

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

## **CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

*Trabajo Experimental Previo a la Obtención del Título de*

**Ingeniero Ambiental**

### **TEMA:**

CÁLCULO DEL RIESGO RADIOLÓGICO DEBIDO A LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN  
EN LOS CENTROS DE EDUCACIÓN INICIAL DE LA ZONA URBANA Y RURAL DE  
CUENCA, ECUADOR

### **AUTOR:**

Bruno Antonio Castillo Moyano

### **DIRECTOR:**

Dr. Tony Jesús Vilorio Ávila, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Bruno Antonio Castillo Moyano portador de la cédula de ciudadanía 1400566624 autor de la tesis “Cálculo del Riesgo Radiológico debido a la concentración de radón en los Centros de Educación Inicial de la zona urbana y rural de Cuenca, Ecuador”, certifico que el total contenido del presente “Trabajo experimental” es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Noviembre de 2016

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Bruno Antonio Castillo Moyano', with a stylized flourish at the end.

Bruno Antonio Castillo Moyano

1400566624

## **CERTIFICACIÓN**

Yo declaro que bajo mi dirección fue desarrollado el trabajo de titulación “CÁLCULO DEL RIESGO RADIOLÓGICO DEBIDO A LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN LOS CENTROS DE EDUCACIÓN INICIAL DE LA ZONA URBANA Y RURAL DE CUENCA, ECUADOR”, realizado por, Bruno Antonio Castillo Moyano, obteniendo un “Trabajo Experimental” que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como Trabajo de Titulación

Cuenca, Noviembre de 2016



Tony Jesús Vilorio Ávila

083893634

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Bruno Antonio Castillo Moyano portador de la cédula de ciudadanía 1400566624 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que soy autor del trabajo de grado “Cálculo del Riesgo Radiológico debido a la concentración de radón en los Centros de Educación Inicial de la zona urbana y rural de Cuenca, Ecuador”, mismo que ha sido desarrollado para obtener el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Cuenca, Noviembre de 2016

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Bruno Antonio Castillo Moyano', with a stylized flourish at the end.

Bruno Antonio Castillo Moyano

1400566624

## **DEDICATORIA**

De manera especial dedico este trabajo a mis padres pues su amor incondicional hacia mí, ha sido la raíz de todo lo bueno que mis manos han podido crear.

A mi esposa Nataly quien siempre ha corrido el riesgo de viajar conmigo, fogata de amor y guía, razón de vivir mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres y hermanos pues siempre han sido el círculo de amor, sobre el cual he girado, su presencia y apoyo siempre ha sido pieza fundamental en mis pasos.

A mi tutor del Trabajo Experimental, Dr. Tony Vilorio Ávila Phd., por su apertura, entrega y gentil colaboración al momento de dirigir el desarrollo del tema propuesto y sobre todo por expandir mi conocimiento en el mundo de la radiactividad

**Tabla de Contenidos**

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	PROBLEMA	1
1.2.	DELIMITACIÓN	3
1.1.1.	Delimitación temporal	3
1.1.2.	Delimitación espacial	3
1.3.	EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.4.	OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICO	6
1.4.1.	Objetivo General	6
1.4.2.	Objetivos Específicos	6
1.5.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
1.5.1.	Radiaciones Ionizantes	7
1.5.1.1.	Decaimiento	7
1.5.1.2.	Tipos de Radiación Ionizante	9
1.5.1.3.	Fuentes de Radiación Ionizante	11
1.5.2.	Interacción de la Radiación con la Materia.	14
1.5.2.1.	Efecto Fotoeléctrico	16
1.5.2.2.	Efecto Compton	17
1.5.2.3.	Producción de pares	18
1.5.2.4.	Efectos Biológicos de las Radiaciones	19
1.5.3.	Dosimetría	24
1.5.3.1.	Dosis Absorbida (D)	25
1.5.3.2.	Dosis Equivalente (H)	25
1.5.3.3.	Dosis Efectiva (E)	26
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1.	DISEÑO	28
2.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA	29
2.3.	RECOPIACIÓN DE DATOS	31
2.3.1.	Distribución y Colección de Detectores	31
2.3.2.	Proceso Químico de Revelado o Grabado:	33
2.3.3.	Digitalización y Conteo de Trazas:	34
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35

3.1.	PRESENTACIÓN DE LOS DATOS	38
3.2.	DISCUSIÓN	43
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
4.1.	Conclusiones	45
4.2.	Recomendaciones	46
5.	BIBLIOGRAFÍA	47
6.	ANEXOS	50
6.1.	Checklist de información de las aulas	50
6.2.	Especificaciones técnicas del detector LR115	51
6.1.	Mapa de Ubicación y Riesgo Radiológico	513

### Lista de Tablas

Tabla 1. Máximo, Mínimo y Promedio de los niveles de Radón Residencial-----	2
Tabla 2. Ubicación Geográfica de los CEI Urbanos de Cuenca Monitoreados -----	3
Tabla 3. Ubicación Geográfica de los CEI Rurales de Cuenca Monitoreados -----	4
Tabla 4. Resumen de Precipitación y Temperatura media anual del Aeropuerto Mariscal Lamar---	4
Tabla 5. Dosis debida a fuentes naturales -----	12
Tabla 6. Factores de ponderación de la radiación recomendados. -----	26
Tabla 7. Factores de ponderación de los tejidos recomendados -----	26
Tabla 8. Tamaño de la muestra de la población de CEI de Cuenca -----	30
Tabla 9. Centros de Educación Inicial seleccionados, Zona Urbana -----	30
Tabla 10. Centros de Educación Inicial seleccionados, Zona Rural -----	30
Tabla 11. Características de los Centros de Educación Inicial de Cuenca -----	31
Tabla 12. Densidad de Trazas y Concentración de Radón en los CEI de Cuenca -----	38
Tabla 13. PAEC, Dosis Anuales, Indice, ELCR, de los CEI de Cuenca -----	41
Tabla 14. Características de las aulas de los CEI de Cuenca -----	42

### Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Fuentes de Radón en construcciones.-----	14
Ilustración 2. Esquema del proceso de Ionización y Exitación-----	15
Ilustración 3. Capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación en la materia -----	15
Ilustración 4. Esquema del proceso de interacción fotoeléctrica-----	17
Ilustración 5. Esquema del proceso de interacción Compton. -----	18
Ilustración 6. Esquema del proceso de formación de pares -----	19
Ilustración 7. Dimensiones de los detectores LR-115 colocados -----	32
Ilustración 8. Utilización del Software IMAGEJ -----	35

### Lista de Gráficos

Gráfico 1. Registro Anual de Precipitación en Cuenca -----	5
Gráfico 2. Registro Anual de Temperatura en Cuenca -----	6
Gráfico 3. Histograma de Frecuencias de la Concentración de Radón en Cuenca -----	39
Gráfico 4. Relación Concentración – Densidad de los CEI de Cuenca-----	40
Gráfico 5. Dosis Anual y Dosis Efectiva de los CEI de Cuenca -----	41

### **Lista de Fotografías**

Fotografía 1. a) Altura de los detectores; b) Porta detectores -----	32
Fotografía 2. Campo de visión Cuadrículado y Dimensionado (mm) -----	34

### **Lista de Ecuaciones**

Ecuación 1. Número de núcleos radiactivos -----	8
Ecuación 2. Constante de Desintegración -----	8
Ecuación 3. Actividad de una muestra radiactiva -----	8
Ecuación 4. Vida Media o Tiempo de semi-desintegración -----	9
Ecuación 5. Media vida o Vida promedio -----	9
Ecuación 6. Dosis Absorbida -----	25
Ecuación 7. Dosis Equivalente -----	26
Ecuación 8. Dosis Efectiva -----	26
Ecuación 9. Tamaño de la muestra -----	29
Ecuación 10. Densidad de Trazas -----	35
Ecuación 11. Densidad de Trazas del detector control -----	35
Ecuación 12. Concentración de Radón -----	36
Ecuación 13. Error promedio de la densidad de trazas -----	36
Ecuación 14. Equilibrio Equivalente de la concentración de radón -----	36
Ecuación 15. Concentración de Energía Alfa Potencial -----	36
Ecuación 16. Dosis Anual Absorbida -----	37
Ecuación 17. Dosis Anual Equivalente -----	37
Ecuación 18. Dosis Anual Efectiva -----	37
Ecuación 19. Índice Alfa -----	38
Ecuación 20. Incremento de Riesgo de Cáncer -----	38

### **Lista de Anexos**

Anexo 1. Checklist de información de las Aulas -----	50
Anexo 2. Especificaciones Técnicas del Detector LR-115 -----	51
Anexo 3. Mapa de Riesgo Radiológico de los CEI de Cuenca -----	51
Anexo 4. Ubicación de los CEI de Cuenca Urbana y Rural -----	52

## RESUMEN

El número de trabajos publicados en revistas especializadas y el número de programas a nivel mundial para la determinación de los niveles de radón en las aulas de los centros de educación, reflejan el gran interés en monitorear y reducir los riesgos radiológicos debido a la exposición al radón, en estos recintos. El presente trabajo resulta ser el primero en su índole, en el Ecuador. Gracias a la colaboración del Ministerio de Educación y la Dirección Zonal 6, se pudo medir las concentraciones de radón en 32 instituciones, en las zonas rurales y urbanas de Cuenca. Para ello se utilizaron los detectores sólidos de trazas nucleares (DSTN) LR-115 tipo II, en modo desnudo, los cuales, se ubicaron a una distancia del suelo de 1,50 m. y a una distancia mayor a los 10 cm. de cualquier superficie cerca de ellos, por 30 días.

Una vez expuestos, estos fueron tratados químicamente con NaOH A 2,5 Normal, 60 °C, por 70 minutos. La mínima concentración de radón ( $6,151 \text{ Bq/m}^3$ ) se encontró en la escuela de educación básica “José Victor Ordóñez Zambonino” en la parroquia Santa Ana, mientras que la máxima ( $47,16 \text{ Bq/m}^3$ ) se detectó en la unidad educativa “Turi” en la parroquia Turi, el promedio calculado fue de  $20,03 \text{ Bq/m}^3$ . Estos valores se encuentran por debajo de los límites superiores de intervención recomendados por organismos internacionales como la EPA ( $150 \text{ Bq/m}^3$ ), ICRP (200 a  $600 \text{ Bq/m}^3$ ) y WHO ( $200 \text{ Bq/m}^3$ ).

## ABSTRACT

Number of works published in specialized and number of programs worldwide for determining the levels of radon in classrooms of education centers, shows the great interest in monitoring and reducing the radiation risks due to exposure to radon, in these places. This work turns out to be the first to its kind in Ecuador. Thanks to the collaboration of the Ministerio de Educación and Dirección Zonal 6 for making possible measuring radon concentration in 32 institutions in urban and rural areas of Cuenca. For these purpose the solid state nuclear track detectors (SSNTD) LR-115 type II, was used in the bare mode. Those were located at a distance from the floor of 1.50 m. and at distance larger than 10 cm of any surface near them, for 30 days. Once they were exposed, they were chemically treated with NaOH 2.5 N, 60 ° C, for 70 minutes. The minimum concentration of radon (6,151 Bq / m<sup>3</sup>) was found in school "José Victor Ordóñez Zambonino", Santa Ana parish, while the maximum (47.16 Bq/m<sup>3</sup>) was detected in school "Turi" Turi parish, the average radon concentration calculated, was 20.03 Bq/m<sup>3</sup>. These are values below the upper intervention limits recommended by international agencies such as EPA (150 Bq/m<sup>3</sup>), ICRP (200 to 600 Bq/m<sup>3</sup>) and WHO (200 Bq/m<sup>3</sup>).

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. PROBLEMA

El radón y su progenie son las más importantes fuentes de radiación ionizante que se encuentra en nuestro ambiente, ocupando aproximadamente el 50% de las fuentes naturales de radiactividad (National Toxicology Program, 2014) que son responsables de causar efectos adversos en los pulmones humanos.

El problema se origina cuando existen altas concentraciones de radón dentro de una habitación ya que, las partículas inhaladas por las personas que ocupan la habitación, irradian radiación alfa a las células epiteliales bronquiales de los pulmones, aumentando la probabilidad de inducir cáncer de pulmón.

Por esta razón el radón ha sido clasificado por la (Organización Mundial de la Salud, 2009) con ayuda de la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer<sup>1</sup>, como un carcinógeno del Grupo 1. Esto coloca al radón en el mismo grupo de sustancias cancerígenas como el asbesto y el humo del tabaco como causa de cáncer de pulmón.

Las estrategias para reducir la exposición al radón y sus afecciones, deben estar basadas en cuantificar la información sobre la variación geográfica de la concentración del radón en el interior de las infraestructuras en un país, así también como el número y la localización de las edificaciones con altos niveles de radón, logrando así determinar una base de datos primaria que nos permita identificar las zonas de mayor riesgo radiológico debido a la concentración de radón.

Por otra parte, la tasa de producción de radón en edificaciones depende de la concentración del radio en el subsuelo, materiales de construcción, grietas en los pisos y paredes, las rutas de acceso hacia la habitación, la porosidad, así como la densidad del material de la pared. Las variaciones geográficas de las concentraciones de radón en el interior de las infraestructuras, están relacionadas con las diferencias regionales de la composición del suelo, el clima y otros factores. (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, 2010).

---

<sup>1</sup> International Agency for Research on Cancer (IARC)

En un estudio realizado por (Canoba, y otros, 2002) en seis países de América del Sur, muestra una alta concentración de radón residencial en Ecuador, medido en la ciudad de Quito por la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica, como se puede observar en la Tabla 1.

*Tabla 1. Máximo, Mínimo y Promedio de los niveles de Radón Residencial*

Ref. No.	Country	Indoor Radon Level (Bq/m <sup>3</sup> )		
		Max	Min	Mean
1	ARGENTINA	286.0	15	36.96
2	BRAZIL	310.0	16.7	81.95
3	BRAZIL	262.7	15	79.92
4	ECUADOR	225.66	20.39	94.30
5	MEXICO	280	15	83.25
6	MEXICO	300	43	88.00
7	MEXICO	103.7	15	30.62
8	PERU	50.20	18.57	32.29
9	VENEZUELA	346	15	52.50

*Fuente: (Canoba, y otros, 2002)*

Si consideramos que:

- El radón es más denso que el aire, y que por ende éste se concentra en las capas inferiores de las infraestructuras donde éste se encuentre,
- La estatura promedio de los niños de educación inicial, o la altura de sus cabezas al suelo cuando se encuentran sentados en las mesas de juego, o cuando juegan en el piso es baja,
- Los niños tienen los pulmones más pequeños y por lo tanto una tasa de respiración más alta,
- Alto tiempo de ocupancia de los niños en las Instituciones Escolares.

Debido todo lo anterior expuesto encontramos que los niños están más expuestos al radón que los adultos, por lo que el monitoreo constante y la evaluación del radón en las aulas de educación inicial es de suma importancia.

## 1.2. DELIMITACIÓN

### 1.1.1. Delimitación temporal

La (EPA, 1993) recomienda que las mediciones iniciales de radón en el interior de edificaciones se realicen mediante pruebas a corto plazo debido a que:

- Es la forma más rápida para la prueba de radón.
- Proporciona resultados más rápidos
- Se puede dar una pronta respuesta en caso de encontrar niveles altos.

En esta prueba, los dispositivos a medir permanecieron en las distintas aulas de los Centros de Educación Inicial por un período de 90 días.

### 1.1.2. Delimitación espacial

La investigación se desarrolló en los centros de educación inicial ubicados en:

- Provincia: Azuay
- Cantón: Cuenca
- Parroquias Urbanas:

*Tabla 2. Ubicación Geográfica de los CEI Urbanos de Cuenca Monitoreados*

NOMBRE	PARROQUIA	X	Y
ANGEL POLIVIO CHAVEZ	SUCRE	720760,412	9678481,974
ANTONIO BORRERO VEGA	SAN SEBASTIÁN	720979,497	9679674,379
CARLOS ZAMBRANO OREJUELA	HUAYNACÁPAC	722597,023	9677969,197
CAZADORES DE LOS RIOS	MACHÁNGARA	726710,854	9681185,572
TOTORACOCHA	TOTORACOCHA	724500,687	9680102,518
CIUDAD DE CUENCA	GIL RAMÍREZ DÁVALOS	721405,079	9680053,7312
LEONCIO CORDERO JARAMILLO	YANUNCAY	717840,342	9677798,357
LUIS CORDERO	HERMANO MIGUEL	724412,6512	9682219,2552
MARY CORYLE	EL VECINO	723239,052	9680299,622
RAFAEL AGUILAR PESANTEZ	BELLAVISTA	720356,3	9681215,994
RITA CHAVEZ DE MUÑOZ	CAÑARIBAMBA	723569,967	9679188,603
VICTOR GERARDO AGUILAR	SAN SEBASTIÁN	720317,624	9680386,446

*Fuente: Ministerio de Educación, 2016*

- Parroquia Rurales:

*Tabla 3. Ubicación Geográfica de los CEI Rurales de Cuenca Monitoreados*

RÓTULO	NOMBRE	PARROQUIA	X	Y
RU01	ALFONSO CARRION HEREDIA	BAÑOS	715295,7835	9676633,9262
RU02	ALBERTO ASTUDILLO MONTESINOS	RICAUARTE	725933,3588	9683312,7436
RU03	JESUS VASQUEZ OCHOA	SAYAUSÍ	715128,234	9681462,997
RU04	SININCAY	SININCAY	720621,536	9684627,846
RU05	CHIQUINTAD	CHIQUINTAD	722375,6606	9689196,1952
RU06	DORA BEATRIZ CANELOS	SIDCAY	724361,9423	9687373,9934
RU07	SAN JOAQUIN	SAN JOAQUÍN	716721,9194	9679703,6068
RU08	ELOY ALFARO	VALLE	725148,6877	9676370,7565
RU09	FRANCISCO ASTUDILLO	TURI	719801,1101	9674199,0333
RU10	FRANCISCO EUGENIO TAMARIZ	NULTI	732606,0755	9683392,9119
RU11	FRANCISCO MOSCOSO	TARQUI	713842,9085	9668836,3503
RU12	GONZALO S. CORDOVA	LLACAO	728687,9878	9686288,0087
RU13	JAVERIANO	SAYAUSÍ	714255,0778	9682196,2324
RU14	AGUSTIN CUESTA VINTIMILLA	BAÑOS	717084,4819	9683312,744
RU15	JOSE VICTOR ORDÑEZ ZAMBONINO	SANTA ANA	733066,7954	9670377,2568
RU16	JUAN PEÑAFIEL	SANTA ANA	727689,154	9670501,714
RU17	MARIA CARABAJO	TARQUI	718536,5463	9666569,9675
RU18	PACCHA	PACCHA	729336,8327	9679490,7909
RU19	TURI	TURI	721009,8254	9676501,0492
RU20	VICTORIA DEL PORTETE	VICTORIA DEL PORTETE	715192,4481	9661857,868

*Fuente: Ministerio de Educación, 2016*

### 1.1.2.1. Clima

Los datos climáticos de la ciudad están referidos a temperatura, humedad y precipitaciones y han sido tomados de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) ubicada en el Aeropuerto Mariscal Lamar de la ciudad de Cuenca.

*Tabla 4. Resumen de Precipitación y Temperatura media anual del Aeropuerto Mariscal Lamar*

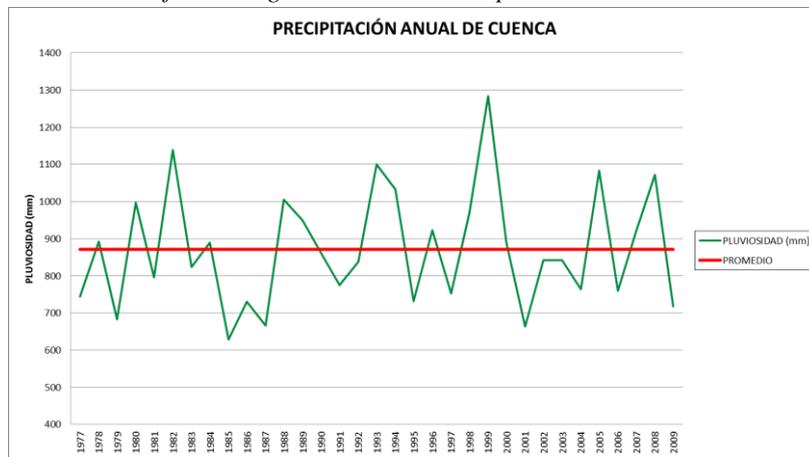
AÑO	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
TEMPERATURA (°C)	16,3	15,9	16,3	16,1	16,4	16,2	16,7	15,8	15,6	15,9	16,6	16	15,6	16,3	16,4	16,5	16
PLUVIOSIDAD (mm)	744,3	892,3	683,4	996,7	796,2	1138,4	823,9	889,6	627,7	730,3	666,2	1005	949,2	860,3	775	837,3	1099,6
AÑO	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
TEMPERATURA (°C)	16	15,9	16,4	15,9	16,6	17,1	15,9	16	16,4	16,6	16,4	16,7	16,8	16,6	16,1	15,8	17
PLUVIOSIDAD (mm)	1099,6	1032,8	732	922,3	752,1	968,7	1283,8	889,8	662,6	841,6	841,6	763,4	1082,3	759,6	919,8	1071,2	717

*Fuente: INAMHI*

- **Precipitación:** Según los datos registrados por la estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar de la ciudad de Cuenca la precipitación anual varía entre 627,7 a 1283,8 mm., siendo el promedio anual de 871,4 mm.

Los meses más lluviosos en Cuenca son Marzo, Abril, Mayo, Noviembre y Diciembre con una precipitación que oscila entre los 125 mm y 178 mm, los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre son relativamente más secos con valores que varían entre 4,2 y 38,6 mm. como se indica en el Gráfico 1.

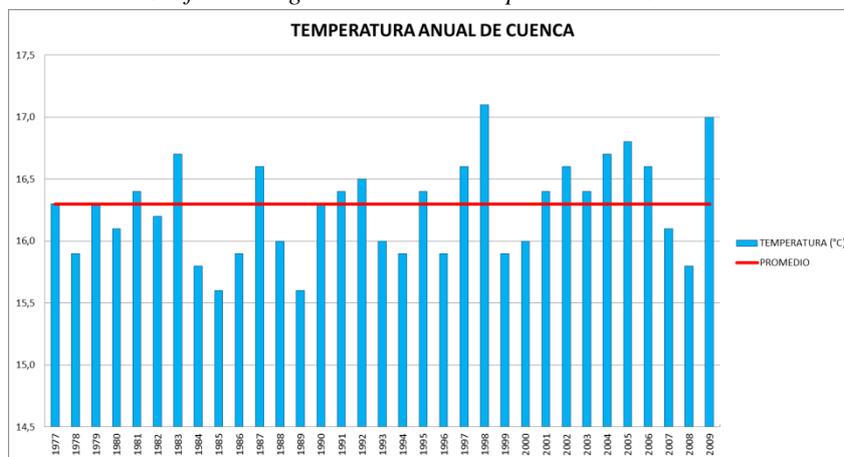
Gráfico 1. Registro Anual de Precipitación en Cuenca



Fuente: INAMHI

- **Temperatura:** La temperatura se estableció en base al registro de los años 1977 a 2009 de la misma estación meteorológica, así, la temperatura media anual varía entre los 15,6 y 17,1 °C, siendo dichos valores las mínimas y máximas respectivamente, la variación diaria está entre 7 °C y 15 °C, como se puede observar en el Gráfico 2.

Gráfico 2. Registro Anual de Temperatura en Cuenca



Fuente: Aeropuerto M. Lamar, Registros Históricos de Precipitación, 2009

### 1.3. EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA

La causa principal del problema a investigar nos lleva a determinar:

¿Cuál es el Riesgo Radiológico debido a la concentración de radón en los Centros de Educación Inicial de la zona rural y urbana de Cuenca, Ecuador?

### 1.4. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICO

#### 1.4.1. Objetivo General

Calcular el riesgo radiológico debido a la exposición al radón en las aulas de educación inicial de la zona rural y urbana de Cuenca.

#### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Calcular las concentraciones de radón en algunos centros de educación inicial de Cuenca, Ecuador.
- Estimar la dosis anual absorbida por los niños(as) y docentes de los centros de educación inicial seleccionados.

- Estimar la dosis anual efectiva por los niños(as) y docentes de los centros de educación inicial seleccionados.

## 1.5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.5.1. Radiaciones Ionizantes

“La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones). La desintegración espontánea de los átomos se denomina radiactividad, y la energía excedente emitida es una forma de radiación ionizante.” (Organización Mundial de la Salud, 2012).

Henri Becquerel, en 1896, descubrió la radiactividad, cuyo fenómeno consiste en la reacción nuclear de “decaimiento”, es decir, un nucleído inestable se descompone en otro más estable que él, a la vez que emite energía.

#### 1.5.1.1. *Decaimiento*

Cuando un átomo radiactivo se desintegra, las partículas que están dentro de él (neutrón, protón y electrón) dan origen a otras partículas. Las partículas alfa, beta y radiación gamma son las más características de un fenómeno de radiación nuclear.

- **Número de Núcleos Radiactivos.-** Para (Young & Freedman, 2009): Sea  $N$  el número (muy grande) de núcleos radiactivos en una muestra en el tiempo  $t$ , y sean  $dN(t)$  el cambio (negativo) en ese número durante un intervalo corto  $dt$ . El número de desintegraciones durante  $dt$  es  $-dN(t)$ .

Cuantos más núcleos hay en el espécimen, más núcleos se desintegran durante cualquier intervalo de tiempo. Esto es, la actividad es directamente proporcional al  $N(t)$ : es igual a la constante  $\lambda$  multiplicado por  $N(t)$ .

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

Integrando y despejando obtenemos:

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

**Constate de Desintegración.-** (Acosta, 1975) nos dice que: Si  $N$  representa el número de átomos presentes en un tiempo dado y  $dN$  representa el número de desintegraciones durante un intervalo de tiempo  $dt$ , entonces

$$\text{probabilidad de desintegración} = -\frac{dN}{N}$$

Donde el signo menos indica que  $dN$  siempre es negativo, la desintegración por unidad de tiempo es

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \text{constante} \quad (2)$$

- **Actividad de una muestra radiactiva (A).**- Según (García, 2000), es el número de desintegraciones que ocurren por unidad de tiempo, cada vez que se efectúa una desintegración, disminuye el número de  $N$  de núcleos radiactivos, es decir la actividad se obtiene dividiendo  $dN$  (cambio de número de núcleos), entre  $dt$  (intervalo de tiempo durante el cual se efectúa el cambio).

El número de desintegraciones que ocurren por segundo en una muestra es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes, de modo que

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3)$$

- **Vida Media o Tiempo de Semi-Desintegración ( $T_{1/2}$ ).**- (Acosta, 1975) indica que el tiempo transcurrido en el cual el número de átomos decae a la mitad del número inicial, o el tiempo en el cual la actividad disminuye a la mitad de la actividad inicial. Cuando  $t = T_{1/2}$  entonces, el número de átomos presentes de una clase dada es  $N = 1/2 N_0$ .

Sustituyendo los valores de  $N$  y despejando obtenemos:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4).$$

- **Media vida o Vida Promedio.**- Es el tiempo de vida promedio de todos los átomos en una muestra dada. Por lo tanto, si hay  $dN_1$  átomos con un tiempo de vida  $t_1$ ,  $dN_2$  con tiempo de vida  $t_2$ , y así sucesivamente.

$$T = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

### 1.5.1.2. Tipos de Radiación Ionizante

Según (Canadian Nuclear Safety Commission, 2012) los tipos de radiación ionizante son:

- **Radiación Alfa ( $\alpha$ ).**- Son partículas alfa compuestas de dos protones y dos neutrones cada uno por lo que tienen carga positiva doble, su masa y carga son relativamente grandes lo que les da una capacidad limitada de penetrar la materia.

La radiación alfa fuera del cuerpo no presenta peligro ya que puede ser detenida por un trozo de papel o la capa externa de nuestra piel, sin embargo cuando las partículas alfa ingresan al cuerpo mediante ingestión o respiración son absorbidas completamente por los tejidos corporales.

- **Radiación Beta ( $\beta$ ).**- Consisten en partículas cargadas que son expulsadas del núcleo de un átomo, son físicamente idénticos a los electrones, por lo general tienen carga negativa, puede penetrar la capa externa de la piel y depositar su energía dentro de las células activas de la piel, sin embargo la radiación beta tiene limitada capacidad de penetrar en tejidos y organismos en el cuerpo, la mayoría de la radiación puede ser detenida por pequeñas cantidades de blindaje (láminas de plástico, vidrio, metal).
- **Radiación con fotones (gamma [ $\gamma$ ] y rayos X).**- La radiación de fotones es la radiación electromagnética. La radiación gamma se compone de fotones que se originan dentro del núcleo y la radiación de rayos X se compone de fotones que se originan fuera del núcleo y que generalmente tienen menor energía que la radiación gamma.  

La radiación de fotón puede penetrar profundamente y a veces solo se puede reducir su intensidad con materiales muy densos como plomo o acero. La radiación con fotones puede viajar distancias mucho mayores que la radiación alfa o beta y puede penetrar tejidos y órganos corporales inclusive cuando la fuente de radiación se encuentre fuera del cuerpo.
- **Radiación de neutrones (n).**- Aparte de la radiación cósmica, la fisión espontánea es la única fuente natural de neutrones. Un reactor nuclear es una fuente común de neutrones, en el que la división de un núcleo de uranio o plutonio se acompaña de la emisión de neutrones. Los neutrones emitidos desde un evento de fisión puede atacar el núcleo de un átomo adyacente y causar otro evento de fisión, la inducción de una reacción en cadena, la producción de energía nuclear se basa en este principio. Todas las demás fuentes de neutrones dependen de reacciones en las que

un núcleo es bombardeado con un cierto tipo de radiación (radiación de fotones o radiación alfa), y en el que el efecto resultante en el núcleo es la emisión de un neutrón. Los neutrones son capaces de penetrar los tejidos y órganos del cuerpo humano cuando la fuente de radiación está fuera del cuerpo.

### ***1.5.1.3. Fuentes de Radiación Ionizante***

- **Fuente Natural**

La radiación natural ha estado presente en todas partes y en todo lo que nos rodea, muchos radioisótopos son de origen natural, se originaron durante la formación del sistema solar a través de la interacción de los rayos cósmicos con moléculas en la atmósfera. Algunos radioisótopos que se formaron cuando se creó nuestro sistema solar tienen vidas medias de miles de millones de años, y todavía están presentes en nuestro entorno.

La (UNSCEAR, 2010) ha identificado las mayores fuentes de radiación natural

- a) Radiación Cósmica.-** Los rayos cósmicos en su mayoría son protones, la capa exterior de la atmósfera está continuamente bombardeada por radiación cósmica que está compuesta por partículas que se mueven rápidamente en el espacio y se originan a partir de una variedad de fuentes como el sol y otros cuerpos celestes. Parte de la radiación ionizante puede penetrar la atmósfera de la tierra y ser absorbida por las personas debido a que la fuente de exposición es natural.
- b) Radiación Terrestre.-** La composición de las capas de la tierra es una fuente importante de radiación natural, principalmente los depósitos naturales de uranio, potasio y torio que lanzan pequeñas cantidades de

radiación ionizante durante el proceso de descomposición natural, el uranio y torio se encuentra en todas partes.

La radiación terrestre es producida también en los materiales de construcción.

- a) Inhalación.-** Los minerales radiactivos que se encuentran en el suelo y la roca madre producen gases que pueden ser inhalados, los niveles de los gases radiactivos dependen de la composición del suelo, cuando dichos gases son liberados al ambiente, generalmente se diluyen hasta niveles no peligrosos, pero a veces quedan atrapados y se acumulan dentro de edificios.
- b) Ingestión.-** Resto de minerales radiactivos se encuentran naturalmente en los alimentos y agua potable; los vegetales son generalmente cultivados con agua y suelo que contienen restos radiactivos, una vez ingeridos, estos restos resultan en la exposición interna a la radiación natural.

*Tabla 5. Dosis debida a fuentes naturales*

Fuente	Dosis Media Mundial	Rango Típico
	Dosis Efectiva (mSv/año)	Dosis Efectiva (mSv/año)
Radiación cósmica	0,4	0,3 - 1,0
Radiación terrestres	0,5	0,3 - 0,6
Inhalación	1,2	0,2 - 10
Ingestión	0,3	0,2 - 0,8

*Fuente: (UNSCEAR, 2010)*

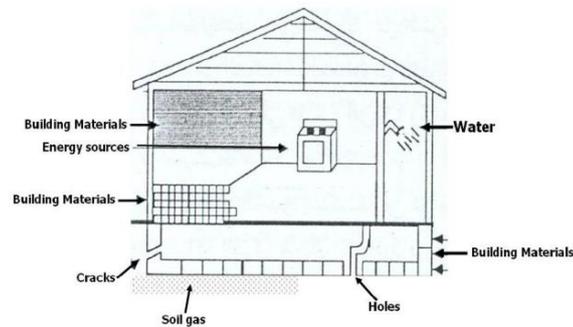
- **Fuente Artificial**

Las personas están expuestas a fuentes de radiación artificial: tratamientos médicos, bioquímica, industria manufacturera, agricultura, ensayos nucleares en la atmósfera y todas las actividades relacionadas con materiales radiactivos.

Las fuentes artificiales de radiación son:

- a) **Fuentes Médicas.-** La radiación tiene muchos usos en la medicina, la aplicación más conocida son los rayos X, los mismos que utilizan radiación para encontrar anomalías en el sistema óseo o diagnosticar enfermedades, además la medicina nuclear utiliza isótopos radiactivos para diagnosticar y tratar enfermedades como el cáncer.
- b) **Fuentes Industriales.-** En la industria, la radiación tiene diversos usos, se encuentra en los medidores de densidad utilizados en la construcción de carreteras, detectores de humo, en algunas señalizaciones brillantes, estimar reservas de campos petroleros, esterilización, etc. Estas actividades industriales deberían ser reguladas y autorizadas
- c) **Plantas de Energía Nuclear (NPP).-** Las plantas de energía nuclear usan uranio para producir reacciones en cadena que generen vapor, que a su vez mueven turbinas produciendo electricidad. Las centrales nucleares liberan pequeñas cantidades de material radiactivo al ambiente que debe ser controlado para asegurar que la dosis que se libera al público esté por debajo del límite permitido.
- d) **Pruebas Atmosféricas.-** La utilización de armas atómicas desde finales de la Segunda Guerra Mundial hasta 1980 han liberado material radiactivo en el aire, a medida que la lluvia radiactiva llega al suelo, esta se incorpora en el ambiente, gran parte de esta radiación tienen tiempos de vida media cortos y ya no existen, pero algunos todavía siguen decayendo. Las personas y el medio ambiente siguen recibiendo dosis pequeñas cada año por las secuelas.

*Ilustración 1. Fuentes de Radón en construcciones.*



*Fuentes: (Ahmad, 2007)*

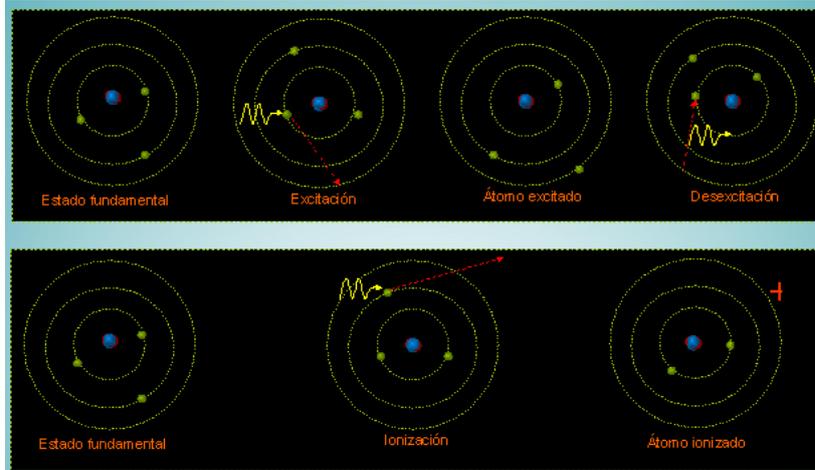
### **1.5.2. Interacción de la Radiación con la Materia.**

“Toda radiación posee energía, ya sea intrínseca, como en el caso de la radiación electromagnética, o como energía cinética en el caso de las radiaciones de partículas; la absorción de la radiación es el proceso por el cual se transfiere esta energía a los átomos del absorbedor. El hecho de decir que la radiación interacciona con la materia significa que ha sido absorbida o dispersada.” (Pedraza, 2007)

El intercambio de energía de la partícula o fotón a los átomos puede ocurrir mediante dos fenómenos elementales:

- **Excitación.-** Los electrones corticales son impulsados a un nivel superior.
- **Ionización.-** Los electrones son expulsados del átomo o molécula.

Ilustración 2. Esquema del proceso de Ionización y Excitación

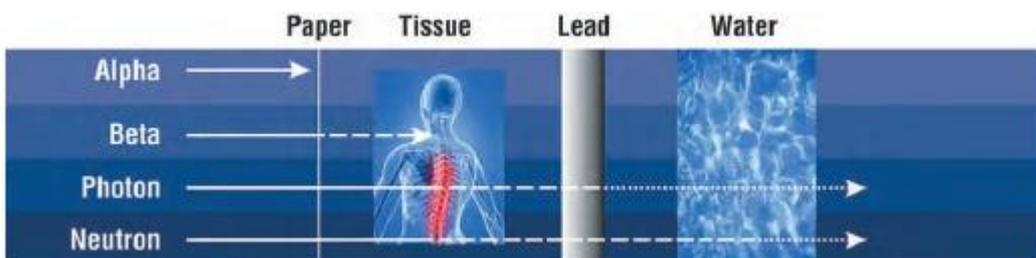


Fuente: (Gallego Diaz, 2011).

La atenuación que sufre la radiación a su paso por la materia dependerá fundamentalmente de dos factores:

- Factor geométrico.- que hace que con la distancia entre la fuente y el objeto la radiación sea cada vez más débil, generalmente en proporción inversa al cuadrado de la distancia.
- Factor Material.- que dependerá del tipo y energía de la radiación y de la composición del material, lo que afecta a la probabilidad de interacción. (Gallego Diaz, 2011)

Ilustración 3. Capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación en la materia



Fuente: (Canadian Nuclear Safety Commission, 2012)

Los mecanismos de absorción de la radiación son de interés fundamental en el ejercicio de la seguridad radiológica, principalmente por las siguientes razones:

- a) La absorción en los tejidos del cuerpo puede ocasionar un daño fisiológico.
- b) La absorción es el principio en el cual se basa la detección.
- c) El grado de absorción o tipo de interacción es un factor primario para determinar las necesidades de blindaje. (Pedraza, 2007)

Según el Departamento de Física de la (Universidad Nacional de la Plata, 2007) los mecanismos de interacción de fotones con la materia se analizarán en las siguientes secciones.

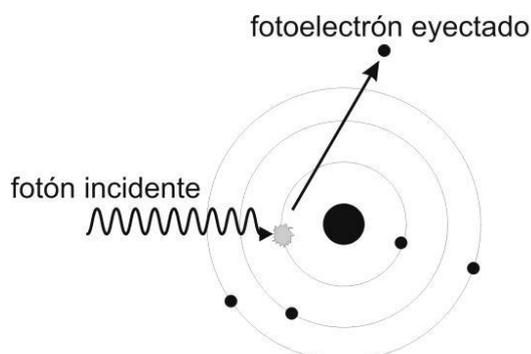
#### ***1.5.2.1. Efecto Fotoeléctrico***

El efecto fotoeléctrico consiste en la absorción de un fotón por un electrón, el cual es expulsado del átomo. Puesto que un electrón libre no puede absorber un fotón y conservar el momento, el efecto fotoeléctrico siempre ocurre con electrones ligados, siendo el núcleo el que absorbe el momento de retroceso.

La energía cinética del fotoelectrón corresponde a la diferencia entre la energía del fotón incidente ( $h\nu$ ) menos la energía de ligadura ( $\phi_{ligadura}$ ) del electrón en la capa electrónica desde donde fue removido

$$E_k^{fotoelectrón} = h\nu - \phi_{ligadura}$$

Ilustración 4. Esquema del proceso de interacción fotoeléctrica



Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2007)

### 1.5.2.2. Efecto Compton

El proceso de dispersión Compton es probablemente el mejor entendido. Se considera a la dispersión Compton como una colisión elástica entre el fotón incidente y un electrón libre. Por supuesto, en los medios materiales todos los electrones están ligados a un átomo. Sin embargo, si la energía del fotón incidente es mucho mayor que la energía de ligadura del electrón, se puede despreciar la energía de ligadura y considerar al electrón como libre.

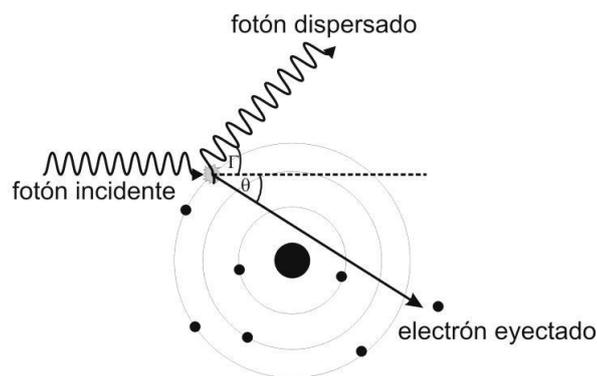
El resultado de este proceso de interacción es la desaparición del fotón incidente de energía

$E_0 = hv$  y la aparición de otro fotón de menor energía  $E_0' = hv'$ . La diferencia de energía ( $E_0 - E_0'$ ) entre ambos fotones se transforma en energía cinética ( $E_e$ ) del electrón que absorbió el fotón.

El electrón de alta velocidad así formado (denominado electrón Compton), produce ionización secundaria y el rayo suavizado continúa perdiendo energía en otras interacciones Compton o bien desaparece completamente, vía efecto fotoeléctrico. El aspecto desafortunado de la interacción Compton es que el rayo  $\gamma$  suavizado se le denomine fotón dispersado y el proceso sea conocido como "Dispersión Compton". Por

este mecanismo de interacción, la dirección de los fotones en un haz puede ser errática, así que la radiación dispersa puede aparecer detrás de una arista o de un blindaje. (Pedraza, 2007)

*Ilustración 5. Esquema del proceso de interacción Compton.*

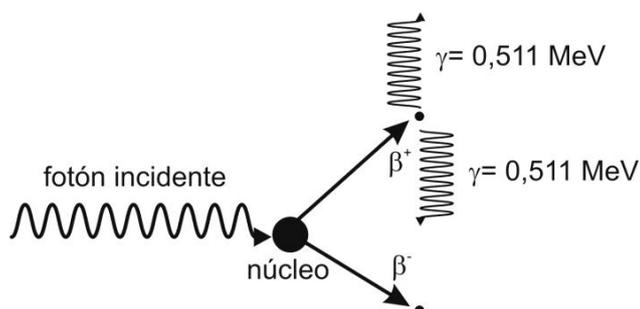


*Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2007)*

### **1.5.2.3. Producción de pares**

El proceso de formación de pares involucra la transformación de un fotón en un par electrón-positrón. Por conservación del momento lineal, este proceso sólo puede ocurrir en presencia de un tercer cuerpo, en general el núcleo. La energía del fotón necesaria para producir un par electrón-positrón debe ser de al menos 1,022 MeV. Posteriormente a la creación del par, ambas partículas se comportan como partículas  $\beta$ , interactuando en forma directa.

Ilustración 6. Esquema del proceso de formación de pares



Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2007)

#### 1.5.2.4. Efectos Biológicos de las Radiaciones

Para comprender mejor el efecto biológico de las radiaciones ionizantes, El (Colegio Oficial de Físicos, 2004), nos muestra dos teorías contradictorias y que a su vez se complementan.

- **Teoría de Acción Directa o Teoría del Blanco.**- Vincula el efecto biológico y la importancia del mismo con la responsabilidad biológica del blanco (diana) alcanzado y del número de dianas impactadas. Si tenemos en cuenta que en cualquier modelo biológico y, más concretamente, en las células humanas la posibilidad de reproducción de las mismas y el adecuado cumplimiento del código genético está vinculado al genoma, es decir, a los cromosomas del núcleo celular, o lo que es lo mismo a la integridad del ácido desoxirribonucleico (ADN), el daño celular será proporcional a la lesión inducida en el ADN.

Si esta lesión es irreversible y por tanto no reparable, la consecuencia será la muerte reproductiva de la célula alcanzada. Si por el contrario la lesión radio inducida es reparada, tendremos un ADN capacitado para ir hacia mitosis sucesivas, pero con la posibilidad de transmitir alteraciones en la línea genética,

mutaciones sumadas a las propias de la generación en la que le corresponda actuar como gen dominante.

Esta teoría explica el efecto biológico que se produce en el momento y en el lugar de la cesión de energía con capacidad ionizante y los efectos tanto somáticos como genéticos.

- **Teoría de Acción Indirecta o Teoría de los Radicales Libres.-** Se complementa con la anterior, puesto que explica la serie de fenómenos biológicos que se producen incluso fuera del momento y del lugar del depósito de energía ionizante.

Es bien conocido el componente de volumen agua en las células del ser humano normalmente hidratado, estimado en un 70%. El efecto de la ionización en las moléculas de agua es lo que se conoce como “radiólisis del agua”. Se produce una ruptura de la molécula con la liberación de los radicales que la componen, H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup>. Estos radicales adquieren una rápida tendencia a recombinarse pudiendo dar lugar a la formación de nuevas moléculas de agua o, lo que es más frecuente, a agua oxigenada que presenta una elevada toxicidad para el medio biológico en donde se forma.

Se consigue por tanto intoxicar el medio biológico, intra y extracelular, lo que complica la vida del mismo.

#### 1.5.2.4.1. Naturaleza y Efectos Biológicos de la Radiación

La interacción entre la radiación y la naturaleza genera ciertos efectos que suceden dentro de los organismos biológicos, dichos efectos según (Cherry Jr, 1998) son:

- **Deposición de energía.-** La radiación ionizante es capaz de depositar suficiente energía para desprender electrones de los átomos con los que está interactuando, es por eso que cuando la radiación colisiona al azar con átomos y moléculas atraviesa

células vivas, dando lugar a iones y radicales libres, que a su vez, rompen los enlaces químicos y provocan otros cambios moleculares en la célula lesionada.

- **Efectos sobre el ADN.-** De todas las moléculas de la célula que son alteradas por la radiación, el ADN es el punto con mayor sensibilidad debido a la redundancia limitada de la información genética que contiene.

“Una dosis absorbida de radiación lo bastante grande para matar a una célula media (2 gray [Gy]) puede generar centenares de lesiones sus moléculas de ADN.” (Ward, 1989)

- **Efecto sobre los Genes.-**El daño del ADN que queda sin reparar o no se repara puede manifestarse en forma de mutaciones, cuya frecuencia parece aumentar como una función lineal de la dosis, lo que nos indica que una sola partícula ionizante que atraviese el ADN es suficiente para causar mutación.

“En las víctimas del accidente de Chernóbil, la relación dosis-respuesta de las mutaciones de la glicoforina de células de la médula ósea es muy similar a la observada en supervivientes de la bomba atómica.” (Jensen, Lanlois, & Bigbee, 1995)

- **Efecto sobre los Cromosomas.-** Las lesiones producidas por la radiación en el aparato genético puede causar cambios en el número y estructura de los cromosomas, aumentando la frecuencia en las modificaciones en trabajadores expuestos, supervivientes de la bomba atómica y personas expuestas a radiación ionizante.
- **Efecto sobre la supervivencia Celular.-** Apenas la célula está expuesta a la radiación sufre de inhibición de la división celular, si bien esta inhibición es una

característica pasajera, la lesión radiológica de genes y cromosomas puede ser letal para la división celular.

- **Efectos sobre los Tejidos.**- Las células maduras que se dividen dentro de un tejido son radiosensibles, por lo que la irradiación puede matar a un número suficiente de células logrando que el tejido se atrofie.

La rapidez de esta atrofia depende de la dinámica de la población celular dentro del tejido afectado; es decir, en órganos caracterizados por un recambio celular lento, como el hígado y el endotelio vascular, el proceso es típicamente mucho más lento que en órganos caracterizados por un recambio celular rápido, como la médula ósea, la epidermis y la mucosa intestinal (Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación, 1971)

#### 1.5.2.4.2. Efectos Somáticos Agudos

“Si un número suficientemente grande de células de un mismo órgano o tejido mueren o resultan drásticamente modificadas, puede haber una pérdida de la función del órgano, tanto más seria cuanto mayor sea el número de células afectadas, constituyendo un daño somático que se manifestará al poco tiempo de la irradiación.” (Gallego Diaz, 2011).

Los efectos clínicos se manifiestan una vez que se superen la dosis mínima, una vez superara esta dosis la probabilidad de que la radiación pueda producir daño aumenta con rapidez, si la dosis es lo suficientemente grande puede ocasionar la muerte del individuo.

La reacción que se tiene después de la irradiación varía según las partes del organismo, de si la dosis recibe de una sola vez o en varias etapas, del tratamiento

médico; los órganos pueden reparar hasta cierto punto los daños provocados por la radiación por lo que es mejor tolerada una dosis suministrada paulatinamente que una dosis recibida de forma instantánea.

#### 1.5.2.4.3. Efectos Cancerígenos

La (International Commission on Radiological Protection, 2007) en coordinación con otros organismos científicos como el UNSCEAR y BEIR<sup>2</sup> ha calculado la probabilidad de cáncer mortal, determinando que los efectos que genera la exposición a la radiación son:

- Probabilidad de cáncer mortal
- Probabilidad de cáncer no mortal
- Probabilidad de efectos hereditarios graves
- La vida media disminuye si se produce daño.

Aunque no se han determinado con precisión las interacciones y mecanismos de las moléculas de cancerogénesis radiológica, según la (National Academy of Sciences, 1990) mediante pruebas de laboratorio se ha observado efectos cancerígenos de la radiación presenta también efectos iniciadores, efectos promotores y efectos sobre la neoplasia, también debemos incluir como efecto la activación de oncogenes y/o inactivación o pérdida de genes supresores de tumores como efectos.

Los efectos cancerígenos de radiación son modificables por hormonas, variables nutricionales y otros factores, tal como son los efectos cancerígenos químicos, además los efectos de radiación pueden ser aditivos, sinérgicos o antagonistas con los mismos.

---

<sup>2</sup> Biological Effects of Ionizing Radiation

#### 1.5.2.4.4. Efectos Prenatales

“La radiosensibilidad es relativamente alta en toda la vida prenatal, pero los efectos de una dosis determinada varían de modo notable y dependen de la fase evolutiva del embrión o feto en el momento de la exposición” (UNSCEAR, 1982)

(Cherry Jr, 1998) indica que durante el período anterior a la implantación el embrión es altamente sensible a morir por irradiación, mientras que durante las fases de la organogénesis es sensible a malformaciones y otras alteraciones del desarrollo.

Según la (National Academy of Sciences, 1990), la sensibilidad a los efectos cancerígenos de la radiación durante todo el período prenatal se puede corroborar por estudios de la relación de cáncer infantil y exposición a rayos X. Los resultados de estos estudios dan como resultado que la radiación puede causar un aumento en el 4% de riesgo de leucemia y otros cánceres infantiles.

Paradójicamente no existe una alteración en el número de cáncer infantil durante el período prenatal en supervivientes a la bomba atómica.

### **1.5.3. Dosimetría**

Por todo lo antes mencionado, sabemos que cuando la radiación interacciona con un material, penetra y deposita en él toda o parte de su energía inicial; para lograr determinar los efectos biológicos producidos por radiación se ha tenido que cuantificar la cantidad o dosis recibida en los órganos afectados.

“La dosis es la energía depositada en una unidad de masa.” (Mercado Uribe, 2007)

Para los propósitos de la protección contra la radiación, las cantidades de dosis se expresan en tres formas: Absorbida, Equivalente y Efectiva.

Uno de los objetivos del actual sistema de magnitudes y unidades es evaluar los efectos biológicos que resulta de la exposición interna y externa a la radiación ionizante tanto en términos estocásticos como los efectos deterministas, logrando así, encontrar mecanismos que puedan contrarrestar estos efectos.

#### **1.5.3.1. Dosis Absorbida (D)**

La energía absorbida de la exposición a la radiación es la dosis absorbida, según (Mattsson & Söderberg, 2013) la dosis absorbida se define como: “el cociente de  $d\varepsilon$  por  $dm$ , donde  $d\varepsilon$  es la energía media impartida a la materia en un volumen infinitesimal  $dV$  en un punto de interés en un material de densidad  $\rho$  durante un periodo de tiempo por la radiación, y  $dm$  es la masa en  $dV$ .

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (6).$$

Su unidad original fue el *rad*, actualmente se utiliza el *Gray (Gy)*, que equivale a 100 *rads*, 1 *Gy* equivale a 1 *J/kg*

La dosis absorbida generalmente se utilizada cuando se van a realizar estudios de los efectos en tejidos y órganos individuales.

#### **1.5.3.2. Dosis Equivalente (H)**

Varias investigaciones en radiobiología han demostrado que existen daños biológicos diferentes para un mismo valor de dosis absorbida, es decir la afección está en función de la radiación incidente.

(Andisco, Blanco, & Buzzi, 2014) define a la dosis equivalente como el producto entre uno de uno de esos factores de peso y la dosis absorbida, la dosis equivalente introduce factores de peso que ponderan efectos biológicos en función de la radiación.

Es una ponderación de la dosis absorbida, para tener en cuenta el tipo de radiación, de acuerdo a su potencialidad para producir efectos biológicos

$$H = D \cdot W_R \quad (7)$$

Tabla 6. Factores de ponderación de la radiación recomendados.

Tipo de Radiación	Factor de ponderación de la radiación $W_R$
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión, Iones pesados	20
Neutron (5,0 MeV)	11

Fuente: (International Commission on Radiological Protection, 2007)

La dosis equivalente es un indicador primario de protección radiológica, ya que especifican los límites de radiación para trabajadores expuestos. Su unidad es el *Sievert* (Sv).

### 1.5.3.3. Dosis Efectiva (E)

“La probabilidad de aparición de efectos en un determinado órgano o tejido depende no solo de la dosis equivalente recibida por dicho órgano o tejido, sino también de la radiosensibilidad del órgano irradiado. Por esto, y a partir de la irradiación que recibiría una persona en todo su cuerpo, la ICRP ha adjudicado un factor de peso ( $W_T$ ) a cada órgano.” (Andisco, Blanco, & Buzzi, 2014)

$$E = \sum D \cdot W_R \cdot W_T \quad (8)$$

La unidad utilizada para la dosis efectiva es también el *Sievert* (Sv).

Tabla 7. Factores de ponderación de los tejidos recomendados

Tejido	$W_T$	$\Sigma W_T$
Médula ósea, Pulmón, Estómago, Mama, Resto de tejidos	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08

Vejiga, Esófago, Hígado, Tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, Cerebro, Glándulas salivales, piel	0,01	0,04
	Total	1,00

---

*Fuente: (International Commission on Radiological Protection, 2007)*

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. DISEÑO**

Para calcular el riesgo radiológico en los Centros de Educación Inicial de Cuenca, se realizó con una investigación de tipo Exploratorio.

Los estudios exploratorios generalmente se realizan cuando se va a examinar un problema de investigación nuevo o que poco ha sido abordado antes. Además los estudios exploratorios sirven para aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos. En muy contadas ocasiones constituyen un fin en sí mismos, por lo general determinan tendencias, identifican relaciones potenciales entre variables y establecen el punto de partida para posteriores investigaciones.

Se utilizó el método científico - experimental para desarrollar la investigación, en la cual se colocó y recogió detectores, se realizó el proceso químico de revelado o grabado, digitalización de los detectores, conteo de trazas y cálculo de la concentración y dosis; para determinar cuál es el concentración de radón en el interior de las aulas de los Centros de Educación Inicial.

Cumpliendo con los requisitos de un experimento puro según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2000):

- 1) El primer requisito de un experimento puro es la manipulación intencional de una o más variables independientes.
- 2) El segundo requisito es medir el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente.
- 3) El tercer requisito es el control y conocimiento de qué está ocurriendo realmente con la relación entre la(s) variable(s) independiente(s) y la(s) dependiente(s).

La técnica aplicada fue la observación directa – cualitativa y cuantitativa, donde se tomó en consideración de manera sistemática y personal cada hecho o fenómeno que se suscitó durante toda la investigación, incluyendo los resultados obtenidos y esperados; dichos resultados se pudieron obtener por medio del conteo de trazas y el cálculo de la concentración de radón a ser analizados de cada detector.

## 2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Al realizar una investigación debemos principalmente definir cuál será la unidad de análisis y cuáles son las características de la población.

(Hernández, Fernández, & Baptista, 2000) definen a la muestra de una población como un subgrupo de la población que sea un reflejo fiel del conjunto de la población. La muestra utilizada en la investigación es la una muestra probabilística en donde todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de ser escogidos.

- **Estimar una proporción.-** Según (Fernández, 1996) para estimar una proporción debemos saber
  - a) El nivel de confianza o seguridad  $(1-\alpha)$ . El nivel de confianza prefijado da lugar a un coeficiente  $(Z_\alpha)$ . Para una seguridad del 95% = 1,96; para una seguridad de 99% = 2,58
  - b) La precisión que deseamos para nuestro estudio.
  - c) Una idea del valor aproximado del parámetro que queremos medir

La fórmula para determinar el tamaño de la muestra de la población finita es:

$$n = \frac{N * Z_\alpha^2 * p * q}{d^2 * (N-1) + Z_\alpha^2 * p * q} \quad (9)$$

dónde:

- N = Total de la población
- $Z_\alpha^2$  = Coeficiente en función del nivel de confianza
- p = Proporción esperada
- q = 1-p
- d = precisión

En la Tabla 6. podemos observar los datos utilizados para encontrar el tamaño de la muestra de la población total de Centros de Educación Inicial, para esta experimentación se colocó detectores en 32 Instituciones Educativas, 12 Urbanas y 20 Rurales, además los Centros de Educación Inicial fueron rotulados como muestran la Tabla 7. Y Tabla 8.

Tabla 8. Tamaño de la muestra de la población de CEI de Cuenca

Total población (N)	116
Nivel de confianza (1- $\alpha$ )	95%
Precisión (d)	3%
Proporción	1%
<b>TAMAÑO DE LA MUESTRA</b>	<b>21</b>

Fuente: (Fernández, 1996)

Tabla 9. Centros de Educación Inicial seleccionados, Zona Urbana

RÓTULO	NOMBRE	PARROQUIA	ZONA INEC
UR01	ANGEL POLIVIO CHAVEZ	SUCRE	URBANA
UR02	ANTONIO BORRERO VEGA	SAN SEBASTIÁN	URBANA
UR03	CARLOS ZAMBRANO OREJUELA	HUAYNACÁPAC	URBANA
UR04	CAZADORES DE LOS RIOS	MACHÁNGARA	URBANA
UR05	TOTORACOCHA	TOTORACOCHA	URBANA
UR06	CIUDAD DE CUENCA	GIL RAMÍREZ DÁVALOS	URBANA
UR07	LEONCIO CORDERO JARAMILLO	YANUNCAY	URBANA
UR08	LUIS CORDERO	HERMANO MIGUEL	URBANA
UR09	MARY CORYLE	EL VECINO	URBANA
UR10	RAFAEL AGUILAR PESANTEZ	BELLAVISTA	URBANA
UR11	RITA CHAVEZ DE MUÑOZ	CAÑARIBAMBA	URBANA
UR12	VICTOR GERARDO AGUILAR	SAN SEBASTIÁN	URBANA

Fuente: Ministerio de Educación, 2016

Tabla 10. Centros de Educación Inicial seleccionados, Zona Rural

RÓTULO	NOMBRE	PARROQUIA	ZONA INEC
RU01	ALFONSO CARRION HEREDIA	BAÑOS	RURAL
RU02	ALBERTO ASTUDILLO MONTESINOS	RICOURTE	RURAL
RU03	JESUS VASQUEZ OCHOA	SAYAUSÍ	RURAL
RU04	SININCAY	SININCAY	RURAL
RU05	CHIQUINTAD	CHIQUINTAD	RURAL
RU06	DORA BEATRIZ CANELOS	SIDCAY	RURAL
RU07	SAN JOAQUIN	SAN JOAQUÍN	RURAL
RU08	ELOY ALFARO	VALLE	RURAL
RU09	FRANCISCO ASTUDILLO	TURI	RURAL
RU10	FRANCISCO EUGENIO TAMARIZ	NULTI	RURAL
RU11	FRANCISCO MOSCOSO	TARQUI	RURAL
RU12	GONZALO S. CORDOVA	LLACAO	RURAL
RU13	JAVERIANO	SAYAUSÍ	RURAL
RU14	AGUSTIN CUESTA VINVTIMILLA	BAÑOS	RURAL
RU15	JOSE VICTOR ORDÑEZ ZAMBONINO	SANTA ANA	RURAL

RU16	JUAN PEÑAFIEL	SANTA ANA	RURAL
RU17	MARIA CARABAJO	TARQUI	RURAL
RU18	PACCHA	PACCHA	RURAL
RU19	TURI	TURI	RURAL
RU20	VICTORIA DEL PORTETE	VICTORIA DEL PORTETE	RURAL

*Fuente: Ministerio de Educación, 2016*

La selección aleatoria de la muestra o proporción se lo realizó mediante las funciones =ALEATORIO.ENTRE() y =BUSCARV() de Microsoft Excel, las instituciones educativas seleccionadas tienen las siguientes características:

*Tabla 11. Características de los Centros de Educación Inicial de Cuenca*

RÉGIMEN ESCOLAR	Sierra
SOSTENIMIENTO	Fiscal
TIPO DE EDUCACIÓN	Regular
JURISDICCIÓN	Hispana
MODALIDAD	Presencial

*Fuente: Ministerio de Educación, 2016*

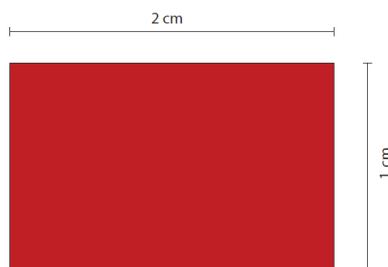
## 2.3. RECOPIACIÓN DE DATOS

### 2.3.1. Distribución y Colección de Detectores

Las recomendaciones a seguir para la colocación de detectores fueron las emitidas por la (EPA, 1993), entre las cuales destacamos:

- Las mediciones iniciales deben ser a corto plazo.
- Obtener información de las edificaciones antes de la colocación de dispositivos.
- Informar a la población, en especial a quienes interactúan lo el aula.
- El detector se debe colocar en una posición en la cual no sea afectado y exista el espacio adecuado.
- No se deben colocar los detectores cerca de calor excesivo como chimeneas o luz solar directa.
- El punto de medición debe estar a 90 cm. de ventadas u otras aberturas potenciales en la pared y a 10 cm. de cualquier pared.
- Los medidores deben estar a la altura ideal de respiración (1- 2 m.)

*Ilustración 7. Dimensiones de los detectores LR-115 colocados*



*Fuente: El Autor*

En este estudio se utilizaron detectores LR-115 type II (célula de nitrosa) colocados a 1 m. y 1,5 m. de altura desde el piso, sostenidos por un porta detector de metal fabricado con el objetivo de separar al detector los 10 cm. mínimos de la pared recomendado por la EPA, como se puede observar en la Fotografía N.

Los detectores LR-115 fueron colocados en 3 aulas por institución educativa, cabe mencionar que algunas instituciones, generalmente en la zona rural, tenían solamente 1 o 2 aulas de educación inicial. El tiempo de exposición fue por un período de 90 días continuos.

*Fotografía 1. a) Altura de los detectores; b) Porta detectores*



*Fuente: El Autor*

Antes de que el detector sea colocado, se llenaba la ficha de información de cada aula, esta ficha se puede ver en el Anexo N 1.

En el Anexo N. se encuentra el mapa de ubicación de las Centros de Educación Inicial en los cuales se colocó los detectores.

### **2.3.2. Proceso Químico de Revelado o Grabado:**

Cuando una partícula cargada choca y se detiene en un sólido, la energía que deposita a lo largo de su trayectoria causa daños en el material. Para poder observar el daño de la traza es necesario ser revelado primeramente a través de un proceso químico que afecta a la superficie del material del detector.

El proceso químico para el revelado de los detectores LR-115 es:

- 1) Colocar los detectores en el portadetectores
- 2) Encender en baño maría y calentar hasta que alcance una temperatura de 60°C.
- 3) Preparar la solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) al 10% o a (2,5) N, antes de usar la solución se debe dejar a que se termalice a temperatura ambiente.
- 4) Colocar la solución en un vaso de precipitación cubierto por un vidrio de reloj e introducir en el baño maría, monitoreando la temperatura para mantenerla constante.
- 5) Se introducen los detectores dentro de la solución calentada por el baño maría durante 70 minutos
- 6) Luego de este tiempo se sacan los detectores y se colocan en un vaso precipitado con agua destilada para enjuagarlos mediante el agitador magnético, por 30 minutos.
- 7) Después de los 30 minutos, se coloca los detectores en otro vaso de precipitación con agua destilada por 2 minutos, sin agitación.
- 8) Terminado todo, los detectores son secados por ventilación a temperatura ambiente durante 60 minutos.

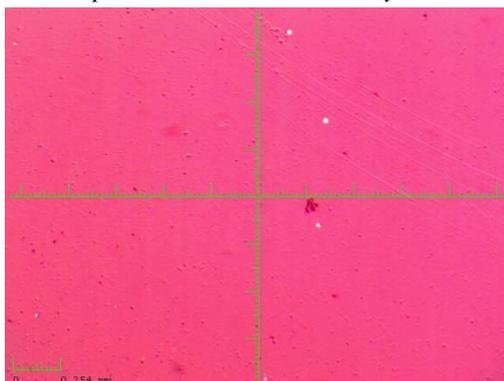
### 2.3.3. Digitalización y Conteo de Trazas:

Si queremos medir la concentración de radón debemos conocer la densidad de trazas marcadas en los detectores, los detectores LR-115 fueron analizados con un microscopio óptico marca MICROS AUSTRIA que puede aumentar una imagen en 10, 40, 100 ó 400 veces, además el microscopio óptico tiene acoplado una pequeña PC con pantalla.

Para observar las trazas nucleares en los detectores se usó el microscopio en una magnificación de 10X, el conteo se realizó en 25 campos de visión por cada detector.

Antes de empezar el conteo de trazas hay que determinar el área de los campos de visión y mantenerla constante durante todo el conteo, con la ayuda del microscopio se pudo cuadrangular el campo de visión y obtener las dimensiones

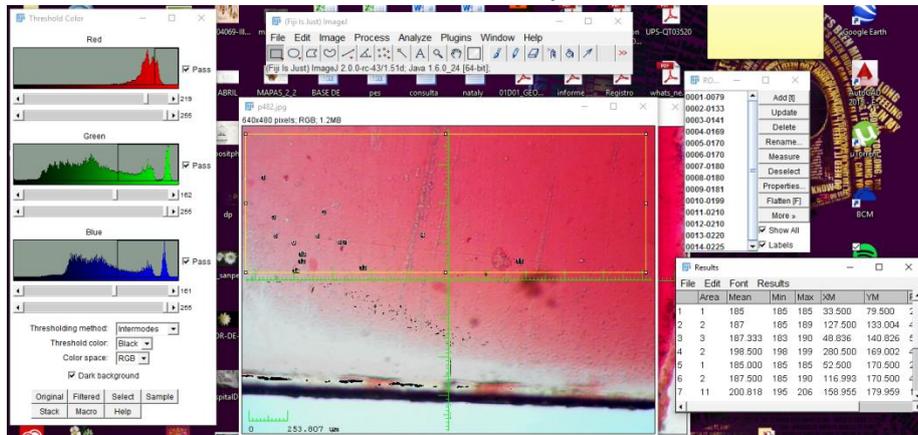
*Fotografía 2. Campo de visión Cuadrulado y Dimensionado (mm)*



*Fuente: El Autor*

El conteo se lo realizo de manera manual y con ayuda del software ImageJ, (Ilustración 8.) este software tiene varias opciones de análisis de partículas, primero se debe calibrar y editar a la fotografía y luego analizarla con el programa.

Ilustración 8. Utilización del Software IMAGEJ



Fuente: El Autor

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después del período de exposición de los detectores LR-115 y del conteo de trazas, se procedió a realizar los cálculos que nos ayuden a determinar las concentraciones de radón y por ende el riesgo radiológico de la ciudad de Cuenca.

- **Densidad de Trazas**

$$\rho = \frac{N_T}{n.A} \quad (10)$$

donde:

- $N_T$  = Número total de trazas en el detector
- $n$  = Número total de campos de visión
- $A$  = Área del campo de visión [ $\text{cm}^2$ ]

Su unidad es:

$$\left[ \frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right]$$

- **Densidad de Trazas del Detector Control**

$$f = \frac{N_{Tf}}{n.A} \quad (11)$$

donde:

- $N_{Tf}$  = Número total de trazas en el detector control
- $n$  = Número total de campos de visión
- $A$  = Área del campo de visión [ $\text{cm}^2$ ]

Su unidad es:

$$\left[ \frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right]$$

- **Concentración de Radón**

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{K.t} \quad (12)$$

donde:

- $\rho$  = Densidad de trazas [trazas/cm<sup>2</sup>]
- $K$  = Factor de calibración (0,020) [(trazas/cm<sup>2</sup>)/(Bq.d/m<sup>3</sup>)]
- $A$  = tiempo [d]

Su unidad es:

$$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$$

- **Error en el Promedio de la Densidad de Trazas**

$$\text{Error}_{\rho} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\rho_i - \rho)^2}{(n-1)}}$$

donde:

- $\rho_i$  = Densidad de trazas del Campo de Visión  $i$ -ésimo [trazas/cm<sup>2</sup>]
- $\rho$  = Densidad de trazas [trazas/cm<sup>2</sup>]
- $n$  = Número total de campos de visión

- **Equilibrio Equivalente de la Concentración de Radón**

$$EEC = C_{Rn} \cdot F \quad (14)$$

donde:

- $C_{Rn}$  = Concentración de Radón [Bq/m<sup>3</sup>]
- $F$  = Factor de Equilibrio (0,40)

Su unidad es:

$$\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$$

- **Concentración de Energía Alfa Potencial**

$$PAEC = \frac{C_{Rn} \cdot F}{3700} \quad (15)$$

donde:

- $C_{Rn}$  = Concentración de Radón [Bq/m<sup>3</sup>]
- F = Factor de Equilibrio (0,40)

Su unidad es:

$$[WL]$$

- **Dosis Anual Absorbida**

$$D_{Rn} = C_{Rn} \cdot D \cdot H \cdot F \cdot T \quad (16)$$

donde:

- $C_{Rn}$  = Concentración de Radón [Bq/m<sup>3</sup>]
- D = Factor de conversión de la dosis ( $9 \times 10^{-6}$ ) [m.Sv.m<sup>3</sup>/h.Bq]
- H = Factor de ocupancia (0,40)
- F = Factor de Equilibrio (0,40)
- T = Tiempo de ocupancia (24x365) [h/y]

Su unidad es:

$$\left[ \frac{mSv}{y} \right]$$

- **Dosis Anual Equivalente**

$$H = D_{Rn} \cdot W_R \quad (17)$$

donde:

- $D_{Rn}$  = Dosis Anual Absorbida [mSv/y]
- $W_R$  = Factor de Ponderación de la radiación

Su unidad es:

$$\left[ \frac{mSv}{y} \right]$$

- **Dosis Anual Efectiva**

$$E = D_{Rn} \cdot W_R \cdot W_T \quad (18)$$

donde:

- $D_{Rn}$  = Dosis Anual Absorbida [mSv/y]
- $W_R$  = Factor de Ponderación de la radiación
- $W_T$  = Factor de Ponderación de los tejidos

Su unidad es:

$$\left[ \frac{mSv}{y} \right]$$

- **Índice Alfa**

$$I_{\alpha} = \frac{C_{Rn}}{200} \quad (19)$$

donde:

- $C_{Rn}$  = Concentración de Radón [ $Bq/m^3$ ]

Su unidad es:

- **Incremento de Riesgo de Cáncer de por vida**

$$ELCR = E \cdot DL \cdot RF \quad (20)$$

donde:

- E = Dosis Anual Efectiva [ $mSv/y$ ]
- DL = Duración de vida (70) [year]
- RF = Factor de Riesgo (0,05) [1/year]

Su unidad es:

$$\left[ \frac{mSv}{y} \right]$$

### 3.1. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Los Centros de Educación inicial que obtuvieron la mayor densidad de trazas fueron: Turi, Victoria del Portete y Eloy Alfaro, es importante mencionar que la densidad de trazas es directamente proporcional a la concentración de radón, como indica en el Gráfico 3.

Los resultados de la concentración de radón en las zonas urbana y rural de Cuenca se encuentran tabulados en la Tabla 10. Podemos observar la variación de la concentración va desde 6,1508  $Bq/m^3$  en la institución José Victor Ordoñez Zambonino en la parroquia Santa Ana, hasta 47,1562  $Bq/m^3$  en la institución educativa Turi de la parroquia Turi. Los resultados muestran que la concentración promedio de radón en Cuenca es de 20,03  $Bq/m^3$ .

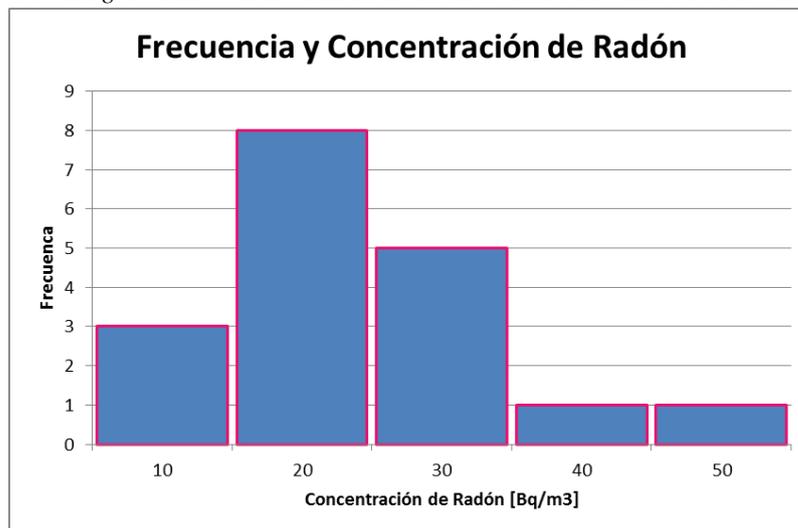
Tabla 12. Densidad de Trazas y Concentración de Radón en los CEI de Cuenca

CENTRO DE EDUCACIÓN INICIAL	Número de trazas	Promedio de trazas	Densidad [trazas/cm <sup>2</sup> ]	Concentración [pCi/L]	Concentración [ $Bq/m^3$ ]
AGUSTIN CARRION	32	1,28	23,62	0,3543	13,1217
ALBERTO ASTUDILLO	17	0,68	12,55	0,1882	6,9709
JESUS VASQUEZ	43	1,72	31,74	0,4761	17,6323
ELOY ALFARO	64	2,56	47,24	0,7086	26,2434

FRANCISCO ASTUDILLO	43	1,72	31,74	0,4761	17,6323
FRANCISCO MOSCOSO	20	0,80	14,76	0,2214	8,2011
GONZALO S. CORDOVA	54	2,16	39,86	0,5979	22,1429
ALFONSO CARRION H	28	1,12	20,67	0,3100	11,4815
JOSE VICTOR ORDOÑEZ Z	15	0,60	11,07	0,1661	6,1508
JUAN PEÑAFIEL	48	1,92	35,43	0,5314	19,6826
MARIA CARABAJO	45	1,80	33,21	0,4982	18,4524
PACCHA	62	2,48	45,76	0,6864	25,4233
TURI	115	4,60	84,88	1,2732	47,1562
VICTORIA DEL PORTETE	84	3,36	62,00	0,9300	34,4445
ANGEL POLIVIO CHAVEZ	38	1,52	28,05	0,4207	15,5820
CARLOS ZAMBRANO	41	1,64	30,26	0,4539	16,8122
LUIS CORDERO	60	2,40	44,29	0,6643	24,6032
RAFAEL AGUILAR	47	1,88	34,69	0,5204	19,2725
VICTOR G. AGUILAR	72	2,88	53,14	0,7971	29,5239
<b>TOTAL</b>	<b>928</b>	<b>37,12</b>	<b>684,95</b>	<b>10,2743</b>	<b>380,5299</b>
<b>PROMEDIO</b>	49	1,95	36,05	0,54	20,03
<b>MAX</b>	115	4,60	84,88	1,27	47,16
<b>MIN</b>	15	0,60	11,07	0,17	6,15

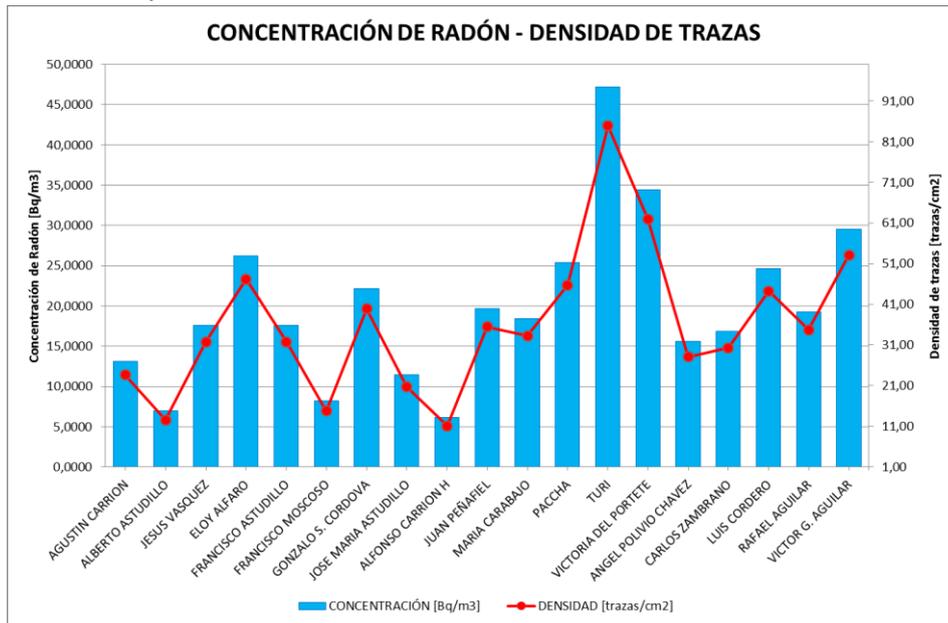
*Fuente: El Autor*

*Gráfico 3. Histograma de Frecuencias de la Concentración de Radón en Cuenca*



*Fuente: El Autor*

Gráfico 4. Relación Concentración – Densidad de los CEI de Cuenca

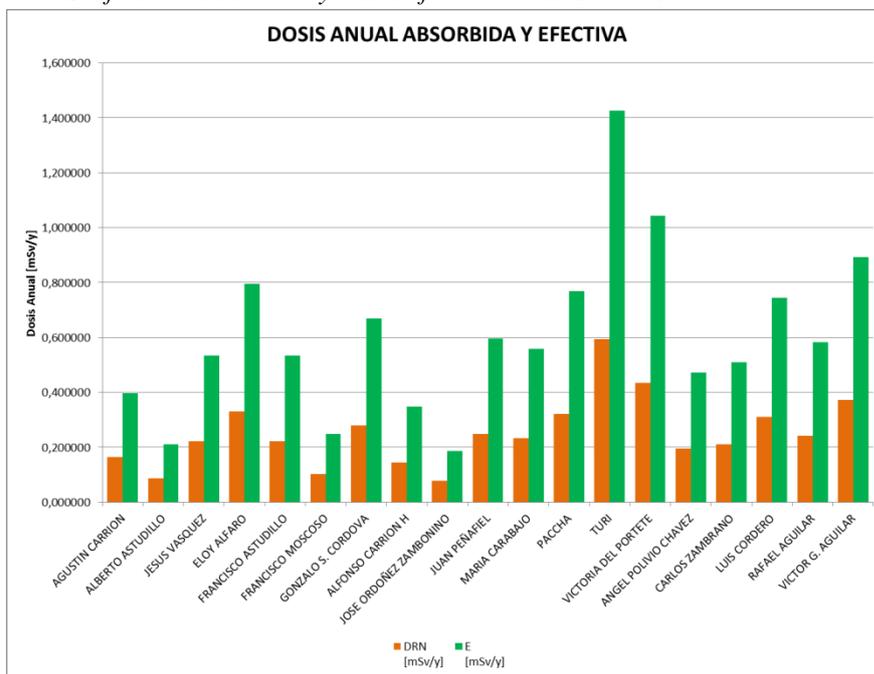


Fuente: El Autor

En la Tabla 11. se encuentran los valores de la Concentración de la Energía Alfa Potencial en Cuenca con un rango de 0,0007 a 0,0051 WL; el Índice Alfa que tiene una media de 1,1001 y sus valores van de 0,0308 a 0,2358.

La Dosis Anual Efectiva se encuentra en un rango de 0,1862 y 1,4276 mSv/y y tiene un promedio de 0,6063 mSv/y.

Gráfico 5. Dosis Anual y Dosis Efectiva de los CEI de Cuenca



Fuente: El Autor

Tabla 13. PAEC, Dosis Anuales, Índice, ELCR, de los CEI de Cuenca

CENTRO DE EDUCACIÓN INICIAL	PAEC [WL]	EEC [Bq/m3]	$D_{Rn}$ [mSv/y]	H [mSv/y]	E [mSv/y]	$I\alpha$	ELCR [mSv/y]	$E_p$
AGUSTIN CARRION	0,0014	5,2487	0,1655	3,3105	0,3973	0,0656	1,3904	1,2541
ALBERTO ASTUDILLO	0,0008	2,7884	0,0879	1,7587	0,2110	0,0349	0,7386	0,6663
JESUS VASQUEZ	0,0019	7,0529	0,2224	4,4484	0,5338	0,0882	1,8683	1,6852
ELOY ALFARO	0,0028	10,4974	0,3310	6,6209	0,7945	0,1312	2,7808	2,5083
FRANCISCO ASTUDILLO	0,0019	7,0529	0,2224	4,4484	0,5338	0,0882	1,8683	1,6852
FRANCISCO MOSCOSO	0,0009	3,2804	0,1035	2,0690	0,2483	0,0410	0,8690	0,7838
GONZALO S. CORDOVA	0,0024	8,8572	0,2793	5,5864	0,6704	0,1107	2,3463	2,1164
ALFONSO CARRION H	0,0012	4,5926	0,1448	2,8966	0,3476	0,0574	1,2166	1,0974
JOSE VICTOR ORDOÑEZ Z	0,0007	2,4603	0,0776	1,5518	0,1862	0,0308	0,6517	0,5879
JUAN PEÑAFIEL	0,0021	7,8730	0,2483	4,9657	0,5959	0,0984	2,0856	1,8812
MARIA CARABAJO	0,0020	7,3810	0,2328	4,6553	0,5586	0,0923	1,9552	1,7636
PACCHA	0,0027	10,1693	0,3207	6,4140	0,7697	0,1271	2,6939	2,4299
TURI	0,0051	18,8625	0,5948	11,8969	1,4276	0,2358	4,9967	4,5071
VICTORIA DEL PORTETE	0,0037	13,7778	0,4345	8,6899	1,0428	0,1722	3,6498	3,2921
ANGEL POLIVIO CHAVEZ	0,0017	6,2328	0,1966	3,9312	0,4717	0,0779	1,6511	1,4893
CARLOS ZAMBRANO	0,0018	6,7249	0,2121	4,2415	0,5090	0,0841	1,7814	1,6069
LUIS CORDERO	0,0027	9,8413	0,3104	6,2071	0,7449	0,1230	2,6070	2,3515
RAFAEL AGUILAR	0,0021	7,7090	0,2431	4,8622	0,5835	0,0964	2,0421	1,8420
VICTOR G. AGUILAR	0,0032	11,8095	0,3724	7,4485	0,8938	0,1476	3,1284	2,8218

<b>TOTAL</b>	0,0411	152,2119	4,8002	96,0031	11,5204	1,9026	40,3213	36,3700
<b>PROMEDIO</b>	0,0022	8,0112	0,2526	5,0528	0,6063	0,1001	2,1222	1,9142
<b>MAX</b>	0,0051	18,8625	0,5948	11,8969	1,4276	0,2358	4,9967	4,5071
<b>MIN</b>	0,0007	2,4603	0,0776	1,5518	0,1862	0,0308	0,6517	0,5879

*Fuente: El Autor*

La caracterización de las aulas en las cuales se colocó los detectores de radón está representada en la Tabla 12. donde el 100% de las instituciones educativas utiliza cemento como material de construcción y el 36,8% construye las paredes de las aulas con otro material además del cemento; 89,4% de los centros de educación inicial utilizan pintura a base de agua en las paredes de las aulas; los pisos de todas las instituciones son de cerámica.

En general, las aulas en las cuales se llevó acabo el monitoreo de la concentración de radón se encuentran en buenas condiciones tanto en paredes como en pisos.

*Tabla 14. Características de las aulas de los CEI de Cuenca*

CENTRO DE EDUCACIÓN INICIAL	MATERIAL		ESTADO		Enlucido	Tipo de Pintura
	Pared	Piso	Pared	Piso		
AGUSTIN CARRION	cemento, ladrillo	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
ALBERTO ASTUDILLO	cemento, madera	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
JESUS VASQUEZ	cemento, ladrillo	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
ELOY ALFARO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
FRANCISCO ASTUDILLO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	látex
FRANCISCO MOSCOSO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
GONZALO S. CORDOVA	cemento, madera	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
ALFONSO CARRION H	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
JOSE VICTOR ORDOÑEZ Z	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
JUAN PEÑAFIEL	cemento, ladrillo	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
MARIA CARABAJO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
PACCHA	hormigón pre fabricado, ladrillo	cerámica	Regular	Bueno	no	agua
TURI	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
VICTORIA DEL PORTETE	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
ANGEL POLIVIO CHAVEZ	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
CARLOS ZAMBRANO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	agua
LUIS CORDERO	cemento	cerámica	Bueno	Bueno	si	látex
RAFAEL AGUILAR	cemento, ladrillo	cerámica	Bueno	Bueno	no	agua
VICTOR G. AGUILAR	cemento	cerámica	Bueno	Regular	si	agua

*Fuente: El Autor*

### 3.2. DISCUSIÓN

En el presente trabajo se realizaron los cálculos del Riesgo Radiológico debido a la concentración de Radón en las aulas de Centros de Educación Inicial en la zona urbana y rural de Cuenca, Ecuador. Los cálculos se llevaron a cabo basado en la información obtenida de los 170 detectores colocados en 32 instituciones educativas, y de los datos obtenidos sobre el estado de las paredes, pisos y ventilación de las aulas monitoreadas.

La investigación realizada pretendió, cuantificar los niveles de radón existentes en los centros de educación inicial seleccionados, tanto de las zonas rurales como urbanas del cantón Cuenca y así evaluar el riesgo radiológico debido las concentraciones de radón medidas, conformando de esta manera una base de datos primarios que permitan orientar futuras investigaciones. Los aspectos cuantitativos para la investigación, son basados en la estadística y el análisis comparativo con los valores reportados por organismos y organizaciones, como EPA, WHO, HSE, ICRP, UNSCEAR, etc. instituciones éstas que promueven a través de sus programas las mediciones frecuentes de los niveles de radón en las unidades educativas de todo el mundo.

De acuerdo con los resultados obtenidos al medir la concentración de radón, se determinó que las mayores concentraciones corresponden a las instituciones educativas Turi (47,16 Bq/m<sup>3</sup>), Victoria del Portete (34,44 Bq/m<sup>3</sup>) y Víctor Gerardo Aguilar (29,52 Bq/m<sup>3</sup>), pertenecientes a las parroquias Turi, Victoria del Portete y San Sebastián respectivamente. Estos resultados invitan a ahondar en las investigaciones con el fin de determinar si estos niveles de concentración se mantienen durante el año y además determinar si existe una fuente predominante de radón, responsable de estas concentraciones.

Sensorialmente se pudo constatar la funcionalidad del film LR-115 tipo II como detector de trazas nucleares para obtener el riesgo radiológico, debido a su costo, manera de manipular, revelado y demás procesos.

Como era de esperarse todos los detectores expuestos mostraron trazas nucleares, lo que demuestra la presencia de radón como gas natural en el ambiente. Vale la pena hacer la observación, para futuros muestreos en instituciones educativas, que los detectores deben

estar fuera del alcance de los niños y pedir mayor colaboración por parte de los involucrados en las instituciones educativas

Por otro lado, si se comparan los resultados obtenidos de la concentración de radón con la normativa internacional, podemos notar que, a pesar de que algunas instituciones educativas presenten valores comparativos elevados, éstos se encuentran dentro de los límites permisibles reportados por las instituciones internacionales como la EPA y la ICRP.

Con el análisis de estos datos, también se pudo evaluar otros resultados como las dosis anuales, índice alfa, incremento de riesgo de cáncer, entre otros.

En cuanto a la dosis anual absorbida presenta un promedio de 0,2526 mSv/y la dosis anual efectiva tiene una media de 0,6063 mSv/y. Es de suma importancia comentar que incluir el cálculo de las dosis, nos puede dar una idea más clara de la cantidad de radiación que estamos asimilando.

Entre los aportes de este trabajo, podemos nombrar el poner al alcance de la comunidad en general datos específicos de zonas de riesgo, y más aún, de niveles de riesgos de lugares concretos como en este caso de unidades educativas, pero este tipo de trabajo se puede extender a cualquier lugar en donde se considere importante la evaluación radiológica alfa, con fuente en el radón y su progenie. A nivel mundial los casos de cáncer de pulmón en no fumadores se está incrementando, y Ecuador no escapa de esta situación, por lo que este tipo de investigaciones resulta ser relevante en la actualidad.

El hallazgo más importante, luego de realizar toda la investigación, es haber obtenido datos de la concentración de radón, consiguiendo así tener una primera estimación del riesgo radiológico en Cuenca, tener información real de la situación actual de los centros de educación inicial y así poder prevenir enfermedades y tragedias en los niños pequeños que ante esta amenaza corresponden a la población más vulnerable, pero sobre todo, aportar con datos que, a más de resultar beneficioso con la naturaleza, también lo sea con la sociedad y sus necesidades actuales.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Este trabajo es el primer estudio radiológico en la ciudad de Cuenca relacionado con los niveles de concentración de radón en las aulas de los colegios de educación inicial. Este estudio de línea base ha permitido obtener una muy valiosa información sobre las concentraciones de radón en las aulas de 32 centros de educación inicial de las áreas rural y urbana de la ciudad de Cuenca. Con esta información se logró realizar un análisis comparativo que involucró: la densidad de trazas, concentración de radón, Equilibrio Equivalente de la Concentración de Radón, PAEC, Dosis Anual Absorbida, Dosis Anual Efectiva, Índice Alfa e Incremento del riesgo de cáncer.

El valor de la concentración promedio de radón, dentro de las aulas de las 32 unidades educativas monitoreadas de la ciudad de Cuenca, de la provincia de Azuay, fue de 20,03 Bq/m<sup>3</sup>, valor que se encuentra por debajo de los límites de intervención reportados por algunas agencias e instituciones como la EPA(150 Bq/m<sup>3</sup>), ICRP (200 a 600 Bq/m<sup>3</sup>) y WHO (200 Bq/m<sup>3</sup>), los valores obtenidos se correlacionaron con algunas características de los edificios que pudieran influir en la exhalación de radón de los materiales de construcción o el ingreso del exterior, no encontrando una relación notoria entre estas variables y las concentraciones dentro de las aulas, lo que nos lleva a sugerir un análisis más detallado para encontrar la(s) fuente(s) de radón dentro de las aulas.

El promedio de la dosis anual absorbida, en los centros de educación inicial de Cuenca es de 0.2526 mSv/y, y de la dosis anual efectiva es de 0,6063 mSv/y, las cuales se encuentran en valores similares en comparación con los valores promedios de países como Italia y Japón.

Los DSSTN LR-115, resultaron ser una económica, sencilla y muy confiable herramienta para determinar los niveles de concentración de radón en el interior de las aulas de las unidades educativas seleccionadas.

## 4.2. Recomendaciones

- Considerando que las concentraciones de radón pueden variar según las condiciones climatológicas, es recomendable continuar con las mediciones a lo largo de todo el año.
- Informar a la comunidad en general y especialmente a las autoridades de instituciones donde las personas pasan gran parte de su tiempo en recintos cerrados, como hospitales, unidades educativas, minas, etcétera, de los riesgos que conlleva la exposición prolongada a la inhalación del radón, con el fin de crear conciencia sobre la importancia del monitoreo regular de las concentraciones del mismo.
- Investigar la fuente de los niveles relativamente altos de radón dentro de los recintos donde se midieron tales concentraciones.
- Fomentar investigaciones multidisciplinarias con las escuelas de arquitectura, civiles, geología, medicina y todas aquellas que de una u otra manera pudieran estar relacionadas con el riesgo de cáncer de pulmón debido al radón, las posibles intervenciones civiles en edificaciones para disminuir las altas concentraciones de radón, y el estudio del origen y la difusión del radón en el suelo.
- Encontrar métodos alternativos para estudiar los niveles de radón en aulas de clases inicial, a alturas aproximadas de 1m, ya que a esta altura y menos los niños tienden a remover los detectores por curiosidad.
- Conformar mapas de isodosis e isoconcentraciones de radón, no sólo de carácter geográfico, sino también de carácter temporal.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Abmurad, K., & Al-Omari, R. (2008). Indoor Radon Levels in Irbid and Health Risk from Internal Doses. *Radiation Measurements*, 389-391.
- Acosta, V. (1975). *Curso de Física Moderna*. Oxford: University Press.
- Ahmad, T. M. (2007). *Indoor Radon Concentration in Kindergartens, Play - and Elementary Schools in Zulf City (Saudi Arabia)*. Riyadh: King Saud University.
- Andisco, D., Blanco, S., & Buzzi, A. (2014). Dosimetría en radiología. *Revista Argentina de Radiología*, 4.
- Canadian Nuclear Safety Commission. (2012). *Introduction to Radiation*. Ontario: Minister of Public Works and Government Services Canada (PWGSC).
- Canoba, A., López, F., Arnaud, M., Oliveira, A., Neman, R., Hadler, J., y otros. (2002). Indoor Radon Measurements in six Latin American countries. *Geofísica Internacional*.
- Cherry Jr, R. N. (1998). *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo II*. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Colegio Oficial de Físicos. (2004). Radiaciones Ionizantes. *Sociedad y Física*, 58.
- Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación. (1971). *Radiation Protection Instrumentation and its Application*. Viena: ICRUM.
- Danhke, G. (1989). *Investigación y Comunicación*. México: McGraw - Hill.
- EPA. (1993). *Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes*. United States: Office of Air and Radiation.
- EPA. (1993). *Radon Measurement in Schools*. Washington: EPA.
- Espinosa, G. (1994). TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS. En G. Espinosa, *Trazas Nucleares en Sólidos* (pág. 119). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Física.
- Fernández, P. (1996). *Determinación del Tamaño Muestral*. Coruña: Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística.
- Gallego Diaz, E. (2011). *Radiaciones Ionizantes y Protección Radiológica*. Madrid: Foro de la Industria Nuclear Española.
- García, M. (2000). Las Fuentes Radiactivas. *Ciencia y Tecnología*, 14.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2000). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw - Hill Interamericana de México.
- International Commission on Radiological Protection. (1977). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt: Pergamon Press.
- International Commission on Radiological Protection. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, 35.
- Jensen, R. H., Lanlois, R. G., & Bigbee, W. L. (1995). *Elevated Frequency of Glycophorin A Mutations in Erythrocytes from Chernobyl Accident Victims*. *Rad Res.*
- Mattsson, S., & Söderberg, M. (2013). *Radiation Protection in Nuclear Medicine*. New York: Springer.
- Mercado Uribe, H. (2007). La Física de las Radiaciones y La Dosimetría. *Cinvestav*, 6.
- National Academy of Sciences. (1990). *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*. Washington DC: National Academy Press.
- National Toxicology Program. (2014). *13th Report on Carcinogens*. Department of Health & Human Services USA.
- Organización Mundial de la Salud. (2009). *Handbook on Indoor Radon*. Francia: WHO Library.
- Organización Mundial de la Salud. (2012). Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. *Centro de Prensa*, 5.
- Pedraza, J. L. (2007). *Introducción a la Seguridad Radiológica*. México: Universidad Autónoma del Estado del Hidalgo.
- United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation. (2010). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nation.
- Universidad Nacional de la Plata. (2007). *Interacción de la Radiación con la Materia*. Buenos Aires: Departamento de Física.
- UNSCEAR. (1982). *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*. Nueva York: Naciones Unidas.
- UNSCEAR. (2010). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nation.

- Ward, J. (1989). *DNA Damage Produced by Ionizing Radiation in Mammalian Cells: Identities, Mechanisms of formation, and repairability*. Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol.
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria, con Física moderna Volumen II*. México: Person Educación.

## 6. ANEXOS

### 6.1. Checklist de información de las aulas

*Anexo 1. Checklist de información de las Aulas*

<b>CÓDIGO</b>	
<b>FECHA COLOCACIÓN</b>	
<b>NOMBRE</b>	
<b>NIVEL/AULA</b>	
<b>USO DEL AULA</b>	
<b>VENTILACIÓN</b>	
# de puertas	
# de ventanas	
otros	
<b>PARED</b>	
Materiales de construcción	
Enlucido	
Tipo de pintura	
Estado de la pared (grietas)	
<b>PISO</b>	
Materiales de construcción	
Estado del piso (grietas)	
<b>EDIFICIO</b>	
Edad	
<b>ENTORNO</b>	
Vegetación	
Obras de construcción cercanas	
Rios/lagos/otros	
Otros	
<b>NÚMERO DE DETECTORES</b>	
<b>FECHA RETIRO</b>	
<b>DIAGRAMA</b>	

*Fuente: El Autor*

## 6.2. Especificaciones técnicas del detector LR115

### Anexo 2. Especificaciones Técnicas del Detector LR-115



#### LR115 films

(Description + instructions for use)

ALGADE

(Version 09/2015)

DOSIRAD Laboratory

#### GENERAL DESCRIPTION

These consist of thin films of a special cellulose nitrate, coloured deep red and coated on a 100 µm thick polyester base. Only one side of these films is sensitive. With a needle, it gives white scratches. This must be taken into consideration when they are used.

The thickness of the sensitive layer of "LR115 type 1" films is 6 µm, that of "LR115 type 2" films is 12 µm. The type 1 is especially designed for its higher sensitivity to alpha of lower energies.

The red sensitive layer of the Type 2 stripping film (**strippable**) must be removed from the base while it is still wet at the conclusion of the washing stage.

The different LR115 film formats and prices, are given in the Price List of our [web site](#).

#### USES OF THESE FILMS

The films are mainly intended for the **dosimetry** of small quantities of ionising particles (mainly **alpha particles**) or neutrons. Most of the time, the object is not, as with KODAK CN85 Film (today discontinued because a too low demand), to obtain an image but to convert each impact by a particle to a perforation of the coloured sensitive layer. These perforations are called **tracks**, by the technicians. Nevertheless, the LR115 films can also be used to make pictures. The examination and counting of the tracks are facilitated by the great contrast between the perforations and the background when the film is examined by transmitted light, especially if a green source, of a complementary colour to that of the film, is used.

When an exposed and processed film is viewed under the conditions suggested above, each particle which it has registered will show as a brilliant point of light which can easily be located by the naked eye, even if in the middle of a large area of film. Moreover, such tracks are easily distinguishable from superficial defects in the sensitive surface (such as those caused by dust or scratches). These perforations ("tracks") can easily be counted by use of a microscope. *On a strippable LR115, the tracks can be counted as well under a microscope or by the "Spark-Counting" method.* Commercial spark-counters are existing on the market. They allow to count tracks **from small to large areas of strippable LR115 films**.

#### Special applications

##### 1 - Detection and dosimetry of **thermal and epithermal** neutrons :

LR115 Films, Type 1 (6 µm) and Type 1B (B, for **B**orated) are specially designed for the registration of alpha particles arising from the (n,α) reaction of B<sub>10</sub> (1.6 MeV) and Li<sub>6</sub> (2.4 MeV). If a cadmium screen covers one part of the film, it is possible to differentiate thermal and epithermal neutrons by the following method. The part covered by the cadmium screen records only epithermal neutrons, the uncovered part records both thermal and epithermal neutrons. It is therefore easy to calculate the number of thermal neutrons by difference.

##### 2 - Detection and dosimetry of **fast neutrons** :

Neutrons cannot be converted to alpha particles at energy levels above 1KeV. Nevertheless it is still possible to obtain tracks in the cellulose-nitrate layer. These arise from the transfer of energy from those nuclei of the constituents of the cellulose nitrate that have been bombarded by neutrons of high energy, from 1 MeV to 14 MeV. These are called **nuclear recoil tracks**.

The use of LR115 Films, Type 2 and "Type 2 Stripping" is recommended for this application.

1 / 2

Very fast neutrons (up to several tens of GeV) can also be detected, like it was with the KODAK CN85 films. In this case, **spallation fragments** produce the tracks.

#### 3 - Auto radiography (with LR115 Films, Type 2) of alpha radioactive objects :

- A diffusing image without the use of a screen is obtained. This image is similar to that produced on KODAK CN85 Films by means of neutron radiography. It results either from spontaneous alpha radioactivity or from particle emission arising from bombardment.

- The technique of recording alpha particles without the use of any screen, using methods similar to those described above, can be of great value. It makes the detection of numerous alpha-particle-emitting elements possible. Elements which act as α emitters when under bombardment (such as boron and lithium) are similarly disclosed. This has enabled the practical development of the following :

- Detection of very small amounts of plutonium in urine samples : due to emission of alpha particles (LR115 Film, Type 2).

- Dosage and repartition of boron (10<sup>10</sup> g/cm<sup>2</sup>) in steels or alloys, doped semiconductors, etc. When bombarded by neutrons the boron gives rise to the (n, α) reaction (LR115 Film, Type 1 or Type 2).

#### INSTRUCTIONS FOR USE

##### 1 - Handling the film before use :

- *The LR115 films are unaffected by electrons or by radiations in the electro-magnetic spectrum* (such as gamma rays, X-rays or infra-red radiations visible light). They are therefore be handled without risk where such radiations are present.

- It is nevertheless recommended that the precautions given below should be observed :

- Take care to avoid any form of abrasion, such as that arising from mechanical rubbing, folding, pressure, etc.
- For long keeping of all the LR115 films, over 12 months, store the films in a cool dry place : temperature below 15°C, relative humidity 50% or below. *In a frig, place the boxes of films in air tight plastic bags, to avoid humidity cycles.* Allow them several hours before use to reach the ambient temperature.
- As far as possible, wear cotton gloves when handling the films.

##### 2 - Processing LR115 films :

##### 2-1- General recommendations :

- The tracks recorded by these films are not directly visible and must therefore be intensified by treatment in an alkaline solution. The etching bath recommended for this purpose is a 10% (2.5N) solution in distilled (or permuted by Ca-Na exchange) water of analytical-grade sodium hydroxide (caustic soda).
- The strength of the etching bath affects heavily the results obtained. The bath must therefore be prepared exactly and be maintained at the correct strength.
- Care must be taken to allow for the effects of evaporation, especially when processing at 60°C and also for that of absorption from the air carbon dioxide, which will combine with the sodium hydroxide to form less-alkaline sodium carbonate.
- The etching bath should not be agitated. But a very slow films movement can homogenise the films etching. An uniform temperature should be maintained by means of a efficient water jacket. The mean temperature during the whole etching process has a very high effect on the etching efficiency (tracks number).
- Surface-active agents, such as detergents, organic solvents, adhesive tapes, **iron or bad stainless steel**, ball-point or felt-pen inks may lead to adverse reactions and should therefore not be allowed. If not, they can contaminate the etching bath and sometimes **destroy the cellulose nitrate**.

(following on the back, p.2 / 2 )

#### 2-2- Processing the LR115 films :

- LR115 film, type 1: Etching bath at 10% of analytical-grade of NaOH. Etching time 25 to 40 minutes. A very stable bath temperature of 60°C is requested (fluctuation < 0.5 °C).
- LR115 film, type 2 : Etching bath at 10% of analytical-grade of NaOH. Etching time 75 to 100 minutes. A very stable bath temperature of 60°C is requested (fluctuation < 0.5 °C).
- Strippable LR115 type 2 : Same process procedures as those given for the "non-strippable" LR115 with the exception that immediately after the completion of washing, the sensitive layer should be **stripped, in case of spark-counting** (not in case of optical counting). This is quite easily done by pinching one of the corners of the film between the thumb and the index finger. All that is then required is to pull the sensitive layer in a direction parallel to the base until the two are completely separated.

For all the LR115 films, after the conclusion of this process, the film should be washed in acidified water (by HCl up to PH = 3), or *distilled water*, at least 30 minutes, with agitation. After this wash time, make a final rinse of 2 minutes at around 20°C, in a distilled water. At least in a "permuted" water.

#### 2-3- Interpreting the etched films :

The trace (tracks) counting on the etched LR115 film can be carried out by different methods : **1)** through a microscope by naked eye or CCD camera, **2)** by spark-counting of the strippable LR115 film type 2. **3)** by photographic enlargements.

Instead of counting the tracks, the LR115 also allows to make pictures, like was doing the CN85 film. For some uses, the LR115 can easily replace the discontinued CN85 film. For instance, it allows to make alpha auto-radiographies of materials.

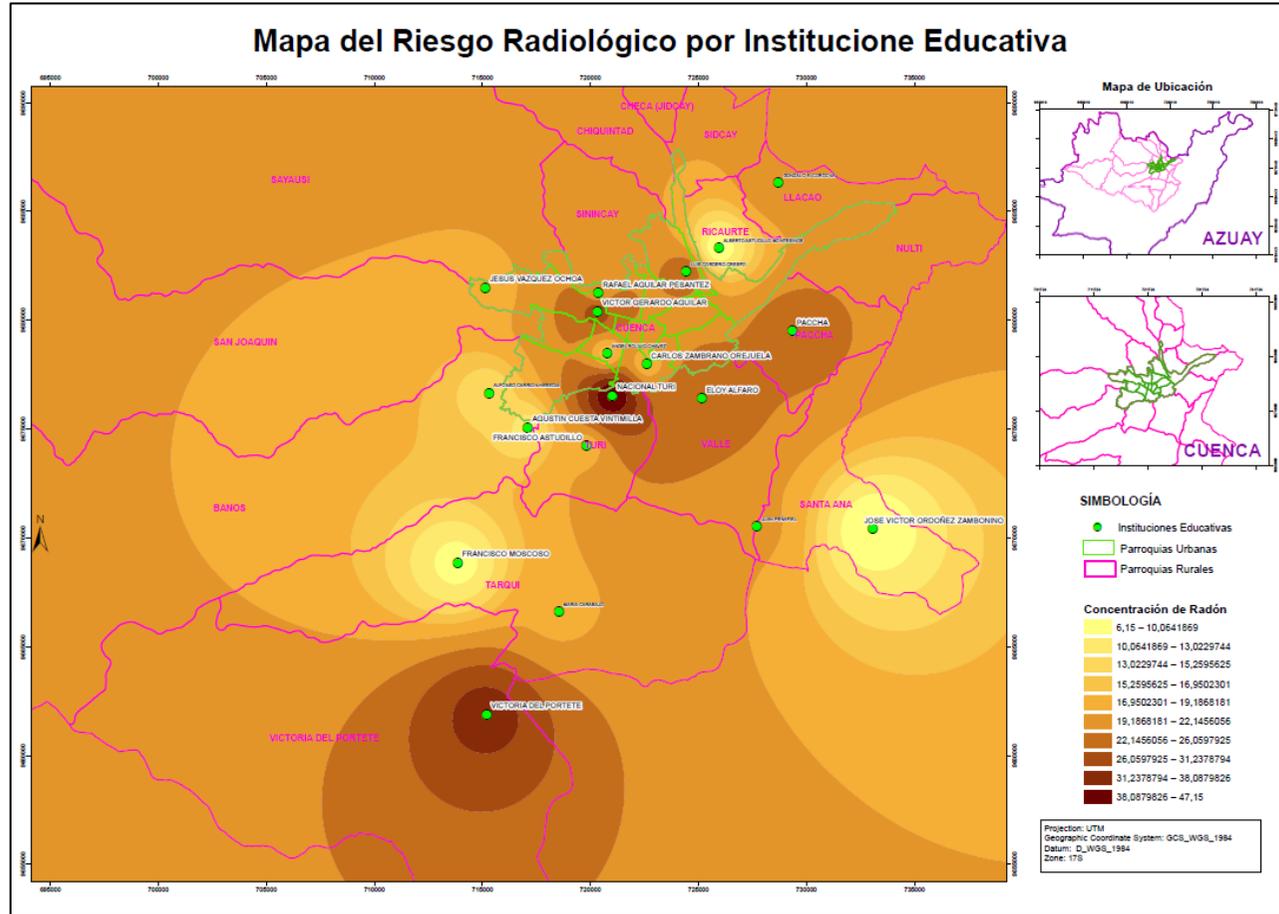
For the microscope counting, *it is proposed to varnish the film surface before counting*. The best are *formophenolic varnishes*. Such a varnish considerably reduces the light diffusion of the etched film surface as well as the light diffused by the tracks. So, a higher number of small tracks can be seen and counted and a luminosity measure can be made, even through the counting microscope, simultaneously with the counting itself. Higher than a minimum thickness of varnish, the quantitative results become totally independent of the varnish thickness. This residual luminosity is important for the quantitative counting adjustments, since the number of tracks increases when the residual thickness decreases, that is when the residual luminosity increases.

#### 2-4- Storage of the etched films.

Etched LR115 films can be kept in stock more than 10 years, without trouble, varnished or not. It allows to re-read the old LR115 films in case of need.

### 6.1. Mapa de Ubicación y Riesgo Radiológico

Anexo 3. Mapa de Riesgo Radiológico de los CEI de Cuenca



Anexo 4. Ubicación de los CEI de Cuenca Urbana y Rural

