

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**MAPA DE RIESGO POR LA DOSIS PROVENIENTE DE LA
RADIATIVIDAD GAMA NATURAL EN LA CIUDAD DE
CHIHUAHUA, MÉXICO**

POR:

I.E. KARLA FLORES ESTRADA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

FEBRERO 2021



Mapa de riesgo por la dosis proveniente de la radiactividad gama natural en la ciudad de Chihuahua, México. Tesis presentada por Karla Flores Estrada como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ecología y Medio Ambiente, ha sido aprobado y aceptada por:

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

D.Ph. Agustín Corral Luna
Secretario de Investigación y Posgrado

Ph.D. Iván Adrián García Galicia
Coordinador Académico

Dra. Marusia Rentería Villalobos
Presidente

25 de Febrero de 2021
Fecha

Comité:
D.Ph. Carmelo Pinedo Álvarez
Dr. Eduardo Santellano Estrada
Ph.D. América Chávez Martínez

© Derechos Reservados
AUTOR. KARLA FLORES
ESTRADA
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO
FRANCISCO R. ALMADA
KM. 1, CHIHUAHUA,
CHIH., MÉXICO C.P. 31453
FEBRERO 2021

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por guiarme y permitirme haber logrado concluir mis estudios de maestría.

Agradezco a mis padres por su apoyo, comprensión y su amor. Quiero que sepan que son y seguirán siendo mi inspiración y mi motivación para seguir adelante. Admiro y valoro mucho todo lo que han hecho por mí. Me siento muy orgullosa de que Dios me haya concedido tenerlos como padres. Gracias por enseñarme a no tener miedo de emprender nuevas cosas en mi vida, ya que para mí volver a la Facultad de Zootecnia y Ecología fue una experiencia maravillosa, me llevo nuevas amistades, nuevos aprendizajes que poner en práctica en la vida laboral.

Agradezco a mi hermana y a mi sobrino, porque sin duda son personas que me impulsan a seguir aprendiendo y a seguirme preparando.

Gracias a todas aquellas personas que me ayudaron, familia, amigos, maestros, asesores, muy en especial agradezco a mi directora de tesis la Dra. Marusia Rentería Villalobos por su apoyo, paciencia y cariño.

A mi comité, el Dr. Eduardo Santellano Estrada, Ph. D. Carmelo Pinedo Álvarez y la D. Ph. América Chávez Martínez, agradezco sus valiosas aportaciones y su gran apoyo en esta investigación.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Chihuahua que durante mi estancia en posgrado me apoyo con beca económica e infraestructura para realizar y concluir mis estudios.

Y a todas aquellas personas que me permitieron tomar muestras en sus casas y que con cariño me recibieron. Finalmente agradezco a CIMAV quien me proporcionó el instrumento que me permitió tomar las mediciones. Sin duda fundamental en la investigación.

DEDICATORIA

A Dios quien me bendice en abundancia.

A mis padres Mónica Estrada Reynoso y Miguel Ángel Flores Sánchez, por su motivación, ejemplo de perseverancia, su amor y apoyo en este proyecto y a lo largo de mi vida.

A mi hermana Gabriela Flores Estrada, por su ayuda, amor y comprensión.

A mi hermoso sobrino Joshua Caleb Robles Flores, quien con tan solo una sonrisa me inspira a seguir adelante, y me motiva a dar lo mejor de mí.

A mi mejor amiga Dina Esmeralda López Castro, por acompañarme a muestrear y estar al pendiente, por motivarme, y animarme para concluir mis estudios.

A toda mi familia y amigos agradezco su apoyo incondicional para que esta meta en mi vida fuera posible.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, si no como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

CURRICULUM VITAE

La autora del presente trabajo nació el 2 de noviembre de 1994 en la Ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México.

2012 – 2016	Cursó la carrera de Ingeniero en Ecología en la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua.
2016	Primer lugar en aprovechamiento académico de la XXXIX Generación de Ingenieros en Ecología.
2016 – Actual	Empleada en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Gobierno del Estado de Chihuahua.
2017 - 2019	Estudios de Maestría en Ecología y Medio Ambiente en la Universidad Autónoma de Chihuahua.
2018	Curso de ArcGis (ArcMap 10) por GeoVirtual en la ciudad de Chihuahua.
2019	Primer Lugar en aprovechamiento académico de la Generación VII de Maestría en Ecología y Medio Ambiente.

RESUMEN

MAPA DE RIESGO POR LA DOSIS PROVENIENTE DE LA RADIATIVIDAD GAMA NATURAL EN LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, MÉXICO

POR:

I.E. KARLA FLORES ESTRADA

Maestría en Ecología y Medio Ambiente

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Dra. Marusia Rentería Villalobos

Los materiales de construcción más utilizados pueden contener elementos naturales radiactivos al derivarse de rocas o terrenos con presencia de radionúclidos de las series del ^{238}U y ^{232}Th , así como del ^{40}K . Estos pueden producir riesgos ambientales que causen daños a la salud de la población y, en consecuencia, costos económicos en las áreas en que se presente. El objetivo de la investigación fue evaluar la distribución espacial de la dosis en interior de domicilios proveniente de la radiación gama natural emitida por materiales de construcción; además, para elaborar un mapa de riesgo por radiactividad gama natural se adicionaron los valores de radiactividad gama natural provenientes del suelo. En este estudio, también se obtuvieron la dosis equivalente anual y el riesgo de cáncer para toda la vida de los habitantes en la ciudad de Chihuahua. Se realizaron 97 colectas de datos de radiactividad gama en hogares de la ciudad de Chihuahua. De igual manera, se analizó la relación que tiene la

radiactividad gama natural con las defunciones por leucemia, mediante un análisis de distribución espacial. La medición de exposición a la radiactividad gama natural se obtuvo con un equipo geiger, a tres distancias desde la pared: 1 cm, 50 cm y en la parte central de la habitación. La exposición a radiación gama no mostró diferencias significativas entre zonas y distancias de medición desde la pared. La exposición gama natural mostró una correlación positiva con el grosor de la pared y el tamaño de la habitación. Los resultados indicaron que la tasa de dosis efectiva anual de los habitantes de la ciudad de Chihuahua es en promedio de 1,18 mSv/año, lo que resulta en un riesgo de cáncer de toda la vida de 0,0043. Aunque los valores de la dosis efectiva anual son más altos que los establecidos por las regulaciones internacionales, no hay evidencia que correlacione las muertes por leucemia con la tasa de dosis gama en interiores. Finalmente, el mayor riesgo por radiactividad gama natural se identificó en el centro y sureste de la ciudad de Chihuahua.

ABSTRACT

RISK MAP OF NATURAL GAMMA RADIATION DOSE IN THE CITY OF CHIHUAHUA, MEXICO

BY:

I.E. KARLA FLORES ESTRADA

The most common building materials show concentrations of natural radionuclides, they derive from rocks and soils which can contain radioactive elements from ^{238}U and ^{232}Th decay series, as well as ^{40}K . These natural radionuclides can produce environmental risks that may cause health damages; consequently, this issue can produce economic costs for society in areas where it occurs. The objective of the research was to evaluate the spatial distribution of indoor gamma dose rates produced by building materials in dwellings of the city of Chihuahua; furthermore, to develop a risk map for natural gamma radioactivity, the values of natural gamma radioactivity from the soil were added. Likewise, this study was assessed the annual effective dose and the lifetime cancer risks for the inhabitants of this city. Similarly, the relationship between natural gamma radioactivity and deaths from leukemia was analyzed using a spatial distribution analysis. The gamma radioactivity exposure was measured in 97 dwellings of Chihuahua city. These measurements were recorded with Geiger equipment, at three distances from the dwelling wall: 1 cm, 50 cm, and in the middle of the room. Gamma radiation exposure did not show significant differences when it is measured by zones and distances from walls. The natural gamma exposure showed a positive correlation with wall thickness and room

size. Results indicated that the annual effective dose rate of the inhabitants of Chihuahua City is on average 1.18 mSv/y, resulting in a lifetime cancer risk of 0.0043. Although the annual effective dose values are higher than those established by international regulations, there is no evidence to correlate leukemia deaths with indoor gamma dose rate. Finally, the higher risk due to natural gamma radioactivity was identified in the center and southeast of Chihuahua city.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xiii
LISTA DE GRAFICAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Riesgos Ambientales.....	4
Mapa de Riesgo.....	5
Evaluación de la Radiactividad.....	6
Características Radiactivas de la Zona de Estudio.....	7
Radiactividad en Materiales de Construcción.....	9
Problemáticas de Salud por Radiactividad en Casas Habitacionales....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Descripción del Área de Estudio.....	14
Localización.....	14
Clima.....	14
Fisiografía.....	14
Economía.....	16
Diseño y Aplicación de Encuestas.....	16
Métodos de Medición de Exposición Gama.....	17
Tasa de Dosis Gama y Equivalente Anual en Dosis Efectiva.....	19
Determinación del Exceso de Riesgo de Cáncer de Toda la Vida	20
Incidencia de Mortalidad por Leucemia.....	20

Elaboración de Mapas de Riesgo por Exposición a la Radiactividad Gama.....	21
Análisis Estadístico.....	23
Estadística Descriptiva de Radiación Gama.....	23
Análisis de Correlación Pearson.....	23
Análisis de Varianza (ANOVA).....	24
Prueba de Hipótesis (<i>t-student</i>).....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
Radiación Gama en Materiales de Construcción.....	26
Nivel y Distribución de Radiación Gama en la Ciudad de Chihuahua...	28
Exceso de Riesgo de Cáncer de Toda la Vida.....	32
Análisis de Leucemia.....	33
Casos de Leucemia y Dosis de Radiación.....	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
LITERATURA CITADA.....	49
ANEXO I.....	55
ANEXO II.....	56

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Dosis emitida por materiales de construcción	11
2	Datos de dosis equivalente anual (mSv/año) y estadística descriptiva de dosis anual equivalente para cada zona de la ciudad de Chihuahua	27
3	Exceso de riesgo de cáncer de toda la vida (ERCT) para la población de la ciudad de Chihuahua.....	34
4	Cantidad de defunciones a causa de leucemia por rango de edad.....	38
5	Fuentes reconocidas y sospechosas del cáncer producido por factores ambientales no ocupacionales	40
6	Casos encontrados de leucemia por distrito con su valor promedio de dosis gama	41

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Casos de leucemia en la ciudad de Chihuahua en el periodo 2004-2012.....	35
2	Frecuencia de casos de leucemia por dosis anual equivalente de radiación gama en la ciudad de Chihuahua.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación del área de estudio.....	15
2	Puntos de muestreo de exposición a radiación gama emitida por materiales de construcción en la Ciudad de Chihuahua, Chihuahua.....	18
3	Esquema de estructuración de mapa de riesgo por radiactividad en materiales de construcción de casa habitación.....	22
4	Distribución de dosis gama, emitida por materiales de construcción en las viviendas de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua.....	29
5	Asociación de la distribución de dosis gama en los sitios muestreados con: a) grosor de la pared y b) dimensiones de la habitación	31
6	Distribución de casos de mortalidad por Leucemia en el periodo 2004-2012 en la ciudad de Chihuahua.....	36
7	Mapa de riesgo por radiactividad gama natural en la ciudad de Chihuahua.....	45

LISTA DE ABREVIACIONES

Abreviación	Término
ANOVA	Análisis de varianza
Bq	Becquerel
Gy	Grey
IDW	Distancia Inversa Ponderada
IMPLAN	Instituto Municipal de Planeación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
mR	Micro röntgen
mVs	Millisievert
nGy	Nano Grey
OMS	Organización Mundial de la Salud
ppm	Partes por millón
SS	Secretaría de Salud
TEG	Tasa de Exposición gama
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómica

INTRODUCCIÓN

Las principales problemáticas ambientales que se presentan en las ciudades están relacionadas con la modificación del paisaje natural, urbano y social. La mayor agrupación poblacional a nivel mundial, se concentra en las zonas urbanas y en ella destacan gran cantidad de actividades productivas. Debido a ello, emergen amenazas en su entorno que pueden ser de gran importancia. Cada peligro presenta un patrón espacial y temporal particular, por lo tanto, cada individuo que habita las zonas urbanas puede estar expuesto a diversos peligros en distintos lugares y momentos.

En el espacio urbano se presentan distintos niveles de exposición a los peligros, lo que hace unas zonas más críticas que otras en materia de protección civil y mitigación del riesgo. Los riesgos son aquellos factores que se encuentran, ya sea de origen natural o inducidos por el hombre, y que pueden poner en riesgo la salud de los habitantes que eventualmente se establezcan en la zona. Se clasifica como riesgos naturales aquellos efectos producidos por el planeta, producto de los diversos fenómenos ambientales que ocurren en ella. Ejemplos de ellos pueden ser erupciones volcánicas, terremotos, sequías, incendios forestales, huracanes, inundaciones y procesos de remoción en masa. Los riesgos inducidos por el hombre, son todos aquellos factores que son producidos por la transformación, manejo y modificación, entre otros, de los recursos o insumos naturales realizados por la actividad humana, un ejemplo típico de esto es la contaminación.

Los mapas de riesgo se generan a partir de los fenómenos que se pueden presentar en un determinado lugar, el objetivo de estos es apoyar el ordenamiento de los asentamientos humanos, la protección civil y seguridad pública. Además, contribuyen a la cultura local, ya que permite un conocimiento más responsable de las variables de estudio, así como llegar a la obtención de herramientas útiles para implementar medidas de reducción de vulnerabilidad y mitigación de dichas amenazas.

Por otra parte, muchos materiales procesados industrialmente, que son la base para diversas actividades económicas y sociales contienen cantidades suficientes de especies químicas que pueden provocar un riesgo a la salud de la población. Estos materiales contienen radioisótopos naturales pertenecientes a las cadenas de desintegración del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . Estos materiales una vez procesados también pueden presentar altos contenidos dentro del producto principal y en los residuos o subproductos generados. Los materiales de construcción son un ejemplo de exposición a la radiación ionizante proveniente de estos elementos radiactivos. A nivel mundial se han realizado diversos estudios sobre la radiometría en materiales como son hormigón, ladrillos, piedras naturales, yeso, cementos, cerámicas, pinturas y maderas, y su consecuente dosis obtenida por la población expuesta. Derivado de ello, varios países han adoptado medidas y políticas para establecer niveles permisibles, las cuales son reguladas por las autoridades de cada uno de ellos. Más aún, en países como Estados Unidos se cuenta con la evaluación de riesgo provocado por la radiactividad natural, que se debe presentar para los aspectos de urbanismo y en la compra-venta de inmuebles.

Es importante mencionar, que a nivel nacional y específicamente en la ciudad de Chihuahua no se cuenta con un mapa de riesgo donde se incluya la radiactividad. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue analizar la distribución de riesgos de radiación gama, emitida por materiales de construcción de las viviendas ubicadas en la ciudad de Chihuahua y por la geología presente en dicha ciudad y así elaborar un mapa de riesgo por radiactividad gama de la ciudad de Chihuahua, siendo este una herramienta indispensable para la atención a la población en riesgo y la aplicación de medidas preventivas para determinar los peligros naturales en una zona urbana. Para obtener un mapa de riesgo resulta de la combinación del mapa de peligrosidad y el grado de vulnerabilidad existentes en el área de estudio.

REVISIÓN DE LITERATURA

Los asentamientos humanos deben contar con una planeación del desarrollo, la cual es una actividad de racionalidad administrativa, dirigida a prever y adecuar de manera armónica las actividades económicas, con respecto a las necesidades básicas, tales como la educación, salud, asistencia social, vivienda, servicios públicos de cualquier comunidad o ciudad y el mejoramiento de las zonas rurales (IMPLAN, 2006).

A través de la planeación, los gobiernos pueden aplicar eficientemente los recursos económicos que los gobiernos tanto federales como estatales proporcionan para el desarrollo de proyectos productivos y sociales. Con ello, los gobiernos a través de las diferentes dependencias, principalmente de planeación y desarrollo territorial, son las encargadas de delimitar áreas urbanas, zonificaciones, crecimiento poblacional y urbano, estructuras de los sectores económicos, así como evaluar riesgos de origen ambiental y antropogénico.

Riesgos Ambientales

El riesgo se define como cualquier característica o exposición de un individuo que aumente su probabilidad de sufrir una lesión o daño. Los riesgos ambientales son aquellos procesos naturales que pueden causar deterioro a la población y daños económicos en el municipio o delimitación administrativa de que se trate. Ejemplos de tales procesos o riesgos son: geotectónicos, erosión, incendios forestales, inundaciones, terremotos, etc. Lo anterior, es debido a fenómenos naturales que han dejado un costo de vidas humanas, daños en infraestructura y riesgos a la salud, así como por la distribución de otros

factores. Es por ello que el contar con los mecanismos necesarios para dar respuesta a los riesgos naturales se ha convertido en una prioridad (IMPLAN, 2006). Para la prevención o mitigación de estos daños, se deben implementar metodologías e instrumentos que apoyen a identificar dichos riesgos en zonas urbanas. Estas metodologías deben estar dirigidas a los tres niveles de gobierno, instituciones relacionadas con la materia y población en general (IMPLAN, 2006).

Mapa de Riesgo

Un mapa de riesgos se define como un instrumento, basado en diversos sistemas de información, que busca identificar actividades que deriven en riesgo, para cuantificar la probabilidad y medir el daño potencial asociado a su ocurrencia (Rodríguez-López *et al.*, 2013). Por lo que generar un mapa de riesgo es un instrumento que causa un alto beneficio, ya que nos ayuda a identificar los peligros existentes que se pueden presentar en dichas áreas (IMPLAN, 2006). Los mapas de riesgo son indispensables para detectar el riesgo hacia la población y dar atención oportuna mediante medidas preventivas. Con ellos se pueden determinar los peligros naturales en una zona urbana. Un mapa de este tipo proporciona una gran cantidad de contribuciones tal como información en conjunto con respecto a las variables de estudio, el valor económico total de los riesgos asumidos y la investigación de esas fuentes de riesgo (Rodríguez-López *et al.*, 2013).

Evaluación de la Radiactividad

La radiactividad es el fenómeno de la descomposición espontánea de los núcleos de un átomo y la emisión de radiación ionizante. A las diferentes especies nucleares radiactivas se les llama radionúclidos o isótopos radiactivos (L'Annunciata, 1998). Este fenómeno puede ser originado por fuentes naturales o artificiales. Las fuentes naturales son todas aquellas matrices ambientales que de manera natural contienen radioisótopos tales como suelo, sedimentos, agua, aire, así como la radiación cósmica. Las fuentes artificiales son los radioisótopos presentes en el combustible de un reactor nuclear para la generación de energía eléctrica, medicamentos, para tratamientos de medicina nuclear, bombas nucleares, accidentes nucleares, entre otros. Los principales tipos de radiactividad son: alfa (α), beta (β) y gama (γ).

El ser humano recibe cierta cantidad de dosis, tanto interna como externa, proveniente de los radioisótopos naturales y artificiales. La radiactividad natural tiene una enorme importancia, debido a que es la principal fuente de exposición de la radiación al ser humano (Miró et al., 2010). El radón (^{222}Rn y ^{228}Rn) al ser un gas y estar presente de manera natural en el aire, brinda la mayor dosis interna recibida por la población. Este elemento se presenta en estado natural debido a las altas concentraciones de uranio presentes en suelo y rocas que son utilizadas en la construcción. Según la OMS (2016) la concentración media de radón al aire libre varía de 5 Bq/m³ a 15 Bq/m³, mientras que en espacios confinados (minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, casas habitación, entre otros) se registran los niveles más altos. En viviendas, escuelas y oficinas, las concentraciones de radón

varían de $<10 \text{ Bq/m}^3$ hasta más de $10,000 \text{ Bq/m}^3$ (OMS,2016). Según la OMS (2009) un nivel de referencia medio anual nacional de 100 Bq/m^3 . Cuando ese nivel nacional no pueda alcanzarse, el nivel que se llegue a establecer no debe superar los 300 Bq/m^3 . Así mismo, la mayoría de la dosis externa (gama) recibida por el hombre es debida a los radioisótopos que se encuentran en suelo. Los principales contribuidores son ^{40}K (35%), ^{232}Th (50%) y ^{238}U (5%) (Medina-Araújo y Reyes, 2002).

Por otra parte, la radiación cósmica proveniente del propio sol y el espacio exterior, que llega a la Tierra cada segundo es del orden de 2×10^{18} partículas de muy elevada energía. Esta radiación está compuesta fundamentalmente de protones (86%), algunos de muy alta energía (mayor de 1000 MeV) y partículas alfa (12%), junto con radiación X y gama (Trinidad *et al.*, 2009).

Características Radiactivas de la Zona de Estudio

En el Estado de Chihuahua se localizan gran cantidad de anomalías de minerales radiactivos distribuidos (SEMIP, 1994). Ya que cuenta con al menos 56 zonas de uranio o de minerales asociados a éste, encontrándose valores de actividad específica altos de algunos radionúclidos, en las ciudades cercanas a yacimientos uraníferos como Aldama y Chihuahua (Ferriz, 1984; SEMIP, 1994; Colmenero-Sujo *et al.*, 2003). Así mismo, de manera natural el suelo contiene los radioisótopos de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K (Damia *et al.*, 2011). Las rocas son materiales sólidos de origen natural Mibei (2014) que están formadas de más de un tipo de mineral. El Uranio es encontrado en todas las rocas y suelos, generalmente se halla concentrado en rocas metamórficas, granito, lignito y

depósitos de fosfatos. Es encontrado en la naturaleza, consiste en tres isótopos: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U (Bonotto y Andrews, 2000).

En la corteza terrestre, el ^{238}U está presente en cantidades del 99.27 %, el ^{234}U en cantidades del 0.006 % y el ^{235}U , el isótopo presente de la serie del Actino, se encuentra presente en cantidad de 0.72 % (Bonotto y Andrews, 2000). El torio existe principalmente como ^{232}Th , es encontrado más abundantemente en rocas ácidas que en alcalinas. En promedio, en suelos, el torio existe entre 9-10 ppm, aunque es mayor que la concentración del uranio, su actividad es casi la misma (Colmenero-Sujo *et al.*, 2003). El potasio de manera natural contiene el isótopo ^{40}K (emisor beta, gama) en una abundancia del 0.0117 % y una vida media de $1,277 \cdot 10^9$ años, estando este radionucleido presente en gran parte de la materia, tanto orgánica como inorgánica y constituyendo una de las fuentes más importantes de radiactividad de origen natural (Trinidad *et al.*, 2009).

A causa de las características geológicas de la zona, la dosis gama natural recibida por los habitantes de la ciudad de Chihuahua es alta. Esto debido a que presenta concentraciones de radioisótopos como el torio, radio y potasio en el suelo, que se encuentran por encima del promedio mundial; mostrando una distribución de radiación natural al norte, al norte-centro y al sur de la ciudad. Observando que las riolitas, contribuyen al alto contenido de uranio y torio observados en el suelo aluvial (Reyes-Cortés *et al.*, 2007; Rentería *et al.*, 2007; Luevano-Gurrola *et al.*, 2015).

Radiactividad en Materiales de Construcción

Una de las principales necesidades de la población es disponer de una vivienda adecuada, ya que es un factor importante, del cual dependerá en gran parte la salud y calidad de vida de sus habitantes (IMPLAN, 2006). Debido a que los materiales de construcción son una de las fuentes que causan una exposición directa a la radiación, que incide en la calidad de vida de la población (Miró *et al.*, 2010). Consecuentemente, los radioisótopos tales como ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn y ^{40}K se encuentran en los materiales de construcción, contribuyendo a la exposición de la radiación ionizante.

Los materiales de construcción se producen a partir de materiales naturales, rocas, granito, yeso y arcilla, entre otros (Sas *et al.*, 2017). Estos se extraen directamente de la naturaleza y se clasifican en dos tipos, los materiales que se extraen de las rocas y materiales o sustancias granulares como arcillas, arenas, gravas, etc. (Crespo, 2010). Según IMPLAN (2006) se conoce que en el municipio de Chihuahua los materiales de construcción más utilizados son principalmente el concreto y sus derivados, tanto en techos como en muros y pisos, éstos son obtenidos de bancos de materiales cercanos a la ciudad de Chihuahua. Las casas habitación a nivel nacional presentan como principales materiales de construcción tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento y concreto (INEGI, 2002), teniendo mayor frecuencia block, ladrillo, adobe, cemento y yeso como materiales de construcción en las casas habitación de la ciudad de Chihuahua. La Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT) tiene control sobre la información de los materiales de construcción con respecto a su existencia y disponibilidad. La información sobre

los materiales de construcción en México se integra en un Inventario Nacional de Bancos de Materiales por Estado, contando con 2729 bancos de materiales registrados.

En el Estado de Chihuahua existen aproximadamente 145 bancos en los cuales se extraen principalmente grava-arena, material conglomerado, caliza, escoria de fundición, material volcánico, roca alterada y roca caliza (Secretaría de Comunicación y Transporte, 2017). Los bancos de materiales registrados en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de Gobierno del Estado de Chihuahua, en su última actualización del 22 de octubre de 2019, muestra que el 26.09 % de los bancos de materiales se encuentran en el municipio de Chihuahua, el 21.74 % en el municipio de Juárez, el 17.39 % en el municipio de Aldama, el restante se encuentra en Cuauhtémoc, Rosales, Cusihuiriachi, Ahumada, Satevó, Meoqui, Bocoyna y Guerrero, cada uno de ellos con 4.35 %. En total se encuentran registrados 23 bancos de materiales en el Estado.

Grupo Cementos de Chihuahua, S.A.B. de C.V., en su reporte anual en el año 2017 menciona que la compañía depende de una gran diversidad de insumos que son fundamentales para sus actividades de producción, entre ellos caliza, arcilla, yeso, sílice y óxidos de fierro; los cuales se suministran de canteras propias o arrendadas, que se encuentran cerca de las plantas de cemento o se adquieren de proveedores.

Como referencia, a nivel internacional, el Cuadro 1 muestra, en la Unión Europea, la probabilidad de encontrar valores altos de radiactividad en varios materiales de construcción comúnmente utilizados (European Commission, 1999). Según Miró *et al.*, 2010, el cemento, ladrillo, arcilla, y rocas graníticas

Cuadro 1. Dosis emitida por materiales de construcción

Material de construcción	Dosis por encima de 0.3 mSv/circunstancias o explicación	Dosis por encima de 1 mSv/circunstancias o explicación
Hormigón	POSIBLE / casi en cualquier lugar donde se utilizan cantidades masivas	POSIBLE / si se utilizan cantidades masivas y el hormigón con tiene cantidades elevadas de escoria de alto horno, cenizas volantes o arena natural o de roca rica en radionucleidos naturales
Hormigón aireado y ligero	POSIBLE / si se utiliza escoria de alto horno, ceniza volante o materiales ricos en radionucleidos naturales	NO PROBABLE / se utiliza sólo en las paredes
Ladrillos de arcilla	POSIBLE / si se utiliza arcilla rica en radionucleidos naturales	NO PROBABLE / se emplea sólo en las paredes
Ladrillos de cal	NO PROBABLE / concentración de actividad baja, uso limitado (sólo en paredes)	NO PROBABLE / concentración de actividad baja, uso limitado (sólo en paredes)
Piedra natural	NO PROBABLE / uso superficial o de otro tipo en una cantidad menor POSIBLE / si se usa en cantidades masivas	NO PROBABLE / uso superficial o de otro tipo con un uso menor POSIBLE / si se utiliza en cantidades volumétricas
Placas o bloques de yeso	NO PROBABLE / yeso natural POSIBLE / si se emplean subproductos de yeso ricos en radio	NO PROBABLE / uso superficial o sólo en las paredes

Fuente: Comisión Europea, 1999

pueden causar tasas de dosis significativas, de 20 a 190 nGy/h, dependiendo del tipo y del lugar de la construcción; lo cual puede contribuir hasta en un 25 % de la dosis total anual que las personas reciben debido a las fuentes de radiación. Además, los materiales aplicados a las estructuras de una construcción, los utilizados para la decoración del interior del hogar y los materiales cerámicos.

Estos materiales pueden contener sales de uranio con objeto de darles colores Miró *et al.*, 2010. En el año 2006 se manifestó que el tipo de materiales en paredes de viviendas de fraccionamientos nuevos, en el municipio de Chihuahua, son principalmente de bloque (64.63 %) y de ladrillo (34.69 %), el resto es de adobe y otros materiales. El piso es principalmente de cerámica y concreto y el techo es de cemento (Instituto Municipal de Planeación Chihuahua, 2006).

En el Estado de Chihuahua se han detectado actividad de radionúclidos en el suelo en concentraciones de 52, 73 y 1097 Bq·kg⁻¹, para ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K (Luevano-Gurrola, *et al.*, 2015). En dicho Estado se encuentra el distrito uranífero Peña Blanca, el cual es el más importante de México.

Problemáticas de Salud por Radiactividad en Casas Habitacionales

Los seres humanos se pueden contaminar con sustancias radiactivas, esto debido al contacto del agente radiactivo con la piel, o al inhalar o ingerir.

Es por eso, que se deben de tener controlados los niveles de radiación a los que las personas están expuestas, y de esa forma evitar un daño en la salud. El determinar la radiación ionizante en un área en específica, sirve para evaluar los efectos sobre la salud de la población (UNSCEAR, 2000).

Se ha estimado que la incidencia de cáncer aumenta directamente con la dosis absorbida de radiación ionizante (Nassef y Kinsara, 2017). Por lo cual, la exposición prolongada a la radiación puede causar un riesgo de contraer esta enfermedad. Es decir, cuando una célula se expone a la radiación, tanto natural como antropogénica, existen cuatro posibilidades de efecto biológico (UNSCEAR, 2000): la primera, que la célula no presente daño; la segunda, que la célula sí experimente daño, pero que pueda repararse y opere normalmente; la tercera, que la célula sí experimente daño, no pueda recuperarse y siga viviendo, pero con sus funciones alteradas; y finalmente que la célula muera.

Por otra parte, los factores físicos, fisiológicos y ambientales influyen en los efectos biológicos provocados por la radiación ionizante (UNSCEAR, 2000). La exposición a largo plazo al uranio y al torio por inhalación tiene varios efectos sobre la salud, entre los que destacan la leucemia (ATSDR, 1990; 1992; 1999).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

La capital del estado de Chihuahua cuenta con 878,062 habitantes, según la Encuesta Intercensal 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En la Figura 1 se muestra mapa de ubicación del área de estudio.

Localización. La ciudad de Chihuahua se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas extremas al norte 31°47', al sur 25°38'; al este 103°18', al oeste 109°07' de longitud oeste.

Clima. El tipo de clima es seco o estepario, semicálido y con inviernos frescos. La temperatura media anual se encuentra en un intervalo de 18 – 22 °C. Mientras que la temperatura del mes más frío es menor a 18 °C. En esta zona se presenta un régimen de lluvias de verano debido a que es 10 veces mayor la cantidad de lluvias en el mes más húmedo que en el mes más seco y se presenta un porcentaje de lluvia invernal de entre 5 y 10.2 % de la mitad anual. Además, se presentan temperaturas extremas con una oscilación >14 °C. La humedad relativa promedio anual es de 45 %.

Fisiografía. El área urbana de la ciudad se localiza en el centro de una extensa meseta asísmica y por tanto los rasgos geológicos son estables. En algunos puntos de la ciudad hay abundancia de rocas, lo que dificulta la edificación convencional de construcciones (Municipium, 2014).

La composición del suelo es diversa, al oeste de la ciudad predominan los suelos fluvisol, estos son suelos muy poco desarrollo, de profundidad media y su estructura es débil y suelta. En la misma región también se encuentra el

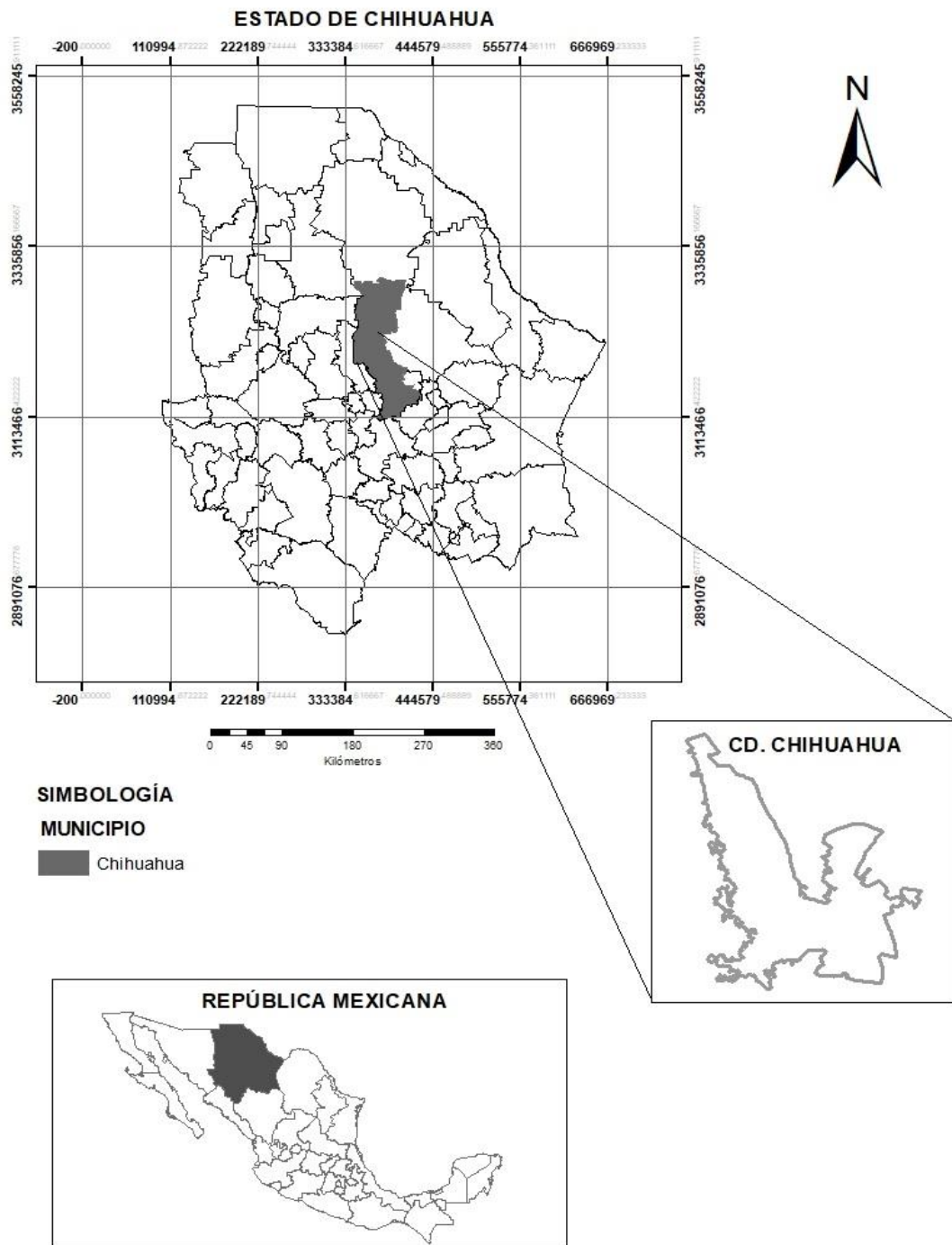


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

cambisol, que se identifica por presentar acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, manganeso y fierro. En la región oriental, predominan los suelos feozem, que se definen por su capa superficial oscura, suave, que contiene gran cantidad de materia orgánica y variedad de nutrientes (Municipium, 2014).

Economía. Está constituida por la prestación de servicios en un 45 % y el comercio en un 44 %, entre estas dos actividades se concentra el 89 % de las empresas en la ciudad, siendo la misma estructura para el Estado. La diferencia entre ambos, es que la ciudad de Chihuahua tiene el sector de servicios con un 3 % más empresas que el promedio estatal y en menor medida el comercio con un 3 %, se considera que es por los servicios que se requieren para ofrecer el desarrollo del sector turismo en la ciudad (Gobierno Municipal de Chihuahua, 2018).

Diseño y Aplicación de Encuestas

El diseño de la encuesta fue establecido con la finalidad de conocer los principales materiales de construcción de los hogares sujetos a muestreo, además de los hábitos y datos personales. Estos datos se usaron para estimar la probabilidad de riesgo a contraer un daño en la salud. La encuesta fue aplicada a estudiantes y personal de la Facultad de Zootecnia y Ecología. Se utilizó un formato para obtener datos como: número de habitaciones con las que cuenta su vivienda, número de habitantes, tiempo viviendo en el lugar, tipo de material de construcción (block, ladrillo, adobe u otro), recubrimiento con el que cuenta la pared de la habitación descrita (cal, yeso, mezcla u otro), grosor de la pared, dimensiones de la habitación más frecuentada y horas presentes en esa

habitación. Así mismo, se solicitó una visita para medir exposición de radiactividad gama en su domicilio.

En la Figura 2 se muestra el polígono de la ciudad de Chihuahua con puntos de muestreo, donde se llevaron a cabo las medidas de exposición de radiación gama emitido por materiales de construcción en viviendas. La selección de los puntos de muestreo se llevó a cabo conforme a la participación voluntaria de estudiantes y personal de la Facultad de Zootecnia y Ecología que decidieron apoyar la presente investigación. El muestreo no fue al azar por recomendaciones de seguridad, ya que este se realizó al interior de las viviendas. Se determinó un número de muestra de 97 casas distribuidas en la ciudad de Chihuahua, el cual establece a la presente investigación contar con el 95% de confiabilidad.

Métodos de Medición de Exposición Gama

Cada medición se realizó por triplicado y a tres distancias de la pared dentro de la habitación. La primera medición fue a 1 cm de distancia, la segunda a 50 cm y la tercera en la parte media de la habitación seleccionada. La determinación de la tasa de exposición gama dentro de las viviendas se midió con un equipo Geiger-Muller Bicron, modelo Surveyor 50. Las unidades se expresaron en miliRöntgen por hora (mR/h). En casos de ausencia de los encuestados, se solicitó apoyo a viviendas vecinas dentro de un radio de 1 km, el procedimiento de aplicación (carta de consentimiento y encuesta) se efectuaron de la misma manera.

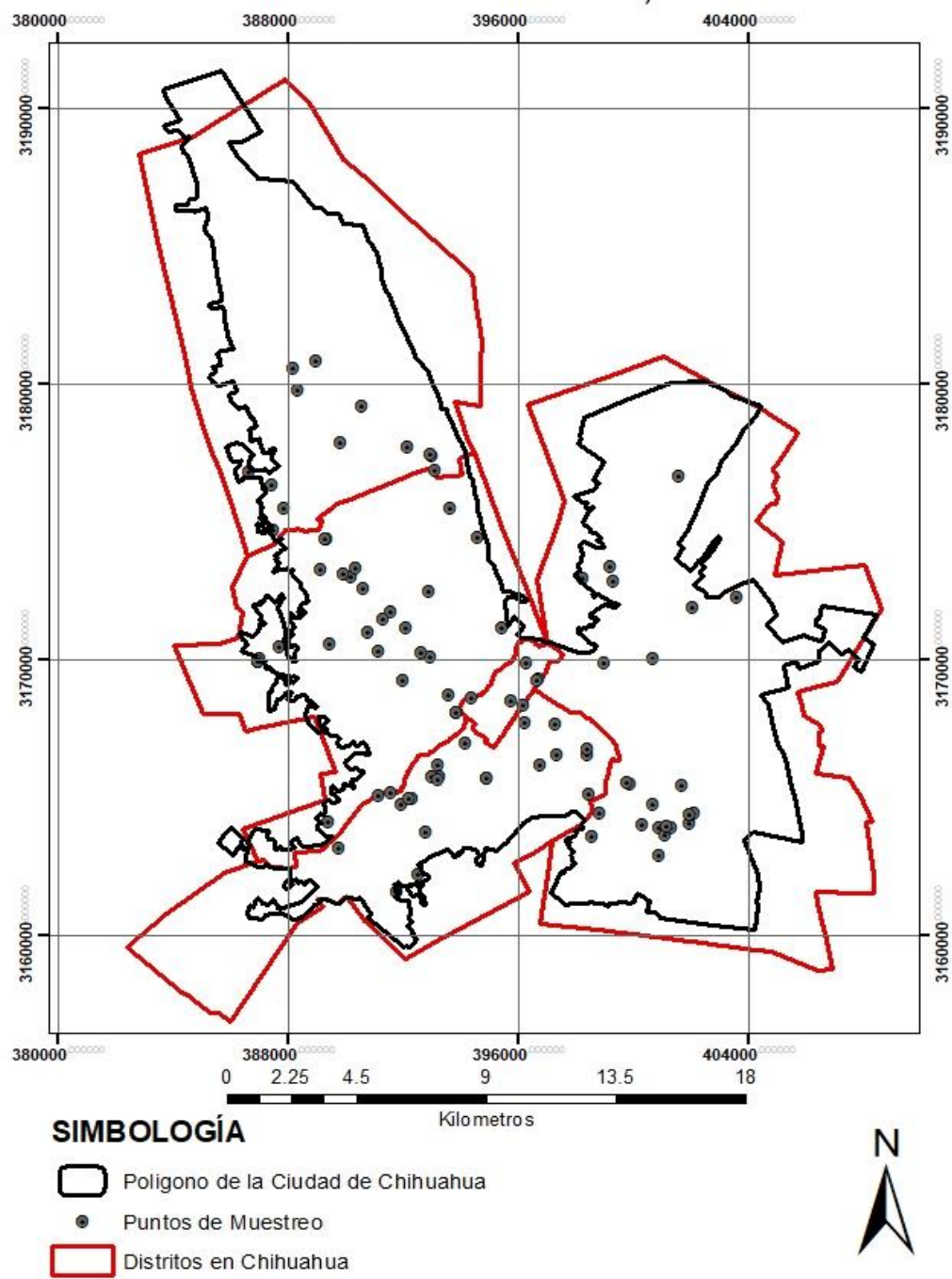


Figura 2. Puntos de muestreo de exposición a radiación gama emitida por materiales de construcción en la Ciudad de Chihuahua, Chihuahua.

Tasa de Dosis Gama y Equivalente Anual de Dosis Efectiva

Los valores de tasa de exposición son transformados a tasa de dosis absorbida (TDGA) la cual expresa el efecto de la radiación gama por unidad de masa. La conversión se determina debido a que un Röntgen deposita una dosis de 0.96 rad, es decir, un rad es igual a 0.001 Gy.

El equivalente anual de dosis efectiva (EADE) cuantifica el riesgo para la salud humana asociado a la exposición a la radiación (Bossew *et al.*, 2016). La determinación del equivalente anual se expresa en Sievert o sus múltiplos (mS/va), la cual se determinó con los valores establecidos de la tasa de dosis gama (nGy/h). Estas unidades reflejan el posible daño biológico que puede sufrir un órgano o tejido, incluso el cuerpo completo expuesto (Euratom, 2014). El Equivalente Anual en Dosis Efectiva (EADE) se calculó mediante el uso de la ecuación (1) establecida por la International Commission on Radiological Protection (ICRP).

$$\text{EADE} = \text{TDGA} \times \text{DCF} \times \text{DE} \times T \quad (1)$$

Donde TDGA es la tasa de dosis gama absorbida, DCF es el factor de conversión de dosis absorbida en las viviendas a dosis efectiva, DE representa el factor de ocupación dentro de las viviendas, es decir, la fracción de tiempo que se pasa en la habitación del hogar y T es el tiempo en horas al año.

Se utilizó el coeficiente de conversión de la dosis absorbida en el aire a la dosis efectiva recibida por adultos ($0.7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$), el número de horas (T) en un año de 365 días (8760 h), el factor de ocupación al aire libre (0.8) y el tiempo de expectativa de vida para los habitantes de Chihuahua (72.3 años).

Determinación del Exceso de Riesgo de Cáncer de Toda la Vida

La exposición a fuentes de radiación ionizante, tanto naturales como artificiales, conlleva un riesgo asociado de provocar efectos a la salud. Así, al evaluar la dosis efectiva durante el periodo de vida el exceso de riesgo de toda la vida (ERCT) se calculó mediante la ecuación (2) de la ICRP.

$$\text{ERCT} = \text{EADE} \times \text{DL} \times \text{RF} \quad (2)$$

Donde DL es esperanza de vida promedio en la población de Chihuahua (72.3 años) y el RF es factor de riesgo de cáncer (Sv^{-1}). De la ICRP se utilizó el valor de 0.05 para el riesgo de cáncer fatal por Sievert, para los efectos estocásticos en el público.

Incidencia de Mortalidad por Leucemia

Se usaron bases de datos sobre incidencia de casos de mortalidad por leucemia. La información de lo anterior fue proporcionada por la Secretaría de Salud del Estado de Chihuahua para el periodo de 2004 y 2012 en la ciudad de Chihuahua.

Los períodos largos y latentes que surgen antes de las manifestaciones de los cánceres ambientales, dificultan el análisis de las exposiciones específicas sufridas de 5 a 40 años antes de la aparición del tumor maligno. La exposición a estos factores se relaciona con actividades del trabajo, medicinas, dietas, cosméticos, materiales de construcción, combustibles, hábitos, costumbres, clima, fauna, contaminantes del agua potable, aire atmosférico y alimentos, y procedimientos bélicos (Hueper, 1952).

Por lo que, para fines de esta investigación se analizó la radiación gama emitida por los materiales de construcción en la ciudad de Chihuahua, la cual se

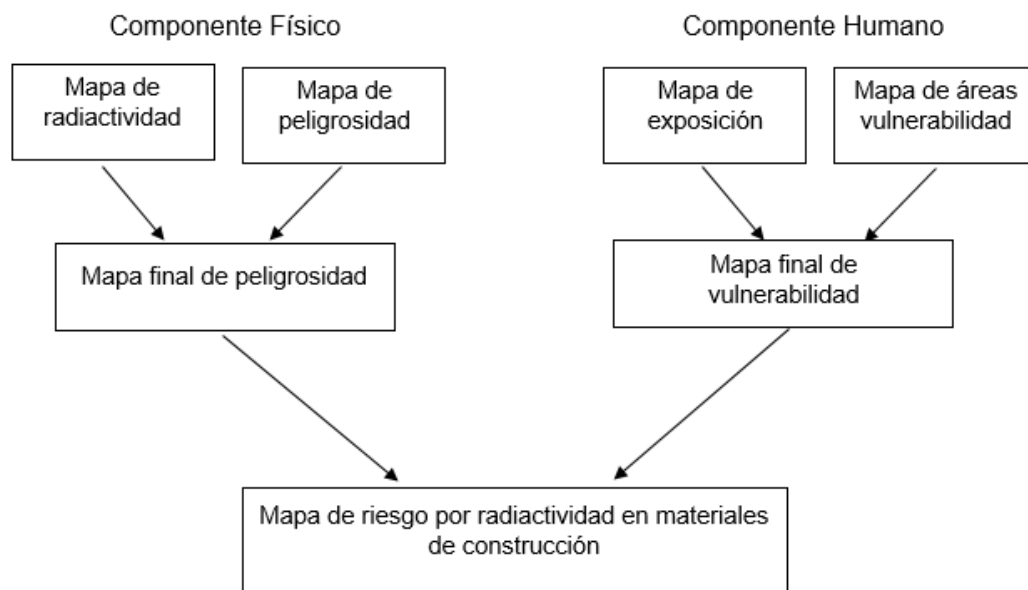
optó por dividirla en cinco distritos, esto según el Fideicomiso para la Competitividad y Seguridad Ciudadana (FICOSEC) en el año 2019, encontrando las dosis gama más altas entre los distritos Ángel, Villa y Zapata.

Elaboración de Mapas de Riesgo por Exposición a la Radiactividad Gama

Los mapas de áreas radiactivas por materiales de construcción se limitan a concretar el área potencialmente afectada. Se trata de determinar las zonas de alto nivel de radiactividad gama a partir de la aplicación de diferentes metodologías ampliamente utilizadas y complementarias (Ribera-Masgrau, 2004).

Para la integración del mapa de riesgo por radiación gama en materiales de construcción se tomaron en cuenta el tipo de material, grosor de las paredes, material de recubrimiento y tiempo de estancia de una persona en su habitación, estas variables pertenecen al componente físico, representado en la Figura 3.

El componente humano se realizó determinando la exposición de radiación gama que emite el material de construcción, ubicando en un mapa los puntos de muestreo distribuidos en la ciudad de Chihuahua. En el campo de vulnerabilidad, se analizaron factores como casos de leucemia, que también fueron ubicados en un mapa para analizar su distribución y la asociación con la exposición a radiación gama, otros aspectos analizados fueron edad y género, entre otros.



Fuente: (Ribera Masgrau, 2004)

Figura 3. Esquema de estructuración de mapa de riesgo por radiactividad en materiales de construcción de casa habitación.

Para finalmente obtener un mapa de riesgo por emisión de radiactividad gama en materiales de construcción en la ciudad de Chihuahua. Para la realización de este mapa se utilizó el programa de ArcGIS 10.5, con la técnica de interpolación con el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés).

Este programa lleva a cabo un método que tiene como finalidad estimar valores de las celdas, calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento, llevando a cabo el mapa de riesgo. La distribución de la radiactividad en el polígono de la ciudad se obtuvo con base en la dosis anual equivalente determinada.

Análisis Estadístico

Para describir el fenómeno que se presenta por radiactividad gama en los materiales de construcción, así como los datos obtenidos en las encuestas, se aplicaron análisis estadísticos descriptivos, análisis de correlación, análisis de regresión lineal, análisis de varianza y prueba de t de *student* para valores de referencia. Para los análisis se utilizaron los paquetes SAS® 9.4 y Minitab® 18.

Estadística Descriptiva de Radiación Gama. Se obtuvieron la media, desviación estándar, valor mínimo, valor máximo y coeficiente de variación de las variables de respuesta.

Análisis de Correlación Pearson. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (1896), el cual es el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Es representado por r y se obtiene tipificando el promedio de los productos de las puntuaciones

diferenciales de cada caso en las dos variables correlacionadas. Se obtuvieron las correlaciones entre todas las variables evaluadas; exposición a la radiactividad gama y las variables continuas de la encuesta aplicada.

Análisis de Varianza (ANOVA). Se realizaron ANOVA para probar el efecto sobre el nivel de radiación por parte de factores fijos: zona de la ciudad, distancia en que fueron tomadas las medidas, tipo de material y tipo de recubrimiento de las paredes de los hogares muestreados. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ijk} = nivel de radiación como variable respuesta medido en la observación j del nivel i del factor fijo,

μ = media general,

A_i = efecto del nivel i del factor fijo, y

ε_{ij} = error aleatorio en la observación j del nivel i del factor fijo, el cual se supone idéntica e independientemente distribuido de forma normal, con media cero y varianza σ^2 .

Prueba de Hipótesis (t-student). Se utilizó para probar si los niveles de radiación en Chihuahua sobrepasaban significativamente el valor de referencia establecido en la normatividad respectiva. Para el cálculo del estadístico de prueba se utilizó la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}},$$

Donde:

$\bar{x}$ = Media muestral

s = Desviación estándar muestral

n = Tamaño de la muestra

μ_0 = valor de referencia establecido por la *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) o por la Comisión Europea (1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Radiación Gama en Materiales de Construcción

Debido a que el propio entorno genera radiaciones de un modo natural, los seres humanos estamos expuestos a ellas de forma continua. El análisis descriptivo de la información arrojada por las encuestas mostró que los materiales utilizados para la construcción de casas-habitación son block en un 57.8 % de los hogares, ladrillo 3.5 % y adobe 6.7 %. El recubrimiento que tienen las paredes de las casas de la ciudad es yeso en un 90 % de los hogares y cal en el 10 %.

Los resultados de la dosis equivalente se muestran en el Cuadro 2. Según el análisis de varianza (ANOVA), en general no existió efecto ni del material de recubrimiento ($P > 0.05$), ni de la distancia en que se tomó la medición ($P > 0.05$). Tampoco existió efecto de interacción entre estos dos factores, de modo que no existió efecto del tipo de recubrimiento sobre el nivel de radiación para ninguna de las distancias (un centímetro, $P = 0.7497$; a 50 centímetros, $P = 0.6298$; al punto medio de la habitación, $P = 0.4044$).

Los radioisótopos en el terreno, al emitir la penetrante radiación gama, irradian a la gente más o menos uniformemente (Piedecausa *et al.*, 2011). Dado que la mayoría de los materiales de construcción se extraen del suelo, también son levemente radiactivos, razón por la cual las personas son irradiadas tanto dentro como fuera de sus hogares. Las dosis que reciben están influidas tanto

Cuadro 2. Datos de dosis equivalente anual (mSv/año) y estadística descriptiva de dosis anual equivalente para cada zona de la ciudad de Chihuahua (Medias $\pm$ desviación estándar)

Zona	Casas muestreadas	Dosis equivalente anual (mSv/año)	Dosis equivalente anual mínima (mSv/año)	Dosis equivalente anual máxima (mSv/año)	Coefficiente de variación (%)
Norte	42	1.16 $\pm$ 0.31	0.46	1.84	27.01
Centro	25	1.22 $\pm$ 0.31	0.61	1.84	25.58
Sur	30	1.17 $\pm$ 0.28	0.46	1.69	24.75

por la geología de la zona donde viven como por la estructura de los edificios que habitan (UNSCEAR, 2000). La dosis equivalente anual promedio en la ciudad de Chihuahua, incorporando datos únicamente de medición de la pared de las casas-habitación se encontró en 1.18 mSv/año.

No existió efecto entre los materiales de construcción (adobe, block y ladrillo), sobre el valor de medición gama a las tres distancias (un centímetro, $P=0.0733$; a 50 centímetros $P=0.3088$; al punto medio de la habitación, $P=0.3102$). Finalmente, se observó que no hubo diferencia entre las zonas (norte, centro o sur), sobre el valor de medición gama a las tres distancias (a un centímetro, $P=0.9314$; a 50 centímetros, $P=0.2792$; al punto medio de la habitación, $P=0.5808$). Ambos resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA).

Nivel y Distribución de Radiación Gama en la Ciudad de Chihuahua

A nivel internacional se establece que los límites máximos permisibles para la dosis anual equivalente son de 0.5 mSv/año y 1 mSv/año, establecidos por el UNSCEAR (2000) y por la Comisión Europea (1999), respectivamente. La dosis equivalente anual promedio que se encontró en la ciudad de Chihuahua sobrepasó dichos valores de referencia ($P=0.0001$) para el establecido por UNSCEAR y para el valor de referencia de la Comisión Europea ($P=0.01$).

En la Figura 4, se puede observar la distribución espacial de la radiación gama en la ciudad de Chihuahua. Aunque no se encontraron diferencias significativas entre zonas, se puede observar que la zona centro-oeste presentó una dosis equivalente más alta. El análisis de correlación de Pearson indicó que

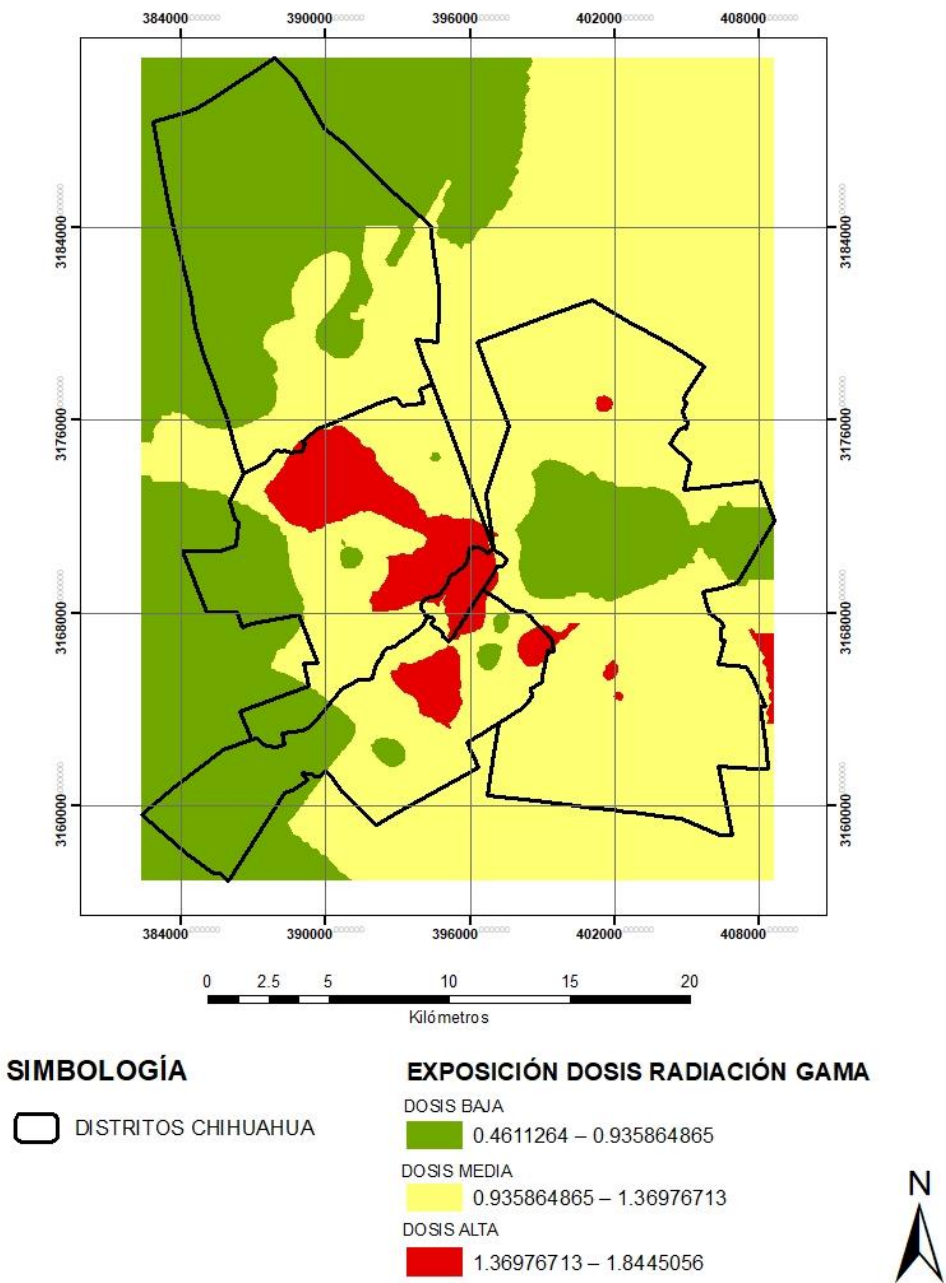


Figura 4. Distribución de dosis gama, emitida por materiales de construcción en las viviendas de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua.

existió una asociación entre las variables de grosor de la pared y el nivel de radiación en la habitación ($r=0.255$, $P=0.013$), ver Anexo I. Así mismo, existe asociación entre las dimensiones de la habitación y el nivel de radiación ($r=0.269$, $P=0.008$), lo anterior se puede observar en las Figura 5.

Los valores de la tasa de exposición obtenidos son a causa de que los materiales de construcción son elaborados con suelo y rocas que contienen en mayor o menor medida concentraciones de elementos radiactivos naturales (Raghu, *et al.*, 2017). Asociado a esto, la ciudad de Chihuahua se encuentra ubicada en el valle de Chihuahua-Sacramento, el cual es rellenado por sedimentos provenientes de la erosión de las rocas presentes y los sedimentos que son arrastrados desde las zonas topográficamente más altas.

Se ha reportado que cerca de la ciudad se encuentran ubicados afloramientos de minerales de uranio, Pastorías al suroeste y Majalca-San Marcos al noroeste, los cuales están siendo transportados hacia dentro del valle (Rentería, *et al.*, 2006). Las rocas ígneas normalmente contienen elementos radiactivos distribuidos dentro de partículas cristalinas muy finas (Válgoma, 2014).

Este tipo de rocas se caracterizan por ser ácidas y comparativamente ricas en uranio (Lima *et al.*, 2015). San Marcos fue caracterizada por presentar depósitos tipo ígneo con asociación de roca volcánica ácida (Férriz, 1984; Reyes-Cortés *et al.*, 2007; Servicio Geológico Mexicano, 2017).

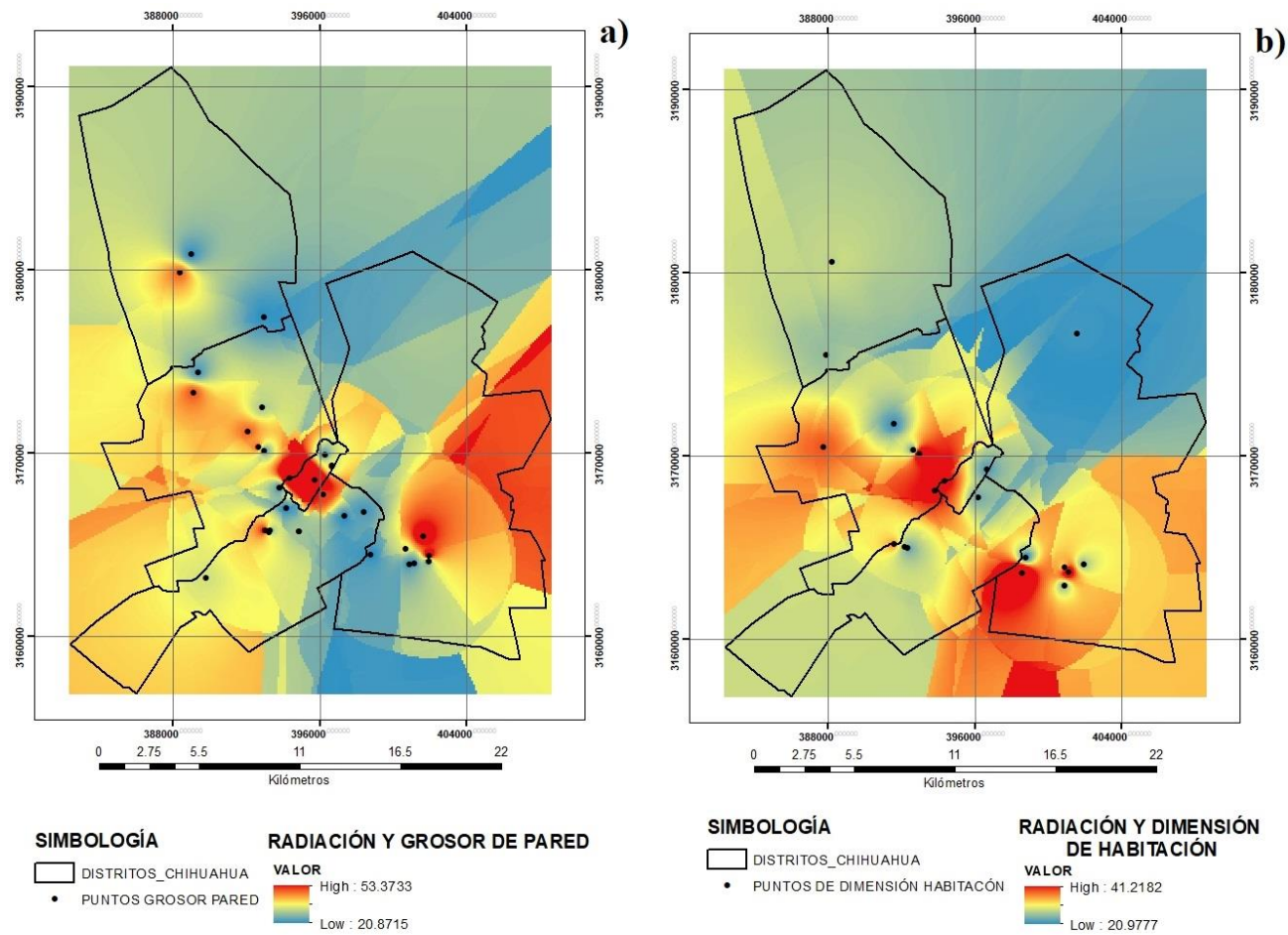


Figura 5. Asociación de la distribución de dosis gama en los sitios muestreados con: a) grosor de la pared y b) dimensiones de la habitación.

Las rocas ígneas son comúnmente utilizadas como material de construcción siendo el granito el más utilizado, el cual presenta 3.8 ppm de uranio (Dickson y Scott, 1997). El uso de este tipo de rocas en materiales de construcción, así como las características geológicas de la localidad puede contribuir a los niveles de radioactividad en la ciudad de Chihuahua.

Por otra parte, la asociación presentada muestra una tendencia baja de tan solo un 26 % para la dosis obtenida desde la exposición a los materiales de construcción y el grosor de la pared. El grosor de la pared para los domicilios en la ciudad de Chihuahua, estuvo asociado al tipo de material utilizado. Así, el adobe que proporciona un mayor grosor, fue ampliamente utilizado para construcción de las viviendas en los siglos pasados. Por lo tanto, las casas que tienen mayor tiempo construidas se encuentran principalmente ubicadas al centro de la ciudad y al sureste (Figura 5a); este último corresponde al Ejido Robinson, el cual en la actualidad se encuentra dentro de la mancha urbana de Chihuahua. Por el contrario, la dosis baja atribuida a materiales de construcción se encuentra en fraccionamientos en el norte y noreste hacia donde se lleva a cabo el crecimiento de la ciudad de Chihuahua. Así mismo, la correlación encontrada en la exposición a la radiación gama con la dimensión de la habitación es debida a que el ángulo de medición se hace más amplio al tomar la medida. En la Figura 5b se observa que las casas que presentan esta tendencia se encuentran distribuidas al centro, oeste y suroeste de la ciudad.

Exceso de Riesgo de Cáncer de Toda la Vida

Se sabe que hay factores de riesgo que incrementan la probabilidad de que una persona pueda enfermar de cáncer a lo largo de su vida. Estos factores

pueden ser la exposición a productos químicos u otras sustancias, y algunos hábitos. Sin embargo, existen riesgos que no se relacionan con las actividades o comportamientos, estos riesgos no se pueden controlar, como edad e historial médico familiar, este último con respecto a padecimientos de algunos tipos de cáncer que pueden ser signo de un posible síndrome de cáncer heredado (Instituto Nacional del Cáncer, 2015).

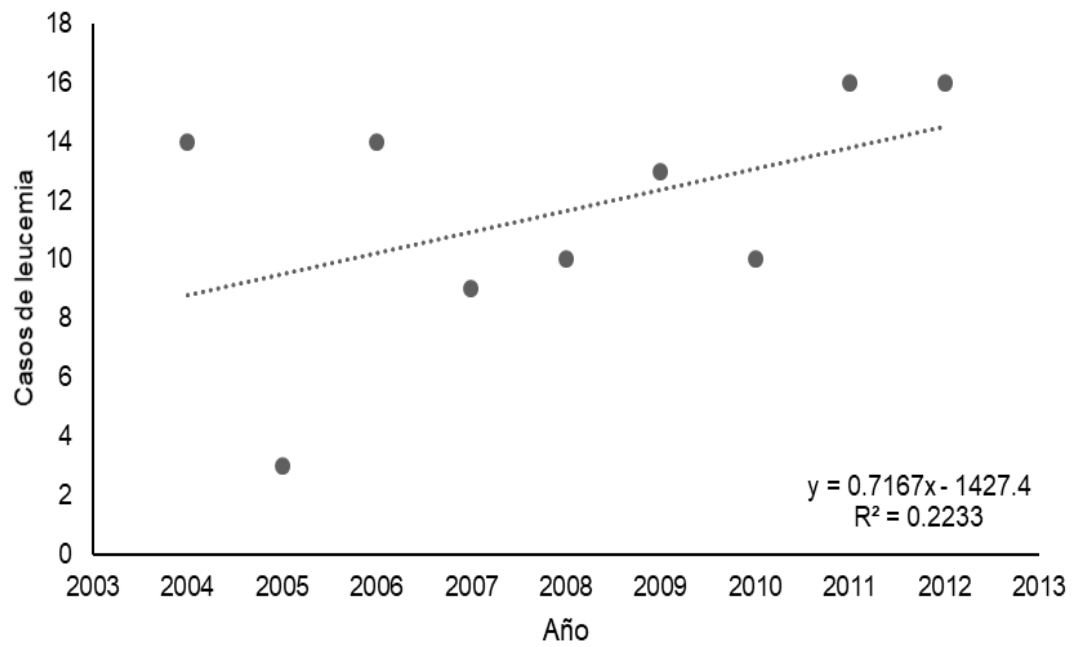
El exceso de riesgo de cáncer de toda la vida (ERCT) para la población de la ciudad de Chihuahua en promedio fue de 4.27×10^{-3} . Así mismo, el Cuadros 3 muestran el ERCT de las diferentes zonas de medición de la ciudad de Chihuahua. Dichos valores son catorce veces superiores a los reportados por el UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) de 2.9×10^{-4} .

Análisis de Leucemia

Los resultados del análisis estadístico sobre los casos de mortalidad por leucemia registrados en la ciudad de Chihuahua se muestran en la Grafica 1, mientras que su distribución aparece en la Figura 6. En el periodo analizado, del 2004 al 2012, se presentó una incidencia de mortalidad por leucemia de 103 individuos. De estas, los años 2011 y 2012, tienen un valor mayor de muertes mientras que en el 2005 sólo se reportaron 3 defunciones. Estadísticamente, usando el análisis de RLS, se obtiene que el 22 % la variación en los casos de leucemia es explicada por el tiempo en años ($R^2 = 0.22$). Así, por cada año se aumenta un caso de cáncer de sangre en la ciudad de Chihuahua. Debido al porcentaje bajo en su coeficiente de determinación, se sugiere un análisis que

Cuadro 3. Exceso de riesgo de cáncer de toda la vida (ERCT) para la población de la ciudad de Chihuahua

Exceso de Riesgo de Cáncer de Toda la Vida				
Ubicación	Número muestras	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo
Zona Norte	42	4.27×10^{-3}	6.67×10^{-3}	1.67×10^{-3}
Zona Centro	25	4.23×10^{-3}	6.67×10^{-3}	1.67×10^{-3}
Zona Sur	30	4.15×10^{-3}	6.67×10^{-3}	1.67×10^{-3}
Media	97	4.27×10^{-3}	6.67×10^{-3}	1.67×10^{-3}



Grafica 1. Casos de leucemia en la ciudad de Chihuahua en el periodo 2004-2012.

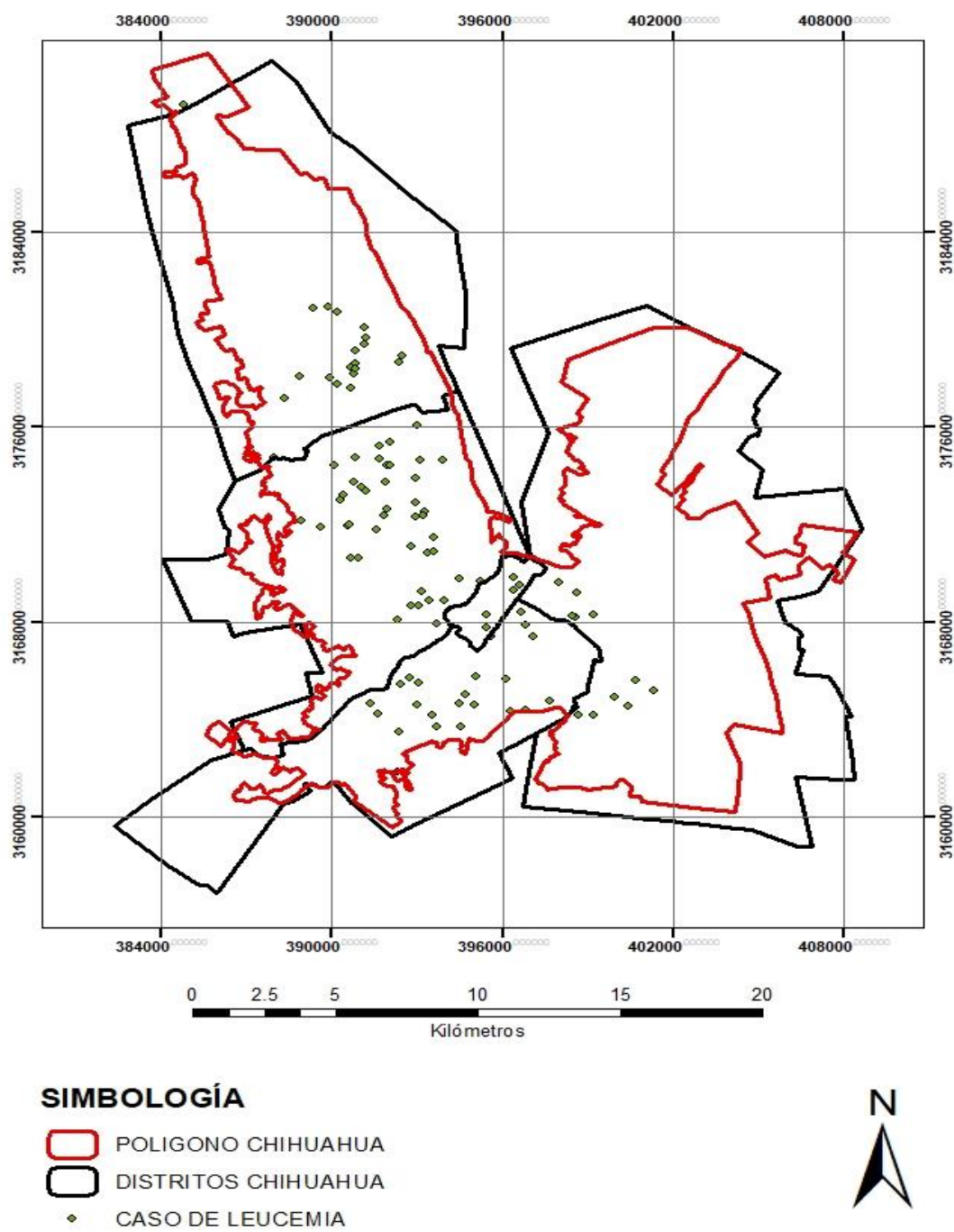


Figura 6. Distribución de casos de mortalidad por Leucemia en el periodo 2004-2012 en la ciudad de Chihuahua.

incorpore más variables que puedan predecir el restante 78% de la variabilidad en los casos de esta enfermedad en la ciudad.

Por otra parte, la mayor incidencia de mortalidad por este tipo de cáncer se presentó en un rango de edad de 60 a 90 años, que representa el 37.1 %. Así mismo, las personas que fallecieron en un intervalo de edad de 30 a 59 años fueron 35 personas, representando el 33.33 % del total (Cuadro 4).

Casos de Leucemia y Dosis de Radiación

Es evidente que todos los lugares de la Tierra están sometidos a la acción más o menos intensa de las radiaciones ionizantes. Por tanto, todos los organismos están expuestos a las radiaciones ionizantes de una forma natural, frente a las cuales muestran un estado de adaptación en las condiciones normales (Capó-Martí, 2007; Binici *et al.*, 2015).

Los rayos X y gama se han definido como agentes con la capacidad de producir cáncer por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer de la Organización Mundial de la Salud. La radiación puede depositar energía directamente en el ADN o puede ionizar otras moléculas de la célula, esta energía es suficiente como para alterar la estructura (Guglielmone *et al.*, 2009). Según el Instituto Nacional del Cáncer (2018) el cáncer es producido por cambios en algunos genes que afectan el funcionamiento de las células. Algunos de ellos surgen de forma natural, esto cuando se generan copias del ADN durante el proceso de división celular. Pero otros cambios se llevan a cabo debido a exposiciones ambientales que dañan el ADN. Dentro de estas exposiciones ambientales se encuentran sustancias como los productos

Cuadro 4. Cantidad de defunciones a causa de leucemia por rango de edad

Edad	Casos leucemia	Porcentaje (%)
0-14	13	12.38
15-29	18	17.14
30-59	35	33.33
60 y más	39	37.14
Total	105	100

químicos del humo de tabaco, la radiación, como los rayos ultravioletas que emite el sol.

Cabe destacar, que el promedio de todas las dosis obtenidas en la ciudad, superan los valores de dosis máxima permisible para materiales de construcción.

Las fuentes reconocidas y sospechosas del cáncer producido por factores ambientales no ocupacionales se presentan en el Cuadro 5, en este se incluyen solamente las relacionados con radiación ionizante y actividades domesticas (Hueper, 1952). Dentro de los límites de la ciudad de Chihuahua, se encontraron 103 casos de cáncer por leucemia entre los años 2004-2012, según base de datos proporcionada por la Secretaría de Salud del Estado de Chihuahua. Mismos que se analizaron según dosis gama anual recibida de manera estimada, obteniendo los resultados expuestos en el Cuadro 6.

Al ser analizados estadísticamente con el método Regresión Lineal Simple, se obtuvo que no existe evidencia suficiente para afirmar que la frecuencia de cáncer de Leucemia se explique por radiación, ya que solo se atribuye el 4.55% a la dosis recibida por radiación gama proveniente de materiales de construcción, esto representado en la Gráfica 2. Según López (1996) algunos estudios han mostrado que la utilización de servicios de salud depende de factores sociales, culturales y económicos. Por tal motivo se realizó el análisis de variables ambientales y socioeconómicas que nos pueden indicar que comportamientos se pueden observar en la población de la ciudad de Chihuahua para la Leucemia. Estas variables son muy importantes para ésta

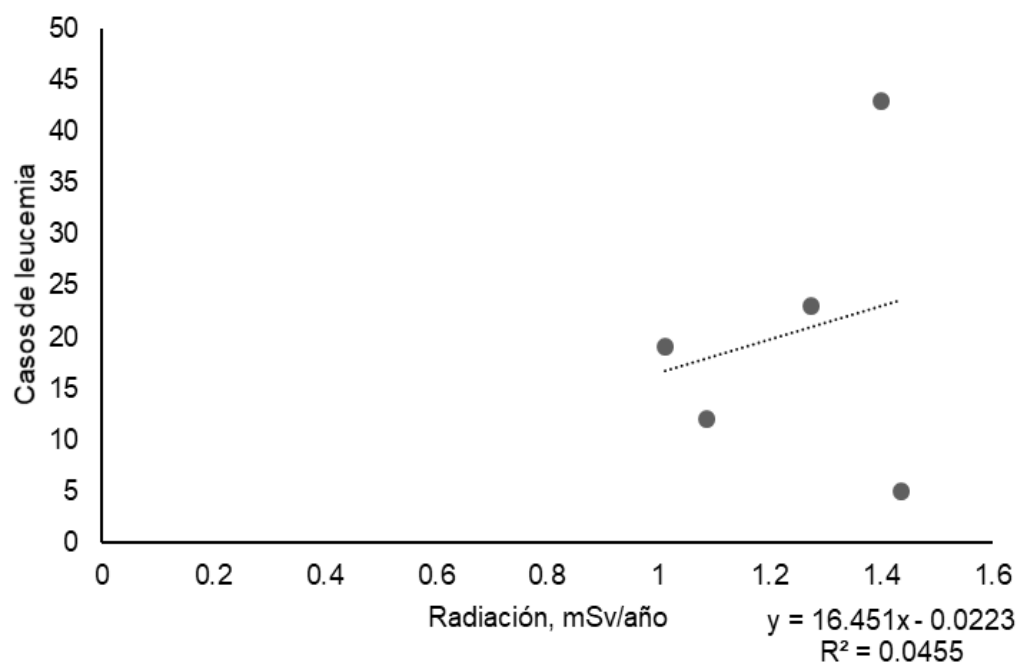
Cuadro 5. Fuentes reconocidas y sospechosas del cáncer producido por factores ambientales no ocupacionales

Método de exposición y cancerígeno	Sitios potenciales del cáncer
Aficiones y actividades domesticas	
Empleo de pinturas y de las sustancias utilizadas para quitar pinturas que contienen benzol, pigmentos de cromo, asfaltos, negros de carbón	Leucemia, pulmón, piel
Medicinas y dispositivos médicos	
Productos químicos hematotóxicos (benzol, sulfonamidas, productos químicos inorgánicos aromáticos)	Leucemia
Rayos X	Piel, huesos, leucemia
Productos químicos radiactivos (radiación ionizante)	Piel, huesos, pulmón, leucemia, hígado

Fuente: Hueper, 1952.

Cuadro 6. Casos encontrados de leucemia por distrito con su valor promedio de dosis gama

Distrito	Casos de leucemia	Promedio dosis anual equivalente (mSv/año)
Colon	19	1.0131
Ángel	5	1.4347
Morelos	12	1.0872
Villa	43	1.3994
Zapata	23	1.2726



Gráfica 2. Frecuencia de casos de leucemia por dosis anual equivalente de radiación gama en la ciudad de Chihuahua.

y todas las enfermedades el oportuno tratamiento médico. Lo anterior es debido a que dicho tratamiento va en función del nivel de educación, de la situación económica, de la disponibilidad de consultas y finalmente de las creencias con respecto a la causa de la enfermedad (López, 1996).

Al analizar, por distrito, las variables que se encuentran disponibles en el INEGI (2016) como lo son existencia de árboles que se encuentran en las vialidades, vivienda con recubrimiento de piso y edad, entre otras. Con las variables que se obtuvieron con la presente investigación como frecuencia de cáncer (leucemia) y dosis anual equivalente de radiación gama (Anexo II). Las correlaciones significativas muestran que en los distritos en los que se muestra mayor población entre 30 a más de 60 años, se encuentra una mayor frecuencia de cáncer, lo que muestra una vulnerabilidad para la población que se halla en este rango de edad. Así como también, donde se concentra las viviendas de este rango de edad en la población, presentan una correlación a mayores vialidades con árboles.

A mayor población de entre 30 a 59 años, se presenta mayor correlación en recubrimiento en pisos de su vivienda ($r= 0.999$) y ($p<0.001$). Encontramos que las viviendas que cuentan con recubrimiento en el piso, presentan mayor cantidad de árboles en las vialidades ($r= 0.908$) y ($p=0.033$), así como donde hay mayor frecuencia de árboles en las vialidades y recubrimiento en pisos de la vivienda, también presenta mayor frecuencia de cáncer (leucemia) ($r=0.897$) y ($p=0.039$). Lo cual nos habla de la importancia de factores económicos en dichas variables.

Finalmente, fue obtenido el mapa de riesgo por radiactividad gama en la ciudad de Chihuahua (Figura 7). Este mapa contiene los datos de exposición a la radiactividad gama emitida por materiales de construcción y de la radiactividad gama proveniente del suelo; este último fue previamente analizado y publicado (Luevano-Gurrola, 2015). Como resultado se observa que el riesgo, por valores altos de radiactividad gama natural, se encuentra hacia el centro norte, centro y sureste de la ciudad de Chihuahua.

En gran parte de las poblaciones urbanas, la escolaridad, el área laboral y el nivel económico, suelen ser temas claves para que los trabajos con respecto a la salud tengan resultado significativo. Pero estos pueden ser factores que se contrapongan a que las personas realicen un cuidado en su salud, debido a la situación económica, de la disponibilidad de consultas médicas y de las creencias sobre la causa de la enfermedad (López, 1996).

La dosis anual de radiación gama recibida en la ciudad de chihuahua estima que solo influye en un 4.55 % para la incidencia de leucemia. Así, hay otros factores que influyen para que esta enfermedad se manifieste en el ser humano, como lo es factores de genética, alimentación, hábitos cotidianos, edad, hormonas, obesidad, enfermedades que padezca, sustancias en el ambiente, entre otros. Por lo que se recomienda realizar un estudio con grupos bien definidos de la población de acuerdo con la residencia, ocupación, hábitos y dietas, para determinar en qué porcentaje se explica cada variable y así llegar a tomar decisiones en beneficio de la población. Aunque en general poco es lo que se puede hacer con respecto a evitar la construcción en zonas con concentraciones de radionucleidos excepcionalmente altos, se recomienda a las

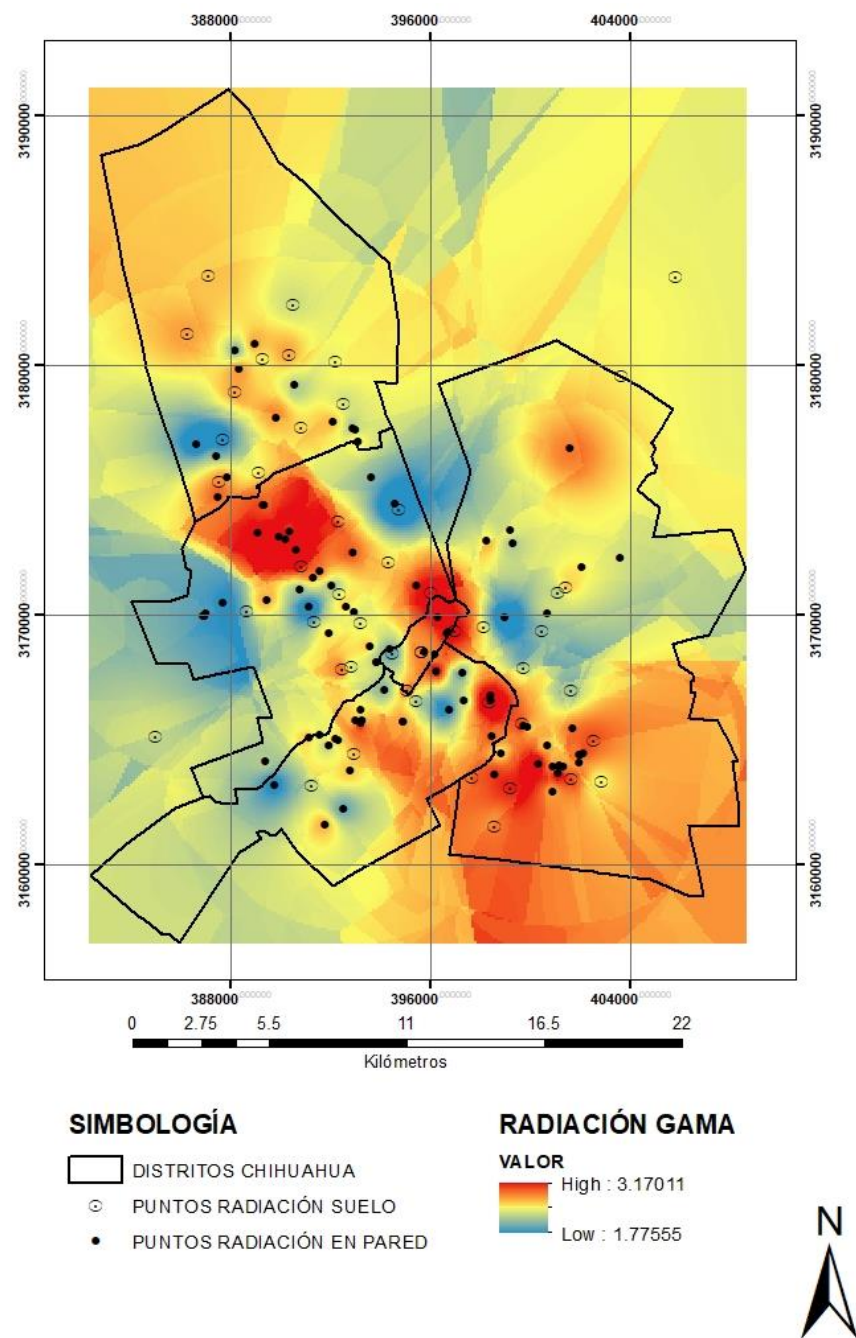


Figura 7. Mapa de riesgo por radiactividad gama natural en la ciudad de Chihuahua.

autoridades competentes, analicen estos factores. Se deben hacer estudios sobre la geología de la zona propuesta a construir, así como el análisis de los bancos de materiales que proveerán la materia prima de la construcción de las nuevas viviendas. Con ello, se obtendrá un mayor control sobre la radiactividad, con la finalidad de limitar la exposición a la radiación. Lo anterior debido a que es importante mantener las dosis tan bajas como razonablemente alcanzables. Sin embargo, dado que las pequeñas exposiciones de los materiales de construcción son ubicuas, los controles deben basarse en niveles de exposición que están por encima de los niveles típicos de exposiciones y sus variaciones normales.

Las concentraciones de radioisótopos naturales en los materiales de construcción varían ampliamente, esto porque cada sitio tiene diferentes condiciones geológicas y por tanto cargas de radiación variables. Para generar normas o leyes que regulen la exposición de radiación natural en México, tal como cuentan los países de la unión europea destacado en el documento "Radiation Protection 112" de 1999. Finalmente, el tener controlados los factores cancerígenos ambientales depende de que estos sean eliminados, si esto no es posible por cuestiones técnicas o económicas, se debe considerar una disminución de la intensidad y tiempos de duración de exposición a estos factores específicos. Una disminución considerable prolonga la aparición del daño, hasta el punto de conseguir que no se muestren durante el periodo de la vida humana. Dado a que cada vez toma mayor importancia como riesgo para la salud, estas enfermedades requieren la atención de todos los organismos correspondiente a nivel mundial.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La dosis equivalente por radiación gama en los hogares de la ciudad se encontró por arriba de los límites establecidos por la *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) y la Comisión Europea. No existió evidencia suficiente para afirmar que la exposición recibida por la población en la ciudad de Chihuahua es diferente entre zonas.

Los factores que muestran asociación con el nivel de radiación fueron; las variables de grosor de pared y dimensiones de habitación. Las variables que no muestran asociación con el nivel de radiación fueron; material de recubrimiento, distancias en la que se tomó la medición y tipo de materiales de construcción.

No se encontraron evidencias suficientes de asociación de la radiactividad gama natural proveniente de los materiales de construcción con los casos de mortalidad evaluados para un periodo de 8 años.

Se recomienda continuar con los muestreos de hogares de la ciudad, dividiéndola por cuadrantes y más que por distritos; ya que la superficie que abarcan los distritos es diversa y puede influir a no tener un valor adecuado al realizar el análisis de regresión lineal de la frecuencia de cáncer con la dosis estimada de radiación gama. Así como muestrear más casas de adobe, para analizar más específicamente si hay una relación con el tipo de material, ya que en la presente investigación el número de casas de adobe muestreadas fue reducido.

No existió evidencia suficiente de una asociación entre niveles de radiación y frecuencia de casos de cáncer, debido a que el primero explicó el 4.55% de la variación en esta frecuencia, por lo que deberán estudiarse otros factores que puedan explicar el resto de la variación.

De igual manera, se recomienda monitorear e incorporar los datos de casos de leucemia más actuales, e incluir variables en encuesta que refieran el historial clínico del habitante de la vivienda.

LITERATURA CITADA

- ATSDR. 1990. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Radon. Public Health Service. Department of Health and Human Services. Atlanta, U.S.A.
- ATSDR. 1992. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Case Studies in Environmental Medicine. Radon Toxicity. Public Health Service, U. S. Department of Health and Human Services. Atlanta, U. S. A.
- ATSDR. 1999. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Uranium (Update). Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, U. S. A.
- Binici, H., O. Aksogan, A. Sevinc y E. Cinpolat. 2015. Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement, sand and egg shells. Construction and Building Materials. 1145-1150.
- Bonotto, D. M. y J. N. Andrews. 2000. The transfer of uranium isotopes ^{234}U and ^{238}U to the waters interacting with carbonates from Mendip Hills area (England). Applied Radiation and Isotopes 52: 965-983.
- Capó-Martí, M. A. 2007. Principios de Ecotoxicología Diagnóstico, Tratamiento y Gestión del Medio Ambiente. Editorial Tebar 320 páginas. En: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=86oL_Ybnwn8C&oi=fnd&pg=PA9&dq=Los+efectos+de+la+radiaci%C3%B3n+son+causados+por+el+da%C3%B1o+en+las+c%C3%A9lulas+por+las+interacciones+de+radiaci%C3%B3n.+El+da%C3%B1o+puede+resultar+en+muerte+celular+o+modificaciones+que+pueden+afectar+el+funcionamiento+normal+de+%C3%B3rganos+y+tejidos.+La+mayor%C3%ADa+de+los+%C3%B3r](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=86oL_Ybnwn8C&oi=fnd&pg=PA9&dq=Los+efectos+de+la+radiaci%C3%B3n+son+causados+por+el+da%C3%B1o+en+las+c%C3%A9lulas+por+las+interacciones+de+radiaci%C3%B3n.+El+da%C3%B1o+puede+resultar+en+muerte+celular+o+modificaciones+que+pueden+afectar+el+funcionamiento+normal+de+%C3%B3rganos+y+tejidos.+La+mayor%C3%ADa+de+los+%C3%B3r&ots=YiMRITl_hg&sig=4bitQFHQwtdxar68FiEaC5Himk0#v=onepage&q&f=false) Consultado 29 abril 2020.
- Colmenero-Sujo, L., M. E. Montero-Cabrera y L. Villalba. 2003. Radiactividad natural en suelos de las principales ciudades del Estado de Chihuahua. Energía nuclear y seguridad radiológica: Nuevos retos y perspectivas XIV Congreso anual de la SNM/XXI reunión anual de la SMSR Guadalajara, Jalisco, México, 10-13 de septiembre, (2003), Memorias en CDROM.
- Colmenero-Sujo, L. y M. de L. Villalba. 2010. Presencia de radón en casas habitación del estado de Chihuahua. Tecnociencia Chihuahua Vol. IV, No 3.
- Crespo, S. 2010. Materiales de construcción para edificación y obra civil. Editorial Club Universitario. España.

- Damia, N., U. Cevik, A. Kobya, A. Celik, N. Celik, e I. Yildinm. 2011. Assessment of natural radioactivity and mass attenuation coefficients of brick and roofing tile used in Turkey. *Radiation Measurements*. 701-708.
- Dickson, B. y K. Scott. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *Journal of Australian Geology and Geophysics*. 12(2): 187-200.
- Euratom. 2014. EUR-Lex, Acceso a la legislación de la Unión Europea. En:<http://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=EN>. Consultado 17 mayo 2018.
- European Commission. 1999. Radiation Protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials, 1999. En <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/112.pdf> Consultado el 27 de abril de 2020.
- Férriz, H. 1984. Uranium Mineralization in the San Marcos volcanic centre, Chihuahua, Mexico. En I. A. Agency, Uranium deposits in volcanic rocks.197-216. El Paso .En: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/17/021/17021959.pdf?r=1#page=211> Consultado 12 mayo 2020.
- Fideicomiso para la Competitividad y Seguridad Ciudadana (FICOSEC). 2019. Distritos de la ciudad de Chihuahua. Obtenidos en el año 2019, de manera digital.
- Gobierno del Estado Libre y Soberano de Chihuahua. 2016. Programa de Ordenamiento y Desarrollo Territorial de la Zona Metropolitana Chihuahua. Periódico Oficial del Estado de Chihuahua No. 79.
- Gobierno Municipal de Chihuahua. 2018. Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021. En:<http://www.municipiochihuahua.gob.mx/Downloads/PMD%202018-2021.pdf> Consultado 26 septiembre 2020.
- Guardado-Lacaba, R., A. Kempena y A. Martinez-Vargas. 2000. Cartografía y evaluación del impacto geoambiental a través de un sistema de información geográfica. *Rev. Minera-Geóloga*. Vol . XVI I, No. 3-4.
- Guglielmone, R. F., W. F. Taua y J. R. Guglielmone. 2009. Riesgo de cáncer en los estudios diagnósticos emisores de radiaciones ionizantes. Visión desde la Cardiología Clínica. *Rev Fed Arg Cardiol* 2009; 38 (4): 231-235 En:http://www.fac.org.ar/1/revista/09v38n4/temas_interes/guglielmone.pdf Consultado 11 mayo 2020.
- Hueper, W. 1952. Factores ambientales en la génesis del cáncer aspectos de salud pública, Trabajo presentado en la Décima Reunión Anual de la Asociación Fronteriza Mexicana-Estadounidense de Salubridad,

- Monterrey, México, marzo 24-27,1952. En: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/11939/v33n1p21.pdf?sequence=1> Consultado 11 mayo 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. Perfil sociodemográfico: XII Censo General de Población y Vivienda 2000. 2002 En: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825496661/702825496661_20.pdf Consultado 13 mayo 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. Inventario Nacional de Viviendas 2016. En: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/inv/> Consultado 30 marzo 2020.
- Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN). 2006. Diagnóstico ambiental urbano. Municipio de Chihuahua. En: <https://implanchihuahua.org/> Consultado 02 junio 2017.
- Instituto Nacional del Cáncer de los Institutos Nacionales de la Salud de EE. UU. 2018. Sustancias en el ambiente que causan cáncer. En: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causasprevencion/riesgo/sustancias> Consultado 12 mayo 2020.
- L'Annunciata, M. F. 1998. Handbook of radioactivity analysis. Academic Press. 2:45-47.
- Lima, M., D. Alves y J. Sanjurjo-Sánchez. 2015. Gamma Radiation In Rocks Used As Building Materials: The Braga Granite (Nw Portugal). Cadernos Lab. Xelóxico de Laxe Coruña. 38: 79-92.
- López, O. 1996. Efecto de los servicios de salud y de factores socioeconómicos en las diferencias espaciales de la mortalidad mexicana. En: <https://www.scielosp.org/article/spm/1997.v39n1/16-24/#> Consultado 8 mayo 2020.
- Luévano-Gurrola, S. D. 2015. Distribución espacial de la radiactividad gama en la ciudad de chihuahua y su asociación con los casos de leucemia. Tesis de Maestría. Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Chih. México.
- Luevano-Gurrola, S., A. Pérez, C. Pinedo, J. Carrillo, M. Montero y M. Renteria. 2015. Lifetime Effective Dose Assessment Based on Background Outdoor Gamma Exposure in Chihuahua City, Mexico. International Journal of Environmental Research and Public Health. 12: 12324-12339.
- Medina-Araújo, S. M. y P. J. Reyes-Torres. 2002. Radiaciones ionizantes y efectos sobre la materia. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 12:31-39.

- Mibei, G. 2014. Orkustofnun National Energy Authority. En: <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-19-0302.pdf> Consultado 12 mayo 2020.
- Miró, C., J. M. Ávila, M. García y J. Pastor-Villegas. 2010. Riesgos debido a la radiactividad natural de pizarras de construcción. Información Tecnológica Vol. - 21 N° 1.
- Municipium. 2014. Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua. En: <http://www.municipium.mx/atlasderiesgos/municipiochihuahua/> Consultado 02 junio 2017.
- Nassef, M. H., A. A. Kinsara. 2017. Occupational Radiation dose for medical workers at a university hospital. En: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1016/j.jtusci.2017.01.003?needAccess=true> Consultado 15 mayo 2019.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2009. Who handbook on indoor radon. En: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y Consultado 02 junio 2017.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2016. El radón y sus efectos en la salud. En: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/> Consultado 02 junio 2017.
- Piedecausa, B., S. Chinchón, M. A. Morales y M. A. Sanjuán. 2011. Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo. Revista técnica Cemento Hormigón N° 945, PP.: 40-65. En: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/27055> Consultado 27 abril 2020.
- Raghu, Y., R. Ravisankar, A. Chandrasekaran, P. Vijayagopal y B. Venkatraman. 2017. Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in building materials used in the Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India, using a statistical approach. Journal of Taibah University for Science. 523-533.
- Rentería, M., M. Montero, M. E. Montero, M. Reyes, E. F. Herrera, A. Rodríguez, G. Manjón, R. García, T. Crespo y M. Valenzuela. 2007. Characterization of source rocks and groundwater radioactivity at the Chihuahua valley. Revista Mexicana de física. ISSN 0035-001X vol. 53 supl. 3: 16-22.
- Reyes-Cortés, M., M. Montero-Cabrera, M. Rentería-Villalobos, L. Fuentes-Montero, L. Fuentes-Cobas, E. Herrera-Peraza, H. Esparza-Ponce y A. Rodríguez-Pineda. 2007. Radioactive mineral samples from the northwest of Chihuahua City, México. Revista mexicana de física. ISSN 0035-001X Vol 53: 23-28. En:

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v53s3/v53s3a7.pdf> Consultado 15 mayo 2019.

- Ribera-Masgrau, L. 2004. Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. Doc. Anàl. Geogr. 43, 2004 153-171.
- Rodríguez, M., C. Piñeiro y P. de Llano. 2013. Mapa de riesgos: Identificación y gestión de riesgos, Atlantic Review of Economics, ISSN 2174-3835, Colegio de Economistas de A Coruña, A Coruña, Vol. 2.
- Ruiz, N., J. M. Casado y M. T. Sánchez. 2015. Los Atlas de Riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial, Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 146-162, dx.doi.org/10.14350/rig.48326.
- Salinas-Torres, M. 2011. Definición de una metodología para un atlas de riesgos ambientales. Rev. Geográfica. 1:149
- Sas, Z., R. Doherty, M. Soutsos, W. Sha y W. Schroeyers. 2017. Radiological evaluation of by-products used in construction and alternative applications; Part I. Preparation of a natural radioactivity database. Construction and Building Materials. 227-237.
- Secretaría de Comunicación y Transporte. 2017. Banco de Materiales. En: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-serviciostecnicos/banco-de-materiales/> Consultado 02 junio 2017.
- SEMIP, 1994. Monografía Geológico-Minera del estado de Chihuahua. Capítulo 3. Minería: Regiones y Distritos mineros. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Editorial Pedagógica Iberoamericana.
- Servicio Geológico Mexicano. 2017. El uranio en México. En: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/El-uranio-en-Mexico.html Consultado 18 mayo 2018.
- Trinidad, J. A., C. Gascó y M. A. Palacios. 2009. Desarrollo informático aplicado a un laboratorio de radiactividad ambiental. Servicio de información y documentación, centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas, ciudad universitaria, 28040-Madrid, España.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I, Sources, Annex B; Exposures from natural radiation sources.

- Válgoma, A. 2014. Minerales y rocas radiactivos. En: <https://desayunoconfotones.org/2014/02/26/minerales-y-rocas-radiactivos/> Consultado 17 mayo 2018.
- Villalba, M. de L., L. H. Colmenero-Sujo, M. E. Montero-Cabrera, G. Manjón, R. Chávez-Aguirre, M. Royo-Ochoa y A. Pinales-Munguía. 2006. Presencia de uranio en el río Chuvíscar, Estado de Chihuahua, México.

ANEXO I. Matriz de análisis de correlación variables de la investigación.

Correlaciones								
	Radiación	Tiempo Hab	Edad	Peso	Estatura	Habitantes	Tiempo Viviendo	Grosor Pared
Tiempo Hab	0.139							
<i>Valor p</i>	0.187							
Edad	-0.081	0.294						
<i>Valor p</i>	0.428	0.005						
Peso	0.071	-0.124	0.058					
<i>Valor p</i>	0.493	0.246	0.575					
Estatura	0.125	-0.160	-0.176	0.560				
<i>Valor p</i>	0.226	0.133	0.087	<0.001				
Habitantes	0.056	-0.043	-0.416	-0.040	-0.046			
<i>Valor p</i>	0.586	0.685	<0.001	0.703	0.655			
Tiempo Viviendo	0.134	0.048	0.271	0.079	-0.092	0.157		
<i>Valor p</i>	0.191	0.650	0.007	0.445	0.374	0.124		
Grosor Pared	0.255	0.102	0.128	0.138	0.091	0.018	0.319	
<i>Valor p</i>	0.013	0.349	0.22	0.192	0.388	0.866	0.002	
Dim. Habitación	0.269	-0.034	-0.108	0.091	0.18	0.124	0.096	0.122
<i>Valor p</i>	0.008	0.752	0.296	0.386	0.083	0.232	0.357	0.250

Fuente: Elaboración propia (2020)

¹Valores en fondo rosa indican una fuerte asociación lineal directa significativa ($P < 0.05$), es decir que a medida que un factor crece el otro también lo hace en proporción cercana.

²Valores en fondo azul indican una fuerte asociación lineal indirecta significativa ($P < 0.05$), es decir que a medida que un factor crece el otro decrece en proporción cercana y viceversa.

³Valores en fondo blanco indican que no existe evidencia de asociación entre factores ($P > 0.05$), es decir que el comportamiento de un factor es linealmente independiente del comportamiento del otro factor.

ANEXO II. Matriz de análisis de correlación de variables de INEGI.

Correlaciones								
	Rad	FrecCancer	Arb-TV	Arb-AV	Arb-NV	Arb-NE	Viv-RP	30-59
FrecCancer	0.192							
Valor p	0.757							
Arb-TV	0.280	0.969						
Valor p	0.648	0.007						
Arb-AV	-0.384	0.745	0.759					
Valor p	0.523	0.148	0.136					
Arb-NV	-0.714	-0.218	-0.175	0.416				
Valor p	0.175	0.725	0.779	0.486				
Arb-NE	-0.592	0.491	0.519	0.943	0.690			
Valor p	0.293	0.400	0.370	0.016	0.197			
Viv-RP	-0.081	0.897	0.912	0.908	0.004	0.724		
Valor p	0.896	0.039	0.031	0.033	0.994	0.167		
30-59	-0.119	0.881	0.896	0.918	0.032	0.744	0.999	
Valor p	0.849	0.048	0.040	0.028	0.959	0.150	<0.001	
60-más	0.450	0.918	0.974	0.642	-0.212	0.403	0.802	0.780
Valor p	0.447	0.028	0.005	0.243	0.732	0.501	0.103	0.120

Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2016) y SS (2004-2012)

¹Valores en fondo rosa indican una fuerte asociación lineal directa significativa ($P < 0.05$), es decir que a medida que un factor crece el otro también lo hace en proporción cercana.

²Valores en fondo verde indican una tendencia significativa, a medida que un factor crece el otro decrece en proporción cercana y viceversa.

³Valores en fondo blanco indican que no existe evidencia de asociación entre factores ($P > 0.05$), es decir que el comportamiento de un factor es linealmente independiente del comportamiento del otro factor.