



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Radiactividad Natural en diferentes tipos de aguas ambientales y de consumo en El Salvador

Natural radioactivity in various types of environmental and drinking waters in El Salvador

Julio Ernesto Payes Hernández^{1,2}, José Ramiro Rodríguez Carpio^{1,3}

Correspondencia: julio.payes@ues.edu.sv

- 1 Departamento de Técnicas Analíticas Nucleares y Convencionales, Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN), Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador.
- 2 ORCID: 0000-0002-0152-5293
- 3 ORCID: 0000-0001-5670-6481

RESUMEN

La calidad del agua de consumo humano puede alterarse por la presencia de contaminantes radiactivos, considerados como parámetros de riesgo para la salud. El objetivo del estudio fue medir concentraciones de gas radón (Rn^{222}) y de radio (Ra^{226}) en aguas ambientales y de consumo, con el propósito de comparar los resultados con los parámetros radiológicos contenidos en el reglamento técnico salvadoreño y en normativas internacionales, contribuyendo a la vigilancia radiológica de aguas potables y ambientales que podrían utilizarse como materia prima para potabilizar. La recolección y análisis de las muestras se realizaron de forma intermitente durante los años 2016 a 2019 y de

DOI: [10.5377/revminerva.v8i1.20809](https://doi.org/10.5377/revminerva.v8i1.20809)

Enviado: 14 de marzo de 2024
Aceptado: 18 de noviembre de 2024

Palabras clave: Radiactividad natural, El Salvador, radón-222, radio-226, aguas ambientales.

Keywords: Naturally occurring radioactivity, El Salvador, radon-222, radium-226, environmental waters.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

2021 a 2022 en distintas zonas del país. Los análisis se efectuaron aplicando la técnica de centelleo líquido, utilizando los métodos ASTM D5072-09 para radón-222 y OIEA ARCAL LXXIX RLA 5048 para radio-226. Los resultados indicaron la presencia de radón-222 en diferentes concentraciones (0.91 ± 0.09 - 60.16 ± 2.0) Bq/L; no se determinó la presencia de radio-226 en concentraciones superiores al límite de detección del método (0.045 Bq/L). En los sitios de monitoreo se observó variación en las concentraciones de radón que pueden atribuirse a eventos sísmicos recurrentes en la región, se muestra una correlación entre eventos sísmicos y el aumento de las concentraciones de radón en fechas específicas. Las conclusiones del estudio sugieren la necesidad de continuar y ampliar el monitoreo radiológico de radón y radio a otras zonas, considerando que el país está influenciado por actividad sísmica y volcánica.

SUMMARY

Drinking water quality is a topic of concern for the population, and the presence of radioactive contaminants is considered a health risk. The objective of this study was to measure the concentrations of radon gas (^{222}Rn) and radium (^{226}Ra) in drinking and environmental waters and compare them with the radiological parameters outlined in Salvadoran technical regulations for water for human consumption, as well as international regulations. The aim was to contribute to the radiological monitoring of drinking water and various types of environmental waters that could be used for purification. Samples were collected and analyzed intermittently between 2016 and 2019, and again from 2021 to 2022 in different parts of the country. Liquid scintillation counting was applied for analysis, using the standardized method ASTM D5072-09 for radon-222 and the IAEA ARCAL LXXIX method for radium-226. All results showed the presence of radon-222 in different concentrations ranging from 0.91 ± 0.09 to 60.16 ± 2.0 Bq/L. However, the presence of radium-226 could not be determined at concentrations higher than the method's detection limit (0.045 Bq/L). At the monitoring sites, variation in radon concentrations that can be attributed to recurrent seismic events in the region was observed, and this study shows a correlation between seismic

events and increases in radon concentrations on specific dates. This study's conclusions suggest the need to continue and expand radiological monitoring of radon and radium to other areas, considering that the country is influenced by seismic and volcanic activity.

INTRODUCCIÓN

Muchos radionúclidos se encuentran en la naturaleza, incluidos en rocas y suelo y, por lo que se detectan con mayor frecuencia en suministros de agua de consumo procedentes de fuentes de agua subterránea (OIEA, 2016). Son de particular importancia para la exposición humana a las *radiaciones ionizantes* del agua de consumo, son los radionúclidos naturales que proceden de los elementos de la serie de desintegración del torio y el uranio, por ejemplo, radio-226, radio-228, polonio-210, plomo-210 y el radón, (OMS, 2018).

El Salvador es un país ubicado en un área de origen volcánico, donde más del 90% del subsuelo está compuesto por material proveniente de al menos 20 estructuras volcánicas, los cuales forman parte del cinturón de fuego del Pacífico y donde la mayor parte de la población, incluida la ciudad capital San Salvador, está ubicada en las proximidades de algún complejo volcánico (Castro Cárcamo & Gutiérrez, 2021).

Las características geológicas del país, formado principalmente por material volcánico con porosidad variable, permiten la emanación de gases que escapan por las vías más permeables; en su recorrido, los gases pueden encontrar acuíferos subterráneos y disolverse en el medio acuoso para salir a la superficie o pueden ser arrastrados por la extracción de aguas subterráneas. Uno de estos gases es el radón, que es un gas *radiactivo*, inodoro, incoloro e insípido; el isótopo más estable es el radón (Rn^{222}) que tiene una semivida de 3.825 días; es decir, una cantidad dada de átomos tarda ese tiempo en desintegrarse hasta la mitad. El radón se forma como producto de la desintegración

del radio (Ra^{226}), cuya semivida es de 1600 años y forma parte de la *serie radiactiva del uranio* (U^{238}), con una semivida de 4.47×10^9 años.

El uranio y el radio se encuentran naturalmente en suelos y rocas, proporcionando una fuente continua de radón. Debido a su carácter gaseoso, el radón es susceptible de escapar de las rocas dependiendo de la densidad y porosidad de las mismas, siendo uno de los elementos radiactivos más comunes en el agua subterránea (Roba et al, 2012). Por ser un gas noble, el radón no reacciona con los elementos químicos en su entorno y por su solubilidad, es transportado en medio acuoso y, preferentemente, en el aire, ya que su coeficiente de difusión de $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ es mayor que $1.13 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ en el agua (Quindós, 1995). Por otra parte, el radio es un metal perteneciente al grupo de los alcalinotérreos, como el calcio y el magnesio, y su transporte se realiza en condiciones especiales que involucran la disminución del pH, aumento de sólidos totales disueltos, en especial énfasis, el aumento de sodio y cloruros permiten la movilidad del radio en un medio acuoso (Bolton y Hayes, 1999).

Desde hace más de 30 años, el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN), de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) de la Universidad de El Salvador (UES), contribuye a la protección radiológica y del medio ambiente de la población salvadoreña; en ese contexto, estudios cuantitativos de radiactividad natural en agua iniciaron como problema de investigación en 2013 cuando se validó la metodología analítica y se realizaron mediciones ambientales de radón (Rn^{222}) y radio (Ra^{226}) en aguas termales del Cerro Pacho, Lago de Coatepeque, Santa Ana (Rodríguez, 2013). A la fecha de esta publicación, se han realizado estudios en diferentes tipos de aguas potables y ambientales (Payes y Rodríguez, 2022), con el propósito de contribuir a la vigilancia radiológica del agua de consumo y de otras aguas que podrían utilizarse para tal fin, teniendo en cuenta la reglamentación técnica salvadoreña (RTS

13.02.01:14) que establece límites permisibles de parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos, en atención a las recomendaciones de las guías de calidad de la OMS (2011) para la calidad del agua de consumo.

Radón y sismicidad

Ha sido ampliamente estudiado desde 1980 como un precursor sísmico, debido a que las fisuras causadas por los eventos tectónicos permiten su liberación, y puede ser transportado por medio del dióxido de carbono (CO_2) o disuelto mediante el agua; por ello, pueden darse cambios abruptos o anomalías en su concentración antes de que ocurra un evento sísmico; estos cambios pueden ser notorios aún con varios días de antelación, como lo fue en el caso de Coconucos, Colombia, en donde se pudieron detectar anomalías en la concentración de radón ante eventos sísmicos a 35 km de la estación de monitoreo (Meza et al., 2018).

La sismicidad recurrente en el territorio salvadoreño se debe a la activación de fallas tectónicas alrededor de la cadena volcánica y al proceso de subducción de la placa de Cocos y del Caribe frente a la costa salvadoreña. Solo en el año 2022 se registraron más de 3000 eventos sísmicos de los cuales 9 tuvieron magnitud mayor a 5.0 en la escala Richter (Volcano Discovery, 2023). El movimiento del radón es influido por la actividad sísmica de la zona y por la geología debido al contenido de radio-226 en las rocas; adicionalmente, la presión atmosférica y la precipitación son elementos que determinan el contenido de radón disuelto en las aguas (García-Vindas, 2002). Por ello, es importante el monitoreo, principalmente cuando el agua es destinada para el consumo humano, lo cual permitirá conocer si no se sobrepasan los niveles máximos permisibles en el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS 13.02.01:14) y considerar las medidas de mitigación pertinentes para que la actividad de radón no afecte la salud de las personas.

METODOLOGÍA

Durante 2016 a 2019 y de 2021 a 2022 se realizaron muestreos de gas radón-222 y de radio-226 en agua de consumo humano, agua envasada, agua superficial, agua subterránea y condensados de fumarolas en sitios geotérmicos, a lo largo del territorio salvadoreño; el muestreo se realizó de forma puntual y ocasional, según las posibilidades y recursos que estuvieron disponibles en el laboratorio del CIAN. El desarrollo metodológico y validación de las metodologías se describen con detalle en el trabajo de Rodríguez (2013).

Para analizar el radón (Rn^{222}) disuelto en agua, se recolectó, en duplicado, 1 litro de muestra en un recipiente de polietileno de alta densidad, evitando la desgasificación por turbulencia, y se transportó en un contenedor con hielo hacia el laboratorio para ser analizado antes de transcurrir 24 horas. Aprovechando que el coeficiente de solubilidad de radón en tolueno es mayor que el del agua (13.24/0.25 respectivamente), se extrajo el radón agregando una solución de centelleo a base de tolueno, que contine los agentes centelladores: PPO (4g/l de 2,5-Difeniloxazol) y POPOP (0.1g/l de 1,4-bis(5-feniloxazol-2-il) benceno), cuya función es transformar las energías de desintegración del radón y de sus descendientes, en fotones que son detectados y convertidos en pulsos eléctricos por dos tubos fotomultiplicadores ubicados dentro del equipo de centelleo líquido; los pulsos eléctricos constituyen la señal analítica cuyo nivel de energía es discriminado por un analizador multicanal y posteriormente se cuantifican como conteos por minuto (cpm). Los cálculos para determinar la concentración y la incertidumbre de la medición del radón, expresada en Bq/L (bequerelios por litro) a partir de los cpm registrados, se realizaron mediante el método normalizado ASTM D5072-09 (ASTM, 2016).

Para analizar el radio (Ra^{226}) se recolectó 1 litro de muestra en un recipiente de vidrio, en duplicado, y se acidificó con ácido nítrico

para su conservación. En el laboratorio se agregaron 20 mg de fosfato ácido de calcio ($CaHPO_4$) y la separación del radio se obtuvo por precipitación utilizando hidróxido de sodio, aplicando la propiedad que comparten los elementos alcalinotérreos como el calcio, magnesio y radio, para precipitarlos como hidróxidos. Este precipitado se centrifugó y disolvió en ácido clorhídrico concentrado para obtener un líquido el cual se aforó con agua destilada hasta 10 ml y se mezcló con igual volumen de solución de centelleo en un vial de vidrio de 20 ml, dejando en reposo por 30 días hasta alcanzar el estado de equilibrio secular en donde la concentración de radón (Rn^{222}) corresponde a la concentración del radio (Ra^{226}), por ser el radio el progenitor radiactivo del radón. Los cálculos correspondientes para cuantificar la concentración e incertidumbre de radón emitido por el radio, expresada en Bq/L (bequerelios por litro) a partir de los cpm registrados, se realizaron mediante el método armonizado del OIEA-ARCAL (2005).

Tanto el radón (Rn^{222}) como el radio (Ra^{226}) se analizaron durante 60 minutos con el equipo de centelleo líquido Tri-Carb 2100 TR, propiedad del CIAN-FIA-UES. Los métodos utilizados fueron adaptados y validados para dar confiabilidad y trazabilidad a las mediciones, a partir de un material de referencia de radio-266 del NIST (National Institute of Standards and Technology), La precisión de patrones preparados a partir del material de referencia anterior es de 8.2%, con un sesgo de 2.5%; valores dentro del límite de exigencia de la norma ASTM D5072-09. Se obtuvo un límite de detección de 0.068 Bq/L y 0.045 Bq/L para muestras de 1 L de volumen para radón y radio, respectivamente; con un rango lineal de medición de 0.01 a 12.0 Bq/L y una incertidumbre en el cálculo de la concentración menor al 10% (Rodríguez, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todos los sitios de muestreo se demostró la presencia de radón-222 en distintas concentraciones en el rango de 0.91 ± 0.09 - 60.16

± 2.0 Bq/L durante los periodos de medición; las concentraciones mayores se encontraron en vapor condensado de fumarolas en sitios geotérmicos.

Los resultados de las concentraciones registradas durante el periodo de muestreo se detallan en la Tabla 1. Los muestreos se realizaron en diferentes tipos de agua: superficial, subterránea, potable (consumo humano) y vapor condensado; los registros demostraron la presencia de radón-222 en todas las muestras en concentraciones variables; con respecto a las mediciones de radio-226 en los diferentes tipos de aguas, ninguna dio un valor mayor al límite de detección de la metodología de 45 mBq/L; el blanco utilizado para obtener el fondo de medición del equipo fue agua destilada. En la Figura 1 se muestran los espectros obtenidos con el equipo de centelleo líquido Packard, modelo TRiCarb 2100 TR, comparados con el espectro de referencia bibliográfica.

El Reglamento Técnico Salvadoreño (MINSAL, 2018) referente a la calidad del agua de consumo humano, considera las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estadounidense, con respecto al límite máximo permisible para radón de 11.1 Bq/L; los datos de radón en agua potable se encontraron por debajo de este límite. Para otros tipos de aguas no existen normativas donde se establezca un límite máximo permisible de radón; sin embargo, se han considerado precisamente

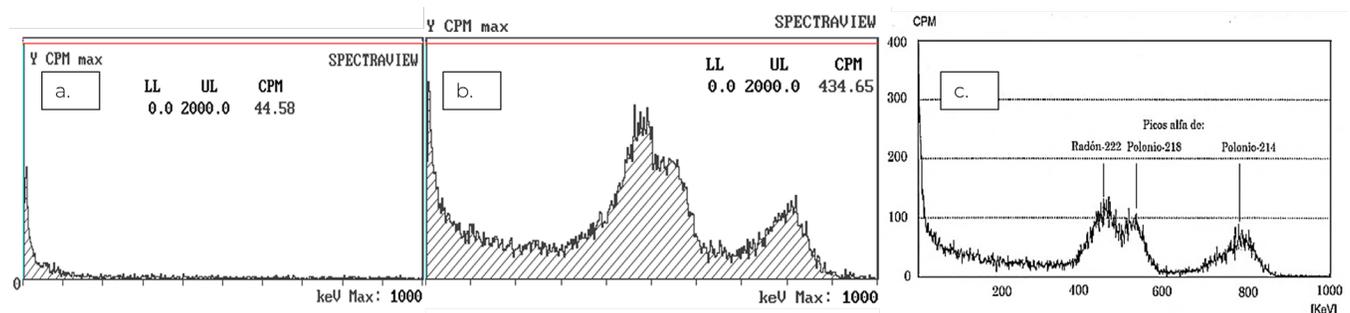
en este estudio porque las aguas superficiales y subterráneas (pozos) pueden utilizarse para consumo humano. Los condensados de vapor en zonas con manifestaciones hidrotermales dan un estimado de cuánto radón emana del subsuelo y cuánto puede disolverse en acuíferos cercanos o escapar al ambiente. Es notable la diferencia en el contenido de radón disuelto de las aguas en sitios cercanos a la cadena volcánica, por ejemplo, el contenido de gas radón en el Playón, Ahuachapán, resultó ser casi 10 veces más grande que en una zona costera como San Diego o la Costa del Sol, como se muestra en la Tabla 1. Esto indica que el material que exhalan los volcanes en su proceso de formación y los cambios en la geología del terreno influyen en el contenido de material radiactivo del mismo. Un ejemplo es el trabajo de García-Vindas y Gazel (2004), en donde los análisis de muestras de suelo de solfataras (fumarolas) en una zona volcánica comprobaron la presencia de radionúclidos naturales expuestos al ambiente, relativos a productos de decaimiento de uranio (U^{238}), entre ellos radio (Ra^{226}) y radón (Rn^{222}).

Las Figuras 2-4 muestran los registros de las concentraciones de radón en diferentes tipos de agua ambiental y potable, donde se pudo realizar un monitoreo periódico de las concentraciones de radón-222.

Durante el año 2022 se recolectaron muestras cada quince días y se analizaron mediante la

Figura 1

Espectro fondo de medición agua destilada (a.), espectro de muestra con gas radón disuelto (b.) y espectro de referencia bibliográfica (c.; Bolton & Hayes, 1999).



técnica de centelleo líquido para determinar el contenido de radón disuelto en agua de un nacimiento natural, ubicado en Apanteos, Santa Ana (Figura 2 y Tabla 1). El nacimiento

de agua fue canalizado desde hace muchos años para que drenara hacia unas piscinas a las cuales la población de la zona tiene acceso gratuito por parte de las autoridades

Tabla 1

Sitios de muestreo y mediciones de radón en aguas de El Salvador.

Lugar	Departamento	Fecha	Lat (°) N	Lon (°) W	Tipo de agua	Radón (Bq/L)	Referencia
Río Agua Caliente	La Libertad	Marzo 2016	13.815401°	-89.449022°	Agua termal (40°C)	5.79 ± 0.23	Investigación CIAN
Pozo comunal	Sonsonate	Mayo 2016	13.563331°	-89.676325°	Agua subterránea	2.86 ± 0.13	
Infiernillos	San Vicente	Marzo-julio 2016	13.624123°	-88.850761°	Vapor condensado	60.16 ± 2.0	(Gómez, 2019)
UES	San Salvador	Julio 2017	13.719948°	-89.200636°	Agua potable	1.56 ± 0.11	Investigación CIAN
Santa Ana Norte	Santa Ana	Septiembre 2017	14.027913°	-89.523845°	Agua potable	4.25 ± 0.16	Investigación CIAN (Morales et al., 2019)
Zona residencial	La Libertad	Marzo 2018	13.796213°	-89.223741°	Agua potable	2.08 ± 0.12	
Pozos ANDA	San Salvador	Abril-septiembre 2018	13.714732°	-89.174385°	Agua potable	4.74 ± 0.19	
Cara Sucia	Ahuachapán	Septiembre 2018	13.777434°	-90.031047°	Agua potable	3.79 ± 0.17	Investigación CIAN
San Diego	La Libertad	Octubre 2018	13.482345°	-89.224852°	Agua potable	1.76 ± 0.11	Investigación CIAN (De la O et al., 2020)
San Diego	La Libertad	Octubre 2018	13.467089°	-89.253650°	Agua subterránea	1.12 ± 0.10	
Chalatenango	Chalatenango	Febrero 2019	14.043441°	-88.934379°	Agua potable	4.05 ± 0.18	
El Playón	Ahuachapán	Abril – junio 2019	13.914705°	-89.813310°	Agua potable	10.50 ± 0.35	
El Playón	Ahuachapán	Abril – junio 2019	13.916020°	-89.817383°	Vapor condensado	45.00 ± 1.55	(De la O et al., 2020) Investigación CIAN
Soyapango	San Salvador	Julio 2019	13.715744°	-89.138604°	Agua potable	3.29 ± 0.16	
Aguilares	San Salvador	Noviembre 2019	13.957305°	-89.187978°	Agua potable	2.87 ± 0.13	Investigación CIAN
Col. Escalón	San Salvador	Febrero 2020	13.709817°	-89.248783°	Agua potable	2.55 ± 0.13	Investigación CIAN
Lourdes Colón	La Libertad	Octubre 2020	13.722031°	-89.367058°	Agua potable	3.52 ± 0.16	Investigación CIAN
Olocuilta	La Paz	Enero 2021	13.566958°	-89.114628°	Agua potable	2.72 ± 0.13	Investigación CIAN
Antiguo Cuscatlán	La Libertad	Abril 2021	13.678407°	-89.235534°	Agua potable	2.95 ± 0.14	Investigación CIAN
Cojutepeque	Cuscatlán	Febrero 2022	13.724758°	-89.941203°	Agua potable	5.15 ± 0.20	Investigación CIAN
Piscina Apanteos	Santa Ana	Marzo-diciembre 2022	14.001276°	-89.547182°	Nacimiento	14.25 ± 0.48	Investigación CIAN
Casa El Trebol	Santa Ana	Enero 2022-enero 2023	13.963557°	-89.568994°	Agua potable	2.14 ± 0.12	Investigación CIAN
Pozo El Molino	Santa Ana	Febrero 2016-enero 2023	13.982656°	-89.546741°	agua potable	12.45 ± 0.41	Investigación CIAN
Izalco	Sonsonate	Marzo 2022	13.745988°	-89.678372°	Agua potable	3.17 ± 0.15	Investigación CIAN
Centro Médico	San Miguel	Marzo 2022	13.477654°	-88.184805°	Agua subterránea	4.83 ± 0.19	Investigación CIAN
Parque Sabana	Guatemala	Junio 2022	14.458292°	-90.175447°	Agua subterránea	5.31 ± 0.21	Investigación CIAN
Costa del Sol	La Paz	Noviembre 2022	13.292717°	-88.896084°	Agua subterránea	0.91 ± 0.09	Investigación CIAN
Talnique	La Libertad	Diciembre 2022	13.651073°	-89.426441°	Agua superficial	12.33 ± 0.42	Investigación CIAN
Comasagua	La Libertad	Enero 2023	13.651592°	-89.387850°	Agua superficial	6.70 ± 0.27	Investigación CIAN

municipales. El contenido de radón disuelto en esa agua, reveló concentraciones muy cercanas al límite reconocido en el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS 13.02.01:14) para agua de consumo humano; estas aguas no se utilizan para el consumo; sin embargo, por la turbulencia que ocasiona las actividades de natación, el radón disuelto es disipado hacia el aire, en donde las personas lo inhalan y

los productos de decaimiento del radón son depositados en los pulmones. Factores como el tiempo de permanencia y la concentración de radón en el aire pueden dar indicios de la dosis absorbida por las personas (W.H.O, 2022). Este hallazgo abre las posibilidades de abordar nuevos campos de investigación que requieren de otras técnicas analíticas. No obstante, con los registros obtenidos, se ha establecido una línea

Figura 2

Concentración de radón registradas en una piscina de nacimiento natural en Apanteos, Santa Ana

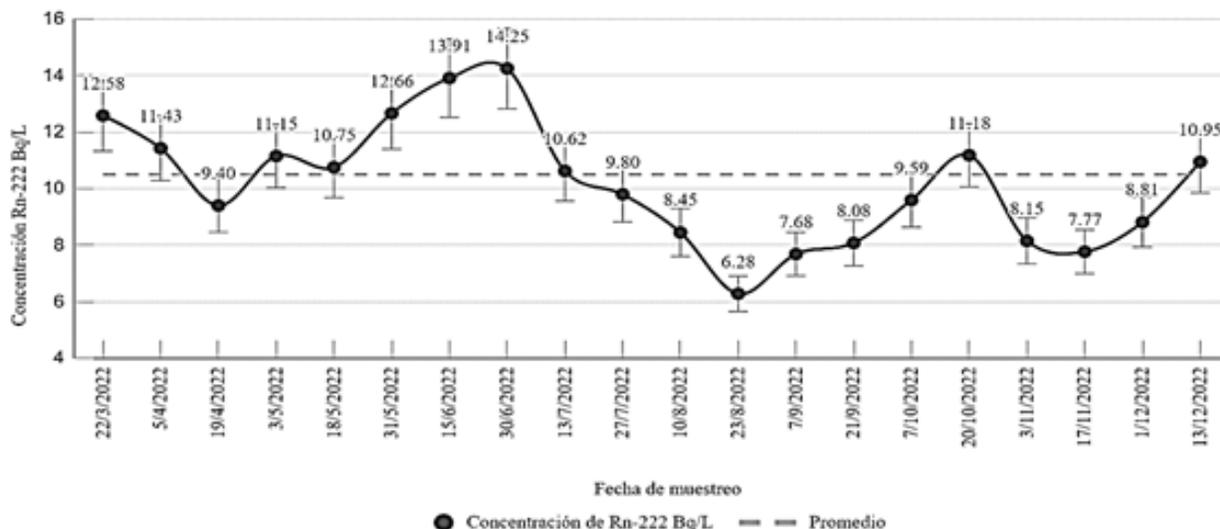
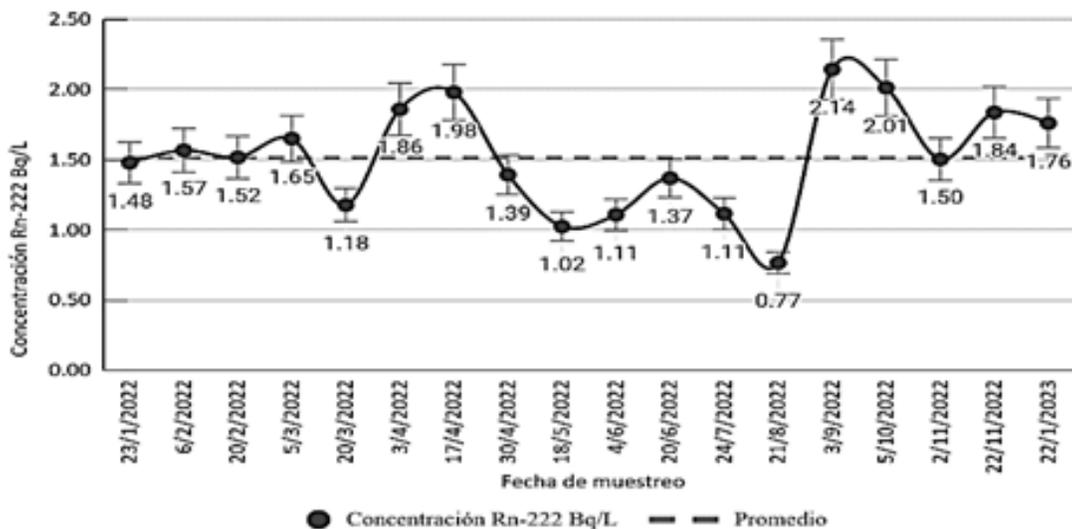


Figura 3

Medición de radón en agua potable en una casa de la residencial El Trébol, Santa Ana, durante el año 2022.



base de la variabilidad de las concentraciones de radón disuelto en ese sitio de estudio durante el periodo de muestreo.

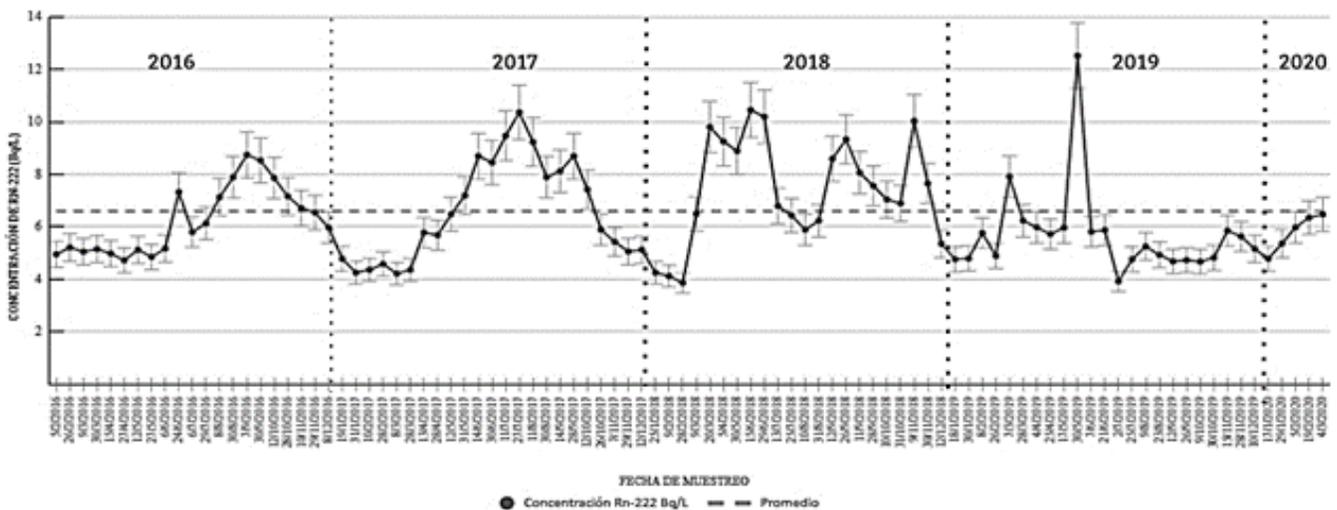
El monitoreo de estos sitios de muestreo se logró por la oportunidad de acceso para los autores, dada la cercanía a los lugares de residencia y por las pruebas preliminares que demostraban la presencia de radón disuelto en el agua. El sitio “casa residencial El Trébol” (Tabla 1 y Figura 3), es agua para el consumo humano, proveniente de un pozo de distribución ubicado en la zona; el sitio pozo “El Molino” (Tabla 1 y Figura 4) está cercano al punto de distribución. A partir de una mayor cantidad de eventos de muestreo se pudo identificar tendencias, observando que, para la época seca, el contenido de gas radón disminuye y para la época lluviosa aumenta, esto puede deberse a que el gas atrapado entre los espacios intersticiales de las rocas del subsuelo es transportado por el agua meteórica que infiltra y sigue las direcciones del flujo local (Guevara et al., 2010). El objetivo principal del presente estudio ha sido presentar las mediciones de radón disuelto en diferentes tipos de aguas, incluyendo las de consumo

humano y cómo esas mediciones cambian en el tiempo; en ese contexto, durante el monitoreo del sitio “El Molino” se realizaron muestreos horas después de algunos eventos sísmicos localizados en la zona de subducción de la placa de Cocos y del Caribe en la zona occidental del país o después de sismos registrados como liberación de energía ubicados en fallas tectónicas a lo largo de la cadena volcánica, cercana al sitio de muestreo, en donde se pudo registrar incrementos en los contenidos de radón disuelto; como lo fue la concentración máxima registrada el 30 de mayo de 2019 en el pozo El Molino con una concentración de 12.45 Bq/L (Tabla 1 y Figura 4) que sobrepasa el límite permitido para radón, según el Reglamento Técnico Salvadoreño para agua de consumo humano, esto coincidió con un evento sísmico registrado, horas antes de la toma de muestra, frente a la costa salvadoreña con magnitud 6.8 en la escala de Richter (Payes & Rodríguez, 2022).

Los datos registran aumentos de concentraciones que van en el orden de 2 a 4 Bq/L por arriba del valor promedio de 6.7 Bq/L.

Figura 4

Medición de radón en agua de consumo humano en el sitio de distribución pozo El Molino, Santa Ana; frecuencia de muestreo quincenal desde junio de 2016 hasta marzo de 2020.



Se puede observar en el gráfico de la Figura 5 que los picos que sobresalen corresponden al registro de la concentración de radón-222 medida después de los eventos sísmicos. Sin embargo, por la limitada cantidad de datos registrados no es posible evaluar una posible relación proporcional, dado que la medición por centelleo líquido es una técnica pasiva y no permite conocer los datos en tiempo real, sino hasta horas después de tomada la muestra; por tanto, saber si este aumento en el radón disuelto es anterior o es posterior al evento sísmico, podría ser posible utilizando técnicas de medición in situ para el registro continuo del radón. Por otra parte, en la misma figura puede notarse que el registro de radón en el

año 2022 fue mucho más variable que en 2021. Este registro permite contribuir a conformar una línea base para profundizar en el estudio de radón y poder compararlo con otras variables para conocer la incidencia en la zona de estudio y puede ser útil tanto en la evaluación de los riesgos a la salud como para la contribución a los mapeos de sismicidad.

La Tabla 2 demuestra el aumento en los contenidos de radón disuelto en el pozo “El Molino”; la recolección de las muestras se realizó intencionalmente en distintas fechas, 2 horas aproximadamente, después de algún evento sísmico de magnitud sensible, ocurrido en horas de la noche o madrugada.

Figura 5

Registro de medición de radón en agua de consumo humano en sitio de distribución pozo El Molino, Santa Ana; frecuencia de muestreo semanal desde enero de 2021 a enero de 2023.

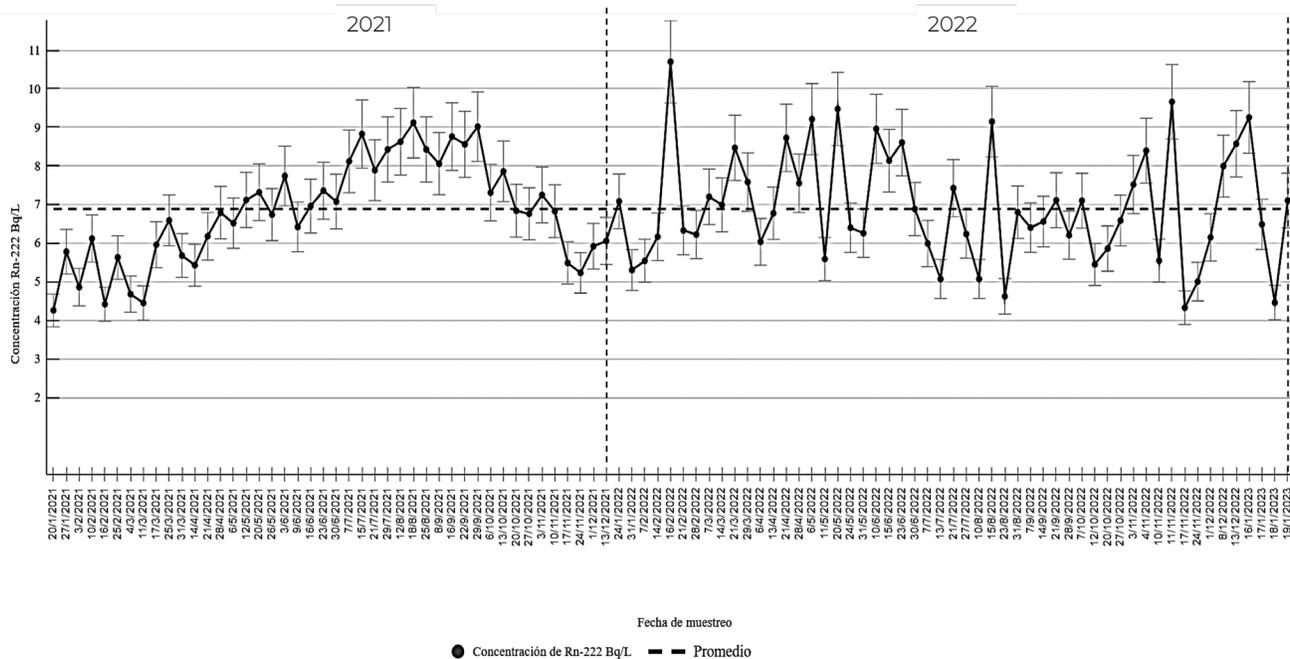


Tabla 2

Eventos sísmicos registrados en los que posteriormente se pudo medir el radón en el pozo El Molino.

Fecha	Hora local	Latitud N(°)	Longitud W(°)	Localización	Magnitud Richter	Concentración de radón Bq/L
16/02/2022	01:50	14.1422	-91.4417	A 107 km al suroeste de la ciudad de Guatemala.	5.0	10.7
21/04/2022	01:42	11.385	-87.163	Frente a la costa de Nicaragua. A 129.0 km al suroeste de ciudad de Managua, Nicaragua.	6.7	8.7
06/05/2022	19:17	13.9892	-91.3622	En territorio guatemalteco. A 111.0 km al suroeste de la ciudad de Guatemala.	5.2	9.2
20/05/2022	00:25	13.082	-89.165	Frente a la costa de La Paz. A 33.0 km al suroeste de playa Las Hojas.	5.1	9.5
10/06/2022	02:18	14.005	-91.436	Frente a la costa de Guatemala. A 118 km al suroeste de la ciudad de Guatemala.	5.3	9.0
15/08/2022	21:44	13.2808	-89.4677	Frente a La Costa de La Libertad. A 24.0 km al sur de Playa Mizata.	5.0	9.1
11/11/2022	22:39	13.9433	-90.966	A 86.0 km al suroeste de la ciudad de Guatemala.	5.9	9.7
15/01/2023	22:47	14.0543	-89.8172	A 5.0 km al noroeste de San Lorenzo. Ahuachapán	5.3	9.3

Nota. Tomado de *Mapa dinámico, sismicidad registrada*, <http://mapas.snet.gob.sv/geologia/sismicidad.phtml>

CONCLUSIONES

En todos los sitios de muestreo se demostró la presencia de radón-222 en distintas concentraciones durante los periodos de estudio; las aguas de consumo humano evaluadas no superan los límites considerados en el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS 13.01.02:14) para agua de consumo humano para radón-222 ni para el radio-226; sin embargo, existe la posibilidad de que en algún momento se sobrepasen esos límites, dado que los niveles de concentraciones de radón en los sitios de monitoreo son variables, tendiendo a incrementar con la frecuencia y magnitud sísmica. Esta variabilidad en las concentraciones de radón, presenta indicios de correlación con la sismicidad recurrente en el territorio salvadoreño y se considera que de esto surge la necesidad de continuar y ampliar el monitoreo

radiológico de radón y de radio a otras zonas, dado que el país está influenciado por actividad sísmica y volcánica.

El sitio de monitoreo de agua potable con mayores concentraciones de radón corresponde al pozo El Molino, a partir de los resultados de las mediciones se infiere que, cuanto más cercano es el punto de muestreo con respecto al pozo de extracción del agua, el contenido de radón es mayor y, a medida que esta agua se distribuye hacia los sitios de destino, las turbulencias y la presión desgasifican el agua de manera que el contenido de radón es menor. Como consecuencia, esta forma de distribución es un mecanismo de disminución de la concentración de radón en el agua potable.

Con respecto a las mediciones de radio-226 en los diferentes tipos de aguas, en ninguna

de las muestras se encontró concentraciones superiores al límite de detección de 0.045 Bq/L del método de análisis, siendo de 1 Bq/L el límite reglamentario, sin embargo, *el radón-222 es producto de la desintegración constante del radio-226* y eso demuestra que el radio-226 se encuentra presente en el sustrato subterráneo; por lo tanto, consideramos que el monitoreo debe continuar. Desde el punto de vista radiológico, la ausencia de radio en concentraciones menores al límite, es beneficiosa porque el radio es un metal alcalinotérreo, y por ello comparte características químicas con el calcio, adhiriéndose a los huesos, que puede ocasionar efectos biológicos a largo plazo.

A partir del mapa de sismos del país, se pueden establecer los sitios de monitoreo de radón más favorables por su cercanía a las zonas sísmicas activas, entre ellas, las zonas costeras del occidente y oriente, además de la cadena volcánica del país, para verificar que en estas zonas las concentraciones de radón-222 y radio-226 se encuentren dentro de los límites reglamentarios, como medida de precaución para el aseguramiento de la calidad del agua de consumo humano.

REFERENCIAS

ASTM (2016). Standard test method for radon in drinking water (D5072-09). Pág. 5.

OIEA-ARCAL (2005). Manual de procedimientos técnicos armonizados para la determinación de la contaminación radiactiva en alimentos. Organismo Internacional de Energía Atómica. Ed. LXXIX.

Bolton, D. W., & Hayes, M. A. (1999). *Pilot Study of Carcinogens in Well Water in Anne Arundel County, Maryland*. Maryland Geological Survey.

Castro Cárcamo, R. A., & Gutiérrez, E. (2021). *Volcanic monitoring and hazard assessment in El Salvador*. *Volcanica*, 4(S1), 183–201. <https://doi.org/10.30909/>

vol.04.S1.183201

Cothern, C. R., & Smith, J. E. (Eds.). (1987). *Environmental radon* (Vol. 35). Springer Science & Business Media.

De la O, J., Grajeda, C. & Mejía, S. (2020). *Estudio del comportamiento del gas radón en aguas superficiales, aguas subterráneas y vapor condensado, proveniente de fumarolas de la zona hidrotermal El Playón, Ahuachapán*. Universidad de El Salvador. Disponible en <https://acortar.link/U6NJzk>

García-Vindas, J. R., & Gazel, E. (2004). Presencia de radionucléidos en arcillas del sistema hidrotermal del volcán Turrialba, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (30).

García-Vindas (2002). Influencia de la precipitación sobre la actividad de radón en el suelo: simulación en el laboratorio y comparación con datos de campo. *Revista Geológica de América Central*, (23).

Guevara, M. Franco, L. & Payes, J. (2010) Estudio Hidrogeológico Cantón Cantarrana. Universidad de El Salvador. Pág.41. Disponible en <https://drive.google.com/file/d/1HYbmsc9pVQ4Jt2xNnLT7DwbAZQx5YYgA/view?usp=sharing>

Meza, L. 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>

MINSAL. (2018). *AAcuerdo N 606 - RTS 13.02.01:14 sobre requisitos de calidad e inocuidad del agua para consumo humano*. Diario oficial No. 60, tomo No. 419. El Salvador. https://osartec.gob.sv/download/24_d_o_rts_13-02-01_14_agua_agua_de_

- consumo_humano_req_de_calidad_e_inocuidad-pdf
- Morales, K., Sigüenza, A. (2018) *Determinación de la actividad del radón(^{222}Rn) en fuentes termales de áreas geotérmicas*. Universidad De El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Posgrado, Diplomado en Geotermia para América Latina. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/16219>
- Morales, K., Rodríguez, A. & Sigüenza, A. (2019). *Evaluación de parámetros radiológicos radón y radio en matrices de agua subterránea destinadas al consumo humano, en el área metropolitana de San Salvador*. Universidad de El Salvador. Disponible en <https://acortar.link/3Re6LW>.
- Gomez, O. (2019). *Determinación de la relación radio/radón en la fracción líquida condensada en fumarolas del complejo geotérmico del volcán de San Vicente, El Salvador*. Universidad de El Salvador. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.14492/11854>
- Payes, J. (2017) *Radiactividad natural en aguas de consumo humano y ambiental. Estudio preliminar*. Revista El Salvador Ciencia y Tecnología Vol. 22 N°33 página 25. ISSN 2226-5783 <https://shorturl.at/uyNPV>
- OEHHA. (2006) *Public Health Goal for Radium-226 and -228 in Drinking Water*. Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency (OEHHA). <https://oehha.ca.gov/media/downloads/water/chemicals/phg/phgradium030306.pdf>
- Payes, J., Rodríguez, R. (2022) Radiactividad en aguas de distinto origen en El Salvador. Revista El Salvador Ciencia y Tecnología Vol. 27 N°47 página 38. ISSN 2226-5783 <https://shorturl.at/uKM49>
- Quindós, L.S. (1995). *Radón: Un gas radiactivo de origen natural*. Consejo de Seguridad Nuclear, Universidad de Cantabria.
- O.M.S., O.P.A.S. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Cuarta edición que incorpora la primera adenda. Organization of American States, General Secretariat.
- Roba, C. A., Nita, D., Cosma, C., Codrea, V., & Olah, S. (2012). *Correlations between radium and radon occurrence and hydrogeochemical features for various geothermal aquifers in Northwestern Romania*. Geothermics, 42, 32–46. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2011.12.001>
- Rodríguez, J. R. (2013). *Cuantificación de la actividad de radón (^{222}Rn) y radio (^{226}Ra) aplicando la técnica de centelleo líquido en aguas termales del cerro Pacho, lago de Coatepeque, departamento de Santa Ana*. Universidad de El Salvador.
- Rodríguez, R., Olmos, R. & Payes, J. (2014). Medición de gas radón (Rn^{222}) en aguas termales del cerro Pacho, caldera Coatepeque, El Salvador. Rev. Geol. Amér. Central, 50: 71-82.
- World Health Organization (2018). *Management of radioactivity in drinking-water* ISBN:9789241513746. <https://acortar.link/4Ku814>
- Volcano Discovery (2023). Últimos sismos y temblores en El Salvador. <https://www.volcanodiscovery.com/es/sismos/el-salvador.html>