

## RASTREO DE Rn-222 EN ÁREAS VOLCÁNICAS DE PANAMÁ

### TRACKING OF Rn-222 IN VOLCANIC AREAS OF PANAMA

#### **Omayra Janeth Pérez Castro**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,  
Departamento de Física. Panamá

<https://orcid.org/0000-0002-7080-5598>

Autor de correspondencia: [omayra.perezc@up.ac.pa](mailto:omayra.perezc@up.ac.pa)

#### **Bernardo Fernández García**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,  
Departamento de Física. Panamá

<https://orcid.org/0000-0002-7947-3147>

[bernardo.fernandezg@up.ac.pa](mailto:bernardo.fernandezg@up.ac.pa)

#### **Luis Antonio Marín Díaz**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,  
Departamento de Física. Panamá.

<https://orcid.org/0000-0001-8580-4128>

[luis.marin-d@up.ac.pa](mailto:luis.marin-d@up.ac.pa)

#### **Juan Manuel Rodríguez Cisneros**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,  
Departamento de Física. Panamá

<https://orcid.org/0000-0002-2013-6752>

[juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa](mailto:juan-m.rodriguez-c@up.ac.pa)

Recepción  
26/01/2024

Aprobación  
21/04/2024

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v34n2.a5334>

## Resumen

El mapa de la radiación de fondo de la región occidental de la República de Panamá muestra un mayor fondo radiactivo, en áreas volcánicas. Estas áreas coinciden con zonas termales identificadas. Se estudió los niveles de gas radiactivo derivado del uranio (el radón), en esas zonas volcánicas de la República de Panamá. Los resultados señalan la presencia, medible, de una mayor actividad del radón, en áreas volcánicas. Los resultados se contrastaron con los de otras zonas no volcánicas, como la de "Arraiján". Entre los sitios volcánicos evaluados, la zona de Cerro Pando, que también es termal, se destacó por presentar los niveles más elevados de radón. Estos datos respaldan la hipótesis señalada por varios autores sobre la existencia de una correlación entre la actividad volcánica y la concentración de radón en las regiones termales, pues su actividad es influenciada por procesos geotérmicos. Es decir, las regiones termales pueden albergar concentraciones más altas de radón y nuestros resultados apuntan hacia una confirmación de dicha hipótesis. Este estudio no sólo contribuye al conocimiento de la distribución del radón en el territorio panameño, sino que también plantea una base para futuros trabajos sobre los posibles riesgos asociados a altas exposiciones, en caso de que estas existan, para establecer criterios básicos y así proponer regulaciones de la actividad humana en zonas con estas condiciones. Para la detección de radón se utilizó el RAD 7, un equipo que ha demostrado ser una herramienta efectiva para la detección y medición precisa en dichas áreas.

**Palabras clave:** Fondo radiactivo, radiación, Panamá, radón, volcanismo, termal.

## Abstract

The map of Panama shows a greater radioactive background, in volcanic areas. These areas coincide with identified thermal zones. In these thermal zones of the Republic of Panama, the incidence of a radioactive gas derived from uranium (radon) was studied. The results indicate the measurable presence of radon activity, particularly in areas with volcanic manifestations. This contrasts with other non-volcanic areas, such as Arraiján. Among the volcanic sites evaluated, the Cerro Pando area stood out for presenting the highest levels of radon. These data support the hypothesis indicated by several authors about the existence of a correlation between volcanic activity and the concentration of radon in thermal regions as it is influenced by geothermal processes. That is, thermal regions can host higher concentrations of radon, which in our case suggests confirmation of this hypothesis. This study not only contributes to the knowledge of the distribution of radon in the Panamanian territory, but also provides a basis for future research on the possible risks associated with high exposures, if these exist, to establish basic criteria and thus propose regulations for the human activity in areas with these conditions. For the detection of radon, the RAD 7 was used, a device that has proven to be an effective tool for the detection and precise measurement in these areas.

**Keywords:** Radioactive background, radiation, Panamá, radon, volcanism, thermal.

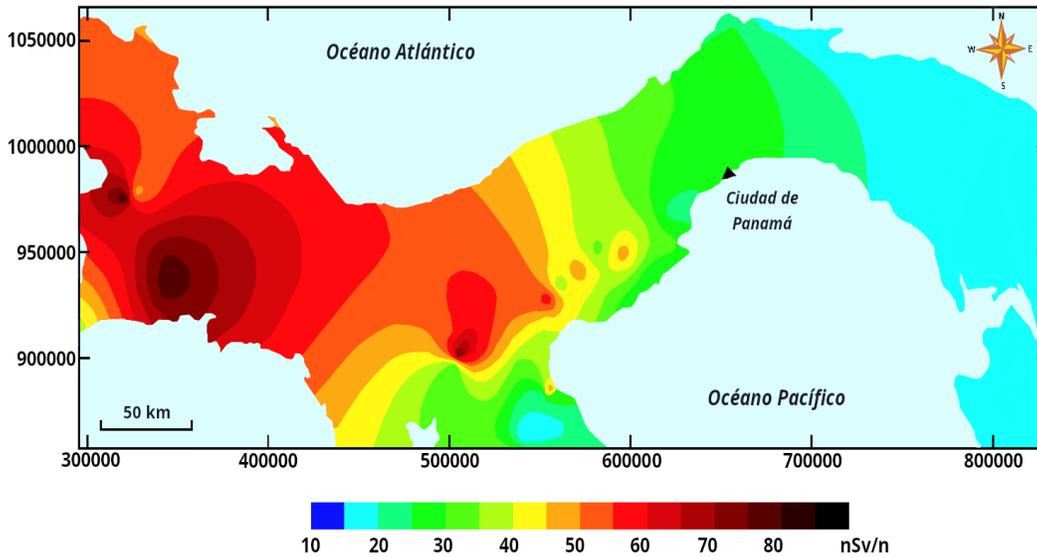
## Introducción

El uranio 238 es un elemento natural radiactivo que emite partículas alfa y es el isótopo padre del radón 222 (Rn-222). Básicamente se encuentra en casi todas las rocas de la corteza terrestre superior, con una concentración promedio de 2,8 µg/g, (Balaram et al., 2022), aunque a veces está en cantidades muy pequeñas, entre (2-6) ppm (Segura, 2022). Además, en casi todo el mundo, se procesa aproximadamente un total de mil millones de metros cúbicos de uranio, con fines básicamente energéticos o militares (Balaram et al., 2022) y esta actividad expone al ser humano a un exceso de radiación del uranio. Por otro lado, estudios como el de Otton (citado en Ramos, 2018) indican que los isótopos de uranio se localizan, de forma natural y en mayor cantidad, en rocas volcánicas, principalmente de tipo granito o lutitas oscuras y en sedimentos de rocas que contienen fosfato y las que se derivan de estas. También se encuentra en minerales volcánicos como la uraninita, monacita y circón (Sasaki et al., 2017). Por ello, debería haber un interés especial en el estudio de la radiación por radón que proviene del uranio en las áreas volcánicas con el interés de tomar medidas de protección radiológica, en el caso requerido.

Un mapa preliminar sobre la radiación de fondo de la República de Panamá (Figura 1), usando un detector de radiación ambiental, modelo Exploranium GR320, fue elaborado por los colaboradores de la estación RN50 del CTBTO (siglas en inglés de la organización que administra el Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares, TPCEN).

**Figura 1.**

Mapa de la radiación de fondo de la región occidental de la República de Panamá.



El mapa de la radiación de fondo de la región occidental de la República de Panamá muestra, por lo menos, cuatro áreas con valores de radiación más altos que el resto. Las áreas identificadas con estos valores coinciden con una geología caracterizada por la existencia de rocas de origen volcánico. Se trata de los sitios termales identificados en un estudio hecho por el IRHE-810-0LADE (Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación - Organización Latinoamericana de Energía - Banco Iberoamericano de Desarrollo, 1987) sobre la geología volcánica relacionada con la presencia de aguas termales en Panamá. Estas áreas son: El Volcán Barú, El Valle de Antón, La Yeguada y Tonosí-Pedasí. Por ello suponemos que esto es indicador de la presencia del Rn-222.

Sobre la relación entre volcanismo y radón, la literatura indica que las fallas geológicas activas, las cuales son comunes en áreas volcánicas, son buenas conductoras de la desgasificación del terreno (Sosa, 2023). Esa desgasificación se encuentra generalmente correlacionada positivamente con la concentración del gas radón en el suelo, el cual es una de las fuentes principales de la radiación de fondo. Meza et al. (2018) exploraron la relación entre la sismicidad de fracturas y las emisiones de radón-222, en la región volcánica de los Coconucos (El Cauca,

Colombia). Allí identificaron anomalías en las concentraciones de gas radón que excedían los valores promedio y que, además, mostraron correlación con la presencia de sismos de magnitudes locales (normalmente conocida como magnitud Richter).

Sobre la relación entre la presencia de aguas termales y radón, se ha observado que ambas son características comunes en las regiones volcánicas. Según el estudio “Calderas volcánicas y su relación con recursos geotermales en el sur del Perú” de Díaz y Gómez (2021), las aguas termales provienen de la infiltración de aguas de lluvia que se han producido en diferentes tiempos geológicos. Este estudio explica que las aguas meteóricas, al filtrarse a través de fallas o fracturas geológicas, aumentan su temperatura por el gradiente geotérmico. Díaz y Gómez también sugieren que, en ciertas condiciones, estas aguas se calientan adicionalmente por la presencia de cuerpos magmáticos y focos calientes situados en regiones volcánicas durante la fase de distensión tectónica. Además, identifican que las estructuras conocidas como calderas volcánicas se forman cuando la cámara magmática subyacente se vacía parcialmente, causando el hundimiento del terreno superior. Este fenómeno no solo indica la presencia de cuerpos magmáticos y focos calientes, que a su vez calientan las aguas infiltradas generando reservorios geotérmicos, sino que también destaca su potencial como fuente de energía geotérmica.

Otros autores indican que la circulación profunda de estas aguas termales hace que, en el trayecto, se enriquezcan con elementos radiactivos procedentes de minerales uraníferos emplazados en diferentes partes de la sección geológica atravesada, principalmente en su porción volcánica (Villalba et al., 2015). De allí la presencia de radón en aguas termales.

En el convenio de cooperación técnica “IRHE-810-0LADE” de 1987, se incluyó la realización de un “Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional”. En él se señala que se trata de una evaluación crítica de la información existente sobre las condiciones geológicas, estructurales e hidrotermales, así como estudios fotogeológicos y de imágenes de satélite, de toda la región occidental de Panamá, en búsqueda de recursos geotérmicos de alta entalpía. Las áreas que se

encontraron como prometedoras para cumplir con el objetivo del estudio están indicadas en la Figura 2: a) Complejo del Volcán Barú, b) La Yeguada, c) El Valle de Antón y d) Tonosí-Pedasí.

**Figura 2.**

*Puntos de medición y su ubicación en un mapa topográfico de la República de Panamá.*

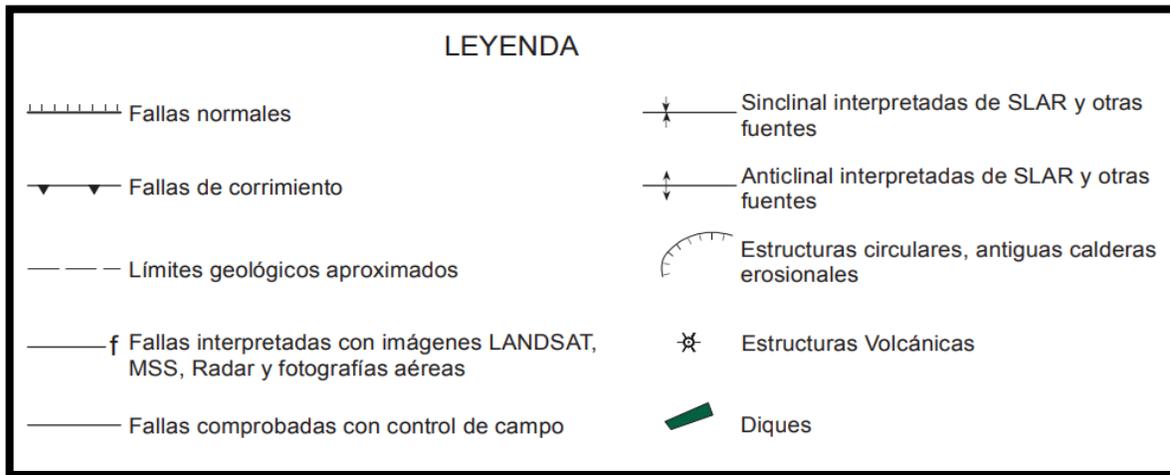


*Nota:* Adaptado del Mapa topográfico de Panamá, por El CapitalFinanciero.com, enero 10 de 2011 (<https://elcapitalfinanciero.com/minas-potencial-vs-sacrificio-ambiental/>).

Según informes de Recursos Minerales del Ministerio de Comercio e Industrias de Panamá, la cartografía geológica revela, por su interés particular, una variedad de formaciones y características geológicas. Dentro de este espectro geológico, se pueden observar fallas geológicas y estructuras volcánicas, todas meticulosamente identificadas y clasificadas según la leyenda que se presenta en la figura 3.

**Figura 3.**

*Leyenda de fallas geológicas y estructuras volcánicas identificadas en el mapa geológico de la República de Panamá. Dirección de Recursos Minerales – Ministerio de Comercio e Industrias (2018).*



En la figura 4., presentamos partes del mapa geológico, que proporcionan información detallada sobre la composición, estructura, y procesos geológicos locales, lo que sirve como un recurso integral para la comprensión de la diversidad geológica de Panamá. El estudio de estos elementos es crucial, ya que permite una mejor comprensión de los fenómenos terrestres en la región y posibilita la identificación de áreas propicias para la exploración de zonas volcánicas.



Panamá, por ser de formación relativamente reciente dentro del contexto del continente americano, hipotéticamente debería tener una actividad volcánica intensa como es el caso de los países centroamericanos. Ese volcanismo debería estar acompañada de una alta detección de radón, en esas zonas.

Además, Panamá, siendo parte de América Central, al igual de los demás países de esta región, debería contar con una alta actividad sísmica y volcánica. Si ese fuera el caso, la actividad sísmica y volcánica indicarían que no es un sitio recomendable para construir un canal interoceánico, necesario para el comercio mundial, a pesar de ser un estrecho Istmo. Pero los hechos señalan que Panamá no tiene esas esperadas: alta sismicidad y volcanismo. La sismicidad registrada por el Instituto de Geociencias (UP) así lo indica. Si Panamá fuese un lugar con alta actividad volcánica, encontrar niveles altos de radón, en las áreas volcánicas, así como otros parámetros típicos del vulcanismo, podrían ser las señales. Pero como veremos en este trabajo, tampoco se registran altos niveles. Es probable que estas dos situaciones de poca sismicidad y bajo volcanismo, que hacen a Panamá diferente del resto de América Central (Centroamérica), se deban a la forma como se dio la evolución geológica particular del Istmo de Panamá y lo hace geográficamente diferente del resto de América Central. De allí la confirmación de que es necesario hacer la diferencia entre “Centroamérica” y América Central, no sólo desde la perspectiva histórica, sino también desde la geología. Los niveles de radón, al igual que otros parámetros típicos del vulcanismo, nos indican, que Panamá es un lugar con baja actividad volcánica. \_

## **Materiales Y Metodos**

A inicios de la presente década, como parte de una iniciativa de la estación RN50, alineada con su compromiso de contribuir con la salud pública en el dominio de la protección radiológica, se hicieron una serie de exploraciones iniciales para detectar la actividad de radón en dos áreas de fácil acceso. Para las mediciones se escogieron dos tipos de sitios representativos de la presencia y ausencia de volcanismo:

a) para la región no volcánica: dos escuelas de Panamá, una en la Región Educativa de Panamá Centro y otra en la Región Educativa de Panamá Norte (Marín, L. 2020).

b) para la región de origen volcánico: el Valle de Antón (Santana, L., 2022).

Además de su representatividad, estas primeras exploraciones tenían la finalidad de familiarizarse con el equipo RAD7. En la primera exploración, establecer las condiciones de base para las mediciones y estudiar las rutinas con las que contaba el equipo. En la segunda, determinar el modo de trabajo de medición de radón en tierra (zona volcánica), en una zona tropical como la de Panamá, en la que las condiciones de pluviosidad y humedad del suelo pueden afectar la detección (Santana, L., 2023). Con los resultados de estas primeras exploraciones, se pudo establecer un plan de trabajo y diseñar una metodología orientada al estudio de la medición de la actividad del radón, en el suelo, en áreas de interés de origen volcánico, que en general son de mayor dificultad de acceso: La Yeguada, El Volcán Barú y Tonosí. Con estas exploraciones se determinó que la mejor estación climática para detectar mayor actividad de radón en la tierra es la estación climatológica llamada seca (1 de noviembre al 31 de marzo).

A manera de contraste (o referencia) se escogió una zona simple. Un lugar donde, en principio, no había manifestaciones de actividad volcánica (manifestaciones como fallas, estructuras de origen volcánico, entre otras), una zona de fácil acceso, cercana, en el distrito de Arraiján, provincia de Panamá Oeste.

Se tomó en cuenta la necesidad de contar con un equipo robusto y adaptable a trabajos de campo, que pudiese resistir y funcionar en distintas condiciones ambientales. Además, que fuese un instrumento versátil, portátil, de lectura simple y poco procesamiento inicial de la data, con modalidades de medición orientados al rastreo y medición en tierra. Para ello, se eligió el RAD7 (figura 5) para los muestreos. Posee una sólida construcción y un diseño ergonómico. Para nuestros propósitos, lo hace menos vulnerable a condiciones ambientales adversas, garantizando, en situaciones variadas, la integridad de las mediciones. Las mediciones hechas en las localidades de interés se almacenan. Además, permite elaborar gráficos de barras detallados y suministrar toda la información necesaria, para poder hacer, posteriormente, un análisis exhaustivo. O sea, los datos recopilados pueden ser visualizados directamente en el dispositivo o exportados a un computador para su análisis y procesamiento adicional, facilitando así la interpretación y comparación de los resultados.

El equipo es fabricado por la empresa DurrIDGE. Se trata de un espectrómetro de estado sólido de alta precisión y sensibilidad, fue diseñado para detectar y cuantificar gases nobles (incluye radón) en diversas matrices y entornos (DURRIDGE Company Inc., 2014). Su sistema de purga, para no afectar la precisión de las mediciones, se asegura de que el aire medido esté bastante libre de contaminantes. Con ese fin, está equipado con una cámara de detección avanzada y un sistema eficiente de purga, lo que le permite realizar mediciones confiables y precisas, que incluye estudios en condiciones ambientales variables.

**Figura 5.**

*Equipo de detección de radón, RAD7.*



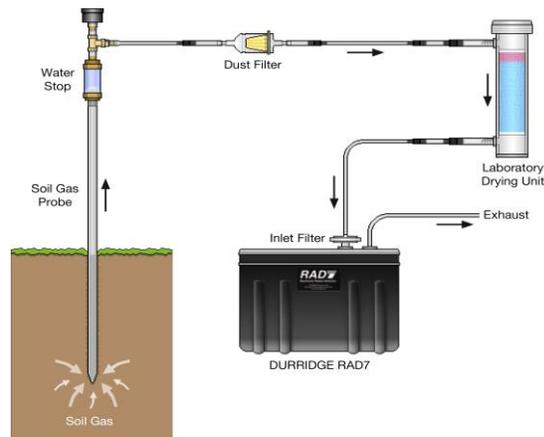
*Nota.* Adaptado del manual de usuario del Detector de Radón RAD7.

<https://durrige.com/documentation/RAD7%20Manual%20Spanish.pdf>

La medición de radón en el suelo utilizando el RAD7 implica un proceso meticuloso para garantizar resultados precisos y fiables. Inicialmente, se lleva a cabo una selección cuidadosa del sitio de medición, que debe ser representativo del área de estudio y estar libre de interferencias. La preparación adecuada del equipo es crucial; el RAD7 debe estar calibrado y configurado correctamente, asegurando su óptimo funcionamiento. Una vez preparado el equipo y seleccionado el sitio, se procede a la instalación de una sonda o tubo de acceso al suelo (figura 6). Esta sonda se introduce hasta una profundidad que se considera adecuada, basándose en los objetivos de la medición y las características específicas del suelo. Posteriormente, se conecta el tubo de muestreo del RAD7 a la sonda instalada, asegurando un sellado hermético en todas las conexiones para evitar contaminaciones con el aire ambiente.

**Figura 6.**

*Configuración estándar de la sonda para medición en suelo.*



*Nota.* Descripción adaptada de *SOIL GAS PROBE* (p. 8), por DurrIDGE, 2022. (<https://durrIDGE.com/documentation/Soil%20Gas%20Probe%20Manual.pdf>)

Antes de iniciar la medición, es esencial purgar el sistema, eliminando cualquier traza de aire ambiente y asegurando que solo se mida el radón proveniente del suelo. Una vez que el sistema está establecido y purgado, el RAD7 comienza a registrar las concentraciones de radón durante un periodo predeterminado, que puede variar en función del modo seleccionado.

En nuestro caso específico, debe ser el modo GRAB y la duración es de 30 minutos por punto. Al finalizar el periodo de medición, los datos recopilados son primeramente almacenados en una memoria interna del propio detector. Una vez descargados en un computador, los datos pueden ser analizados detalladamente con un software específico para el equipo “Capture de DurrIDGE”, que permite exportar los datos para su análisis en softwares específicos, destinados para tal fin, por ejemplo, Qtiplot.

El software permite visualizar la actividad por unidad de volumen en cada punto de medición, junto con la incertidumbre asociada, o elegir un conjunto de lecturas (puntos) y realizar tratamientos estadísticos, haciendo correcciones automáticas de los resultados al considerar condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, ya que pueden influir en estos últimos.

Nuestras zonas estudiadas son aquellas donde se han encontrado manifestaciones de aguas termales, que en general, están asociadas a actividad de tipo volcánica. Como se mencionó previamente estas son: El Valle, en Coclé, La Yeguada, en Veraguas, Tonosí, en Los Santos y Caldera, en Chiriquí. Se agregó Cerro Pando, por sus cualidades especiales identificadas “in situs”. A continuación, se presenta información que describe las zonas de estudio, como su extensión superficial y las coordenadas geográficas (Tabla 1).

**Tabla 1.**

*Extensión de las áreas exploradas y sus correspondientes coordenadas geográficas.*

Ubicación	Área de estudio (m <sup>2</sup> )	Coordenadas
El Valle	10 000	8°35'51.1"N 80°08'15.4"W
Cerro Pando	74 000	8°52'06.5"N 82°41'35.4"W
Caldera 1	130 000	8°39'59.1"N 82°20'53.8"W
Caldera 2	100 000	8°38'01.3"N 82°21'18.4"W
La Yeguada	330 000	8°30'51.4"N 80°54'07.7"W
Tonosí	50 000	7°27'20.1"N 80°36'25.2"W
Arraiján	10 000	8°57'16.1"N 79°40'49.7"W

Una vez hechas las mediciones, se efectúa un análisis exploratorio de los datos (AED) utilizando el software Qtiplot, el cual nos permite emplear diversos métodos gráficos de visualización y tratamientos estadísticos de la información. Este análisis exploratorio tiene como objetivo principal descubrir y entender posibles relaciones entre las diferentes variables de estudio, estudiar la naturaleza y distribución de los datos, identificar patrones subyacentes y detectar comportamientos inusuales, o atípicos, en el conjunto de datos.

El AED, mediante el uso de Qtiplot, facilita la manipulación de los datos, permitiendo identificar tendencias, correlaciones y características clave del conjunto de datos, lo que resulta crucial para la toma de decisiones informadas y la formulación de hipótesis sólidas en trabajos subsiguientes.

**Figura 7.**

Fotografías de las mediciones realizadas en algunos de los puntos de interés. Estos sitios son: Tonosí (Azüero), La Yeguada (Veraguas), Caldera (Chiriquí) y Cerro Pando (montaña fronteriza entre Costa Rica y Panamá, que marca un tripunto entre las fronteras de las provincias de Bocas del Toro y Chiriquí y la línea fronteriza con Costa Rica).



Tonosí



La Yeguada



Caldera



Cerro Pando

## Resultados

Para determinar si los niveles de Radón son significativamente “altos” en regiones de manifestaciones de tipo termal (pozos termales), primero se muestran los resultados de la medición de radón en el suelo de una zona panameña sin manifestaciones geológicas de tipo volcánica, en este caso, en una zona específica de Arraiján, Provincia de Panamá Oeste. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Valores de la radiactividad por unidad de volumen medida en distintos puntos de la zona de referencia, ubicada en Arraiján, su valor promedio y las desviaciones.*

Medición	Actividad ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
Punto 1	(0 ± 71)
Punto 2	(0 ± 71)
Punto 3	(0 ± 71)
Punto 4	(8 ± 16)
Punto 5	(0 ± 71)
Punto 6	(30 ± 30)
Punto 7	(55 ± 45) *
Punto 8	(0 ± 71)
Punto 9	(18 ± 26)
Punto 10	(0 ± 71)
<b>Promedio</b>	<b>(14,5 ± 8,4)</b>

Utilizando estos valores como referencia de la actividad de radón en áreas panameñas no volcánicas, podemos realizar una comparación con las que han sido designadas como áreas de interés. Esta comparación permite entender de manera más profunda las diferencias y similitudes entre estos dos tipos de zonas, y establecer si existen variaciones significativas en los niveles de radón presentes.

Este análisis es crucial para determinar las potenciales implicaciones y

riesgos asociados con la presencia de radón en diferentes entornos, y contribuirá a la formación de estrategias más informadas y efectivas para el monitoreo y manejo de este elemento radiactivo en diversas localidades.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas en las áreas de interés.

### **Tonosí**

En Tonosí, se presenta una afloración natural de aguas termales y la zona de medición es atravesada por un río de la localidad (Río Tonosí). Esto podría influir en la actividad medida en la zona, a causa de la intrusión de agua.

**Tabla 3.**

*Valores de la actividad radiactiva por unidad de volumen medida en distintos puntos de la zona de interés de Tonosí, y su valor promedio.*

Ubicación	Actividad ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
Punto 1	(1 110 ± 230)
Punto 2	(2 480 ± 340) *
Punto 3	(520 ± 150)
Punto 4	(193 ± 93)
Punto 5	(16 ± 32)
Punto 6	(320 ± 120)
Punto 7	(290 ± 120)
Punto 8	(2 090 ± 310)
<b>Promedio</b>	<b>(877 ± 71)</b>

### La Yeguada

En la región de La Yeguada se presentan ojos de agua termal, además de rocas de origen volcánico. Cercano a la zona, según los moradores, se encuentra lo que sería el cráter del volcán La Yeguada. En esta zona, debido a las dificultades de movilización (topografía compleja), se realizaron mediciones en los puntos de más fácil acceso. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Valores de la actividad radiactiva por unidad de volumen medida en distintos puntos de la zona de interés de La Yeguada, y su valor promedio.*

Ubicación	Actividad ( $Bq/m^3$ )
Punto 1	(6 270 ± 530)
Punto 2	(1 920 ± 290)
Punto 3	(2 140 ± 310)
Punto 4	(1 160 ± 230)
Punto 5	(270 ± 120)
Punto 6	(8 530 ± 620) *
Punto 7	(6 470 ± 530)
<b>Promedio</b>	<b>(3 820 ± 160)</b>

### El Valle

En la zona de El Valle donde se realizaron las mediciones, no se encontraron manifestaciones superficiales de aguas termales naturales, por el contrario, las aguas termales a las que se tiene acceso son extraídas mediante perforaciones a

nivel del suelo y posteriormente desviadas hacia otros puntos. Debido a que los terrenos colindantes con la zona de medición son privados, se tuvo limitaciones con respecto a la cantidad de puntos en los que se podía medir. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Valores de la radiactividad, por unidad de volumen, medida en distintos puntos de la zona de interés de El Valle, y su valor promedio.*

Ubicación	Actividad ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
Punto 1	(1 410 $\pm$ 250)
Punto 2	(2 100 $\pm$ 300) *
Punto 3	(280 $\pm$ 110)
Punto 4	(20 $\pm$ 28)
<b>Promedio</b>	<b>(1 000 <math>\pm</math> 100)</b>

**Cerro Pando**

Cerro Pando es una zona montañosa caracterizada por la presencia de varios ojos de aguas de tipo termal que no han sido intervenidos por el hombre. De los puntos de interés, donde fueron realizadas mediciones, es la zona con mayor altura sobre el nivel del mar. Los resultados obtenidos en la zona se presentan a continuación (Tabla 6).

**Tabla 6.**

*Valores de la actividad radiactiva por unidad de volumen medida en distintos puntos de la zona de interés de Cerro Pando, y su valor promedio.*

Ubicación	Actividad ( $Bq/m^3$ )
Punto 1	(330 ± 120)
Punto 2	(1 870 ± 270)
Punto 3	(2 820 ± 340)
Punto 4	(12 710 ± 740) *
Punto 5	(8 400 ± 600)
Punto 6	(740 ± 180)
<b>Promedio</b>	<b>(4 470 ± 180)</b>

### **Caldera (Ubicación 1)**

En esta zona se encuentran cerca de tres ojos de agua termal, sin embargo, es una zona con mucha humedad en la tierra, debido a que fluye el río Chiriquí Nuevo a un costado del terreno. Los datos de esta primera ubicación de la zona se muestran a continuación (Tabla 7).

**Tabla 7.**

*Valores de la actividad radiactiva por unidad de volumen medida en distintos puntos de la primera ubicación en la zona de interés de Caldera, y su valor promedio.*

Ubicación	Actividad ( $Bq/m^3$ )
Punto 1	(980 ± 210)
Punto 2	(152 ± 81)
Punto 3	(1 130 ± 220)
Punto 4	(161 ± 86)
Punto 5	(4 970 ± 470) *
Punto 6	(520 ± 150)
<b>Promedio</b>	<b>(1 319 ± 98)</b>

### **Caldera (Ubicación 2)**

A diferencia de la primera ubicación de Caldera, esta zona no cuenta con ojos de agua naturales. Las aguas termales que se encuentran provienen de una perforación cercana realizada en el suelo. Al igual que en la primera ubicación, cerca de los puntos de medición fluyen las aguas de una quebrada. Los resultados de las mediciones en esta segunda ubicación se detallan en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

*Valores de la actividad radiactiva por unidad de volumen medida en distintos puntos de la segunda ubicación en la zona de interés de Caldera, y su valor promedio.*

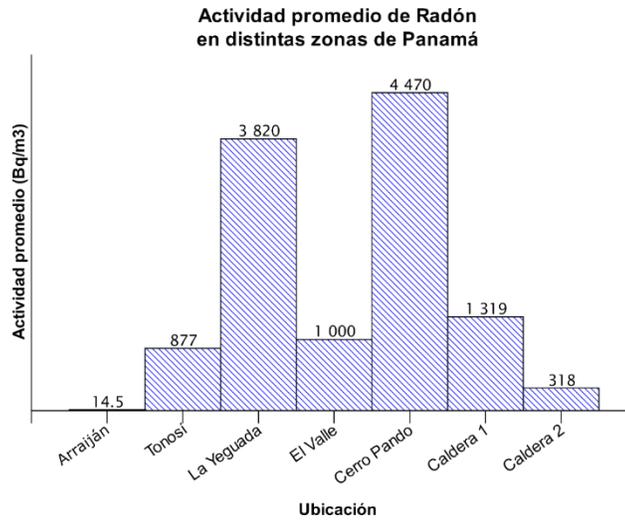
Ubicación	Actividad ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
Punto 1	(207 ± 93)
Punto 2	(490 ± 140)
Punto 3	(630 ± 160) *
Punto 4	(166 ± 86)
Punto 5	(98 ± 66)
<b>Promedio</b>	<b>(318 ± 52)</b>

A modo de comparación entre una zona de referencia (Arraiján) y las de interés, se presentan los siguientes dos gráficos:

1. Los promedios de actividad de Radón de las distintas zonas de interés, y la referencia (Figura 8).
2. Los valores más altos de actividad de Radón detectados (marcados con un \* en cada tabla de resultados) en las distintas zonas de interés, y la referencia (Figura 9).

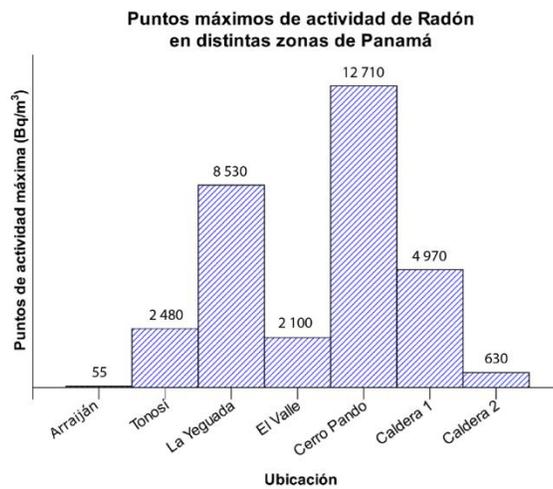
**Figura 8.**

*Valores actividad promedio de radón en las distintas zonas de interés.*



**Figura 9.**

*Valores actividad máxima de radón detectada en las distintas zonas de interés.*



## Discusión

El presente estudio proporciona evidencia robusta de la correlación entre la actividad volcánica y altas concentraciones de radón, especialmente en zonas con manifestaciones termales y geológicas activas. Esta correlación es importante no solo para la comprensión de sus características geológicas, sino también para la salud pública y la planificación territorial, dado que por su radiactividad el radón representa un riesgo potencial. Los datos recopilados ofrecen una base para futuras normativas que regulen la ocupación humana y las actividades en áreas con altas concentraciones de radón. Esto es crucial para mitigar los posibles riesgos de salud asociados con la exposición prolongada a este gas radiactivo, que es conocido por ser, entre otros, un factor de riesgo para el cáncer de pulmón.

La utilización del equipo RAD 7 para la detección de radón ha demostrado ser efectiva y precisa. Este estudio resalta la importancia de seleccionar adecuadamente los puntos de muestreo y asegurar la calibración y configuración correcta del equipo, lo que garantiza la fiabilidad de los datos obtenidos. Por otro lado, se observa una notable variabilidad en las concentraciones de radón, incluso dentro de zonas geológicamente similares. Esto sugiere que factores como la composición específica de las rocas, la historia volcánica y las dinámicas hidrogeológicas pueden influir significativamente en los niveles de radón. Además, subraya la necesidad de estudios geológicos detallados para comprender mejor estas dinámicas.

El estudio del radón en Panamá y su correlación con áreas volcánicas provee resultados significativos que están en línea, con hallazgos en otras latitudes. La detección de radón en áreas como Cerro Pando y su comparación con zonas menos activas como Arraiján revelan una mayor actividad radiactiva en la primera, lo cual

es consistente con estudios similares realizados en áreas volcánicas activas alrededor del mundo.

Por ejemplo, el estudio en el área volcánica de Tatun en Taiwán reveló comportamientos variados de radón en relación con la actividad sísmica y volcánica local. La utilización de detectores de estado sólido y técnicas de discriminación radón-torón, resaltaron variaciones que podrían ser señales precursoras de actividad tectónica o volcánica (Arvind et al., 2018). Esta correlación también se observa en el sur de Perú, donde la presencia de estructuras “caldéricas” y la correlación con recursos geotérmicos destacan una alta concentración de radón en áreas de actividad geotermal significativa (Díaz & Gómez, 2021).

En el contexto de Panamá, estos resultados refuerzan la hipótesis de que áreas con un fondo geológico volcánico presentan mayores concentraciones de radón, lo cual podría ser indicativo de un mayor riesgo radiológico ambiental y necesitaría de regulaciones específicas para la protección de la salud pública y el manejo del territorio. Este entendimiento se alinea con las recomendaciones de Kumar y colaboradores (2018), quienes enfatizan la importancia del monitoreo continuo del radón para entender mejor su dinámica y potencial, como indicador de fenómenos geológicos. Al contrastar sus hallazgos con los obtenidos en el presente trabajo, se resalta la importancia universal del monitoreo de radón en áreas geológicamente activas, pero también subraya cómo la variabilidad local (por ejemplo, la geología, el clima y la tectónica) puede influir en las concentraciones y el comportamiento del radón. Tanto el estudio de Kumar como este trabajo demuestran la relevancia de adaptar las estrategias de monitoreo y mitigación, a las condiciones específicas de cada región estudiada.

La conexión entre la estructura y manifestaciones geológicas con las radiológicas superficiales es clara, tanto en los estudios de Díaz & Gómez (2021) como en el nuestro, pero se centran en diferentes aspectos del ambiente geológico (calor vs radiactividad). La identificación de estructuras “caldéricas” y su relación con los sistemas geotermales en el estudio de Díaz y Gómez puede proporcionar un marco valioso para futuros trabajos, en Panamá, donde estructuras similares podrían indicar áreas de alta radiactividad de radón. Pero también señalarían potenciales recursos geotérmicos, tal como fue planteado en los estudios que desarrolló el IRHE (1987). Esta integración de conocimientos podría llevar a una comprensión más holística de cómo las características geológicas pueden influir en múltiples fenómenos naturales, desde la radiactividad hasta los recursos energéticos, facilitando una mejor gestión y aprovechamiento de los recursos naturales en regiones volcánicas. Además, enfatiza la importancia de establecer una vigilancia ambiental continua y adoptar regulaciones adaptadas a las características específicas de cada región geológica, para proteger la salud pública y promover un uso sostenible de los recursos naturales.

La comparación de los estudios encontrados en la literatura, con los resultados preliminares obtenidos en Panamá, no solo valida los métodos utilizados, sino que también amplía la comprensión del radón como un trazador efectivo de procesos geológicos subterráneos. Además, con estos resultados, se propone un marco para futuros trabajos que podrían enfocarse en áreas específicas identificadas con alta radiactividad y así proponer estudios más detallados con la finalidad de elaborar medidas preventivas.

Los trabajos futuros podrían beneficiarse del desarrollo de modelos predictivos que integren variables radiológicas y geológicas, similar a lo visto en Taiwán, donde se ha hecho un esfuerzo considerable para vincular la actividad del

radón con eventos sísmicos y volcánicos específicos. Esto no solo ayudará a mejorar la seguridad pública sino también a informar de cómo adoptar políticas de desarrollo y uso de la tierra, en regiones volcánicas.

Por último, se plantea la necesidad de continuar los estudios para entender más profundamente las fuentes y variabilidades del radón en diferentes zonas volcánicas. Esto podría incluir estudios más extensos y detallados en áreas con concentraciones altas de radón, así como investigaciones comparativas en zonas con baja actividad volcánica para establecer un perfil más completo del riesgo radiactivo, a nivel nacional.

## **Conclusiones**

La estación RN50 del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares de Panamá detecta una baja radiación de fondo, como promedio anual, a pesar de que Panamá, como el resto de América Central, es de origen volcánico. Pero sabemos que, desde la Geología, hay diferencias entre la formación de Panamá y la de los otros países de América Central. Al inicio la pregunta clave era, ¿las mediciones de parámetros como la medición de la baja radiación de fondo detectada por la estación RN50 es un resultado local, del área de la Universidad de Panamá, o bien hay otros indicadores al respecto? Los resultados encontrados para radón, en las áreas registradas como de actividad volcánica, indican que también hay una radiación de fondo relativamente baja, pero que hay que tomar en cuenta. Para el estudio, se escogió, en primera instancia, a Arraiján, al ser un punto de referencia, por no tener origen volcánico, según indica la información tomada del mapa geológico de Panamá de la Dirección de Recursos Minerales – Ministerio de Comercio e Industrias. De los puntos estudiados, Arraiján presentó los valores más bajos de actividad radiactiva, tanto en valores promedio como en máximos. Se

supone que las zonas de origen volcánico tienden a tener una concentración más alta de radón en suelo.

Globalmente la radiación de fondo es baja y los valores de radón también. La variabilidad entre los valores promedio y máximos en cada zona de medición sugiere una variabilidad geológica local, que podría estar relacionada con diferencias en el tipo, edad o actividad del material volcánico presente.

Los puntos de las zonas de La Yeguada y Cerro Pando presentaron las mayores concentraciones de radón, tanto en valores promedio como máximos. A diferencia de las otras zonas, en estos puntos se tenía acceso a los puntos de afloración de aguas termales, y sus cercanías, lo que podría ser un reflejo más fiable de los niveles de concentración de radón que se alcanzan en zonas cuya geología local se caracteriza por contener material rocoso de origen volcánico.

En las ubicaciones 1 y 2 de Caldera, a pesar de ser zonas con afloraciones de aguas termales, presentaron niveles relativamente bajos de radón, lo que sugiere que no todas las áreas volcánicas poseen la misma concentración de materiales radiactivos, o que la geología y las condiciones de ventilación y drenaje en esa área específica reducen la acumulación de radón. Esto también puede coincidir con el hecho de que los puntos en los que se realizaron mediciones (cercanías de los pozos) no coincidían, necesariamente, con afloraciones naturales. Además, en los puntos tomados en la zona de Caldera 1, el terreno tenía concentraciones altas de humedad, que, según el estudio de Santana, L., et al (2023) indica que puede afectar las concentraciones de radón medidas.

Aunque los valores de actividad en las zonas de Tonosí y El Valle son significativos, respecto a la referencia (Arraijan), son intermedios en comparación con otras zonas volcánicas como La Yeguada y Cerro Pando. Esto podría estar relacionado con diferencias en la actividad volcánica histórica, la composición de

las rocas y la permeabilidad del suelo, lo que afectaría la movilidad y acumulación del gas radón. Estos resultados, comparados con los de la literatura (referencias utilizadas), se consideran relativamente bajos.

A pesar de que este estudio proporciona una visión general de la actividad del radón en áreas termales y de origen volcánico, en Panamá, sería beneficioso realizar investigaciones más detalladas en áreas con altas concentraciones (si existen) para entender mejor las fuentes y variabilidades del radón, y, al mismo tiempo realizar en zonas de origen natural distinto, para poder hacer una caracterización más detallada del fondo radiactivo a nivel nacional.

### Referencias Bibliográficas

Balaram, V., Rani, A., Rathore, D.P.S. (2022). *Uranium in groundwater in parts of India and world: A comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies*. Geosystems and Geo environment, Volume 1, Issue 2, 100043, ISSN 2772-8838,

<https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100043>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277288382200022X>

Díaz, G., & Gómez, E. (2021). Calderas volcánicas y su relación con recursos geotermales en el sur del Perú. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr.*, 57–62.

Durridge Company INC. (2014). *Detector de radón rad7*.

<https://durridge.com/documentation/RAD7%20Manual%20Spanish.pdf>

Durridge Company INC. (2022). *Soil Gas Probe*.

<https://durridge.com/documentation/Soil%20Gas%20Probe%20Manual.pdf>

Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación - Organización Latinoamericana de energía – Banco Interamericano de Desarrollo. (1987). *Informe final del estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Panamá*. Programa IRHE-BID-OLADE. Convenio de Cooperación Técnica IRHE-OLADE, 77 p.

<https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0168.pdf>

Kumar A., Walia, V., Sung, Y.-C., Lin, S.-J., Lee, H.-F., Lin, C.-H., Fu, C.-C., & Chen, C.-H. (2018). Integrated radon monitoring in Tatun Volcanic Areas of Northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 261–273.

Marín D., L. A. (2020). *Identificación de los criterios básicos para la utilización del RAD 7 en la medición de radón en centros educativos de la República de Panamá* [Universidad de Panamá].

Ministerio de Comercio e Industrias, D. G. de R. M. (2018). *Mapa de la Geología de la República de Panamá*. ArcGis.

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fdadd3da67ec4ab4a3045e218256b303>

Meza, I. f., Londoño, J. M., Alpala, R. L., & Narváez, A. (2018). Anomalías de gas radón asociadas a la sismicidad en la región volcánica de los Coconucos (Cauca, Colombia). *Boletín Geológico*, 44, 101–114.

<https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.37>

Neri, M., Ferrera, E., Giammanco, S. *et al.* Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. *Sci Rep* 6, 24581 (2016).

<https://doi.org/10.1038/srep24581>

*Nota:* Adaptado del Mapa topográfico de Panamá, por El CapitalFinanciero.com, enero 10 de 2011 (<https://elcapitalfinanciero.com/minas-potencial-vs-sacrificio-ambiental/>).

*Nota.* Descripción adaptada de *SOIL GAS PROBE* (p. 8), por Durridge, 2022.

(<https://durridge.com/documentation/Soil%20Gas%20Probe%20Manual.pdf>)

Ramos, J. (2018). *Distribución Espaciotemporal de Radón en Interiores Urbanos de San Luis Potosí* [Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.]. <http://hdl.handle.net/11627/3974>

VILLALBA, M., COLMENERO-SUJO, L., RUBIO-ARIAS, H., PINALES-MUNGUÍA, A., ESPINO VALDÉS, M., GARZA, R., SILVA-HIDALGO, H., & VIRAMONTES-OLIVAS, O. (2015). *Cuantificación de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aire y dosis de radiación en baños termales del norte de México*. Nova scientia, 7(15), 153-167.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-07052015000300153&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000300153&lng=es&tlng=es)

Santana Muñoz, I. a. (2022). *Comparación de los resultados de medición de radón durante tres períodos del año en un área del Valle de Antón* [Universidad de Panamá]. <http://up-rid.up.ac.pa/6384/>

Santana, I. A., Marín, I. A., Rodríguez, J., Arroyo, A., Dreyfus, C., Fernández, B., & Castro, O. J. P. (2023). Incidencia del Radón-222 en la radiactividad de fondo en algunas viviendas de El Valle de Antón, Panamá. *Tecnociencia*, 25(2), 121-137.

Sasaki, T., Koukami, T., Kobayashi, T., Kirishima, A., Murakami, H., Amano, y., Mizuno, T., Jwatsuki, T., Sasamoto, H., & Miyakawa, K. (2017). *Determination of dissolved natural thorium and uranium in Horonobe and Mizunami Underground Research Laboratory groundwater and its thermodynamic analysis*. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54(3), 373-381, DOI: 10.1080/00223131.2016.1273801 To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00223131.2016>

Segura, C. (2022). *Estimación de la concentración de actividad específica de radionucleidos en el suelo de la Provincia de Tungurahua* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/17502>

Sosa, M. (2023). *Estudio geofísico de la porción sur del campo volcánico Los Encinos a través de métodos potenciales, espectrometría de rayos gamma y concentración de radón en subsuelo* [Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.]. <http://hdl.handle.net/11627/6470>