



Universidad de Almería



Facultad de Ciencias Experimentales

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Monitorización de la concentración de gas radón en las galerías mineras de acceso a la Geoda de Pulpí (Almería): evaluación dosimétrica preliminar

Monitoring of the radon gas concentration in mining galleries accessing the Geode of Pulpí (Almería): preliminary dosimetric assessment

Autor: Ramón García Roca

Curso académico: 2019-2020

Fecha: junio 2020

Tutores:

Ángel Fernández Cortés

José María Calaforra Chordi

(Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería)

Monitorización de la concentración de gas radón en las galerías mineras de acceso a la Geoda de Pulpí (Almería): evaluación dosimétrica preliminar.

Monitorización de la concentración de gas radón en las galerías mineras de acceso a la Geoda de Pulpí (Almería): evaluación dosimétrica preliminar.

Monitorización de la concentración de gas radón en las galerías mineras de acceso a la Geoda de Pulpí (Almería): evaluación dosimétrica preliminar.

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Ciencias Ambientales presentada por
Ramón García Roca

Fdo: Ramón García Roca

Almería, junio de 2020

Fdo: Ángel Fernández Cortés

Fdo: José María Calaforra Chordi

Monitorización de la concentración de gas radón en las galerías mineras de acceso a la Geoda de Pulpí (Almería): evaluación dosimétrica preliminar.

*Podemos desafiar las leyes humanas,
pero no podemos resistir a las naturales.*

Julio Verne #24

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todo el personal de la “Mina Rica” por el buen trato que he recibido en sus instalaciones y en especial a su coordinadora Milagros Carretero Tortosa “Mila” por ofrecerse a colaborar y ayudar en todo momento.

INDICE:

- 1. Resumen.**
- 2. Introducción.**
- 3. Zona de estudio: Mina Rica o “Quién tal pensara” (Pilar de Jaravía, Pulpí, Almería).**
- 4. Materiales y métodos.**
 - 4.1. Instrumental de medida.**
 - 4.2. Parámetros y procedimiento de cálculo de dosimetrías.**
- 5. Resultados y discusión.**
 - 5.1. Niveles de radiactividad ambiental en la mina por presencia de gas radón.**
 - 5.2. Dinámica natural del radón en el aire de la mina.**
 - 5.3. Ventilación forzada de las galerías mineras durante la apertura al público.**
 - 5.4. Evaluación dosimétrica de los guías de la mina por exposición a gas radón.**
- 6. Conclusión.**
- 7. Bibliografía.**

1. RESUMEN

El gas radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo, presente en la naturaleza en numerosos ambientes y que puede llegar a provocar graves enfermedades de carácter pulmonar. Este gas se forma de manera natural en el interior de la tierra y puede ser expulsado a la atmósfera o almacenado en cavidades terrestres. El estudio de su concentración y difusión en la atmósfera resulta fundamental para prevenir daños a la salud de personas que pudieran estar en contacto con este gas durante tiempo prolongado.

En este estudio se han medido los niveles del gas radón en las galerías de la Mina Rica (Pilar de Jaravía, Pulpí, Almería) para caracterizar la evolución temporal y el efecto que tienen las condiciones meteorológicas exteriores en sus variaciones, en concreto, la variación de temperatura externa.

Con los datos medidos y elaborados se ha estimado la dosis acumulada que sufre un trabajador de la Mina Rica, en este caso un guía, para compararlos con los niveles recomendados por la Unión Europea.

ABSTRACT

Radon gas or Radon-222 is a radioactive gas, present in nature in many environments and that can cause serious lung diseases. This gas forms naturally inside the Earth and can be expelled into the atmosphere or stored in terrestrial cavities. The study of this concentration and diffusion in the atmosphere is essential to prevent damage to the health of people who may be in contact with this gas for a long time.

In this study, the levels of radon gas in the galleries of the Mina Rica (Pilar de Jaravía, Pulpí, Almería) have been measured to characterize the temporal evolution and the effect that external meteorological conditions have on its variations, specifically, the variation external temperature.

With the measured and processed data, the accumulated dose suffered by a worker at the Mina Rica, in this case a guide, has been estimated to compare them with the levels recommended by the European Union.

2. INTRODUCCIÓN

La radiactividad ambiental procede de isótopos radiactivos que se encuentran de forma natural en el medio ambiente, estos isótopos podemos encontrarlos en suelos, aguas superficiales y subterráneas, y en la atmósfera. Los radionúclidos de radón se definen como su forma inestable que libera radiación a medida que se descompone y da lugar a su forma más estable, siendo estos fuentes internas y externas de exposición a la radiación para el hombre y el medio ambiente.

El nivel de radiación que encontramos en cada zona depende en gran medida en la naturaleza de las rocas, es decir, de su origen geológico; así como de los parámetros climáticos e hidrológicos y de la historia agrícola del lugar, ya que el uso de fertilizantes juega un papel muy importante a la hora de variar las características de un suelo.

Esta variabilidad de condiciones hace que los niveles de radón sean muy diferentes en cada zona, ya que como se ha comentado depende de las características propias del lugar.

El gas radón ^{222}Rn (con un tiempo de vida media de 3,8 días) tiene su origen en la desintegración del ^{226}Ra (con tiempo de vida media de 1.622 años) dentro de la cadena de desintegración del uranio (238-U), este último forma parte en la composición de rocas y suelos de la corteza terrestre, en proporción variable.

El gas radón ^{222}Rn no se hace estable hasta que no se desintegra por completo a ^{218}Po . En la tabla 1 podemos observar el proceso de desintegración del gas.

Elemento	Símbolo	Radiación	Vida media	Constante de desintegración
Rn-222	Rn	α, β	3,8 días	$1,26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Po-218	Ra A	α	3,05 min.	$0,228 \text{ min}^{-1}$
Pb-214	Ra B	β	16,8 min.	$0,0259 \text{ min}^{-1}$
Bi-214	Ra C	β	19,7 min.	$0,352 \text{ min}^{-1}$
Po-214	Ra C'	α	$1,5 \times 10^{-4} \text{ s}$	$2,77 \times 10^5 \text{ min}^{-1}$
Pb-210	Ra D	β	22 años	$3,15 \times 10^{-2} \text{ año}^{-1}$
Bi-210	Ra E	β	5 días	$9,63 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$
Po-210	Ra F	α	140 días	$3,44 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$
Pb-206	Ra G	-	Estable	-

Tabla 1: Cadena de desintegración del radón-222

Fuente: Repositorio AEMET (Relación Bi-214/Pb-214 como trazador en los procesos de difusión atmosférica)

Enlace: https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/1150/1/TyC_1983_1_05.pdf

El gas radón es un elemento químico que posee número atómico 86, pertenece al grupo de gases nobles del sistema periódico con los que comparte la propiedad de ser inerte químicamente.

Origen y dinámica del gas radón

Los isótopos de radón se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura. Una de sus características principales es que su capacidad para formar compuestos moleculares es muy pequeña, esto condiciona que una vez que se ha creado en el interior de la corteza terrestre es capaz de alcanzar la atmósfera sin sufrir apenas cambios. El radón se desplaza a través de dos procesos: la emanación y la exhalación. La emanación es el movimiento del Rn desde su punto de producción en el interior de la roca al sistema poroso de esa roca. La exhalación es el movimiento desde el sistema poroso superficial de la roca al ambiente circundante. Una vez exhalado, los procesos que afectan a la dinámica del gas radón en un ambiente subterráneo (mina, cueva, etc.) son los siguientes:

- Difusión molecular, proceso en el cual la materia se transporta de regiones con alta concentración a regiones donde la concentración es baja.
- Convección a través del terreno y el aire, el movimiento se realiza como respuesta a un gradiente de presión.

En la serie de descomposición del Radón-222, aparecen dos isótopos principales, Actinón y Torón.

Debido a que los procesos de difusión y convección tienen unos tiempos de evolución superiores al tiempo de desintegración de los isótopos comentados anteriormente, estos dos no generan gran interés radiológico en lo que respecta a su presencia. Por tanto, a la hora de evaluar la exposición de las personas a la radiación ambiental se tiene en cuenta la concentración Radón-222, principalmente, que presenta un periodo de semidesintegración de 3,8 días.

La tasa de generación (emanación) del radón, como se ha comentado, depende del tipo de roca, ya que la abundancia de Uranio (^{238}U) y por tanto, de radón es mayor en rocas ígneas como granitos y en rocas metamórficas como pizarras y esquistos. El Radón que forma parte de las rocas se encuentra en forma de Radón-226, este posteriormente se desintegra formando Radón-222 que se acumula en los poros de las rocas.

A su vez, la emisión de Radón-222 desde el suelo no es constante y depende de factores climáticos y ambientales. Es 8 veces más pesado que el aire atmosférico favoreciendo la estratificación de éste en los ambientes confinados, estas características tendrán una fuerte influencia en los procesos relacionados con las variaciones de la concentración a nivel diario y/o estacional.

Influencias del gas radón en la salud de las personas

La radiación por exposición a gas radón representa aproximadamente la mitad del promedio de radiación que el ser humano recibe por exposición a fuentes radiactivas naturales. La exposición al radón se produce mayoritariamente por la acumulación de este en espacios confinados con poca o nula renovación de aire, que conducen a inhalación de niveles peligrosos, tanto en forma de gas como en forma de partículas.

La peligrosidad de exposición ante altas concentraciones del gas no proviene del elemento en sí, sino de las radiaciones emitidas en su desintegración y a sus descendientes que se depositan directamente en el tracto respiratorio tras el decaimiento del radón en el interior de los pulmones. La inhalación de gas radón deriva en su fijación en el tejido pulmonar radiándolo. En la desintegración del radón se generan dos tipos de radiación, beta y alfa, resultando en los siguientes isótopos radiactivos (descendientes) Po-218 →; Po-214 →; Po-210.

Una vez fijados en el tejido pulmonar los niveles de radiación provocan ionizaciones y excitaciones de las estructuras celulares provocando daños directos e indirectos sobre el ADN llegando a provocar mutaciones en el tejido que pueden dar lugar a cáncer.

Para una correcta valoración del riesgo que entraña para la salud la inhalación de radón se deben tener en cuenta tanto los niveles de tolerancia de los individuos como la intensidad de la exposición y el máximo tiempo de exposición admisible.

Unidad de medida del gas radón

La vigilancia del radón en ambientes de trabajo se mide en unidad de becquerelios (Bq), en la industria minera la exposición suele medirse en WL (Working Level) y la exposición acumulada mensual se expresa como WLM (Working Level Month). La exposición de los trabajadores y las trabajadoras se mide en mSv (milisieverts).

En el caso de este estudio, la unidad que se ha tomado como referencia son los becquerelios (Bq)

Legislación española

En España, el Real Decreto 783/2001, del 6 de julio, que aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), trasladó la directiva europea de 1996.

Este Real Decreto fue modificado en 2010, donde se exigía que todas las actividades donde existiesen fuentes naturales de radiación (exceptuando la explotación de minerales radiactivos) debían de ser declaradas, estableciendo la necesidad de realizar los estudios necesarios a fin de determinar si existe un nivel significativo de exposición de las personas que allí trabajen.

La competencia para hacer cumplir esta normativa recae en los órganos de industria de las comunidades autónomas en cuyos territorios se realicen estas actividades.

En 2010 se publicó en el BOE la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural. Esta instrucción incluye en su anexo las actividades laborales que están dentro del ámbito de aplicación del artículo.

En el Anexo de la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológico para la protección frente a la exposición a la radiación natural, publicada en el BOE el 26 de enero de 2012 se especifica que actividades están sometidas a dicha instrucción.

“Las Actividades laborales cuyos titulares deberían realizar los estudios requeridos por el RPSRI son las que se llevan a cabo en los lugares de trabajo siguientes:

1. *Lugares de trabajo subterráneos como:*
 - *Cuevas y galerías.*
 - *Minas distintas a las de uranio.*

[...]”

La normativa española sobre la protección frente a la exposición a la radiación natural cataloga los lugares de trabajo con relación a las dosis efectivas de radiación ionizante recibida por los trabajadores dentro de dos categorías:

- Zona monitorizada; permite ser expuesto a una dosis efectiva inferior a 6 mSv por año.
- Zona controlada; permite ser expuesto a una dosis efectiva entre el intervalo de 6 a 20 mSv por año. Se permite la exposición a una dosis total de 50 mSv en un mismo año, pero sin sobrepasar los 100 mSv en 5 años.

Una nueva directiva europea, 2013/59/EURATOM, debía haber estado transpuesta y haber entrado en vigor en todos los países europeos, incluyendo a España, antes de febrero de 2018. En el caso de España el proceso de transposición lleva un retraso de más de un año y cabe destacar que la Comisión Europea ha abierto un expediente a España por no transponer todavía dicha directiva a nuestra legislación.

Esta norma obliga, entre otras cosas, a tener un plan nacional sobre los efectos nocivos del gas radón y que los estados miembros establezcan un nivel de referencia de 300 Bq/m³ para la protección frente a la exposición a este tipo de radiación ambiental, tanto para viviendas como para lugares de trabajo.

Esos 300 Bq/m³ se corresponden con el límite propuesto en la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear actualmente fijado para actividades en las que hay

presencia de público. En contraposición, para los lugares de trabajo, los niveles de referencia fijados en dicha instrucción son los siguientes:

< 600 Bq/m ³	No es necesario control.
600 – 1.000 Bq/m ³	Se debe aplicar un nivel bajo de control.
> 1.000 Bq/m ³	Se debe aplicar un nivel alto de control.

Tabla 2: Niveles de referencia fijados para lugares de trabajo

Fuente: Exposición laboral al radón. Guía para la prevención (Gobierno de España. Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social)

Enlace: <https://istas.net/sites/default/files/2019-04/Guia%20Radon%202019.pdf>

Implicaciones del gas radón-222 en el medio subterráneo

Existe una gran variedad de ambientes subterráneos turísticos donde se conoce la existencia de elevadas concentraciones de radón, entre estos ambientes destacan: cuevas turísticas (Solomon *et al.*, 1996), catacumbas (Quarto *et al.*, 2014) y minas turísticas (Przylibski, 2001; Anjos *et al.*, 2010). En la mayoría de los casos se han implementado acciones de mitigación con el fin de reducir la cantidad de radón inhalado por los turistas y por los trabajadores (guías turísticos, personal de mantenimiento, etc.), esto se ha desarrollado mediante ventilación forzada a lo largo de las rutas y en las zonas donde se desarrolla un mayor tiempo de permanencia. Sin embargo, el uso de estos medios para reducir los niveles de radón existentes no tiene fácil solución en cavidades naturales, dado que estos ambientes poseen un delicado equilibrio ambiental y esta puesta en práctica podría suponer un problema en su conservación.

Por ello, un control sobre la exposición de las personas frente al gas radón y sus elementos de desintegración puede ser la opción más favorable, en concreto la limitación del tiempo de permanencia y la restricción de entrada a zonas con alto nivel, así como establecer turnos y horarios de trabajo adecuados para cada trabajador para que no se alcancen a los límites máximos establecidos. Algunos de los métodos que se están llevando a cabo en varios ambientes subterráneos son: limitaciones en la ruta turística (Przylibski, 2001) o reducciones en los horarios diarios de los trabajadores dentro de las zonas subterráneas (Anjos *et al.*, 2010; Álvarez-Gallego *et al.*, 2015)).

Objetivos

El objetivo central del presente trabajo es conocer la relación entre los niveles de radón y las condiciones ambientales de la zona observando cómo influyen las variaciones de temperatura en su concentración. Una vez establecidos los niveles de radón para un determinado periodo de tiempo se calcularán los niveles de exposición para cada trabajador según los tiempos de permanencia. Los niveles calculados se extrapolarán a un periodo de un año para comprobar si la dosis se ajusta a los niveles establecidos por la Unión Europea.

El trabajo de investigación se ha desarrollado en la Mina Rica (Pilar de Jaravía, Pulpí, Almería) conocida principalmente por albergar la geoda visitable más grande del mundo. Por esta cueva pasan a diario numerosos grupos de visitantes por lo que es necesaria la presencia de un número determinado de guías que acompañan a los turistas durante la visita.

Con este planteamiento, el trabajo de investigación se ha enfocado principalmente en los siguientes objetivos:

- Determinar los niveles de radón en las distintas galerías visitables de la mina.
- Conocer la influencia de los factores ambientales sobre los niveles de radón del interior de la cueva.
- Estimar las dosis de radiación ambiental que reciben los guías turísticos de la mina por exposición a gas radón, en función de los tiempos de permanencia de en cada sector de la mina.

3. ZONA DE ESTUDIO: MINA RICA O “QUIÉN TAL PENSARA”

La Mina Rica, conocida por albergar La Geoda de Pulpí, se sitúa en la barriada de Pilar de Jaravía perteneciente a la localidad de Pulpí (Almería), se encuentra a unos 4km de esta localidad y las instalaciones ocupan una extensión de unos 3,5 km².

Para llegar a ella se debe acceder por la carretera A-350 desde San Juan de los Terreros a Pulpí, desviándose con un camino a la derecha al pasar el PK 31.

Esta mina se encuentra situada en el sector oriental de la Cordillera Bética, en los pies de la Sierra del Aguilón, teniendo actividad minera de manera discontinua desde finales del siglo XIX hasta 1970 (Fernández-Bolera et al., 2014). De esta mina se extrajeron diferentes materiales a lo largo del tiempo, primero se extrajo óxido de hierro en las zonas someras, después los carbonatos de hierro y finalmente los sulfuros de plomo y plata.

La Mina Rica alberga numerosos elementos de interés además de la geoda Gigante de Pulpí. Desde el punto de vista estructural se observan: plegamientos, superficies de falla y escamas tectónicas; que han provocado el desarrollo de amplias zonas milonitizadas.

Todo esto se observa también a lo largo de las galerías mineras recorridas por el público, siendo las de mayor permanencia en las denominadas “Catedral”, “Geoda Partida”, “Luminiscencia” y “Geoda”. En estos cuatro puntos es donde se han llevado a cabo el registro en continuo de gas radón de este estudio.

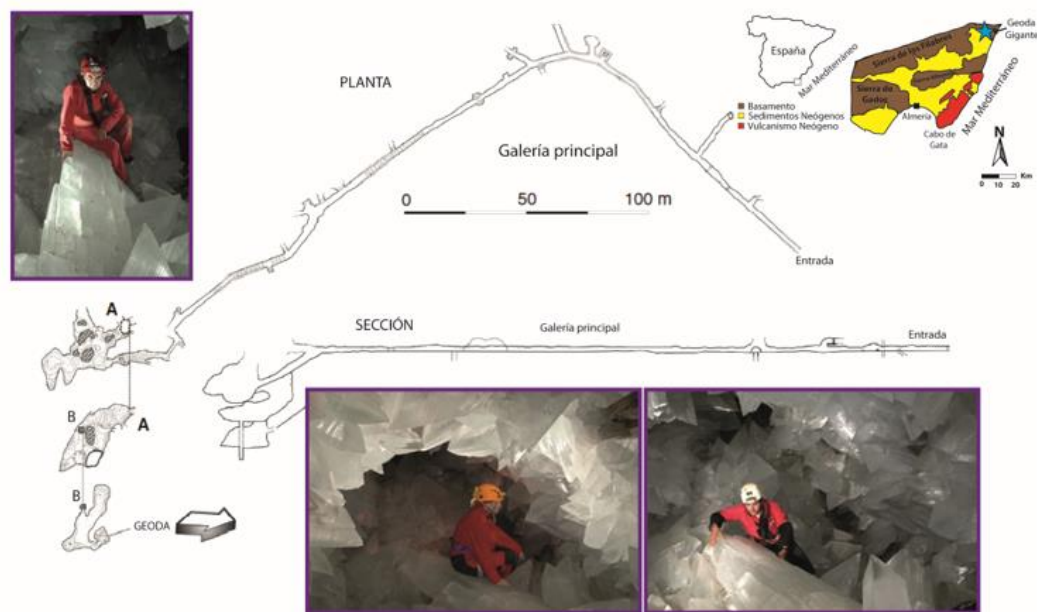


Figura 1: Trazado de recorrido mina e imágenes en el interior de la geoda

Fuente: Modificada de Fernández-Cortés et al (2006)

Estudios previos

Tras el descubrimiento de la Geoda Gigante de Pulpí en 1999 y con el fin de su protección, se creó una Comisión de Seguimiento formada por diferentes Consejerías de la Junta de Andalucía implicadas en su gestión y conservación (Calaforra *et al.*, 2001). Se adoptaron una serie de medidas urgentes como el cierre del acceso a la mina debido el peligro que suponía la visita a la mina que en esos tiempos se encontraba abandonada, así como por precaución a sufrir explosión de los minerales que en ella se encontraban. Simultáneamente, la Consejería de Medio Ambiente inició los trámites para declarar a la Geoda de Pulpí como Monumento Natural, si bien su declaración es aún un asunto en trámite hoy en día por parte de las administraciones y entidades responsables de su gestión y conservación.

La propia figura de protección como Monumento Natural conlleva la protección del interés turístico de la geoda, por lo que su conservación se enmarcó en un proyecto más amplio cuyo fin era la habilitación turística. Con esta perspectiva, desde la Universidad de Almería se realizaron una serie de estudios microclimáticos para evaluar la posibilidad de visita *in situ* a la geoda (Fernández-Cortés *et al.*, 2006). En condiciones naturales el aire de la geoda tiene una serie de características:

- Temperatura media: 19,3 °C
- Humedad: 85-90%
- Contenido de CO₂: 800-1800 ppm

Conociendo estos parámetros se realizaron controles microclimáticos de la atmósfera de la geoda durante las visitas a su interior con un escaso número de personas, máximo tres, y un tiempo de permanencia entre 10 y 30 minutos. Se observó que los tiempos de recuperación de las condiciones dentro de la geoda eran inviables para darle acceso a las personas a visitar su interior, sumando los daños que provocaría en los cristales de yeso el contacto directo y continuo de las visitas, así como el riesgo de provocar un proceso de corrosión de los cristales por condensación en su superficie del vapor de agua exhalado por los visitantes la visita directa era inviable.

Por ello, finalmente se decidió que las personas verían el interior de la geoda desde un lateral de ésta introduciendo solamente la parte superior del cuerpo durante unos pocos segundos y bajo la supervisión de los guías.

Trabajos de adecuación turística.

Debido a la inactividad de la mina hasta el descubrimiento de la Geoda, el interior de las galerías se encontraba muy deteriorado y el acceso al nivel donde se encuentra la geoda era extremadamente peligroso. Por ello, fue imprescindible la rehabilitación de las galerías para garantizar la seguridad y accesibilidad de los visitantes y del personal de trabajo.

Se comenzó reforzando las galerías con vigas y estructuras de acero forjado, se rebajó el nivel del suelo en algunos tramos ya que con el paso de los años se habían acumulado gran cantidad de sedimentos, para facilitar la accesibilidad de los visitantes a las galerías.

Se instalaron una serie de escaleras, una de ellas de 15m de altura que permiten acceder a los diferentes niveles de la mina y como salida de emergencia. Actualmente se cuenta incluso con la instalación de un ascensor hidráulico que accede hasta el nivel inferior. Por otro lado, se llevaron a cabo trabajos de restauración en el exterior de la mina facilitando el acceso y rehabilitación de algunas las estructuras originales. Los trabajos de rehabilitación y adecuación turística se realizaron por la empresa TECMINSA S.L.

El modelo de visitas tanto a la mina como a la geoda se planteó de forma que fuese lo menos invasiva con los cristales de yeso y provocase el menor impacto sobre el conjunto geológico. El modelo de visita actual que consiste en grupos de 12-15 visitantes acompañados de un guía con un total de 8-10 visitas al día y con una duración aproximada de 1.30 h.

Para mejorar la calidad del aire en el interior de la mina, y con el fin a su vez de disminuir los niveles de radón-222 en las galerías, se instaló un sistema de ventilación (Figura 2) que favorece el movimiento y renovación del aire desde los niveles más inferiores de la mina hasta la superficie.

Este sistema de ventilación no está activo en continuo, se activa durante un determinado periodo de tiempo a lo largo del día, con los siguientes intervalos:

- De 10:00 hasta las 15:00 h funciona en intervalos de 15 minutos.
- De 15:00 a 16:00 h funciona en continuo.
- De 16:00 a 21:00 h funciona en intervalos de 15 minutos.
- En horario de noche permanece apagado.



Figura 2: Tubo de ventilación y boca del tubo en la base de la geoda

Fuente: Imágenes propias

Régimen de visitas

La Mina Rica acoge a turistas los siete días de la semana en dos tramos de horarios distintos, un horario de lunes a jueves y otro de viernes a domingo. El horario de visita de lunes a jueves comenzaría a las 09:00 hasta las 11:00 h, descanso hasta las 11:30 h y continuación hasta las 13:00 h, el horario de tarde sería de 15:30 hasta 20:30 h sin interrupción.

Los fines de semana se elimina el descanso de la mañana y se alargan los tiempos de visita, siendo estos, de 09:00 a 13:30 h y en horario de tarde de 15:00 a 20:30 h. Estos horarios corresponden a la cadencia antes de las medidas de seguridad impuestas por la situación de alerta sanitaria actual (COVID-19). Los horarios actuales son mucho más restrictivos y están actualmente en fase de adecuación.

Los intervalos de visitas son cada 30 minutos evitando así que se aglomeren dos grupos de visitantes en un mismo punto, los días de diario entran 19 grupos cada día y los fines de semana 22, cada grupo entra con un guía distinto y en el interior de la mina hay personal de apoyo para ayudar a algún visitante en caso necesario. El número máximo de visitantes por grupo es de 15 personas.

Se realizó una medición del tiempo de permanencia de cuatro grupos de visitas midiendo el tiempo que tardaban en realizar el recorrido completo, y el tiempo de permanencia en las cuatro galerías/salas principales de la mina. Como resultado se obtuvo la siguiente Tabla 3:

MAÑANA			
	Entrada	Salida	Permanencia (minutos)
Polvorín	9:48	9:58	10
Luminiscencia	10:03	10:08	5
Partida	10:17	10:26	9
Geoda	10:28	10:51	23
Mina	9:37	11:02	85
	Entrada	Salida	Permanencia (minutos)
Polvorín	11:56	12:10	14
Luminiscencia	12:16	12:24	8
Partida	12:35	12:40	5
Geoda	12:44	13:11	27
Mina	11:40	13:24	104
TARDE			
	Entrada	Salida	Permanencia (minutos)
Polvorín	16:30	16:37	7
Luminiscencia	16:43	16:51	8
Partida	17:00	17:06	6
Geoda	17:08	17:34	26
Mina	16:10	17:45	95
	Entrada	Salida	Permanencia (minutos)
Polvorín	18:26	18:31:00	5
Luminiscencia	18:37	18:45	8
Partida	18:55	19:01	6
Geoda	19:03	19:28	25
Mina	18:04	19:40	96

Tabla 3: Tiempos de permanencia en cada galería

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos, podemos obtener los siguientes tiempos medios de permanencia (Tabla 4).

Tiempo medio (minutos)	
Mina	95
Polvorín	7
Luminiscencia	7
Partida	5
Geoda	20

Tabla 4: Tiempos medios de permanencia

Fuente: Elaboración propia

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Instrumental de medida

Los datos con los que se va a trabajar en este estudio corresponden a una estación meteorológica situada en Águilas (Murcia) además de una serie de sensores de alta precisión instalados en la mina de forma permanente, por la Universidad de Almería.

Estación meteorológica

Para realizar un correcto estudio de las variaciones que sufren los niveles de radón en la mina con relación a los cambios de temperatura, y el efecto que puede tener la lluvia en la ventilación de la mina, se utilizó como estación meteorológica la más cercana posible a la zona de estudio. En este caso, se ha establecido como referencia la estación meteorológica de “La Pilica” situada en Águilas (Murcia), perteneciente a la Red del Sistema de Información Agrario de Murcia (<http://siam.imida.es/>).

Esta estación se encuentra a unos 10km de la mina, y registra una gran variedad de parámetros meteorológicos, si bien para nuestro estudio nos vamos a centrar en las variables de temperatura y precipitación.

En la siguiente tabla podemos observar los valores medios mensuales de precipitación y temperatura durante los meses en los que se ha desarrollado este estudio.

ESTACIÓN	FECHA	LLUVIA (mm)	TMAX (°C)	TMED (°C)	TMIN (°C)
La Pilica	ago-19	0,2	28,75	26,61	25,49
	sep-19	72,62	26,82	24,35	21,01
	oct-19	36,52	23,93	20,31	13,71
	nov-19	7,96	24,45	16,35	12,43
	dic-19	13,67	19,36	14,19	11,31
	ene-20	58,55	14,38	11,52	9,86
	feb-20	2,04	16,44	13,83	11,8

Tabla 5: Datos medios de precipitación (LLUVIA, mm) y temperatura media (MED), media de las mínimas (MIN) y media de las máximas (MAX) por meses en la zona de estudio.

Fuente: Tabla elaborada a partir de los datos de la estación, obtenidos del Sistema Informático Agrario de Murcia

Sensores de alta precisión

Gracias al Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y al convenio de colaboración entre la UAL y el Ayuntamiento de Pulpí se instalaron una serie de sensores de alta precisión: temperatura del aire, temperatura de los cristales de la geoda, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono; tanto en el interior de la geoda como en las galerías de acceso. Estos sensores registran los parámetros en intervalos de 1 o 15 minutos, dependiendo del sensor y con autonomía

de varios meses. Los sensores se encuentran conectados a una red wifi por lo que se pueden consultar de manera remota desde cualquier ordenador.

Al igual que con los datos de la estación meteorológica, solo se ha utilizado para este estudio los registros de temperatura del aire de la mina, en concreto en las inmediaciones del punto de acceso a la Geoda.

Monitores de radón

Los sensores de medición de radón que se han instalado en cuatro puntos de la mina son los “Smart Radón Gas Monitor RADONEYE +2” (Figura 3), estos sensores son de la marca RadonFTLab.

Algunas de las características técnicas de estos aparatos podemos verlas recogidas en la Tabla 6:

Tipo:	Cámara de iones pulsados
Sensibilidad:	De 0,5cpm/pCi/l a 10pCi/l
Rango operativo:	10 – 40 °C
Rango de medición:	0,1 – 255 pCi/l (9,435 Bq/m ³)
Precisión:	< ±10% a 10pCi/l
Exactitud:	< ±10% (error mínimo <±0,5pCi/l) a 10pCi/l

Tabla 6: Características técnicas de los medidores de radón.

Fuente: Obtenida de la ficha técnica.

Los cuatro puntos elegidos para la instalación de estos medidores son “La Catedral” o “Polvorín”, la sala de “Luminiscencia”, la “Geoda Partida” y en la boca de la Geoda Gigante. Se han instalado a un metro con respecto al nivel del suelo para que las mediciones del gas sean más exactas y situados fuera de la vista de los turistas para evitar que puedan ser manipulados por los mismos y se falseen o se borren los datos.



Figura 3: Sensor de radón situado en uno de los cuatro puntos de medición.

Fuente: Imagen propia.

4.2. Parámetros y procedimientos de cálculo de dosimetrías por exposición a gas radón

Las labores subterráneas en zonas con altas concentraciones de radón incrementan el peligro de padecer cáncer de pulmón debido a sus descendientes radioactivos que se depositan directamente en el tracto respiratorio tras el decaimiento del radón en el interior de los pulmones (Álvarez-Gallego et al. 2015). Debido a ello guías y personal de mantenimiento pueden estar sometidos a un amplio rango de radiación ionizante alfa de origen natural. Así, en el caso de emplazamientos turísticos subterráneos es necesario desarrollar programas de monitorización ambiental de dicho gas permitiendo tomar decisiones y diseñar acciones de protección para los guías y turistas. Las decisiones relativas a la protección deben establecerse según los niveles de referencia de radón, en Bq/m³.

En la actualidad, la Unión Europea establece como nivel de referencia medio anual un valor menor a 300 Bq/m³, y recomienda sobre los límites de las dosis efectivas en trabajadores y público en general, no sobrepasando estas los 20mSv por año para los trabajadores y 1mSv al año para los visitantes.

Disminuir las altas concentraciones de radón en estos lugares no tiene fácil solución debido a que estos ambientes poseen un delicado equilibrio. Las medidas como la ventilación forzada se consideran en muchos casos como método no apto debido a los efectos negativos que esta provocaría. Por ello, un control sobre la exposición de las

personas a la radiación puede ser la opción más favorable, algunas de las medidas que esto conllevaría sería: restricción del tiempo de permanencia, limitar el acceso a zonas con altos niveles de radón, incluir a los trabajadores en programas de protección, o elaborar un correcto calendario de trabajo evitando que sobrepasen los niveles de radiación anuales. En algunos casos se han aplicado restricciones sobre la accesibilidad a determinados ambientes subterráneos incluyendo limitaciones en la ruta (Przylibski, 2001) o reducción en los horarios de trabajo (Anjos *et al.*, 2010).

La Mina Rica presenta estacionalmente concentraciones de radón superiores a los niveles establecidos por la Unión Europea en ambientes de trabajo con posible exposición al gas. En este estudio se han calculado los niveles de radón en distintos puntos y se va a estudiar el efecto que tienen las variaciones de temperatura ambiental y la variación en ellos. Con estos datos se van a estimar las dosis que reciben los trabajadores y en caso de que también sean superiores buscar soluciones a este problema. La mina posee dispositivos de ventilación forzada, al conocer los horarios de funcionamiento se puede comprobar si esta ventilación actual supone ayuda en el control de dicho radón o hay que modificarla.

Se ha realizado una evaluación de la dosis total efectiva y las horas máximas permitidas a los guías y al público en general en la mina, en función de los datos obtenidos en la medición del radón mediante los cuatro detectores instalados.

Cálculos de la exposición a la radiación alfa procedente del radón.

Las decisiones relativas a la protección de los trabajadores y visitantes frente al radón se establecen en función de los niveles de referencia. La dosis de radiación recibida se calcula en función del tiempo de exposición (exposición potencial a la energía α) y se expresa en mSv. La dosis efectiva se calcula mediante la siguiente expresión (Álvarez-Gallego, 2015):

$$\text{Dosis (en mSv)} = [(C_{Rn} * F * T)/6,37 \times 10^5] * DCF$$

Donde:

- C_{Rn} es la concentración media de radón expresada en Bq/m³.
- F es el factor de equilibrio medio, siendo la ratio entre la concentración de los descendientes del radón y la concentración del gas radón (UNSCEAR, 2000).
- T es el tiempo, en horas, dentro de la mina.
- El factor de conversión de dosis (DCF: *Dose Conversión Factor*, expresado en mSv·m³·Bq⁻¹·h⁻¹) corresponde con el detrimento por unidad de exposición de radón y sus descendientes (expresado en WLM) con relación al detrimento total asociado a la unidad de dosis efectiva (expresado en mSv).

El factor F ha sido ampliamente estudiado en diferentes condiciones para evaluar la dosis recibida en personas expuestas. Por defecto, un valor de 0,4 es recomendado por

la International Commission for Radiological Protection (ICRP; 1994) para ambientes de interior como minas, aunque se ha estudiado una amplia variación desde 0,1 hasta 0,9 (UNSCEAR, 2006). En los cálculos llevados a cabo en este estudio el valor F corresponde a 0,4 y el valor DCF a 20.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Niveles de radiactividad ambiental en la mina por presencia del gas radón.

En este apartado se describen los datos obtenidos durante el periodo de medida del gas radón, los datos han sido calculados por meses.

En las siguientes tablas se recopilan: la media mensual, el valor máximo y mínimo en un mes, la amplitud (diferencia entre el valor más alto y el más bajo), la desviación estándar, representada como “Des.Vest” (representa la variación en el conjunto de datos) y el coeficiente de variación, expresado como “Coef.Variación” (coeficiente entre la desviación típica y la media, cuanto mayor sea este valor, más variación se ha producido entre los niveles de radón)

Estación:	GEODA					
Mes	Media	Máxima	Mínima	Amplitud	Des.Vest	Coef.Variación
sep-19	2997,48	4189,00	1704,00	2485,00	767,75	0,26
oct-19	1550,02	4417,00	157,00	4260,00	157,00	0,10
nov-19	477,40	2541,00	105,00	2436,00	562,83	1,18
dic-19	238,35	665,00	76,00	589,00	96,48	0,40
ene-20	181,20	410,00	45,00	365,00	53,47	0,30
feb-20	268,72	638,00	127,00	511,00	95,44	0,36
mar-20	299,90	827,00	78,00	749,00	168,31	0,56

Tablas 7: Estadísticos mensuales de las concentraciones de radón obtenidos en la estación de Geoda

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

Estación:	POLVORÍN					
Mes	Media	Máxima	Mínima	Amplitud	Des.Vest	Coef.Variación
nov-19	115,42	816,00	32,00	784,00	115,12	1,00
dic-19	106,83	426,00	23,00	403,00	73,40	0,69
ene-20	87,86	379,00	26,00	353,00	51,25	0,58
feb-20	138,55	770,00	26,00	744,00	120,73	0,87
mar-20	188,96	901,00	34,00	867,00	158,71	0,84

Tablas 8: Estadísticos mensuales de las concentraciones de radón obtenidos en la estación de Polvorín

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

Estación:	LUMINISCENCIA					
Mes	Media	Máxima	Mínima	Amplitud	Des.Vest	Coef.Variación
nov-19	325,80	913,00	56,00	857,00	201,02	0,62
dic-19	344,93	921,00	64,00	857,00	176,18	0,51
ene-20	266,34	831,00	68,00	763,00	111,07	0,42
feb-20	372,80	1142,00	61,00	1081,00	222,30	0,60
mar-20	435,59	1249,00	82,00	1167,00	246,89	0,57

Tablas 9: Estadístico mensual de la concentración de radón obtenido en la estación de Luminiscencia.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

Estación:	G.PARTIDA					
Mes	Media	Máxima	Mínima	Amplitud	Des.Vest	Coef.Variación
nov-19	227,72	565,00	99,00	466,00	95,33	0,42
dic-19	272,31	829,00	92,00	737,00	138,20	0,51
ene-20	178,76	496,00	21,00	475,00	67,59	0,38
feb-20	300,53	730,00	95,00	635,00	143,18	0,48
mar-20	332,16	978,00	43,00	935,00	222,51	0,67

Tablas 10: Estadístico mensual de la concentración de radón obtenido en la estación de Geoda Partida.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

La tabla que recoge los datos de la estación situada en la geoda posee dos filas más de datos mensuales ya que se empezaron a medir los niveles de radón antes, desde el mes de septiembre.

Como podemos observar las cuatro estaciones siguen un mismo patrón con respecto al nivel de radón, si nos fijamos en la tabla de radón medio, observamos como los valores más bajos los encontramos en el mes de enero, siendo este también el mes con temperaturas más bajas en el exterior. A partir de enero con el aumento de temperatura, los niveles de radón aumentan también. En más detalle, podemos observar cómo los niveles medios y máximos más altos los encontramos en la estación de Luminiscencia, esto se debe a que es una sala lateral de la mina y posiblemente la menos ventilada, por tanto, la renovación de aire es más lenta en comparación con el resto de las galerías y salas. Los niveles más bajos de radón se encuentran en la galería de Polvorín (zona Catedral), esta a su vez es la sala más grande de todas y la mejor ventilada y donde se ubica la salida de emergencia.

5.2. Dinámica natural del radón en el aire de la mina.

En este apartado se estudia el comportamiento del gas radón a lo largo del periodo de medición y la variación de este respecto la temperatura, principalmente a la variación de temperatura exterior, y el efecto que tienen los periodos de lluvia.

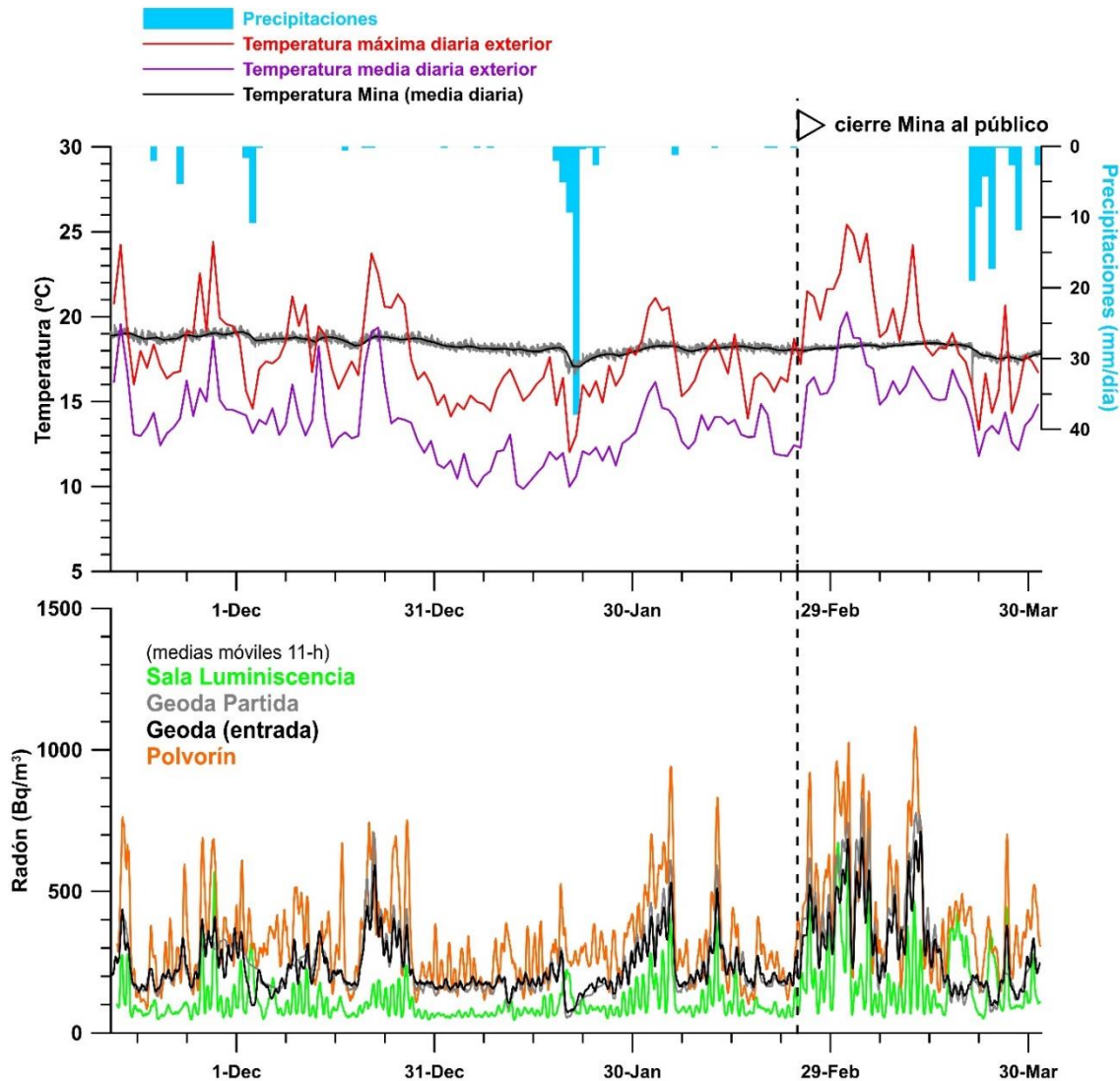


Figura 4: Comportamiento del radón según variación de temperatura y precipitación. Nivel de radón diario en cada una de las estaciones.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

En la primera gráfica se observa como la temperatura de la mina permanece prácticamente constante, siendo su media aproximada 18,43 °C, considerando el periodo de registro utilizado en este estudio.

La segunda gráfica nos muestra los niveles de radón a lo largo del periodo de estudio. Se observa como siguen prácticamente el mismo patrón en las cuatro estaciones. Si comparamos ambos gráficos, observamos que los mayores picos en los niveles de radón

se producen cuando la temperatura exterior supera a la temperatura de la mina, lo que indica que el radón correlaciona bien con la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la mina.

Para conocer mejor el efecto de las temperaturas frente a los niveles de radón, se ha estudiado el comportamiento de este gas en las cuatro estaciones de registro, para ello en las Figuras (5,6,7,8) se han enfrentado los valores medios diarios de radón de cada punto con relación a la diferencia media diaria entre la temperatura exterior y la interior de la mina ($T_{\text{med exterior}} - T_{\text{med. mina}}$), calculando para cada caso la función exponencial que mejor se ajusta a la relación entre ambos parámetros.

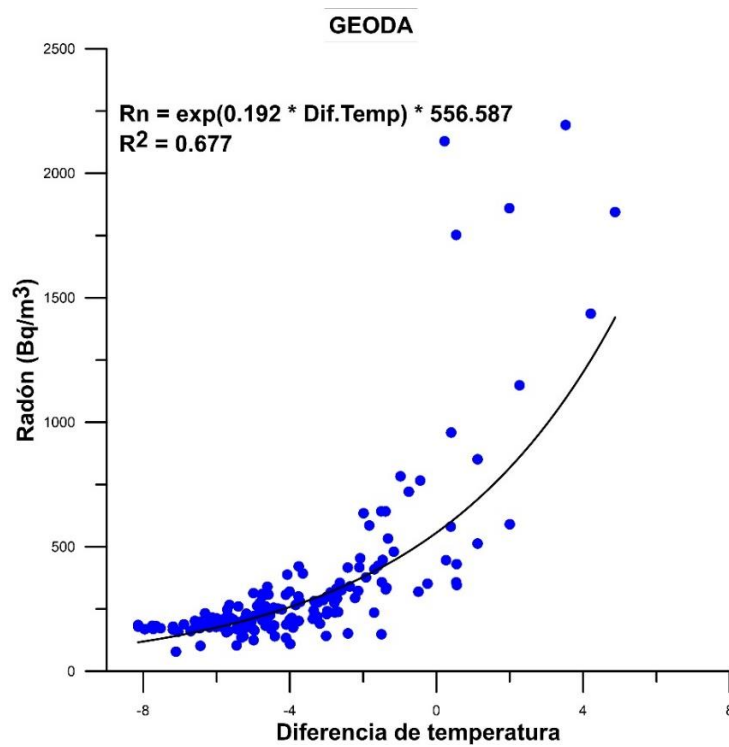


Figura 5: Niveles de radón frente diferencias de temperatura (Media mina – exterior).

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

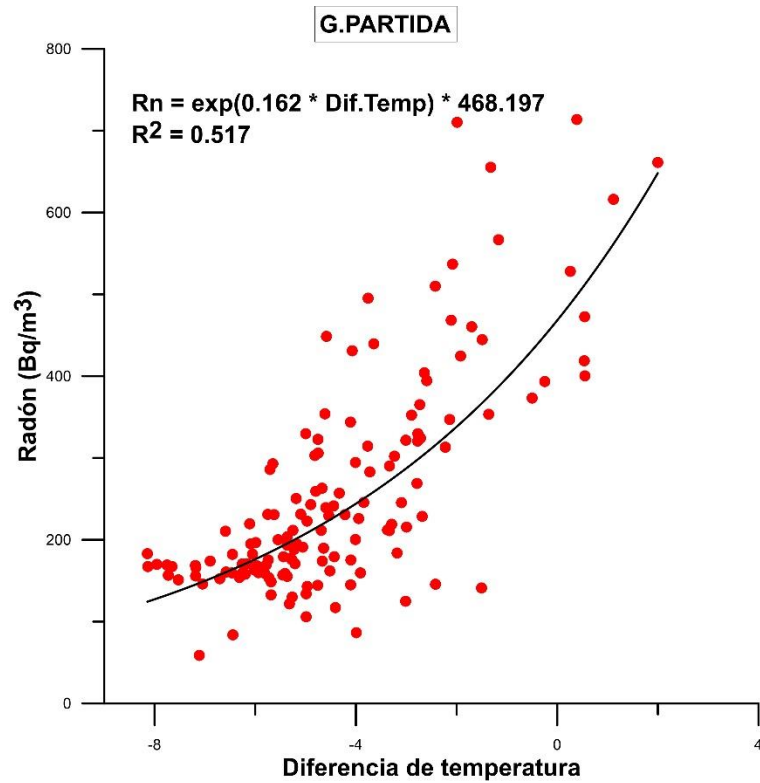


Figura 6: Niveles de radón frente diferencias de temperatura (Media mina – exterior).

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

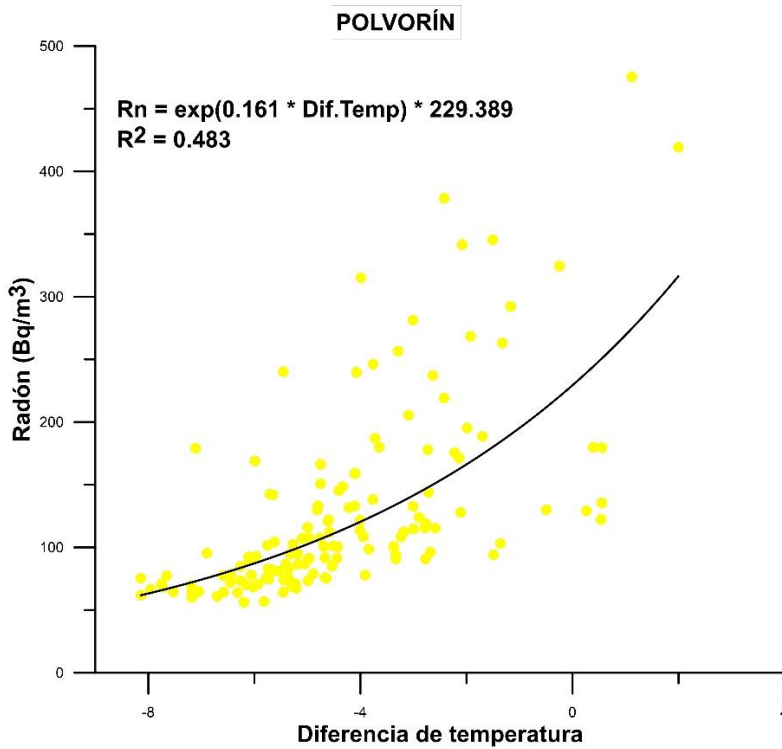


Figura 7: Niveles de radón frente diferencias de temperatura (Media mina – exterior).

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

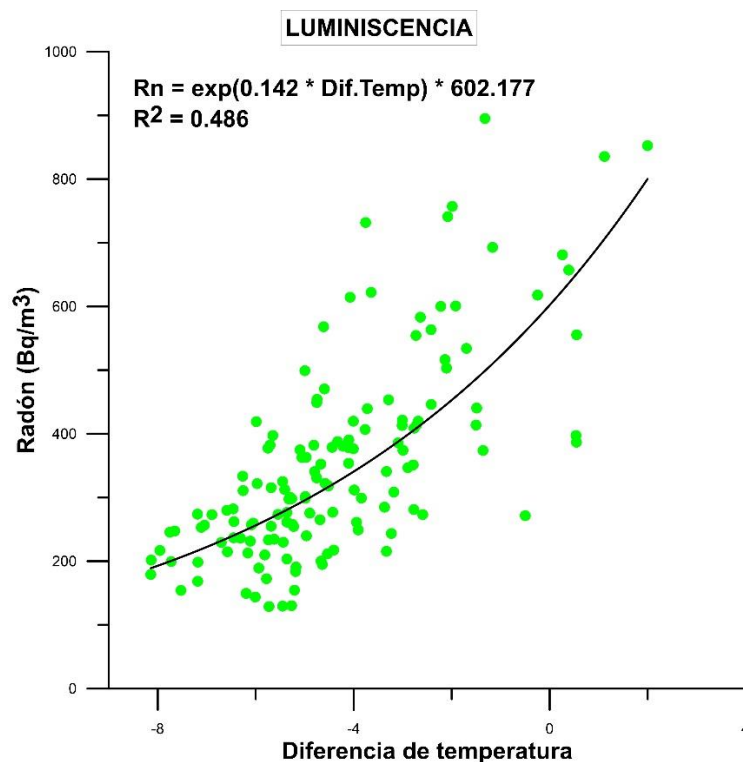


Figura 8: Niveles de radón frente diferencias de temperatura (Media mina – exterior).

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

Al observar las cuatro gráficas: Geoda, Geoda Partida, Polvorín y Luminiscencia, vemos que todas se comportan igual. A diferencia de variaciones térmicas negativas (temperaturas de la mina mayor que la temperatura en el exterior) los niveles de radón son más bajos, y a medida que esta diferencia se hace positiva (temperatura exterior superior a la de la mina) se incrementa la concentración de radón.

Cuando la temperatura del aire exterior es menor que la temperatura del interior de la mina, y en consecuencia, la densidad del aire exterior es mayor que a densidad del aire de la mina, se favorece el movimiento advectivo del aire, principalmente a través de la entrada de la mina y otras discontinuidades de la roca encajante. Como resultado, la renovación del aire subterráneo es más intensa, disminuyendo los niveles de radón del aire subterráneo al diluirse con la entrada de aire exterior (alcanzando concentraciones muy bajas de este gas).

Con un gradiente de temperatura opuesto (temperatura exterior mayor a la temperatura de la mina), se anula este proceso de renovación del aire subterráneo y como resultado se produce una acumulación continua de gas radón en el ambiente en función de la tasa de exhalación del gas desde los materiales encajantes. Por lo tanto, el radón presenta un rasgo distintivo que le confiere un gran valor como gas trazador dado

que su origen es exclusivamente abiótico y permite así evaluar el intercambio gaseoso y de masas de aire en ambientes confinados, como es el caso de las galerías mineras, y la atmósfera exterior.

5.3. Ventilación forzada de las galerías mineras durante la apertura al público.

Como se ha comentado en el punto 2 de este trabajo, la mina posee un sistema de ventilación forzada con el fin de facilitar la renovación del aire y con ello disminuir los niveles de radón. El sistema de ventilación ha estado activo durante todo el periodo en el que se han recogido los datos exceptuando el mes de marzo que la cueva estuvo cerrada al público debido a obras de remodelación y adaptación. Si comparamos los valores medios de radón en las cuatro estaciones en los meses de febrero y marzo, podemos observar un aumento del nivel del gas en el mes que estuvo sin funcionar el sistema de ventilación.

Estación	Valor medio mensual de radón	
	Febrero	Marzo
Geoda	268,72	299,90
Polvorín	138,55	188,96
Luminiscencia	372,80	435,59
G.Partida	300,53	332,16

Tabla 11: Comparación del nivel medio de radón con ventilación forzada y sin ella.

Fuente: Elaborada a partir de los datos medios mensuales.

Para valorar mejor si la ventilación forzada tiene algún efecto sobre los niveles de radón se ha estudiado un periodo de dos semanas, con una primera semana de estudio con la mina abierta al público y por tanto la ventilación forzada estaba activa, y una segunda semana con la mina cerrada al público y, con ello, la ventilación desconectada.

Este estudio se ha realizado con los datos obtenidos en la estación de la Geoda, ya que en ese punto se encuentran uno de los tubos de ventilación, y por tanto, se podrá observar mejor el efecto de dicha ventilación.

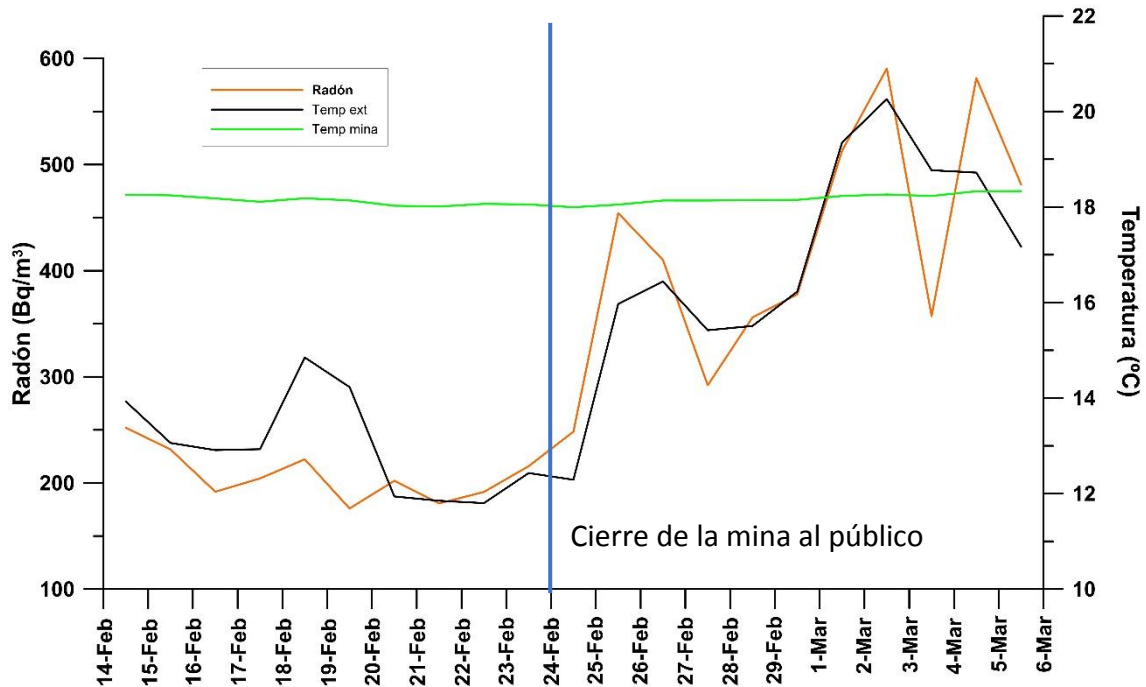


Figura 9: Niveles de radón con y sin ventilación forzada y en relación a la temperatura exterior e interior de la mina. Valores medios diarios en ambos parámetros.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

La temperatura del aire de la mina (línea verde) permanece constante y la temperatura media exterior (línea negra) aumenta. Los niveles de radón, en concreto la variación de estos con la mina cerrada la mina al público aumenta, pero también, lo hace ligeramente la temperatura, dicha variación es muy ligera y por tanto, en un principio si se puede afirmar que esta ventilación tiene efecto sobre los niveles de radón siempre y cuando la temperatura externa sea constante. Si varía demasiado la temperatura exterior con respecto a la de la mina, los niveles de radón se dispararán igualmente.

5.4. Evaluación dosimétrica de los guías de la mina por exposición a gas radón.

El objetivo principal de esta parte del estudio es estimar la dosis acumulada de radón en mSv para los trabajadores (guías turísticos de la mina) en un año. Para ello, se han calculado los valores mínimos, medios y máximos de radón en cada estación durante cada día. Con estos datos se ha estimado la dosis mínima, media y máxima que potencialmente recibiría un guía tipo que trabajase durante todo el año, y de acuerdo con la distribución de tiempo de permanencia, cuyos datos han sido facilitados por los gestores de la mina, así como en función de los tiempos medios de permanencia en cada zona de la mina y los tiempos de transido por las diferentes galerías (datos de la Tabla 4).

La Figura 10 muestra el periodo de cálculo de dosis (media, mínima y máxima) del tiempo establecido en el ámbito temporal de estudio (del 25/09/2019 hasta el 31/03/2020), considerando los registros de radón obtenidos y la proyección a un año.

En función de ajuste lineal se ha realizado una estimación de la dosis acumulada.

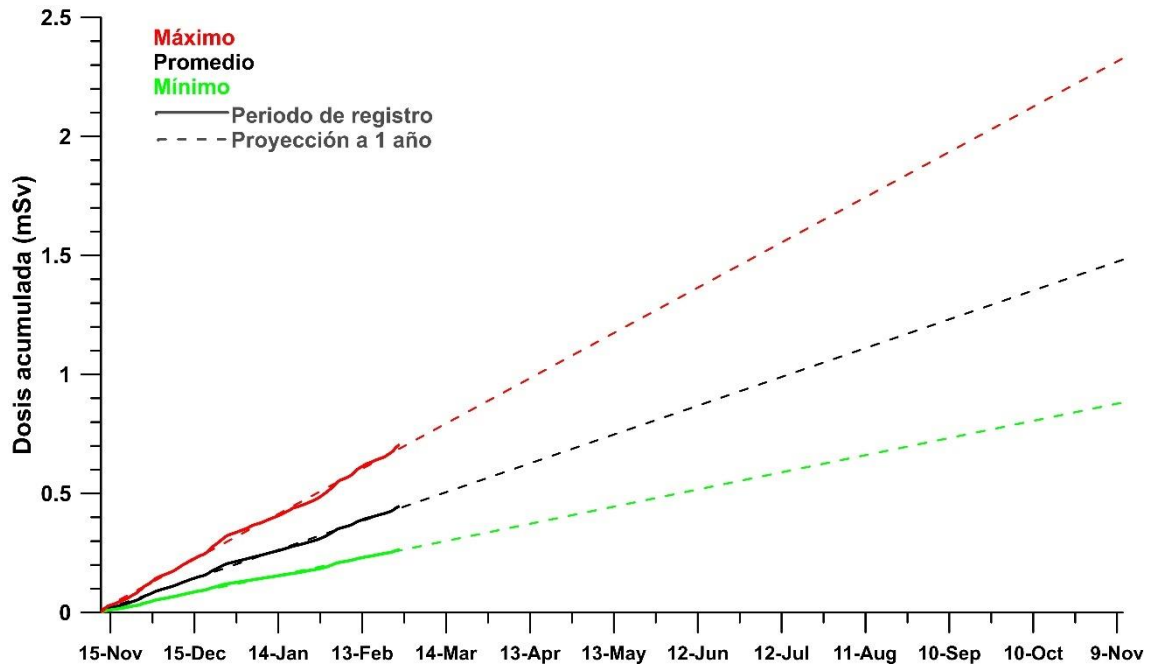


Figura 10: Estimación dosimétrica lineal de radón para un año.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos diarios de medición.

Como se puede observar en la Figura 10, la dosis acumulada por exposición a radón lógicamente aumentaría a lo largo del año. Para esta estimación de dosis se ha considerado el registro de radón obtenido durante el periodo de estudio (desde noviembre a abril, líneas sólidas en la Figura 10). Sin embargo, los registros de radón de mayor duración obtenidos en la Geoda indican que la concentración de este gas varía mucho a lo largo del año debido a la diferencia de temperaturas, por ello, es previsible que la evolución de la dosis acumulada no tenga una evolución lineal, y si en cambio aumento de forma exponencial durante los meses con niveles de radón superiores debido a la menor renovación del aire de la mina (verano).

Para la estimación de la dosis acumulada en un ciclo anual completo es necesario simular la concentración de radón en las cuatro estaciones de control para los periodos en los que no se cuenta aún con registros. Para ello, se ha utilizado el registro más extenso que corresponde a la estación de la Geoda.

Como se ha comentado, el radón correlaciona muy bien con la variación de temperatura exterior-interior, cuanto mayor sea esta diferencia (temperaturas exteriores más altas), mayor serán los niveles de radón. Dado que la temperatura del aire de la mina es

bastante constante (varía entre 17,05 y 19,06 °C, durante el periodo de registro), podría utilizarse a la temperatura en el exterior como predictor de los niveles de radón en la mina. La Figura 11 muestra la correlación entre ambos parámetros en dos tramos, un primer tramo (rojo) donde la temperatura exterior es menor de 19°C y los niveles de radón se incrementan ligeramente con las temperaturas crecientes; y un segundo tramo (azul) donde la temperatura exterior supera los 19°C y, en este caso, los niveles de radón experimentan un intenso aumento para pequeños incrementos de temperatura en el exterior. Se ha establecido dicha temperatura como punto de corte, ya que corresponde aproximadamente con la temperatura media de la mina (18,43°C, durante el periodo de registro).

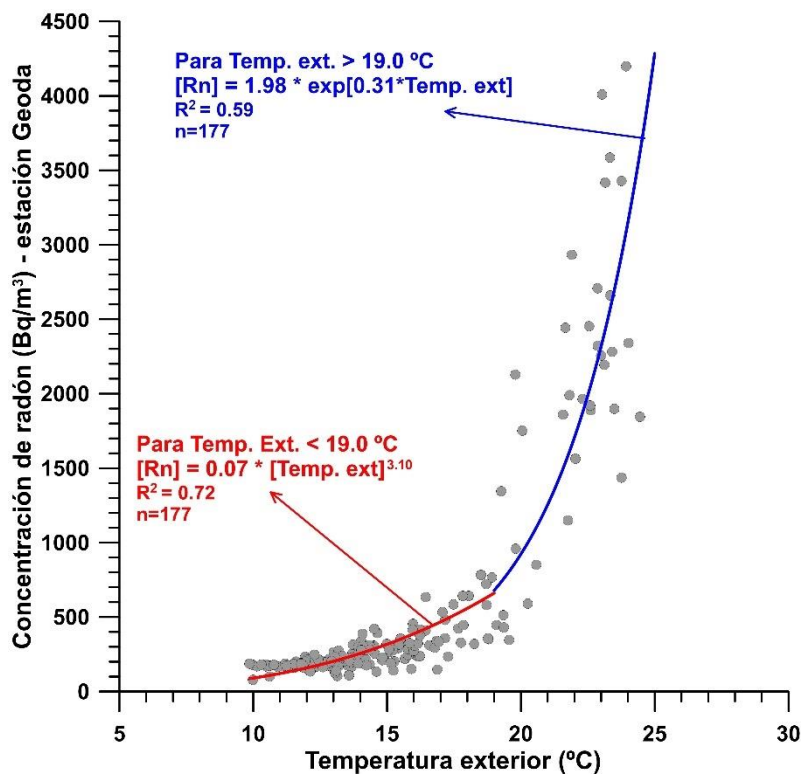


Figura 11: Estimación de concentración de radón con respecto variación de temperatura.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos estimados de Geoda.

A partir de esta relación entre la temperatura exterior y los niveles de radón, se ha estimado la serie de concentración del gas para el periodo de registro y compararla con los datos reales de radón obtenidos en la estación de la Geoda (Figura 12). Se observa que los valores de radón estimados son muy parecidos a los reales, la mayor dispersión la encontramos con valores altos de radón, pero en términos generales, se puede considerar que el ajuste y la estimación de la concentración de radón a partir de la temperatura exterior es válida.

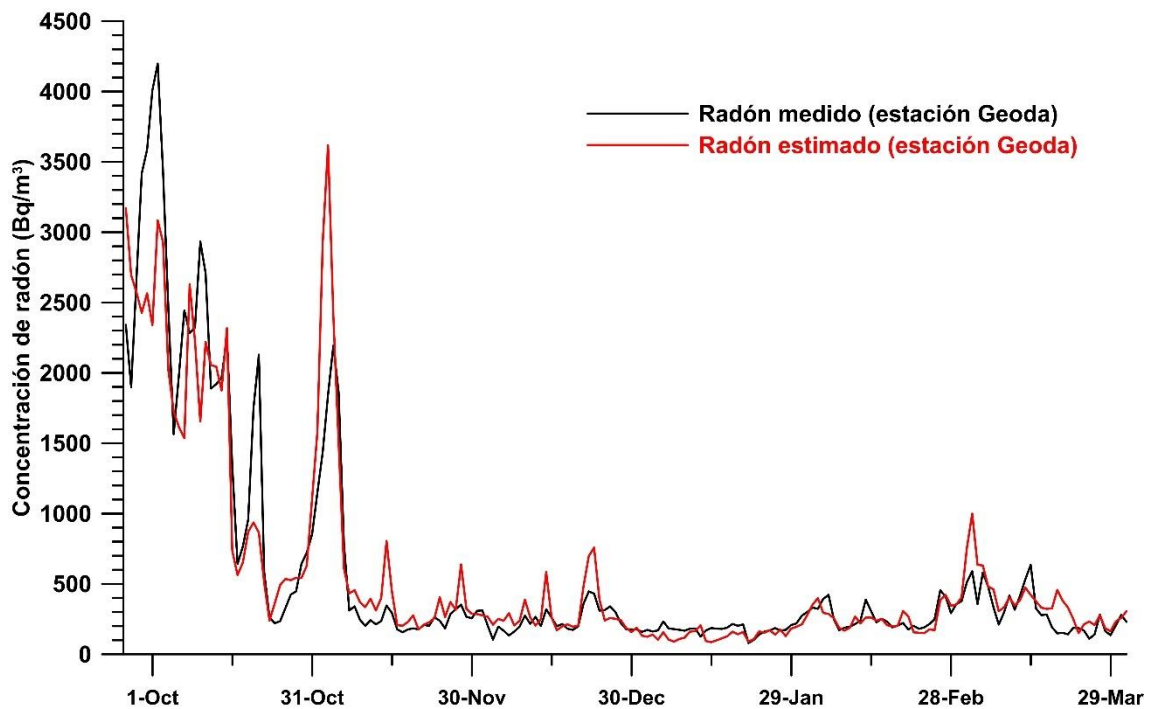


Figura 12: Comparación datos reales con estimados.

Fuente: Obtenidos a partir de las fórmulas de ajuste.

Tras este primer paso y a partir de las fórmulas obtenidas en el ajuste de la Figura 11, sería posible estimar los valores de radón en cada estación de control en función de la evolución de la temperatura exterior a lo largo de un año completo. Para ello, se han evaluado en primer lugar la relación entre la concentración de radón en la estación de la Geoda y los niveles del gas en las otras tres estaciones de control (Luminiscencia, Polvorín y Geoda Partida) (Figura 13).

Los niveles estimados más exactos de radón a partir de las series registradas en la Geoda corresponden a la estación de Geoda Partida, ya que es la estación que se encuentra más cercana a la Geoda. La estación Polvorín es la más alejada a la Geoda y la más ventilada de manera natural posee un peor ajuste con la estación Geoda.

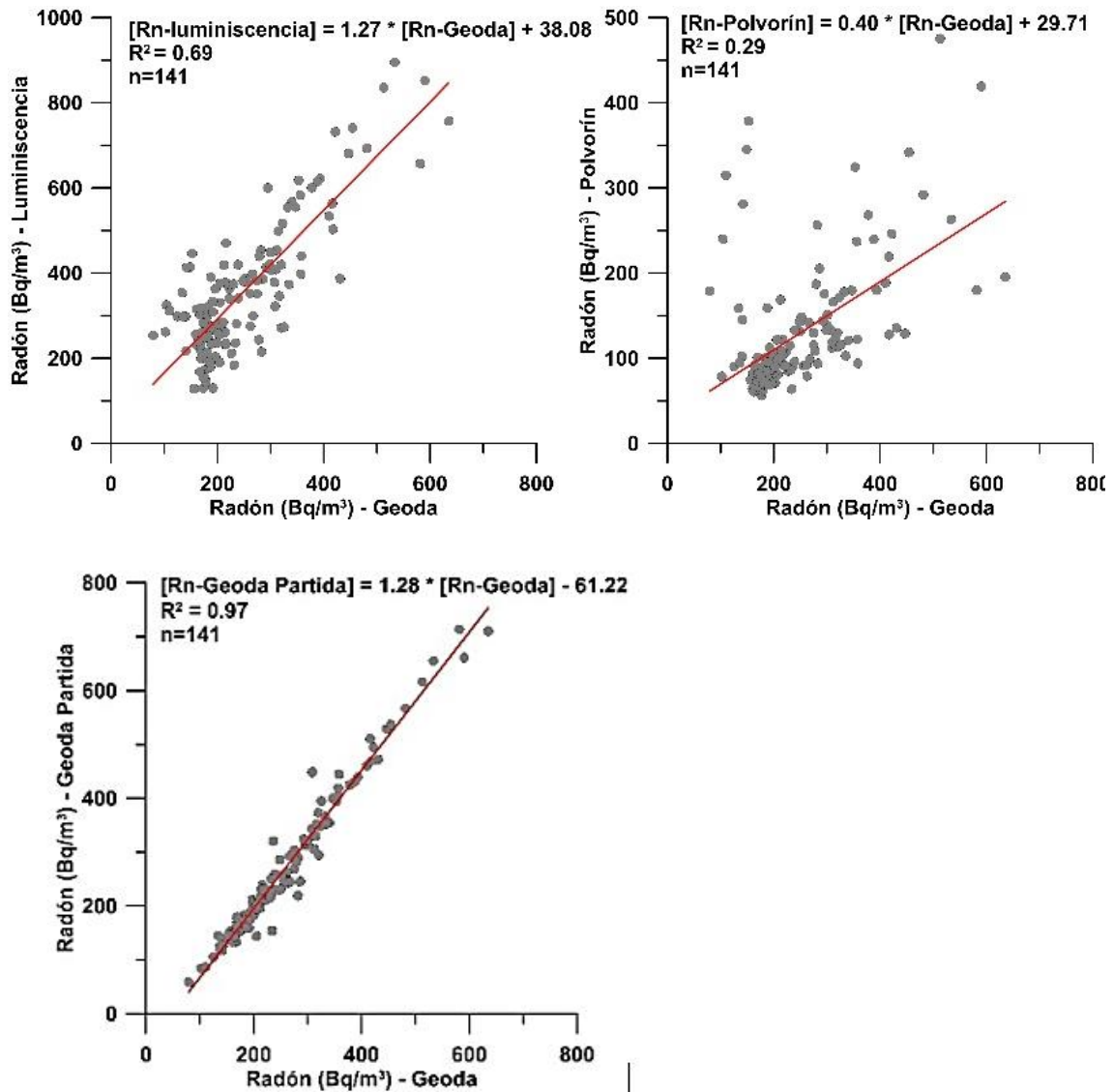


Figura 13: Ajuste en la estación de G.Partida, Polvorín y Luminiscencia.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos de ajuste en Geoda.

En función de las ecuaciones lineales que definen la relación entre el radón en cada estación con el registrado en la estación Geoda (Figura 13) y usando la temperatura exterior durante un ciclo anual completo como variable de estimación de radón, se ha reconstruido las series de concentración de radón en cada punto de la mina para un ciclo completo (desde el 01/04/2019 hasta el 31/02/2020).

Las correspondientes series de radón anuales se representan en la Figura 14. Los valores más altos de radón se obtienen en Luminiscencia, Geoda y Geoda Partida tendrían valores muy parecidos ya que se encuentran muy próximas entre sí, y Polvorín sería la galería con menos niveles de radón ya que es la que mayor ventilación natural posee, tal y como se ha mencionado anteriormente.

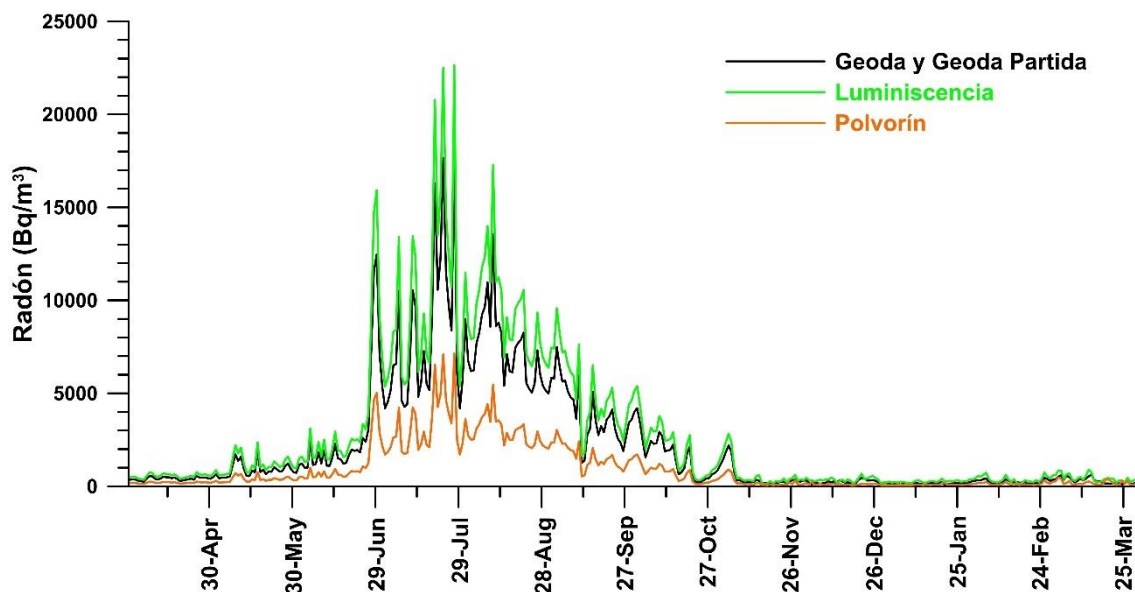


Figura 14: Niveles de radón estimado en las cuatro estaciones de control.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos estimados.

A partir de las series anuales completas de radón (Figura 14) se puede estimar la dosis acumulada en un año teniendo en cuenta las variaciones en la concentración del gas controladas por la evolución diaria de la temperatura media en el exterior. La Figura 15 muestra como hubiera sido la evolución de la dosis acumulada (expresada en mSv), estimada para un ciclo anual completo (desde el 01/01/2019 hasta el 31/03/2020) y para un guía-tipo que efectuara una visita diaria a la mina durante 95 minutos, de acuerdo con los datos del régimen de visitas comentado anteriormente.

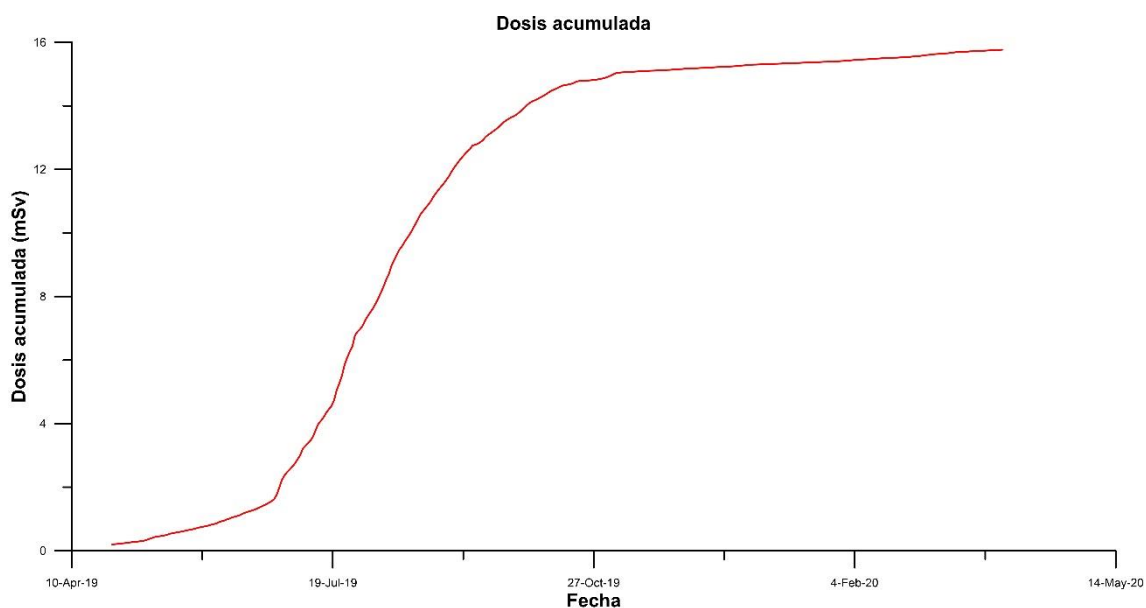


Figura 15: Dosis acumulada estimada para el periodo de un año.

Fuente: Obtenidos a partir de los datos estimados.

Vemos como la dosis acumulada ha pasado de 2mSv en la primera estimación (Figura 10) a 16mSv en esta estimación final.

Para comprobar finalmente si esta estimación se ajusta a los datos reales de radón para un año habría que esperar a que se complete una medición anual y volver a realizar el estudio para calcular la dosis acumulada real.

6. CONCLUSIONES

La principal conclusión que se obtiene de este trabajo es que el radón correlaciona muy bien con la diferencia de temperatura existente entre el exterior e interior de la mina, pudiendo utilizar este parámetro para estimar niveles de radón futuros.

Con respecto a la dosis acumulada, la Unión Europea en zonas controladas como es la Geoda Gigante de Pulpí, recomienda que no se sobrepasen los 20 mSv al año para los trabajadores, llegando a permitir 50 mSv/año siempre y cuando no se sobrepasen los 100 mSv en 5 años.

En el estudio se ha obtenido un valor máximo de dosis anual recibida de 16mSv al año para un trabajador que trabaja 1,5h al día durante todo el año, siendo el total estimado de 550h trabajadas al año en el interior de la mina.

Los guías de la Mina Rica trabajan 30h semanales, de las cuales alrededor de 20h como máximo suelen permanecer en el interior de la mina. Esto supone unas 80h mensuales y por tanto si solo trabajasen 10 meses al año, realizarían unas 800h anuales. Esto supondría una dosis acumulada de unos 23mSv al año sin tener en cuenta la estación del año en la que trabajen ni el número de veces que lo hagan al día, y en un periodo de 5 años se llegaría a una dosis acumulada de 116 mSv.

Aun teniendo en cuenta que se trata de una estimación muy inicial, es evidente que, en un futuro, cuando ya se tengan datos más directos, se deberán establecer horarios y periodos de trabajo anuales donde se procure que los guías y personal de mantenimiento adecúe su periodo laboral para no sobrepasar los niveles recomendados de dosis recibida. Para la mejora de las condiciones laborales, no cabe duda de que además de la mejora de los sistemas de ventilación se tendrán que valorar otras opciones como reducir el número de entradas totales de los guías y/o aumentar la plantilla de trabajadores.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACTE. (s.f.). *Asociación Cuevas Turísticas Españolas*, de ACTE. Consultado junio 2020. <http://www.cuevasturisticas.es/geoda-de-pulpi-y-mina-rica>
- Alonso-Hernández, & Eulogio, H. (2015). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales* (Tesis Doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, 1-10.
- Alvarez-Gallego, M., García-Anton, E. F.-C., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, Angel & Sanchez-Moral, S. (2015). *High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castañar cave, Spain)*. *Journal of Environmental Radioactivity* 145: 19-29.
- Álvarez Gallego, M. (2015). *Variabilidad de la concentración de radón-222 como gas trazador de procesos geodinámicos en ambientes subterráneos* (Tesis Doctoral). Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, 14-23, 98-113.
- Anjos, R., Umisedo, N., & da Silva, A. (2010). Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Environmental Radioactivity*, 101: 153-158.
- Calaforra Chordi, J. M., Romero, Á., García-Guinea, J., Guerrero, M., & Moreno, R. (2001). *La Geoda gigante de Pulpí: Patrimonio geológico y minero*.
- Calaforra, J. M., Gázquez, F., Guerrero, M., García-Guinea, J., & Fernández-Cortés, Á. (2020). La Geoda Gigante de Pulpí. *Un hito en la conservación y puesta en valor del patrimonio geológico y minero* (Informe). *Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (en prensa)*.
- Fernández-Bolera, E (2014). *Minas y mineros en el Pilar de Jaravía y su entorno (Pulpí): Una aproximación histórica y patrimonial (1840-1936)*. Arráez editores, S.L. 256.
- Fernández-Cortes, A., Calaforra, J. M., Sánchez-Martos, F., & Gisbert, J. (2006). *Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): Technical criteria for conservation* (Estudio). *International Journal of Climatology* 26: 691-706.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Badino, G., & Forti, P. (2014). *Estrategias de conservación de los cristales gigantes de yeso. José María Calaforra y Juan José Duran (Ed). I Congreso Iberoamericano y V Congreso Español Sobre Cuevas Turísticas*, 308-309. Aracena, España.
- ICRP. (1994). *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. Pergamon. Obtenido de https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_24_1-3

Instituto Sindical de Trabajo, A. y.-C. (2017). *Exposición laboral al radón Guía para la prevención* (Guía). QAR Comunicación, SA, 2-15.

LaRUC, L. d. (2019). *El gas Radón en el ámbito Laboral*. Secretaria de Salud Laboral y Medio Ambiente UGT-CEC (Ed), 13-20.

País, El. (28 de Nov de 2019). *La UE expedienta a España por no aprobar la normativa sobre el gas radón*. Consultado: Mayo 2020. https://elpais.com/sociedad/2019/11/28/actualidad/1574966107_501969.htm

Palero, F., Canals, À., Van Driessche, A., & García-Ruíz, J. M. (2015). *Interpretando la Mina Rica (Pulpí, Almería): Estructura, Mineralogía y Geoquímica*. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 20: 113-114.

Przylibski, T. (2001). Radon and its daughter products behaviour in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Ztoty Stok (Sudety Mountains, Sw Poland). *Enviromental Radioactivity*, 57: 87-103.

Pulpí, A. d. (s.f.). *La Geoda de Pulpí*. Obtenido de Conoce la Geoda de Pulpí. Consultado mayo 2020:<http://www.geodapulpi.es/Servicios/cmsdipro/index.nsf/informacion.xsp?p=Geoda&documentId=8E39839582DA476AC1258424003061B6>

Quarto, M., Puglise, M., Loffredo, F., Zambella, C., & Roca, V. (2014). *Radon measurements and effective dose from radon inhalation estimation in the Neapolitan catacombs*. *Radiation Protection Dosimetry*, 158(4): 442-446.

Quindós, L., Soto, J., & Villar, E. (s.f.). *La relación Bi-214/Pb-214 como trazador en los procesos de difusión atmosférica* (Informe). Universidad de Santander, Departamento de Física Fundamental, Santander. 45-47 https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/1150/1/TyC_1983_1_05.pdf

Solomon, S., Langroo, R., Lyons, R., & James, J. (1996). *Radón exposure to tour guides in Austrian show caves*. *Enviromental International*, 22: S409-S413.