

Evaluación del potencial de gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují en la provincia de Cienfuegos, Cuba

✉ Israel David Cedeño Fernández, ✉ Alejandro García Moya, ✉ Willy Roberto Rodríguez Miranda, ✉ Héctor Alejandro Cartas Águila

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

israeldavidcedenofernandez@gmail.com

Resumen

Como parte de los proyectos de estudio y conservación de aguas superficiales y subterráneas (ISOAGUA y CIANOCUBA), en los cuales se emplea el Radón (^{222}Rn) como radiotrazador hidrogeológico, el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) planteó la tarea de estudiar las zonas potenciales a contener gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují. La aplicación del método de los 10 puntos posibilitó la cartografía a escala 1:100 000 del potencial de Radón en la cuenca hidrográfica Damují. Las mediciones de campo realizadas posibilitaron un análisis estadístico y la correlación entre el Radón en los suelos y las aguas. Se identificaron varias zonas con valores relativos de potencial de gas Radón en suelos. Las concentraciones de gas Radón en las aguas arrojaron resultados estables dentro de los límites que establece la Organización Mundial de la Salud. Por otro lado, las concentraciones medidas de Radón permitieron analizar el comportamiento de la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales.

Palabras clave: cuencas hidrográficas; Cuba; Radón 222; cartografía; estadística.

Evaluation of the radon gas potential in the Damují hydrographic basin in the province of Cienfuegos, Cuba

Abstract

As part of the surface and groundwater study and conservation projects (ISOAGUA and CIANOCUBA), in which Radon (^{222}Rn) is used as a hydrogeological radiotracer, the Cienfuegos Environmental Studies Center (CEAC) proposed the task of studying the potential areas containing Radon gas in the Damují watershed. The application of the 10-point method made possible the mapping at a scale of 1:100,000 of the Radon potential in the Damují hydrographic basin. The field measurements made possible a statistical analysis and correlation between Radon in soils and waters. Several zones with relative values of Radon gas potential in soils were identified. Radon gas concentrations in water showed stable results within the limits established by the World Health Organization. On the other hand, the measured Radon concentrations allowed to analyze the behavior of the interaction between groundwater and surface water.

Key words: watershed; Cuba; Radon 222; mapping; statistics.

Introducción

La principal fuente de Radón (en la inmensa mayoría de los casos) es el terreno, y la causa es su contenido natural en Uranio, a partir de los cuales se generará el radio (^{226}Ra) que produce el Radón en su proceso de desintegración. El mismo se desplaza por procesos de difusión y por convección, dependiendo de propiedades como la porosidad y la permeabilidad. Las concentraciones en aguas suelen ser muy variables siendo más abundantes en aguas subterráneas que en aguas superficiales. En la actualidad se utilizan técnicas avanzadas para mejorar la cartografía de zonas potenciales a contener gas

Radón. En este aspecto se destaca la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y la adquisición de datos radiométricos en suelos y aguas subterráneas. Las investigaciones realizadas por [1-4] aplican diferentes metodologías enfocadas en realizar estimaciones del potencial de Radón en suelos o aguas subterráneas. En Cuba se han desarrollado numerosas investigaciones direccionadas a la determinación de las concentraciones de gas Radón; se destacan los estudios [5-7] en aguas subterráneas y superficiales. También el trabajo de [8] estudiando las exposiciones del gas en cuevas turísticas y la evaluación del potencial de Radón en La Habana presentado por [9].

Zona de estudio.

La cuenca hidrográfica Damují se encuentra en el centro de la provincia de Cienfuegos, Cuba, extendiéndose hacia el norte y abarcando varios municipios, incluidos Abreus, Rodas, Palmira, Cruces y Lajas. En la zona de estudio se encuentran los embalses; El Salto (13,4 millones de m³) y Damují (187 millones de m³) además de poseer aguas mineromedicinales y termales en Ciego Montero. Los embalses El Salto y Abreus poseen características hidrogeológicas particulares que influyen significativamente en la dinámica del agua y la distribución del gas Radón en la región. Estas características están determinadas por la interacción entre las formaciones geológicas, la estructura tectónica y los procesos hidrogeológicos. Sus cuencas yacen principalmente, sobre rocas sedimentarias (margas, calizas, aleurolitas, brechas, conglomerados y areniscas) que ocupan la mayor parte de las formaciones geológicas del área (figura 1). Las rocas ígneas están distribuidas al sur de la cuenca hidrográfica formando parte del arco volcánico cretácico. Las formaciones La Rosita y Arimao están presentes en varias partes de la zona de estudio, compuestas fundamentalmente por diferentes tipos de rocas tales como lavas y lava – brechas basálticas, andesito – basálticas y andesíticas, así como por tobas de igual composición con granulometría muy variable [10].

Materiales y métodos

El “sistema de 10 puntos” se basa en parámetros tanto geogénicos como antropogénicos sobre el potencial de Radón del suelo y no incluye las influencias de las características de los edificios. De acuerdo con su importancia, se establecen siete parámetros en un sistema de clasificación, que puede aplicarse tanto en zonas rurales como urbanas: geología, relleno o suelos descubiertos, relieve, tectónica, vegetación, suelo sellado y fuertes vibraciones del tráfico [12].

El principal análisis se realizó en la variedad de rocas de la geología debido a que las rocas sedimentarias loess y till glacial, que originalmente se les otorgaba 1 punto, no se encuentran en la región. Se tuvo en cuenta las rocas arcillosas en la clasificación, considerando la importancia de las arcillas para el transporte del Radón (²²²Rn) por las propiedades de porosidad y permeabilidad. Se reclasificaron las capas según el método semicuantitativo de los 10 puntos, creando una nueva columna denominada "Reclaf" en la tabla de atributos y se transformaron en ráster para ser sumadas. El análisis de elevaciones se llevó a cabo para evaluar las diferentes alturas presentes en la zona de estudio, permitiendo una reclasificación por tabla que asigna nuevos valores de clase basados en rangos de elevación específicos. Adicionalmente, el algoritmo de interpolación de densidad lineal se utilizó para calcular una medida de densidad de objetos lineales para las líneas férreas, viales y fallas, en una vecindad circular dentro de cada celda ráster.

El muestreo de datos radiométricos en la cuenca hidrográfica Damují se planificó en zonas con diferentes potenciales de gas Radón, empleando los resultados del método semicuantitativo. Aunque no se alcanzó la densidad espacial de pozos planificada, se obtuvieron resultados representativos en las ubicaciones muestreadas. El proceso de muestreo incluyó el registro de profundidades del nivel freático y la profundidad total del pozo, el cálculo del volumen del pozo y el bombeo del agua utilizando una bomba de flujo regulable para asegurar muestras representativas. Se midieron varios parámetros, como la concentración de Radón, temperatura, pH, conductividad eléctrica y concentración de sólidos disueltos (*TDS* por sus siglas en inglés), con el Monitor de Radón RTM 1688-2 y sondas multiparamétricas. Los datos se organizaron y procesaron en *Microsoft Excel* y *StatSoft.Statistica*, aplicando cálculos de incertidumbre y análisis estadístico univariado y multivariado para identificar relaciones entre variables y patrones en los datos.

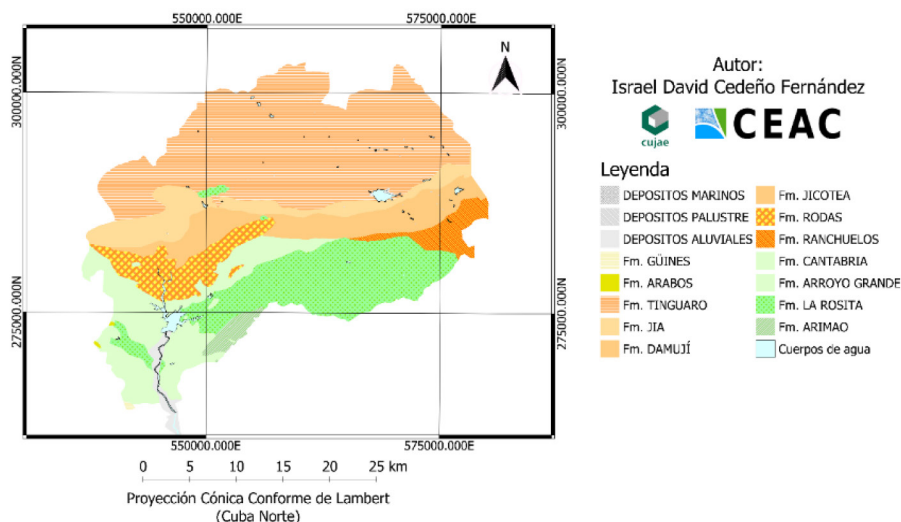


Figura 1. Mapa esquemático de la geología presente en la zona de estudio a escala 1:100 000. [11]

Resultados y discusión

Como parte de los resultados de la investigación realizada se confeccionó un mapa con el potencial de gas Radón en los suelos de la cuenca hidrográfica Damují. Como se muestra en la figura 2, el puntaje oscila entre los cero y nueve puntos, clasificado en bajo, intermedio y alto. Como se plantea en la metodología no necesariamente el potencial de gas Radón de un área debe llegar a 10 puntos, este depende de la estimación que se realiza a partir de las capas.

Se identificaron siete zonas con alto potencial de gas Radón, caracterizadas mayormente por la presencia de rocas carbonatadas, excepto en la zona 2, donde predominan rocas volcánicas. El espesor del suelo es un factor importante en todas las zonas con altos y medios valores de Radón, ya que un menor espesor puede aumentar la emanación del gas. La vegetación, incluyendo cultivos de caña de azúcar, afecta la humedad y permeabilidad del suelo, influyendo en el potencial de gas Radón en las zonas 1, 2, 4 y 7. Además, factores locales como el suelo sellado y las vibraciones del tráfico también son importantes, con una correlación observada entre el suelo sellado (>50 %) y las zonas 1, 2, 4 y 7, así como las vibraciones del tráfico (<10 metros) en todas las zonas de alto potencial. La densidad de viales afecta a todas las zonas, mientras que la densidad de líneas férreas influye en todas las zonas excepto en la 7. La tectónica tiene un mayor impacto en las zonas con potencial medio de gas Radón, aunque en la zona 2 un grupo de fracturas podrían asociarse con el alto potencial de gas Radón.

Se correlacionó el potencial de gas Radón en los suelos de la cuenca con las concentraciones de Radón en las aguas (figura 3). La mayoría de los pozos mostraron una relación directamente proporcional entre el potencial de Radón y las concentraciones medidas en las aguas, indicando una buena correlación entre la

metodología aplicada y los datos medidos en la cuenca. Se identificaron cuatro puntos de interés en relación con el Radón. El pozo artesanal La Curva presentó un alto potencial de Radón en suelos (9 puntos) y una elevada concentración en aguas (11,450 Bq/L), lo que sugiere una significativa migración entre el suelo y el agua subterránea, posiblemente debido a la presencia de rocas volcánicas. El pozo artesanal La Borde, ubicado a unos 3 km de La Curva, también mostró altas concentraciones de Radón, sin embargo, las variaciones en las concentraciones podrían deberse a diferencias en la permeabilidad o profundidad del manto freático. Por otro lado, el pozo artesanal Molino de Piedras posee un alto potencial de Radón en suelos, pero una baja concentración en aguas (0,79 Bq/L), lo que podría estar relacionado con factores geológicos locales, como una alta permeabilidad y un manto freático elevado, que facilitan la transferencia de Radón del agua al suelo. La estación de bombeo CF 195. Laberinto Viejo, mostró un bajo potencial de Radón en suelos, pero una alta concentración en aguas (1,336 Bq/L), esto está relacionada la presencia de intercalaciones de rocas volcánicas y carbonatadas de las formaciones La Rosita y Cantabria. El manto freático en este pozo se encuentra a más de 20 metros de profundidad, lo que puede influir en las diferencias de concentración de Radón entre el agua y el suelo.

A partir del análisis de los datos se obtuvo un mapa del comportamiento de la información radiométrica (figura 4) a una escala de detalle 1:50 000. La región centro – este muestra las concentraciones más altas de Radón, con isolíneas cerradas que indican niveles por encima de los 3 Bq/L. Esta área incluye el pozo La Curva, extendiéndose hacia el pozo La Borde, la estación de bombeo de Indaya y la de Tumba Saco. Las isolíneas se extienden hacia la cuenca hidrográfica Caunao, indicando la posibilidad de altos valores de Radón en algunos pozos de esa área. Las concentraciones más bajas de Radón se encuentran en la parte

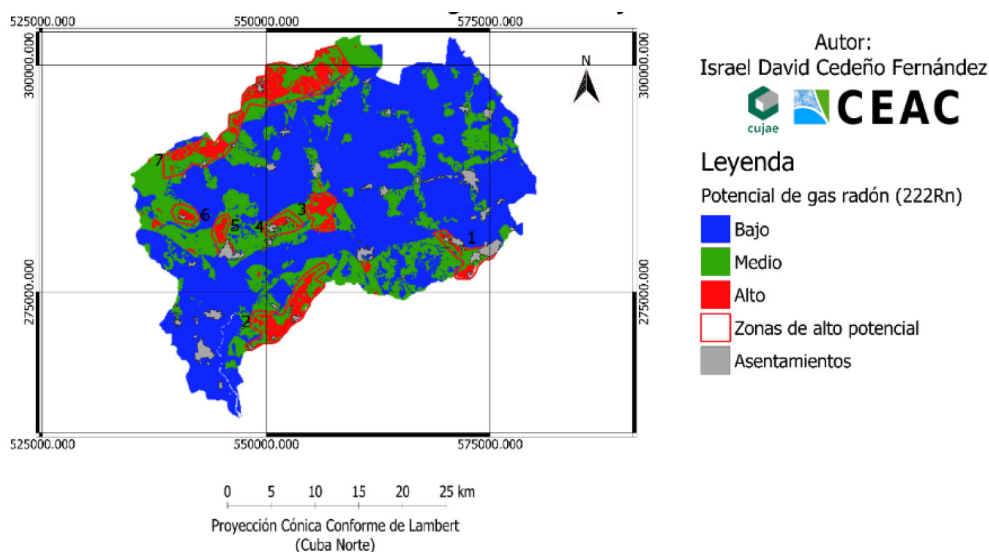


Figura 2. Mapa de zonas potenciales a contener gas Radón en los suelos de la cuenca hidrográfica Damují.

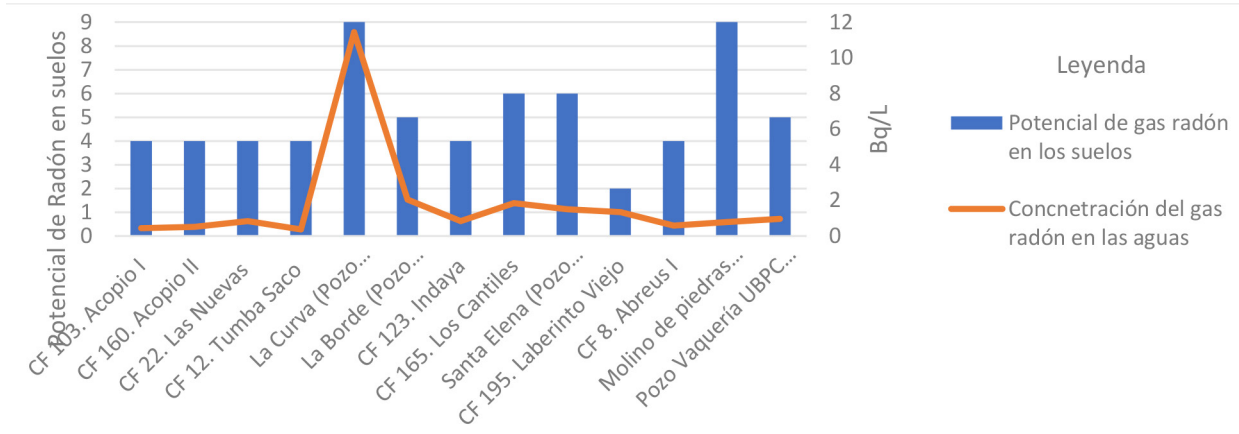


Figura 3. Relación entre el potencial de gas Radón y la concentración de Radón en las aguas.

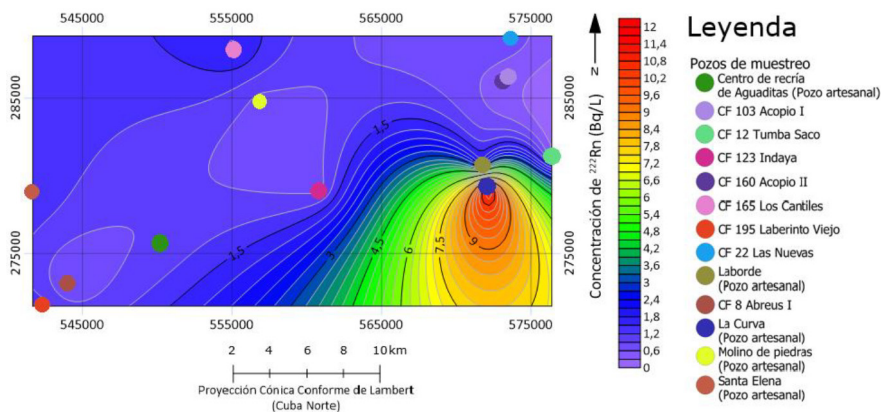


Figura 4. Comportamiento de la información radiométrica en los pozos de agua potable.

oeste y suroeste de la cuenca, con valores entre 0,6 y 0,9 Bq/L, mientras que las concentraciones moderadas se dispersan por el resto de la cuenca, con valores entre 1,5 y 1,8 Bq/L. Se puede observar una clara tendencia en el movimiento de las aguas subterráneas en las zonas correspondiéndose con el caudal de los ríos Damují y Anaya. Esto facilita la correlación entre los valores de potencial de Radón en los suelos y las concentraciones en las aguas subterráneas. La variabilidad en las concentraciones de Radón en los pozos podría deberse a diferencias en las propiedades del acuífero, como la permeabilidad, porosidad y el nivel del manto freático.

Discusión

La identificación de zonas potenciales de Radón en suelos y aguas subterráneas es crucial para el estudio de la cuenca hidrográfica Damují. Los resultados sugieren que la geología local y la estructura tectónica juegan un papel importante en la liberación y distribución del Radón (²²²Rn). Las primeras mediciones de Radón en suelos deberían realizarse en áreas con asentamientos, aunque el potencial de Radón puede ser variable, estas validaciones son esenciales para determinar la distribución real del gas en los suelos y validar el potencial estimado.

El límite de concentración de gas Radón en las aguas subterráneas es de 100 Bq/L según la Orga-

nización Mundial de la Salud [13]. Este valor es considerado seguro para la salud humana y se utiliza como referencia en diversas normativas y estudios científicos. El uso del Radón como trazador hidrogeológico en la cuenca hidrográfica Damují representó una oportunidad para comprender los movimientos e interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales. Dada la influencia de la geología local y la estructura tectónica en la zona de estudio se determinó que existe una fuerte relación entre las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas con el potencial estimado en los suelos. Por otro lado, el Radón, debido a su solubilidad en el agua y a su moderada vida media, actúa como un indicador eficaz del intercambio hidrológico entre aguas subterráneas y superficiales. Esto se ve representado en el mapa del comportamiento de la información radiométrica donde se observa el recorrido del río Damují y Anaya.

Conclusiones

- La integración de la cartografía del potencial de gas Radón en los suelos, y el análisis del comportamiento de las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas permitieron evaluar las zonas potenciales a presentar valores anómalos de gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují.

- La estimación del potencial de gas Radón en los suelos y el análisis de las concentraciones de Radón en los pozos de agua potable permitieron obtener una correlación estable en la cuenca hidrográfica Damují; la mayoría de las zonas con alto y bajo potencial de Radón en los suelos coinciden con las altas y bajas concentraciones de Radón en las aguas subterráneas.
- El análisis de las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas permitió la aplicación del gas como trazador hidrogeológico, mostrando el comportamiento de las aguas superficiales respecto a las aguas subterráneas y a la geología en la cuenca hidrográfica Damují.

Referencias bibliográficas

- [1]. WIEGAND J. A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. *Environ. Geol.* 2001; 40: 949-963. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s002540100287>. ISSN 1432-0495.
- [2]. SKEPPSTRÖM K & OLOFSSON B. A prediction method for radon in groundwater using GIS and multivariate statistics. *Sci. Total Environ.* 2006; 367: 666-680. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.044>.
- [3]. TUNG S, LEUNG J, JIAO J, et. al. Assessment of soil radon potential in Hong Kong, China, using a 10-point evaluation system. *Environ. Earth Sci.* 2013; 68: 678-689. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1782-0>.
- [4]. PRZYLIBSKI T. Shallow circulation groundwater – the main type of water containing hazardous radon concentration. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011; 11: 1695-1703. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1695-2011>.
- [5]. ALCAIDE J, OLIVERA J, VALDÉS MG, et. al. Radioactividad del agua en los manantiales de El Cedrón, Santiago de Cuba. *Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd.* 1998; XIII. ISSN 0214-2813.
- [6]. ALCAIDE J, OLIVERA J, VALDÉS G, et. al. Radioactividad del agua en manantiales y balnearios de Cuba. *Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd.* 1999; XIV. ISSN 0214-2813.
- [7]. MONTALVÁN A, BRÍGIDO O, CABALLERO A, ESCALANTE A. Radium-226 in drinking water in Camagüey. *Third International Symposium on Nuclear and Related Techniques (NURT)*. La Habana, Cuba; 2001.
- [8]. CARRAZANA JG, DOMÍNGUEZ LEY O, ÅKERBLÖM G, et. al. Exposure to radon in tourist caves in Cuba. *Int. J. Low Radiat.* 2010; 7(2): 133-139.
- [9]. RODRÍGUEZ WR, SANTIBÁÑEZ JA & FUENTES R. Evaluación del potencial de Radón en la antigua provincia de La Habana. *XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana, Cuba. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10479.89765>.
- [10]. ITURRALDE VINENT MA. *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe*. La Habana: Editorial CITMATEL, 2012.
- [11]. NÚÑEZ KE. Nuevo mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000. *XI Congreso Cubano de Geología. Geología Regional y Geodinámica de Cuba y el Caribe*. La Habana, 2015.
- [12]. BLEILE D & WIEGAND J. Checking the 10 - point system for an evaluation of the soil radon potential. *Radioact. Environ.* 2005; 7: 833-841. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07104-9](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07104-9)
- [13]. World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO Press; 2020. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit/Conceptualización: Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Fuentes:** Israel David Cedeño Fernández. **Curación de datos:** Israel David Cedeño Fernández. **Software:** Israel David Cedeño Fernández. **Análisis formal:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Validación:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Investigación:** Israel David Cedeño Fernández. **Visualización:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda. **Metodología:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Administración de proyecto:** Alejandro García Moya. **Escritura – borrador original:** Israel David Cedeño Fernández. **Redacción – revisión y edición:** Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda.