. Concreto puro  
e. Ladrillos rojos  
f. Ladrillos de arena  
g. Adobe  
h. Otros materiales-especifique \_\_\_\_\_  
i. Existen grietas notables \_\_\_\_\_  
j. Recubrimiento en el interior \_\_\_\_\_  
k. Recubrimiento en el exterior \_\_\_\_\_  
3. Acabado de la planta baja (recubrimiento)  
\_\_\_\_\_

4. Materiales del piso

a. Contiene secciones sin pavimentar-especifique sitio y localización \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

b. Concreto puro, grava

c. Bloques, piedra, ladrillos, mosaicos, especifique \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

d. Otros materiales-especifique \_\_\_\_\_

e. Descripción de grietas en el piso y huecos \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

f. Recubierta del piso-especifique \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. Accesos a la planta baja

e. Cuantos accesos existen \_\_\_\_\_

6. Ventanas en la planta baja

a. Número de ventanas \_\_\_\_\_

b. Tipo \_\_\_\_\_

c. Condiciones \_\_\_\_\_

d. Dimensiones \_\_\_\_\_

7. Existe sótano \_\_\_\_\_

8. Accesos entre la planta baja y el sótano

a. Normalmente abierto \_\_\_\_\_

b. Normalmente cerrado \_\_\_\_\_

9. Condiciones de la puerta entre el sótano y la planta baja

a. Estimación de la longitud de la misma \_\_\_\_\_

b. Accesibilidad \_\_\_\_\_

10. Drenaje

a. Localización \_\_\_\_\_

b. Descripción de longitud y espesor \_\_\_\_\_

c. Otras especificaciones \_\_\_\_\_

d. Existen goteras en las conexiones \_\_\_\_\_

e. Conectado a bomba \_\_\_\_\_

f. Conectado a cisterna \_\_\_\_\_

- g. Conectado a alcantarillas\_\_\_\_\_
  - h. Conectado a trampas de agua\_\_\_\_\_
  - i. Conectado a letrinas\_\_\_\_\_
  - J. Que tan frecuente se tapa el drenaje-especifique\_\_\_\_\_
  - k. Especifique el origen de la información\_\_\_\_\_
- 

11. Agua potable

- a. Localización del sistema de bombeo\_\_\_\_\_
  - b. Descripción de la longitud del sistema de tuberías y espesor\_\_\_\_\_
  - c. Otras especificaciones\_\_\_\_\_
  - d. Existen goteras en las conexiones\_\_\_\_\_
  - e. Conectada a bombas\_\_\_\_\_
  - f. Conectada a cisternas\_\_\_\_\_
  - g. Conectada a trampas de agua\_\_\_\_\_
  - h. Que tan frecuente se hace la inspección al sistema de almacenamiento del agua \_\_\_\_\_
  - i. Que tipo de almacenamiento de agua hay\_\_\_\_\_
- 
- J. Tipo de tubería\_\_\_\_\_

12. Existe sistemas de aire acondicionado\_\_\_\_\_

13. Servicios eléctricos

14. Penetraciones entre el sótano y el primer piso

- a. Por plomería\_\_\_\_\_
- b. Eléctrica\_\_\_\_\_
- c. Respiraderos\_\_\_\_\_
- d. otros \_\_\_\_\_



#### 9.4 Resultados del monitoreo en las viviendas

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos así como algunas de las gráficas de las mediciones de la progenie del radón en 25 casas distribuidas en la zona oriente de Coyoacán.

La tabla 9.4.1 muestra los resultados de las medidas de investigación de radón en las 25 casas monitoreadas y además los 4 blancos. Los blancos se realizaron fuera de la casa habitación entre 50 y 70 cm del piso. La hora cero es cuando el equipo comienza a funcionar, y va de las 12 pm a la 1 am que es cuando se registra el primer valor, esta secuencia se sigue hasta completar 24 horas.

Todos los resultados que aparecen en la tabla 9.4.1 son los valores horarios dados por el equipo.

La tabla 9.4.2 se muestra los resultados de las mediciones al extremo (con la bomba apagada) que sirven para calcular el % de torón. Esto significa que a las 12:30 se registra el primer valor y el último las 4 am dando un total de 8 valores.

##### 9.4.1 Análisis estadístico

Para analizar las lecturas se empleo el método de control estadístico que se denomina por variables, el cual con el intervalo de confianza deseado determina el límite máximo y mínimo de variación que estadísticamente se obtiene a partir de las lecturas por medio del promedio y su desviación estandar. En este control estadístico se usaron límites de  $3\sigma$  lo que da un intervalo de confianza de 99.73%, es decir que de 100 datos, 99.73 datos caerán dentro los límites de control. Este análisis se hizo utilizando el software. Statgraphics versión 2.7.

El software lo que hace básicamente es utilizar las siguientes formulas :

$$LSCDE = PromDE + CDE \cdot DDE$$

$$LICDE = PromDE - CDE \cdot DDE$$

$$LSCRE = PromRE + CRE \cdot DRE$$

$$LICRE = PromRE - CRE \cdot DRE$$

Donde :

LSCDE = Límite superior de control para los datos

LICDE = Límite inferior de control para los datos

LSCRE = Límite superior de control para los rangos

LICRE = Límite inferior de control para los rangos

PromDE= Promedio de los datos

PromRE= Promedio de los rangos

CDE = Constante de los límites de los datos de control para  $3\sigma$

CRE = Constante de los límites de los rangos de control para  $3\sigma$

DDE = Desviación estándar de los datos

DRE = Desviación estándar de los rangos

Nota: Para hacer el análisis estadístico utilizaron los valores con la contribución al extremo.

Tabla 9.4.1

**DATOS DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO EN LAS CASAS  
HABITACION EN COYOACAN**

hora	casa01	casa02	casa03	casa04
0.	2.36000E-4	2.89000E-5	1.15000E-3	8.56000E-4
1.	2.66000E-4	5.31000E-5	2.24000E-3	9.74000E-4
2.	5.02000E-4	5.81000E-5	5.01000E-3	1.00000E-4
3.	2.36000E-4	5.75000E-5	2.83000E-3	8.56000E-4
4.	5.31000E-4	4.34000E-5	2.77000E-3	6.49000E-4
5.	7.67000E-4	4.22000E-5	3.48000E-3	1.00000E-3
6.	6.49000E-4	2.77000E-5	3.36000E-3	8.26000E-4
7.	1.15000E-3	2.18000E-5	3.36000E-3	1.03000E-5
8.	9.74000E-4	2.18000E-5	2.42000E-3	1.00000E-5
9.	5.61000E-4	1.74000E-5	2.39000E-3	1.18000E-5
10.	7.97000E-4	2.07000E-5	2.04000E-3	6.79000E-4
11.	9.44000E-4	2.07000E-5	1.12000E-3	8.56000E-4
12.	7.08000E-4	2.86000E-5	1.39000E-3	2.36000E-4
13.	7.38000E-4	3.35000E-5	1.89000E-3	4.72000E-4
14.	4.43000E-4	2.95000E-4	1.49000E-3	4.13000E-4
15.	6.49000E-4	5.02000E-4	1.50000E-3	6.49000E-4
16.	3.25000E-4	9.15000E-4	1.53000E-3	4.43000E-4
17.	7.97000E-4	7.67000E-4	1.36000E-3	3.84000E-4
18.	4.43000E-4	5.02000E-4	1.48000E-3	3.54000E-4
19.	4.72000E-4	7.38000E-4	2.09000E-3	5.90000E-4
20.	5.61000E-4	9.74000E-4	2.18000E-3	3.54000E-4
21.	7.08000E-4	9.74000E-4	2.39000E-3	4.13000E-4
22.	6.79000E-4	1.12000E-3	2.59000E-3	5.90000E-4
23.	1.00000E-3	2.01000E-5	2.57000E-3	7.08000E-4
casa05	casa06	casa07	casa08	casa09
1.77000E-4	5.80000E-4	2.95000E-4	9.28000E-4	3.89000E-3
2.36000E-4	1.07133E-3	4.87000E-4	1.22000E-3	1.63000E-3
4.13000E-4	1.76100E-3	1.13650E-3	1.31000E-3	1.60000E-3
5.61000E-4	1.97700E-3	1.55050E-3	1.36000E-3	1.72000E-3
5.84000E-4	1.74133E-3	1.22700E-3	1.42000E-3	1.99000E-3
5.02000E-4	2.07400E-3	1.37100E-3	1.94000E-3	2.22000E-3
4.43000E-4	2.33100E-3	1.81650E-3	2.09000E-3	2.67000E-3
4.13000E-4	2.33100E-3	1.81650E-3	2.81000E-3	2.84000E-3
6.49000E-4	1.76967E-3	1.44450E-3	2.23000E-3	2.64000E-3
7.08000E-4	1.47800E-3	1.01900E-3	2.64000E-3	3.44000E-3
1.12000E-3	1.52667E-3	1.27000E-3	2.05000E-3	2.67000E-3
5.61000E-4	1.03367E-3	9.90500E-4	1.51000E-3	1.84000E-3
7.38000E-4	7.48667E-4	4.28000E-4	1.39000E-3	1.75000E-3
8.85000E-4	1.04300E-3	6.19500E-4	1.74000E-4	1.38000E-3
9.15000E-4	9.06667E-4	6.20000E-4	4.35000E-4	8.89000E-4
1.03000E-3	1.00067E-3	7.51000E-4	5.51000E-4	5.85000E-4
1.15000E-3	1.18833E-3	1.01750E-3	7.83000E-4	4.74000E-4
6.20000E-4	8.86333E-4	6.49500E-4	5.19000E-4	4.45000E-4
9.44000E-4	1.01467E-3	7.82000E-4	6.67000E-4	5.93000E-4
6.49000E-4	1.05067E-3	5.31000E-4	6.96000E-4	7.11000E-4
5.90000E-4	1.13967E-3	6.19500E-4	8.70000E-4	7.70000E-4
7.38000E-4	1.32800E-3	7.97000E-4	9.57000E-4	8.30000E-4
7.67000E-4	1.30800E-3	7.67000E-4	1.04000E-3	1.13000E-3
6.20000E-4	1.38800E-3	7.97000E-4	6.09000E-4	1.01000E-3

casal0	casal1	casal2	casal3	casal4
4.13000E-4	2.51000E-3	6.52000E-4	2.03000E-3	8.00000E-4
7.38000E-4	2.34000E-3	2.22000E-3	1.57000E-3	2.10000E-3
1.86000E-3	2.19000E-3	1.95000E-3	1.57000E-3	2.67000E-3
2.54000E-3	2.55000E-3	3.17000E-3	1.91000E-3	3.41000E-3
2.07000E-5	3.11000E-3	2.70000E-3	2.49000E-3	3.59000E-3
2.24000E-3	2.37000E-3	3.05000E-3	2.12000E-3	4.12000E-3
3.19000E-3	2.40000E-3	3.35000E-3	2.96000E-3	3.88000E-3
3.22000E-3	2.67000E-3	3.65000E-3	2.23000E-3	3.73000E-3
2.24000E-3	2.28000E-3	4.15000E-3	2.81000E-3	4.06000E-3
1.33000E-3	2.84000E-3	4.12000E-3	3.05000E-3	3.38000E-3
1.42000E-3	2.87000E-3	3.65000E-3	2.87000E-3	3.14000E-3
1.42000E-3	2.67000E-3	3.56000E-3	2.73000E-3	2.28000E-3
1.18000E-4	2.19000E-3	4.12000E-3	2.84000E-3	2.34000E-3
3.54000E-4	2.25000E-3	4.00000E-3	2.78000E-3	1.45000E-3
3.25000E-4	2.49000E-3	4.30000E-3	2.06000E-3	1.54000E-3
4.72000E-4	8.85000E-4	4.74000E-3	1.80000E-3	1.21000E-3
8.85000E-4	5.03000E-4	3.73000E-3	2.09000E-3	8.30000E-4
6.79000E-4	1.16000E-3	3.29000E-3	2.47000E-3	1.16000E-3
6.20000E-4	1.16000E-3	2.43000E-3	2.20000E-3	1.42000E-3
4.13000E-4	1.93000E-3	3.79000E-3	1.91000E-3	1.57000E-3
6.49000E-4	1.63000E-3	3.32000E-3	1.62000E-3	1.93000E-3
8.56000E-4	1.63000E-3	3.91000E-3	1.74000E-3	2.04000E-3
7.67000E-4	2.55000E-3	4.42000E-3	2.15000E-3	2.76000E-3
9.74000E-4	2.28000E-3	4.27000E-3	2.49000E-3	2.82000E-3
casal5	casal6	casal7	casal8	casal9
1.48000E-3	8.00000E-4	3.38000E-3	2.04000E-3	1.86000E-3
2.90000E-3	1.75000E-3	2.06000E-3	2.04000E-3	2.03000E-3
4.06000E-3	1.42000E-3	1.74000E-3	1.99000E-3	2.09000E-3
4.03000E-3	1.99000E-3	1.86000E-3	2.37000E-3	2.26000E-3
3.77000E-3	2.46000E-3	2.55000E-3	2.43000E-3	2.93000E-3
4.15000E-3	2.10000E-3	2.23000E-3	2.61000E-3	2.44000E-3
4.50000E-3	2.16000E-3	2.90000E-3	2.73000E-3	2.99000E-3
4.12000E-3	2.19000E-3	2.87000E-3	2.73000E-3	2.73000E-3
4.61000E-3	2.34000E-3	2.87000E-3	2.87000E-3	2.76000E-3
3.63000E-3	2.93000E-3	3.28000E-3	3.76000E-3	2.96000E-3
3.22000E-3	2.99000E-3	2.41000E-3	3.17000E-3	2.90000E-3
3.16000E-3	2.84000E-3	2.81000E-3	3.26000E-3	2.76000E-3
2.67000E-3	1.75000E-3	2.15000E-3	2.40000E-3	2.44000E-3
2.61000E-3	1.42000E-3	2.35000E-3	1.87000E-3	2.67000E-3
2.58000E-3	1.36000E-3	2.29000E-3	8.89000E-4	2.23000E-3
1.68000E-3	9.78000E-4	2.67000E-3	2.96000E-4	1.82000E-3
1.71000E-3	1.30000E-3	3.07000E-3	6.52000E-4	1.60000E-3
1.54000E-3	1.04000E-3	2.90000E-3	8.59000E-4	1.19000E-3
1.19000E-3	1.19000E-3	3.34000E-3	8.89000E-4	1.39000E-3
1.28000E-3	1.75000E-3	3.16000E-3	9.48000E-4	1.25000E-3
1.39000E-3	2.28000E-3	2.96000E-3	1.33000E-3	1.39000E-3
1.77000E-3	2.55000E-3	3.36000E-3	1.42000E-3	1.25000E-3
1.89000E-3	2.43000E-3	3.71000E-3	1.87000E-3	1.68000E-3
2.23000E-3	2.64000E-3	3.16000E-3	1.96000E-3	1.57000E-3

casa20	casa21	casa22	casa23	casa24
3.78000E-4	5.66000E-4	6.55000E-4	1.62000E-3	1.54000E-3
1.34000E-3	1.34000E-3	1.10000E-3	2.29000E-3	1.25000E-3
1.80000E-5	2.26000E-3	1.43000E-3	2.29000E-3	1.57000E-3
1.72000E-3	2.44000E-3	1.82000E-3	2.23000E-3	1.89000E-3
2.27000E-5	1.90000E-3	1.16000E-3	2.44000E-3	2.41000E-3
1.63000E-3	2.38000E-3	1.67000E-3	2.49000E-3	2.15000E-3
2.62000E-5	2.89000E-3	2.53000E-3	3.16000E-3	2.87000E-3
2.76000E-3	3.15000E-3	1.96000E-3	3.36000E-3	3.39000E-3
2.79000E-5	2.26000E-5	1.96000E-3	3.71000E-3	3.71000E-3
5.61000E-5	1.96000E-3	1.90000E-3	3.74000E-3	3.16000E-3
3.14000E-3	1.88000E-3	1.82000E-3	2.47000E-3	2.64000E-3
2.21000E-3	1.67000E-3	1.61000E-3	2.73000E-3	2.47000E-3
2.15000E-3	1.85000E-3	1.73000E-3	1.97000E-3	1.68000E-3
2.09000E-5	1.37000E-3	1.46000E-3	1.62000E-3	1.45000E-3
2.79000E-3	1.52000E-3	8.93000E-4	1.18000E-3	1.68000E-3
1.77000E-5	1.16000E-3	9.82000E-4	6.38000E-4	1.39000E-3
1.40000E-5	1.37000E-3	7.14000E-4	8.99000E-4	9.57000E-4
1.48000E-3	1.13000E-3	9.23000E-4	4.64000E-4	1.51000E-3
1.45000E-5	1.16000E-3	1.19000E-3	1.07000E-3	1.62000E-3
1.34000E-3	1.61000E-3	8.93000E-3	7.38000E-4	1.22000E-3
1.16000E-3	1.85000E-3	7.14000E-3	1.16000E-3	2.12000E-3
1.60000E-3	1.55000E-3	1.28000E-3	2.18000E-3	1.39000E-3
8.72000E-4	2.05000E-3	1.16000E-3	1.60000E-3	1.80000E-3
1.40000E-5	1.73000E-3	9.82000E-4	1.54000E-3	1.94000E-3
casa25	blanco01	blanco02	blanco03	blanco04
2.35000E-3	7.15000E-5	4.65000E-4	1.21000E-3	1.87000E-4
3.22000E-3	9.16000E-4	1.31000E-3	1.48000E-3	1.06000E-3
2.96000E-3	1.17000E-3	1.57000E-3	1.48000E-3	2.06000E-3
2.61000E-3	1.31000E-3	1.71000E-3	1.78000E-3	2.44000E-3
2.84000E-3	1.26000E-3	1.66000E-3	2.07000E-3	2.44000E-3
3.34000E-3	1.29000E-3	1.69000E-3	2.25000E-3	3.03000E-3
3.16000E-3	1.87000E-3	2.27000E-3	1.81000E-3	2.65000E-3
2.78000E-3	1.69000E-3	2.09000E-3	2.04000E-3	3.12000E-3
3.19000E-3	2.24000E-3	2.64000E-3	2.37000E-3	3.31000E-3
2.87000E-3	2.3000E-3	2.70000E-3	2.10000E-3	2.72000E-3
3.10000E-3	1.95000E-3	2.35000E-3	1.84000E-3	2.58000E-3
2.70000E-3	1.40000E-3	1.80000E-3	2.52000E-3	2.09000E-3
2.52000E-3	1.23000E-3	1.63000E-3	5.04000E-4	1.47000E-3
2.81000E-3	9.16000E-4	1.31000E-3	6.01000E-4	1.56000E-3
8.70000E-4	5.36000E-4	9.30000E-4	8.30000E-4	1.31000E-3
1.17000E-3	4.49000E-4	8.43000E-4	8.30000E-4	1.06000E-3
1.10000E-3	3.32000E-4	7.26000E-4	7.70000E-4	1.65000E-3
1.31000E-3	2.16000E-4	6.10000E-4	5.93000E-4	1.39000E-3
8.99000E-4	4.49000E-4	8.43000E-4	6.22000E-4	1.75000E-3
8.99000E-4	4.78000E-4	8.72000E-4	9.19000E-4	1.50000E-3
1.25000E-3	5.07000E-4	9.01000E-4	1.19000E-3	1.09000E-3
1.62000E-3	9.46000E-4	1.34000E-3	1.48000E-3	1.69000E-3
1.97000E-3	4.78000E-4	8.72000E-4	1.24000E-3	1.44000E-3
1.57000E-3	1.14000E-3	1.54000E-3	1.24000E-3	2.03000E-3

#### 9.4.2 Cálculo de los límites con la contribución al extremo

El procedimiento que se usa cuando el porcentaje de torón es insignificante es el siguiente (se toma como ejemplo la casa 01).

De los datos de la tabla 9.4.2 de la casa 01 se suman los ocho datos del intervalo del extremo  $9.44E-4 + 8.26E-4 + 6.49E-4 + 2.95E-4 + 5.9E-5 + 2.36E-4 + 5.31E-4 + 3.54E-4 = 38.94E-4$  el total se divide entre 48 ( Cuando el porcentaje de torón es insignificante que es el caso de todas las lecturas tomadas se dividirá entre 48 que es lo que indica el manual)  $38.94E-4/48 = 8.11E-5$ . Este valor es la contribución al extremo en WL. De la tabla 9.4.1 (casa 01) se saca el promedio de los 24 valores lo que da  $6.3066E-4$  WL, y a este valor se le sumará la contribución al extremo o sea  $8.11E-5 + 6.3066E-4 = 7.11E-4$  WL. El valor de  $7.11E-4$  WL (PromDE) es el valor promedio en ese día de la progenie del radón en la casa 01.

Al software se le suministran los valores y este calcula los límites máximo y mínimo de los datos y rangos que pueden encontrarse en la casa los cuales se muestran en la figura 9.2; calcula la desviación estándar de los 24 datos utilizando las fórmulas descritas en este capítulo en la página anterior ejemplo:

$$CDE = 2.999996$$

$$DDE = 2.4604E-4$$

$$LSCDE = 7.11E-4 + 2.999996 * 2.46E-4 = 1.44991E-3$$

$$LICDE = 7.11E-4 - 2.999996 * 2.46E-4 = -2.6328 E-5$$

Este procedimiento fue el mismo que se utilizó para calcular los límites de control de todas las casa al igual que los rangos de variación entre punto y punto.

Como no puede haber concentraciones negativas los límites inferiores de control se deberán considerar como cero.

## 9.5 Control de calidad

Una parte importante del control de calidad es verificar que los datos son de precisión, exactitud y reproducibilidad conocida por lo cual y dentro de este programa se efectuó lo siguiente:

### 9.5.1 Calibración de la eficiencia de conteo del detector

La tabla siguiente muestra las lecturas de las seis calibraciones que se realizaron para conocer la eficiencia del conteo del detector. Las calibraciones se efectuaron con una fuente de Th 230 (0.0281  $\mu$ Ci). La lectura promedio de 6 calibraciones fué de 1465 cpm y la eficiencia de 23.30%, la lectura máxima obtenida fué de 1540 cpm lo que da una eficiencia de 24.68 % (Tabla 9.5.1) y la mínima es de 1400 cpm lo que da una eficiencia de 22.43 %. Se recomienda que la eficiencia esté entre 29 % y 22 % (lo cual cumplen todas las lecturas). La eficiencia se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia} = (\text{cpm promedio observadas} / \text{dpm fuente}) \times 100$$

Donde :

dpm emitidas de la superficie del disco: 6240 dpm +/- 437

cpm emitidas de la superficie del disco: 3720 cpm +/- 219 (2 $\sigma$ ).

Las calibraciones se realizaron a un nivel de significación de 0.045 (4.5 % de probabilidad de error del tipo I) o 2 $\sigma$

### 9.5.2 Calibraciones del flujo

La tabla 9.5.2 muestra las lecturas de las 4 calibraciones del flujo. El flujo promedio es de 0.1342 l/min, el promedio máximo es de 0.1438 l/min y el mínimo es de 0.1296 l/min. Se recomienda que el flujo esté entre 0.12 y 0.18 l/min lo que cumplen todas las lecturas. El flujo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo (l/min)} = (\text{Volumen (ml)} \cdot 60 (\text{s}) \cdot 1 (\text{l})) / (\text{Tiempo (s)} \cdot 1 (\text{min}) \cdot 1000 (\text{ml}))$$

**Tabla 9.5.1 Calibración en eficiencia**

*Fuente de Th - 230 Blindaje : Acero inoxidable ; Disco de 0.79mm de espesor;  
Diámetro activo de 1.91cm ; Diámetro total de 2.23cm*

Calibración No.	Fecha	1 cpm	2 cpm	3 cpm	4 cpm	5 cpm	Promedio cpm	% Eficiencia
1	13 agost. 93	1540	1510	1470	1460	1500	1496	23.97
2	23 agost. 93	1410	1450	1410	1470	1460	1440	23.07
3	4 dic. 93	1420	1480	1450	1410	1470	1446	23.17
4	18 dic. 93	1490	1470	1450	1490	1480	1476	23.05
5	30 dic. 93	1443	1445	1440	1450	1430	1440	23.07
6	25 ene. 93	1440	1400	1450	1400	1430	1424	22.80

**Tabla 9.5.2 Calibración del flujo**

*En cada calibración se toman 20 lecturas de tiempo*

Calibración No	Fecha	Volumen ml	Tiempo prom. seg	Flujo prom. l/min	$\sigma_a$	$\sigma_{a-1}$
1	13 agost. 93	20	9.09	0.1320	0.000510	0.000527
2	4 dic. 93	20	8.34	0.1438	0.000347	0.000356
3	18 dic. 93	20	9.12	0.1315	0.000412	0.000422
4	25 ene. 94	20	9.25	0.1296	0.000468	0.000480

Nota: El valor del flujo debe estar entre 0.12 y 0.18

**Tabla 9.5.3 Resultados de los duplicados y blancos**

Muestra No.	Fecha	WL prom.	+ /- % de variación	% de Torón	Cte. calibración cpm/WL	Fondo WL
Casa 6	25 sept.93	9.74E-4	4.32	insignificante	544	1.54E-4
D1	27 sept.93	9.83E-4	5.19	insignificante	544	5.72E-4
Casa 10	4 sept.93	1.36E-3	6.30	insignificante	544	1.12E-3
D2	6 sept.93	1.34E-3	5.15	insignificante	544	8.74E-4
Casa 16	18 dic. 93	1.98E-3	5.09	insignificante	575	0
D3	20 dic. 93	1.95E-3	5.26	insignificante	575	1.19E-4
B1	13 ags. 93	9.02E-4	4.78	insignificante	565	6.75E-5
B2	8 dic. 93	1.45E-3	5.79	insignificante	585	5.81E-5
B3	5 ene. 94	1.41E-3	5.89	insignificante	574	1.19E-4
B4	2 feb. 94	2.02E-3	5.04	insignificante	534	5.82E-5

### 9.5.3 Medidas por duplicado y blancos

Para estimar la precisión de los resultados se tomaron medidas por duplicado de tres casas (Tabla 9.5.3).

También se efectuaron medidas a muy bajas concentraciones de radón en el exterior de las casas habitación (en 4 de ellas) a las que se les denomina blancos. (Tabla 9.5.3).

## 9.6 Medición de la radiación gamma en la zona oriente de Coyoacán

### 9.6.1 Termoluminiscencia

Existen ciertos sólidos previamente irradiados que tienen la propiedad de emitir luz, si se eleva su temperatura a un valor suficiente por debajo de su temperatura de incandescencia. a este fenómeno se le conoce como radioluminiscencia térmicamente estimulada; sin embargo, por razones históricas se les llama radiotermoluminiscencia o simplemente termoluminiscencia (TL).

La importancia de este fenómeno en la dosimetría de la radiación ionizante radica en el hecho de que la cantidad de la luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado.

El mecanismo general para explicar el fenómeno de TL es el siguiente: al irradiar el cristal, su estructura sufre alteraciones por la ionización; en este proceso se liberan electrones de la red y se generan dos tipos de entes móviles: electrones y agujeros, ambos portadores de carga, que pueden viajar por el cristal hasta quedar atrapados en defectos de la red, generando centros de color.

Los electrones y agujeros permanecen atrapados hasta que se proporciona al material la energía suficiente para liberarlos, volviéndolos a su estado natural antes de la irradiación. Cuando esto ocurre, se desprenden del exceso de energía que adquirieron, emitiendo fotones de luz visible. Si la energía que se proporciona al cristal para que los entes móviles vuelvan a su estado original es térmica, se produce el fenómeno de TL. A la energía necesaria para liberar a los entes atrapados se les denomina energía de activación o profundidad de la trampa.

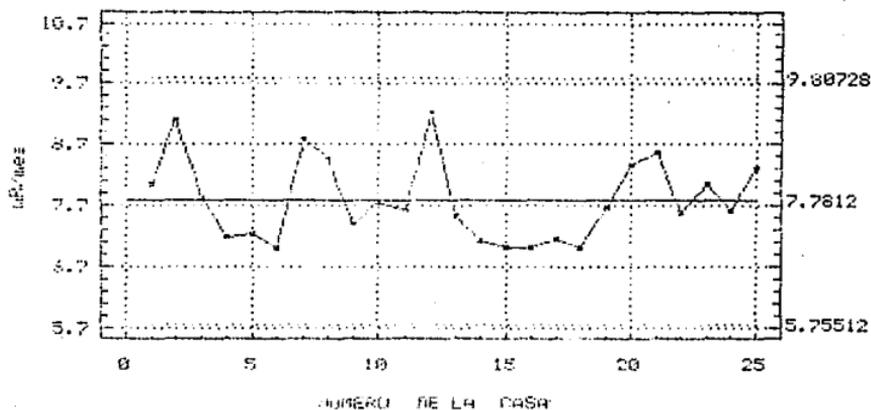
### 9.6.2 Resultados de las mediciones con dosímetros termoluminiscentes

Para la medición de radiaciones gamma en el area del oriente de Coyoacán se utilizaron dosímetros de sulfato de calcio activados con disprosio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{PTFE}$ ); estos dosímetros son extremadamente sensibles y por ello recomendados para dosimetría ambiental. Los dosímetros fueron proporcionados y leídos en el ININ. El muestreo se efectuó durante tres meses, un dosímetro por mes se hizo en Julio, septiembre y octubre, y los dosímetros se colocaron a una altura entre 1.70m y 1.80m, en la sala de la casa y lo mas lejos de aparatos eléctricos

En la tabla 9.6.1 se muestran los resultados de la evaluación de los dosímetros. Para analizar las lecturas se empleó el control estadístico de calidad de gráficos por variable por medio del software del Statgraphics versión 2.7 y se determinan los niveles de radiación gamma a un intervalo de confianza 99.73%

Fig. 9.6.1

DATOS DE LOS BUSTREPROS DE DS-30412g  
 MPPE EXPUESTOS EN COYOACAN EN JULIO



RANGOS DE LOS BUSTIMETROS EXPUESTOS EN  
 COYOACAN EN JULIO

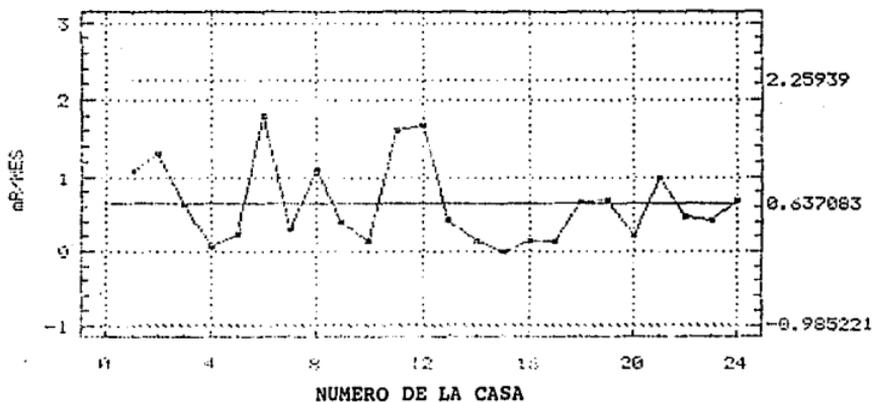
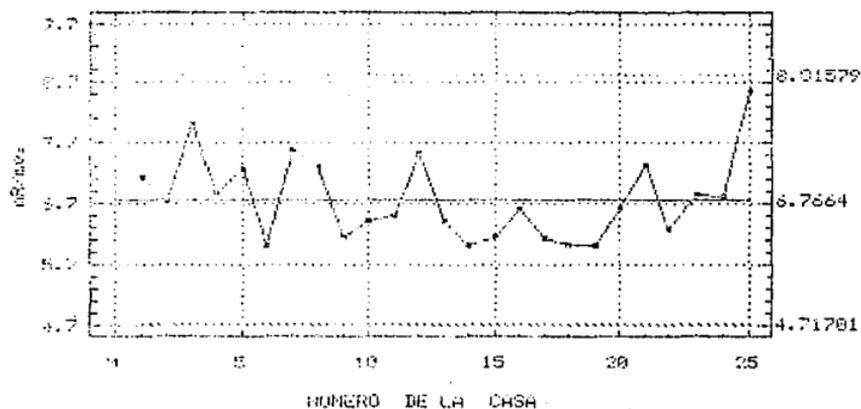


Fig. 9.6.2

DATOS DE LOS COSMÉTOS DE CASAS 10+PTFE  
EXPUSTOS EN COYOACAN EN SEPTIEMBRE



RANGOS DE LOS DOSIMETROS EXPUESTOS EN  
COYOACAN EN SEPTIEMBRE

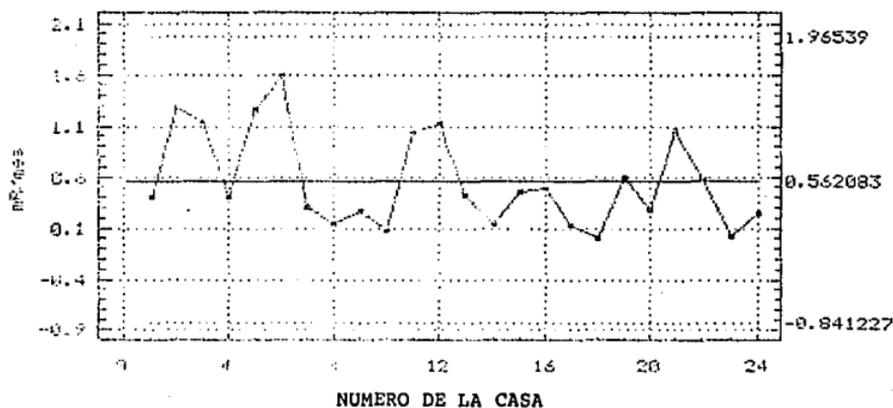
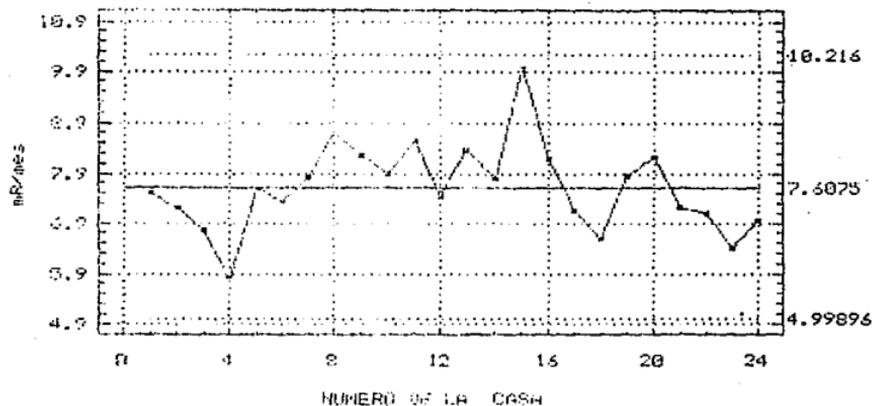


Fig. 9.6.3

RANGOS DE LOS DOSÍMETROS DE CASAS 10y+PTFE  
EXPUUESTOS EN COYOHCAN EN OCTUBRE



RANGOS DE LOS DOSÍMETROS EXPUESTOS EN  
COYOHCAN EN OCTUBRE

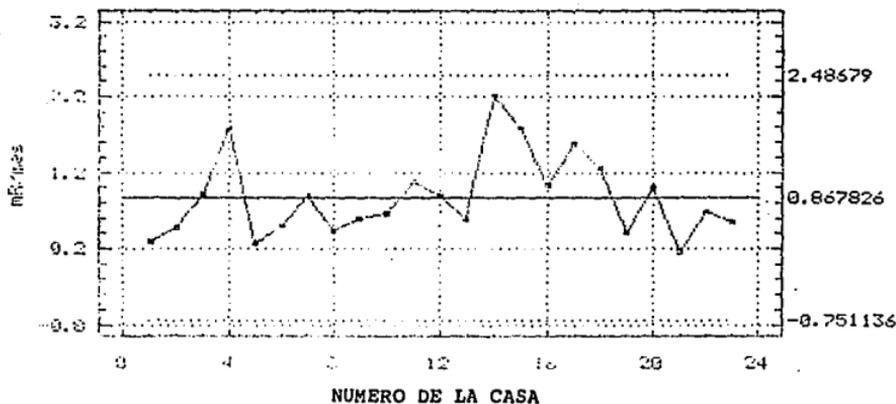


Tabla 9.6.1

Lectura de los dosímetros de termolumiscencia  
 Dosímetros de CaSO<sub>4</sub> : Dy + PTFE Exposición (mR).

Dosímetro No.	1er. Período Julio 93	2do Período Sept. 93	3er Período Oct. 93	Media	
1	8.03	7.50	7.13	7.55	PARA LA MEDIA:
2	9.11	7.20	6.72	7.88	
3	7.81	6.73	8.01	7.52	$\sigma_s = 0.541404$
4	7.18	5.82	6.86	6.62	$\sigma_{s-1} = 0.55171$
5	7.24	7.60	7.27	7.37	
6	7.00	7.34	6.00	6.78	MEDIA ARITMETICA: $\bar{X} = (1/3) * (7.6635 + 7.4274 + 6.7160)$ $\bar{X} = 7.2689 \pm 0.58 \text{ mR}$
7	8.79	7.83	7.60	8.07	
8	8.48	8.71	7.30	8.16	
9	7.38	8.28	6.15	7.27	
10	7.76	7.88	6.42	7.35	
11	7.62	*	6.50	7.06	
12	9.23	8.53	7.54	8.43	
13	7.54	7.45	6.42	7.14	
14	7.13	8.35	6.00	7.16	
15	7.00	7.77	6.15	6.97	
16	7.00	9.96	6.60	7.85	MEDIA GEOMETRICA:
17	7.15	8.18	6.12	7.15	$a = \sqrt[3]{7.6635 * 7.4274 * 6.7160}$
18	7.00	7.15	6.00	6.72	$a = 7.2576 \text{ mR}$
19	7.66	6.58	6.00	6.75	RANGO DE VARIACION (0.02 a 1.84 mR)
20	8.35	7.84	6.60	7.60	
21	8.56	8.24	7.32	8.04	
22	7.57	7.23	6.28	7.02	
23	8.03	7.08	6.83	7.31	
24	7.61	6.39	6.8	6.93	
25	8.30	6.94	8.58	7.93	
26	*	5.65	6.23	5.94	
27	10.87	5.76	6.00	7.54	
28	9.18	6.55	6.66	7.46	
From	7.6635	7.4274	6.7160	7.33	
+/- variación promedio	0.54	0.81	0.49	0.58	

\* El dosímetro se perdió.

# LIMITES DE CONTROL PARA LA ZONA ORIENTE DE COYOACAN (CON INTERVALOS AL EXTREMO)

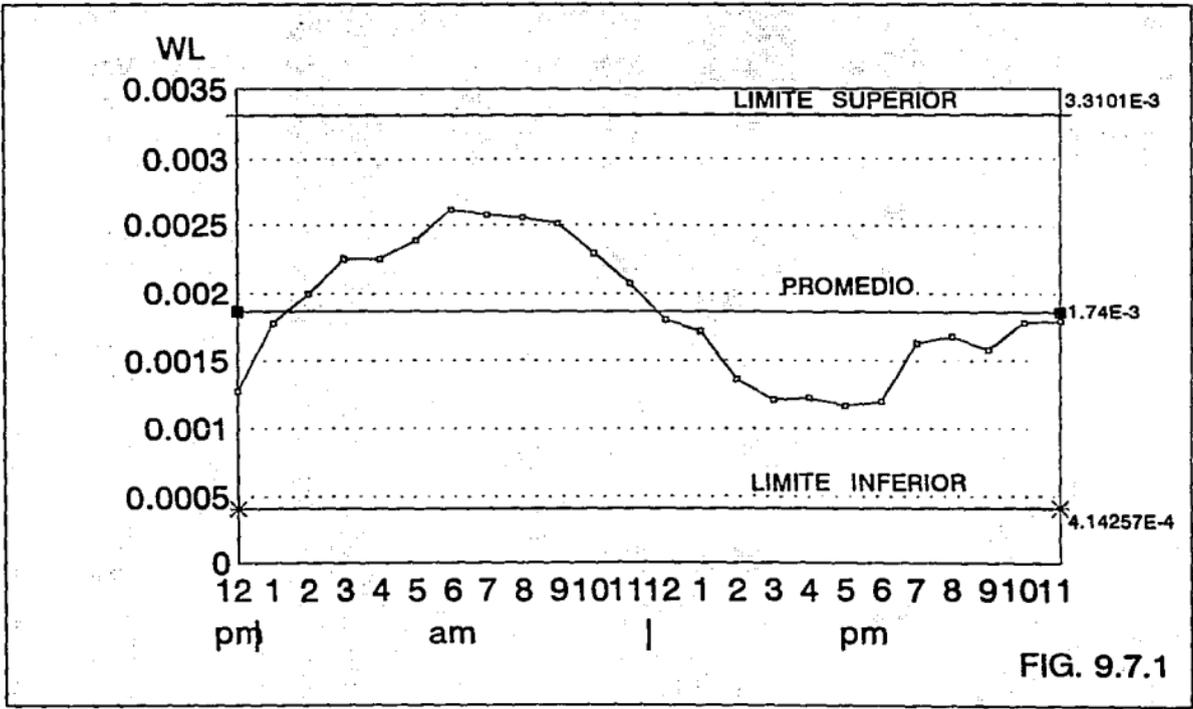


FIG. 9.7.1

Los límites y el promedio son calculados con todas las 25 muestras

## 9.7 Análisis de los resultados de las mediciones de radón y radiación gamma

De acuerdo con el método de control estadístico de calidad mencionado efectuado por medio del software de statgraphics versión 2.7 se calcularon los límites de control los datos y rangos de cada una de las muestras. La tabla 9.7.1 nos dice que las concentraciones máximas y mínimas obtenidas estadísticamente (límite superior y límite inferior) que se pueden esperar en cada una de las casas así como sus promedios. Se puede notar que aún las máximas concentraciones de la progenie del radón que podrían esperarse como por ejemplo la casa 22 con  $7.7978E-3WL$  está abajo de  $0.02WL$ , nivel de no acción de EPA.

La figura 9.7.1 muestra la gráfica de los medios de la concentración de la progenie de radón en la zona oriente de Coyoacán para las 25 casas que es de  $1.74E-3$  con un límite de concentración máximo de  $3.310E-3WL$  y un límite de control mínimo de  $4.14E-4WL$  (obtenidos estadísticamente con un intervalo de confianza de 99.73%); una desviación estándar de  $4.826E-4$  y una constante de los límites de control  $3\sigma$  de los datos de 2.999999 (figura 9.7.1). Se puede concluir al observar la figura 9.7.1 que la concentración de radón comienza a aumentar en la madrugada hasta alcanzar un máximo a las 8 hrs, que después los habitantes de las mismas comienzan a ventilar sus casas y debido a esto los niveles de radón comienzan a decrecer hasta una mínima concentración a las 18 horas y de ahí empieza a aumentar nuevamente siguiendo un ciclo

# LIMITES DE CONTROL PARA LAS MUESTRAS

CASA No.	PROMEDIO CON EXTREMOS WL	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	PROMEDIO DE LOS RANGOS	LIMITE DEL RANGO SUPERIOR	LIMITE DEL RANGO INFERIOR
1	7.1178E-04	1.4409E-03	0	2.1424E-04	8.3973E-04	0
2	2.3594E-03	7.4281E-03	0	8.1690E-04	2.9595E-03	0
3	2.1995E-03	4.3420E-03	0.0001	3.5132E-04	1.3725E-03	0
4	8.5473E-04	1.5054E-03	0	2.5622E-04	9.3430E-03	0
5	6.0285E-04	1.4344E-03	0	1.5910E-04	5.4833E-04	0
6	9.5441E-04	2.2312E-03	0	3.2580E-04	1.4955E-03	0
7	1.3695E-03	2.8258E-03	0	3.0420E-04	1.1823E-03	0
8	1.2535E-03	3.4278E-03	0	3.2968E-04	1.1773E-03	0
9	1.5241E-03	4.1470E-03	0	3.6505E-04	1.1015E-03	0
10	1.2482E-03	3.8919E-03	0	3.9758E-04	1.5700E-03	0
11	2.1428E-03	4.1178E-03	0.0002	3.9245E-04	1.5108E-03	0
12	3.4545E-03	6.2331E-03	0.0007	5.4274E-04	1.7811E-03	0
13	2.2774E-03	3.6778E-03	0.0009	3.4958E-04	1.0117E-03	0
14	2.4373E-03	5.0078E-03	0	4.1775E-04	1.3815E-03	0
15	2.7630E-03	6.1727E-03	0	3.8212E-04	1.5375E-03	0
16	1.9515E-03	3.9000E-03	3.0030E-09	3.4928E-04	1.1755E-03	0
17	2.7653E-03	4.3393E-03	0.0012	4.0020E-04	1.3058E-03	0
18	1.9808E-03	4.7172E-03	0	3.1391E-04	1.1455E-03	0
19	2.1388E-03	3.9975E-03	0.0003	2.8214E-04	7.7935E-04	0
20	2.0450E-03	4.3249E-03	0	4.2813E-04	1.1261E-03	0
21	1.6001E-03	3.5538E-03	0.0005	3.8871E-04	1.1081E-03	0
22	1.8622E-03	7.7878E-03	0	3.1500E-04	8.7858E-04	0
23	1.8876E-03	4.8201E-03	0	3.5404E-04	1.1821E-03	0
24	1.9871E-03	4.1773E-03	0	4.2388E-04	1.0880E-03	0
25	2.2189E-03	4.8463E-03	0	3.9238E-04	1.5218E-03	0

TABLA 9.7.1

La figura 9.7.2 se muestra la gráfica de los rangos que se obtienen con las 25 casas y sus respectivos límites de control (con la contribución al extremo), en la cual se puede apreciar claramente que el primer valor (12pm a 1 am) varía considerablemente con relación al segundo (1 a 2am) especialmente y con relación a los demás que permanecen todos cerca del promedio de los rangos (enlazamiento) y ninguno se sale de los límites estadísticos lo que muestra que el equipo necesita por lo menos dos horas para que logre estabilizarse y que una vez logrado esto las variaciones que se presentan están dentro de los normal.

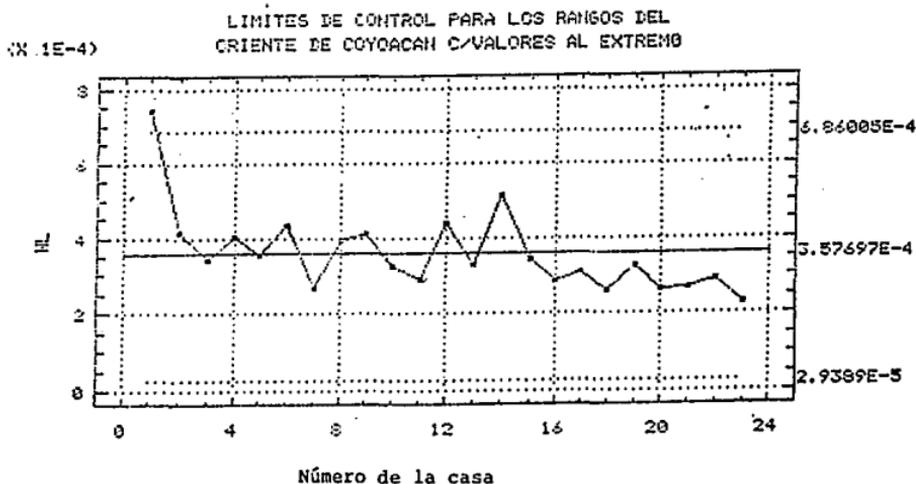


Fig. 9.7.2

La tabla 9.7.2 muestra los resultados de las pruebas de investigación que se realizaron en las 25 casas e indica la fecha en que se realizó el monitoreo, el promedio en WL, el % de variación, la constante de calibración del equipo y el fondo en WL.

# RESULTADOS DE LAS MUESTRAS

LAS HORAS MUESTREADAS EN CADA CASA HABITACION SON 24 HRS.

MUESTRA No.	PERIODO	PROMEDIO WL	+/- % DE VARIACION	CTE. CAL. cpm/WL	FONDO WL
1	15 AGS	7.12E-04	8.83	565.00	8.85E-05
2	17 AGS	2.46E-03	4.58	565.00	1.19E-03
3	19 AGS	2.20E-03	4.74	565.00	1.18E-04
4	21 AGS	6.78E-04	4.45	565.00	3.45E-03
5	23 AGS	7.62E-04	4.64	544.00	1.18E-04
6	25 AGS	9.74E-04	4.32	544.00	1.54E-04
7	29 AGS	1.37E-03	4.53	544.00	2.87E-04
8	31 AGS	1.35E-03	5.22	544.00	2.90E-05
9	2 SEP	1.61E-03	5.70	544.00	8.89E-05
10	4 SEP	1.36E-03	6.30	544.00	1.12E-03
11	22 DIC	2.28E-03	4.83	575.00	1.19E-04
12	24 DIC	3.83E-03	3.79	575.00	8.89E-05
13	12 DIC	2.38E-03	4.68	585.00	2.90E-05
14	28 DIC	2.63E-03	4.51	575.00	2.90E-05
15	8 DIC	2.90E-03	4.19	585.00	0.0E+00
16	18 DIC	1.98E-03	5.04	575.00	0.0E+00
17	16 DIC	2.93E-03	4.28	585.00	2.90E-05
18	4 DIC	2.07E-03	5.04	585.00	5.93E-05
19	14 DIC	2.40E-03	4.91	585.00	8.70E-05
20	9 FEB	2.07E-03	5.19	585.00	3.12E-05
21	30 ENE	1.95E-03	5.26	560.00	1.19E-04
22	1 ENE	1.84E-03	6.05	560.00	2.98E-05
23	26 DIC	2.06E-04	4.98	575.00	1.45E-04
24	12 DIC	2.09E-04	4.97	575.00	1.16E-04
25	3 ENE	2.31E-04	4.73	574.00	8.70E-05

NOTA: SE MUESTREO SIEMPRE EN LA SALA

Para encontrar la ecuación que describe el comportamiento de los resultados obtenidos en Coyoacán se usó el software Mathematica versión 2.1. Se buscó el mejor ajuste y resultó ser el de un polinomio de sexto grado.

Se introducen los datos del promedio de la 25 casas habitación muestreadas (In[7]) al software, se le da el grado del polinomio (In[15]) y el software calculó la ecuación. En el comando In[15] muestra la ecuación calculada y se muestra su respectiva gráfica de ajuste.

En las páginas siguientes se muestra la corrida del programa tal como lo imprime.

Con esta correlación se puede calcular la concentración que puede existir en cualquier momento del día (si no hay cambios de presión temperatura etc.), pero principalmente muestra claramente la tendencia que tiene la concentración del radón y sus productos de decaimiento con un máximo en las mañana entre las 6 y 8 AM, y un valor mínimo en la tarde. En la noche nuevamente el enfriamiento de la superficie terrestre lleva a un incremento en la estabilidad atmosférica y ocurre el incremento en las concentraciones de radón, ocasionando también una disminución en la ventilación normal ya que se mantienen las ventanas cerradas por lo que se concluye que la ventilación es un factor determinante en los niveles de la concentración del radón.

La tabla 9.7.3 muestra los límites de control y los promedios para los datos y rangos para las 4 medidas de los blancos efectuadas en el exterior. El promedio fue de  $1.459E-3WL$  con un límite de control máximo a esperarse en el exterior de  $3.299E-3WL$  y un límite mínimo de  $0 WL$  (figura 9.7.3 ). Aquí nuevamente se puede observar que se necesitan por lo menos dos horas para que el equipo se estabilice.

In[7]:=

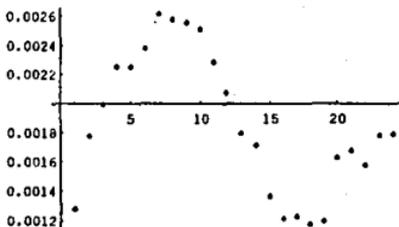
```
a={.00127727, .00177603, .00199335, .00225369, .00225293,  
.00238342, .00261639, .00257681, .00255396, .00250967,  
.00228836, .00207346, .00179936, .00171431,  
.00136548, .00121122, .00122465, .00116753, .00119648,  
.00162890, .00167688, .00157704, .00178192, .00179316}
```

Out[7]=

```
{0.00127727, 0.00177603, 0.00199335, 0.00225369,  
0.00225293, 0.00238342, 0.00261639, 0.00257681,  
0.00255396, 0.00250967, 0.00228836, 0.00207346,  
0.00179936, 0.00171431, 0.00136548, 0.00121122,  
0.00122465, 0.00116753, 0.00119648, 0.0016289,  
0.00167688, 0.00157704, 0.00178192, 0.00179316}
```

In[8]:=

```
b=ListPlot[a]
```



Out[8]=

-Graphics-

In[15]:=

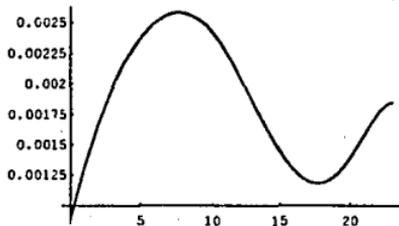
```
Fit[a, {1, x, x^2, x^3, x^4, x^5, x^6}, x]
```

Out[15]=

```
0.000896087 + 0.00050249 x - 0.0000685644 x2 +  
9.25857 10-6 x3 - 9.8965 10-7 x4 +  
4.79893 10-8 x5 - 8.03281 10-10 x6
```

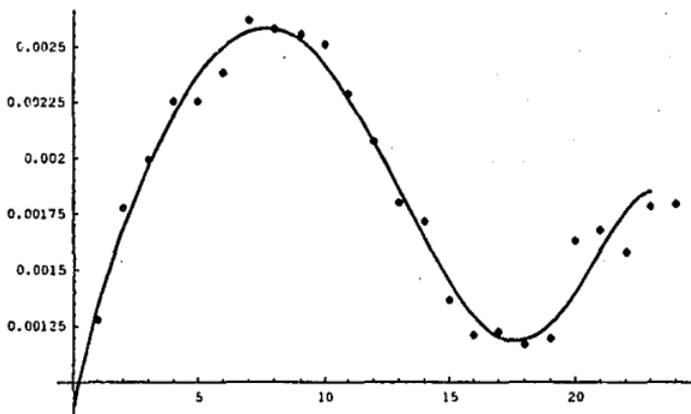
In[16]:=

```
Plot[%, {x, 0, 23}]
```



Out[16]=  
-Graphics-

In[17]:=  
Show[%, b]



Out[17]=  
-Graphics-

**Tabla 9.7.3 Límites de control para los blancos con intervalos al extremo**

Muestra No.	Promedio de los datos WL	LSCDE	LICDE	$\sigma_{n-1}$	$\sigma_n$
B1	9.0230E-4	2.82470E-3	0	6.4083E-4	6.2733E-4
B2	1.4480E-3	3.37094E-3	0	6.4079E-4	6.2730E-4
B4	2.0270E-3	4.28040E-3	0	7.5083E-4	7.3502E-4
BP	1.4590E-3	3.29950E-3	0	6.1345E-4	6.0053E-4

Muestra No.	Promedio de los rangos WL	LSCRE	LICRE	$\sigma_{n-1}$	$\sigma_n$
B1	2.5098E-4	1.0099E-3	0	2.5296E-4	2.4763E-4
B2	2.9204E-4	9.9432E-4	0	2.3400E-4	1.6025E-4
B3	2.4061E-4	7.3188E-4	0	1.6370E-4	1.6025E-4
B4	4.5130E-4	1.4947E-3	0	3.4780E-4	3.4047E-4
BP	2.6073E-4	6.3881E-4	0	1.2602E-4	3.6526E-4

*BP = Promedio de los blancos*

Para conocer la precisión de las medidas se hicieron por duplicado en la misma casa, con el fin de obtener el porcentaje relativo de desviación (%RMD). Se hicieron medidas por duplicado en tres casas diferentes, el %RMD para la casa 6 fué de 0.46% para la casa casa 10 fué de 0.74% y para la casa 16 fué de 0.76% y el promedio de las tres fué de 0.65% +/- 0.0004457 lo que muestra que las medidas son muy reproducibles. La tabla 9.7.4 muestra los promedios tanto de los datos como de los rangos para las medidas por duplicado.

La Tabla 9.7.4 muestra los límites de control máximo y mínimo esperado y el promedio de las medidas entre los duplicados con contribución al extremo, (lo cual da las variaciones entre una misma casa muestreada en otro día y con las mismas condiciones) es de 3.21E-4WL.

Para el caso de los dosímetros termoluminiscentes evaluando los resultados por el mismo método de gráficos de control por variables dan un promedio de 7.39097 mR/mes +/- 0.58% de variación con un límite máximo de control de 8.89768 mR/mes y un límite mínimo de 5.88427 mR/mes.

También se calcularon los límites, máximos y mínimos de control y el promedio de los rangos de variación entre hora y hora muestreada que es de 0.703188mR/mes como se puede ver en la figura 9.7.6.

Para conocer la precisión de las medidas, los dosímetros 27 y 28 se colocaron en una misma casa (medidas por duplicado), y así poder obtener el %RMD que fué el siguiente.

Exposición en mR

No. dosímetro	1er Período	2o Período	3er Período	Promedio
27	10.87	5.76	6.00	7.54
28	9.18	6.55	6.66	7.46
Media	10.025	6.155	6.33	7.50
%RMD	6.18	6.41	5.21	0.53

Ejemplo %RMD = ( abs(10.87-10.025) / 10.025 ) \* 100 = 6.18% con un promedio para los tres periodos de 0.53%

**Tabla 9.7.4 Límites de control para los duplicados**

Muestra No.	Promedio de los datos WL	LSCDE	LICDE	$\sigma_{n-1}$	$\sigma_n$
D1	9.83E-4	2.589E-3	0	5.356E-4	5.243E-4
D2	1.34E-3	4.411E-3	0	1.024E-3	1.002E-3
D3	1.95E-3	4.093E-3	0	7.145E-4	6.994E-4

Muestra No.	Promedio de los rangos WL	LSCRE	LICRE	$\sigma_{n-1}$	$\sigma_n$
D1	4.048E-4	1.702E-3	0	4.326E-4	4.230E-4
D2	3.887E-4	1.570E-3	0	3.941E-4	3.854E-4
D3	3.097E-4	1.026E-3	0	2.391E-4	2.338E-4

Nota : En las gráficas que tienen como límite inferior un número negativo se considera como cero, porque no puede existir concentraciones negativas.

La figura 9.7.7 muestra el histograma de frecuencias de los resultados de la 25 casas que muestra que el 28.0% de los valores caen entre los niveles de 0.0WL a 0.001WL; el 28.0% caen entre de los niveles de 0.001WL a 0.002WL; el 40.0% caen entre los niveles de 0.002WL a 0.003WL, por lo que el 96.5 % de los valores caen entre los niveles de 0.0WL a 0.003WL o sea dentro de los valores propuestos como límites normales por las organizaciones internacionales ( cap. 7.8.1).



Fig. 9.7.5

PROMEDIO DE LOS DATOS DE LOS DOSIMETROS  
DE JULIO, SEPTIEMBRE Y OCTUBRE

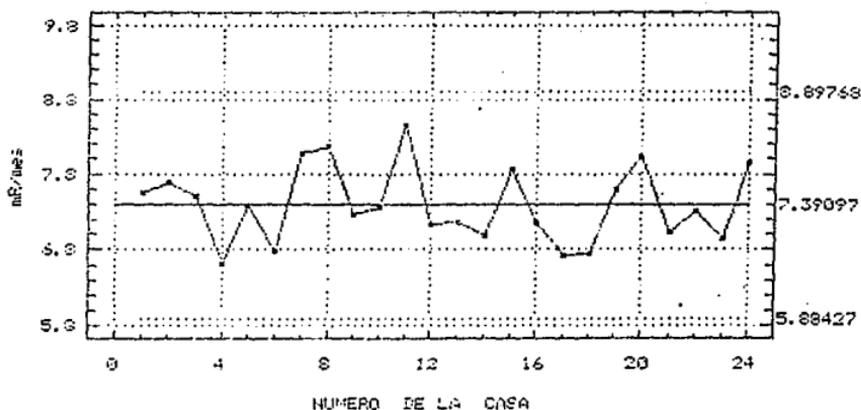
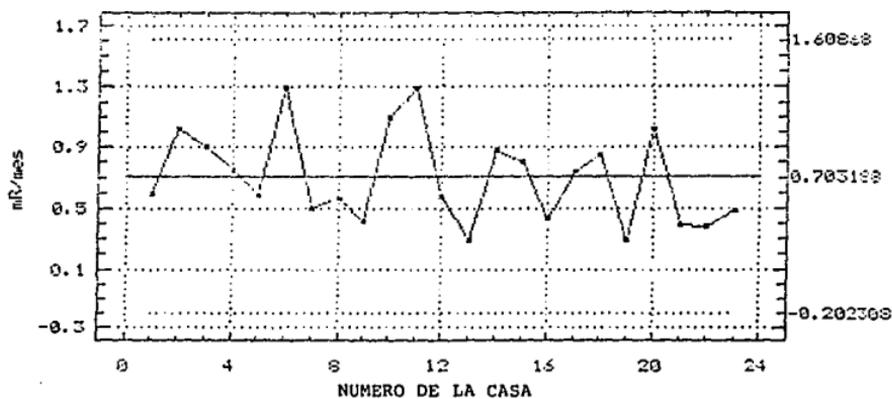


FIG.9.7.6

PROMEDIO DE LOS RANGOS DE LOS DOSIMETROS  
DE JULIO, SEPTIEMBRE Y OCTUBRE



# HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS

## DATOS DE LA CONCENTRACION DE RADON EN LA ZONA ORIENTE DE COYOACAN

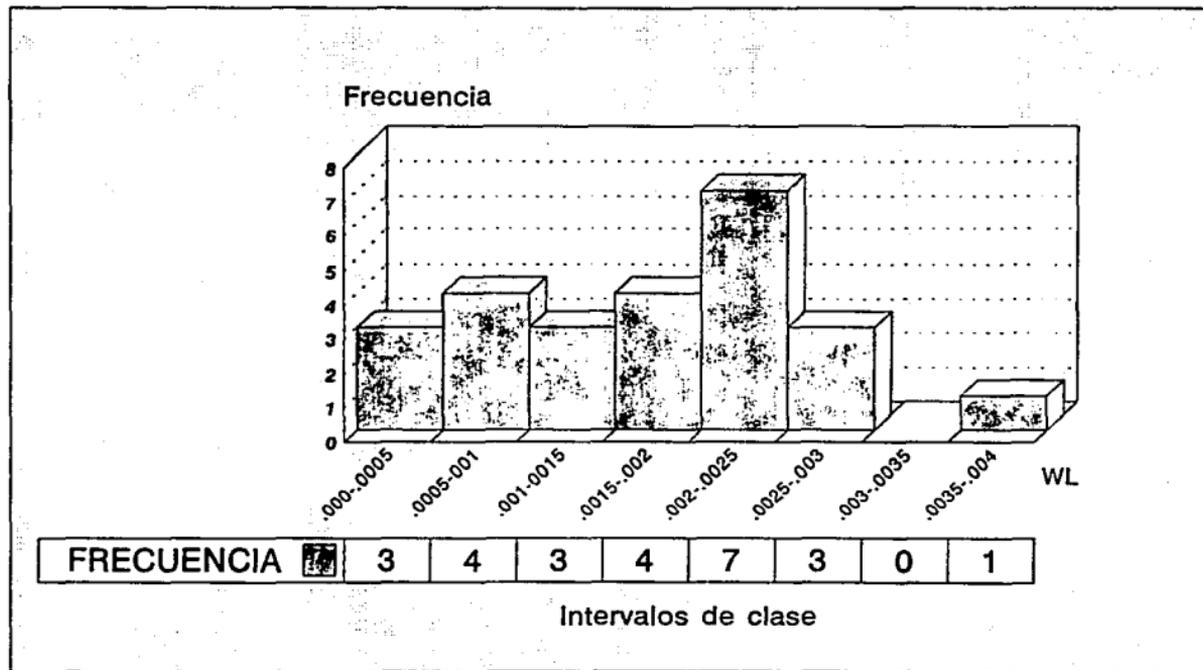


Fig. 9.7.7

## 9.8 CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION, HABITOS Y COSTUMBRES DE LOS MORADORES

Los resultados más relevantes que se obtienen al aplicar la encuesta son los siguientes:

### RESULTADOS DE LA FORMA DE INSPECCION

#### TIPO

1. Edad de la casa.  
1-10 años (28 %)    10-20 años (48 %)    mas de 20 años (24 %)
2. Material de las paredes.  
24 % Bloques huecos  
0 % Bloques rellenos de cemento  
20 % Concreto puro  
40 % Ladrillos rojos  
16 % Ladrillos de arena  
0 % Adobe  
0 % Otros materiales
3. Materiales de la base de la construcción:  
100 % Concreto  
0 % Madera  
0 % Piedra con cemento  
0 % Otros
4. Origen del agua doméstica  
100 % Municipal de origen exterior  
0 % Pozos privados  
0 % Otros
5. Ventilación mecánica  
36 % de los hogares
6. Exteriores de la construcción  
0 % Arboleda espesa  
0 % Arboleda ligera  
36 % Arboleda ligera con construcciones cercanas

- 0 % Terreno abierto
- 64 % Construcción cercana
- 7. Existen medidas de mitigación para el radón
  - 0 % de los hogares
- 8. Actividades inusuales cercanas en el exterior
  - 0 % Granja
  - 20 % Construcción de edificios
  - 4 % Fábricas
  - 12 % Tráfico pesado

#### SUBESTRUCTURA

- 1. Sótano
  - 4 % de los hogares
- 2. Casa elevada sobre muelles
  - 0 % de los hogares

#### OCUPANTES

- 1. Número de ocupantes
 

1-3 (16 %)	4-8 (60 %)	más de 8 (24 %)
------------	------------	-----------------
- 2. Número de fumadores
 

1-3 (16 %)	4-8 (0 %)	más de 8 (0 %)
------------	-----------	----------------
- 3. Que tan frecuentemente se fuma en el hogar
  - 8 % 1-3 cigarrillos
  - 8 % 3-7 cigarrillos
  - 0 % 8-12 cigarrillos
  - 0 % Más de una cajetilla
- 3. Número de niños
 

1-3 (28 %)	4-6 (0 %)	más de 6 (0 %)
------------	-----------	----------------

#### CALIDAD DEL AIRE

- 1. Quejas acerca del aire
  - 0 % Problemas respiratorios
  - 12 % Irritación de los ojos

- 8 % Olores
- 0 % Sofocación
- 12 % Problemas de humedad
- 0 % Problemas de condensación
- 2. Padecimiento de problemas respiratorios frecuentes
  - 92 % 1-2 por año
  - 8 % 3-5 por año
  - 0 % mas de 6 por año

#### PLANTA BAJA

- 1. Uso de la planta baja
  - 0 % Recreación
  - 100 % Doméstico
    - 0 % Almacén
    - 0 % Local de servicios
    - 0 % Otro
- 2. Materiales de recubrimiento del piso
  - 0 % Contiene secciones sin recubrimiento
  - 0 % Mosaicos
  - 0 % Ladrillos
  - 28 % Marmol
  - 8 % Cemento
  - 40 % Losetas
  - 24 % Losetas vinilicas
- 3. Estado del recubrimiento del piso
  - 84 % En buenas condiciones
  - 16 % Algunas grietas
  - 0 % Existen Grietas y huecos
- 4. Accesos a la planta baja
  - 44 % 1 acceso
  - 48 % 2 accesos
  - 8 % más de 2 accesos
- 5. Ventanas en la planta baja

- 24 % 1-5 m<sup>2</sup> aproximadamente
- 56 % 6-10 m<sup>2</sup> aproximadamente
- 20 % mas de 10 m<sup>2</sup> aproximadamente
- 6. Normalmente se encuentran abiertas las ventanas
  - 12 % En el día (7am - 12 am)
  - 72 % En el día y la tarde (7am - 6pm)
  - 16 % En la tarde (12am - 6pm)
  - % Siempre se encuentran abiertas
  - % Siempre se encuentran cerradas
- 7. Drenaje
  - 76 % 6 pulgadas de diámetro en promedio
  - 24 % Más de 6 pulgadas de diámetro en promedio
  - 0 % Existen fugas
- 8. Agua potable
  - 76 % Pulgadas de espesor en promedio
  - 32 % Pulgadas de espesor en promedio
  - 8 % Existen fugas
  - 28 % Conectado a cisternas
  - 72 % Se tienen tanques estacionarios
- 9. Penetraciones entre el subsuelo y el primer piso
  - 100 % Por plomeria
  - 12 % Por Servicios eléctricos
  - 0 % Por respiraderos
  - 0 % Otros

#### SERVICIOS

- 96 % Hornos
- 100 % Calentadores de agua
- 4 % Aire acondicionado
- 0 % Agua tratada
- 92 % Extractores
- 100 % Armarios

## **10 Conclusiones**

1.- Las calibraciones de eficiencia de conteo y del flujo de la bomba estuvieron dentro del rango que se recomiendan; por lo tanto las lecturas de los muestreos son precisas y confiables.

2.- Al observar la gráfica de los promedios para las 25 casas monitoreadas, se concluye, que las dos primeras horas de funcionamiento del equipo son para que se establezca y los valores del rango sobre toda la primera hora quedan fuera de límite de control, por lo que es preferible hacer un muestreo de por lo menos 26 horas.

3.- El método de control estadístico de calidad de gráficos de control por variables garantiza un intervalo de confianza de 99.73% ó  $3\sigma$ .

4.- El promedio aritmético de concentración en las casas muestreadas en la zona oriente de la delegación de Coyoacán fue  $1.74E-3$  WL +  $-0.00094$  (4.87%) de variación o equivalente a  $0.3724$  pCi/l ó  $12.843 \pm 6.97$  Bq/m<sup>3</sup> de radón con un factor de equilibrio de 0.5, con un % de torón insignificante. El 100% de casas mostró una concentración menor al nivel de no acción de EPA de  $0.02$ WL ó  $148$ Bq/m<sup>3</sup> de radón.

5.- El límite máximo de concentración esperado por el método estadístico fue de  $3.310E-3$  WL ó  $0.662$ pCi/l. Aún esta concentración esta por abajo del recomendado por las organizaciones internacionales. EPA recomienda que con  $4$ pCi/l en interiores no se tome ninguna acción.

6.- El promedio aritmético de la concentración en el exterior para la zona monitoreada es de  $1.459E-3$  WL  $\pm 0.000457$  (5.84%),  $0.29183$ pCi/l,  $10.796 \pm 3.38$  Bq/m<sup>3</sup> de radón (factor de equilibrio = 0.5), dentro los valores reportados para zonas continentales.

7.- El límite máximo de concentración que se puede esperar en exteriores de acuerdo con el análisis estadístico es de  $3.299E-3$  WL ó  $0.6598$  pCi/l que esta por debajo de  $0.02$  pCi/l, que es el promedio reportado por la EPA en el medio ambiente y dentro de los valores reportados por otros autores.

8.- Si tratamos de evaluar el efecto de la concentración máxima encontrada ( $0.662$  pCi/l) en la Delegación de Coyoacán sería comparable al de que una persona se tomara al año 60 placas de rayos X o bien el 1%, de las personas que hayan vivido 70 años en la delegación podrían morir de cancer de pulmón por causa del radón (ver cap. 7.7)

9.- El porcentaje relativo de desviación del promedio (% RMD) que se obtuvo con el monitor continuo en niveles de trabajo en el interior de las casas es reproducible en el interior con una desviación del 0.65% y en el exterior de 1.32% de acuerdo a las mediciones de seguimiento (blancos y duplicados).

10.- La tasa de exposición gamma promedio registrada por los dosímetros termoluminiscentes fue: Promedio aritmético  $7.33$  mR/mes  $\pm 0.58$  ó  $9.81$   $\mu$ R/h  $\pm 0.66$ . El promedio geométrico fue de  $9.79$   $\mu$ R/h con un rango de  $8.80$  a  $11.21$   $\mu$ R/h.

11.- El porcentaje relativo de desviación del promedio (%RMD) obtenido con los duplicados (duplicado - muestra) fue de 8.43% en el mes de agosto, 6.41% y 5.21% en los meses de septiembre y octubre con un promedio de 0.53% lo que muestra que las medidas son muy reproducibles.

12.- Fue evidente que en la zona oriente de Coyoacán como se ha reportado ya ampliamente la concentración del radón comienza a aumentar en la madrugada hasta alcanzar un máximo a las 8 horas de la mañana, cuando comienza a disminuir, entre otras causas es cuando se abren las ventanas, hasta alcanzar los niveles mas bajos en la tarde alrededor de las 18 horas, comenzando a incrementarse nuevamente al aumentar la estabilidad atmosférica, y empezar a cerrarse las ventanas y puertas, repitiéndose el ciclo.

Esto indica que además de las condiciones atmosféricas y tipo de suelo, la ventilación es una de las variables más importantes para la mitigación del radón en los hogares.

13.- Como se mencionó en el capítulo 5 las rocas volcánicas tienen concentraciones bajas de uranio (1ppm), las casas 01 y 02 que están contruidas sobre roca volcánica, ambas tienen ventilación similar pero el piso es diferente, siendo el de la casa 01 de cemento (compuesto principalmente de arcilla) y el de la casa 02 de loseta de mármol; y conociendo además que la arcilla es de origen sedimentario con menor concentración de uranio y el mármol de origen metamórfico con mayor concentración de uranio, era de esperarse que la concentración de la progenie de radón en el aire fuera menor en la casa 01 que en la casa 02 que fue lo que se encontró experimentalmente y que corrobora la importancia fundamental de tipo de piso y suelo en la concentración de radón y sus descendientes.

15.- La zonas del oriente de Coyoacán en las partes bajas, norte y sureste son de origen sedimentario y su contenido de elementos radiactivos no alcanza 1ppm por lo que era de esperarse que la zona no tuviera problema de altas concentraciones de radón.

16.- La ecuación que describe el comportamiento del radón en un día fue una ecuación de un polinomio :

$$Y = 0.000896087 + 0.00050249 X - 0.0000685644 X^2 + 9.25857E-6 X^3 \\ - 9.8965E-7 X^4 + 4.79893E-8 X^5 - 8.03281E-10 X^6$$

donde X representa la hora del día. Esta ecuación describe la tendencia que tiene la concentración de la progenie del radón en el aire de las casas en la zona oriente de Coyoacán.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Alan M. Portis y Young "Física Nuclear" Ed. Reverte S.A. 2a ed España (1974)
2. Brooks O.Bradford and Davis F.William "Understanding indoor AirQuality" Ed. CRC Press U.S.A. pp. 61-63, 122-126 (1992)
3. Coppens, Rene "La radioactividad de las rocas" Ed. EUDEBA. Argentina (1963)
4. Crawford-Brown D.J "Age-dependent lung doses from ingested Rn-222 in drinking water" Health Physics 52(2):149-159 (1987)
5. Enciclopedia temática ilustrada "Mente Sagaz" Ed. Verga Barcelona España Vol.3 pp.1037-1040 (1973)
6. EPA "Interin Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Protocols" EPA 52/1-86-04, Office of Radiation Program. Washington. D.C:U.S. Environmental Protection Agency (1986)
7. EPA. "National occurrence of Radon and other Natural Radioactivity in Public Water Supplies" EPA 520/5-85-008. Eastern Environmental Radiation Facility. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency (1985)
8. EPA. "Radon Reference Manual" EPA 520/1-87-20. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency (1987)
9. Fitzgerald, J.E. et al. "A Preliminary Evaluation of the Control of Indoor Radon Daughter Levels in New Structures" EPA-520/4-76-018 (1976)
10. Fleischer, R.L. and L.G. Turner "Indoor radon measurement in the New York Capital District" Health Physics 46(5):999-1011 (1984)
11. George A.C. et al. "Radon and Radon daughter measurements in solar buildings" Health Physics 45(2):413-420 (1983)
12. Goldmith, W.A. et al. Radon-222 and progeny measurements in typical east Tennessee residences" Health Physics 45(1):81-88 (1983)
13. Hansen J.Shirley "Managing Indoor air Quality" Ed. The Fairmont Press. Inc. U.S.A. pp. 7-8,55,64-65,136-137,227,275-280 (1991)
14. Hargje, D.T and K.J. Gadsby. "Practical Engineering Solutions for Optimizing Energy Conservation and Indoor Air Quality in Residential Buildings " 333-341 : In Proceedings of IAQ 86 "Managing Indoor Air for Health and Energy Conservation"

- American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. Atlanta. (1986)
- 15.Henschel, D.G. and A.G.Scott "The EPA Program to Demonstrate Mitigation Measures for Indoor Radon: Initial Results" 110-121 In: Proceedings: Indoor Radon. APCA Specialty Conference. Air Pollution Control Association, Pittsburgh. (1986)
  - 16.Holub, R.F. et al. "Radon-222 and radon-220 Progeny concentrations measured in energy-efficient house equiped with a heat exchanger " Health Physics 49(2):267-277 (1985)
  - 17.Horacio E.Bosch "Nociones de Física Nuclear y Radiodosimetría" Ed. EUDEBA Argentina (1965)
  - 18.Juan Azorín Nieto "Protección Radiológica III Efectos biológicos" Ed. ININ México 1992; "Health Phisy. 56,4(1989) 55pp
  - 19.Kay G.Jay et al. "Indoor air Pollution" Ed. Lewis Publishers U.S.A. pp. 135-217 (1991)
  - 20.Lao,Kenneth Q "Controlling indoor Radon:measurement, mitigation and prevention" Ed. Van Nostrand Reinhold, New York (1990)
  - 21.Merckler P.Milton "Indoor Air Quality Design Guidebook" Ed.Prentice-Hall U.S.A. pp. 13-21, 273 (1990)
  - 22.Ordoñez Ezequiel "Las rocas eruptivas de la cuenca de México" Boletín No 2 Instituto de Geología de México, Mex.D.F.(1895)
  - 23.Richard Cothorn "Radon, radium and uranium in drinking water" Ed. Lewis Publishers (1991)
  - 24.Rogers, V.C. et al. "Radon attenuation Hanbook for Uranium Tailings Cover Design" Rogers y Assoc. Engineering Corp. (1984)
  - 25.Sanders C.L.and Kathren R.L. "Ionizing Radiation: Tumoricidal Effects" Ed. Battelle Press. Columbus,Ohio, (1983)
  - 26.Silvia Bulbullaín "La radiactividad" Ed. Fondo de Cultura Económica México (1987)
  - 27.Chavez Flores, Piedad " Estudio Geográfico de la Delegación de Coyoacán " tesis (1959)
  - 28.Galán Cárdenas Graciela "Mediciones físicas empleando fuentes radiactivas puntuales" Tesis F.Química (1989)
  - 29.García R. Juan José "Monitoreo de radón en casas habitación" Tesis F. Química

(1994)

30. Suarez Sarabia, Irene Alicia "Estudio Geográfico de la delegación de Coyoacán, Distrito Federal" Tesis (1961)
31. U.S. Department of Health. "Radiological Health Handbook" Education and Welfare. U.S (1970)
32. Villaronga Maicas M. "Atlas del Atomo" ED. Jover, S.A. 10a ed Barcelona (1979)
33. Thad Godish "Indoor Air Pollution Control" Ed. Lewis Publishers 3a ed., U.S.A. (1991)
34. Wadden A. Richard et al. "Contaminación del aire en interiores" Ed. Limusa México pp. 15,25,50,67,78,80-85,133,209 (1987)
- 35 T.F. Getsell. Health Phys. 45(1983)289