

## Caracterización geoambiental del inventario de pasivos ambientales en la región minera de Santa Lucía, Cuba

### Geoenvironmental characterization of the inventory of environmental liabilities in the mining region of Santa Lucia, Cuba

Noel Caridad Bruguera Amarán<sup>I</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4084-2803>

Damaris Gallardo Martínez<sup>II</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9870-9063>

José Ricardo Álvarez Santander<sup>III</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6170-6873>

Robert Ramírez Hernández<sup>IV</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0224-0011>

Leidy Ivón Hernández García<sup>I</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9111-5935>

- <sup>I</sup>- Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA. Km 2 ½ Carretera Luis Lazo, Pinar del Río, Cuba. E-mails: [noel@ecovida.cu](mailto:noel@ecovida.cu); [leidy@ecovida.cu](mailto:leidy@ecovida.cu)
- <sup>II</sup>- Delegación Territorial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA en Pinar del Río. Cuba. E-mail: [regulatoriapr@citmapri.gob.cu](mailto:regulatoriapr@citmapri.gob.cu)
- <sup>III</sup>- Dirección General de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente CITMA. La Habana. Cuba. E-mail: [jralvarez1006@gmail.com](mailto:jralvarez1006@gmail.com)
- <sup>IV</sup>- Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río, Cuba. E-mail: [robertrh@upr.edu.cu](mailto:robertrh@upr.edu.cu)

Fecha de recepción: 10 de febrero de 2022      Fecha de aceptación: 6 de abril de 2022

**RESUMEN.** Con el objetivo de desarrollar la evaluación ambiental integral para la remediación perspectiva de los impactos generados en la región minera de Santa Lucía, se desarrolla la caracterización ambiental y cartográfica del inventario de los pasivos ambientales (PA) registrados en la zona. Se emplearon los métodos teóricos, como el análisis histórico-lógico y el enfoque sistémico. Como métodos empíricos, el análisis documental de los referentes más actualizados del tema. Se emplea una plataforma de infraestructura de datos espaciales (IDE) con soporte en ArcGIS. Para el levantamiento de los PA, se emplea el método geológico de itinerarios irregulares en tres sectores de la región. Las herramientas utilizadas para el procesamiento y confección del SIG estuvieron apoyadas por ArcMap. Para la confección de los mapas se trabajó sobre la base del Modelo Digital del Terreno (MDT) disponible a escala 1:25000. Se correlaciona la proporción entre explotación del recurso natural, la emisión de residuos, la naturaleza del PA, los componentes activos de este y su ciclo de vida. Se expone un inventario de 62 PA sin precedentes para la región, desglosados en 16 pasivos mineros, 31 químicos, siete sanitarios, cinco tecnológicos y tres agroforestales. El SIG desarrollado de los PA de la región, permite la gestión efectiva en pos de la mitigación de los impactos negativos generados a los ecosistemas expuestos, a partir de la correlación con la geología, la hidrogeología, la tectónica, los ecosistemas y el modelo de elevación digital del terreno en el área de estudio.

**Palabras clave:** pasivo ambiental químico, minero, caracterización cartográfica, contaminación.

**ABSTRACT.** With the objective of developing the integral environmental evaluation for the perspective remediation of the impacts generated in the mining region of Santa Lucia, the environmental and cartographic characterization of the inventory of environmental liabilities (EL) registered in the area is developed. Theoretical methods were used, such as historical-logical analysis and the systemic approach. As empirical methods, the documentary analysis of the most up-to-date references on the subject. A spatial data infrastructure (SDI) platform supported by ArcGIS is used. For the survey of the EL, the geological method of irregular itineraries is used in three sectors of the region. The tools used for the processing and preparation of the GIS were supported by ArcMap. For the preparation of the maps, we worked on the basis of the Digital Terrain Model (DTM) available at a scale of 1:25,000. The proportion between the exploitation of the natural resource, the emission of waste, the nature of the EL, its active components and its life cycle are correlated. An unprecedented inventory of 62 ELs for the region is presented, broken down into 16 mining liabilities, 31 chemicals, seven health, five technology and three agroforestry. The developed GIS of the ELs of the region, allows the effective management in pursuit of the mitigation of the negative impacts generated to the exposed ecosystems, from the correlation with the geology, the hydrogeology, the tectonics, the ecosystems and the model of digital terrain elevation in the study area.

**Key words: environmental liability chemical, mining, cartographic characterization, contamination.**

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de desarrollo contemporáneos se han caracterizado por la generación de sitios contaminados de largo recorrido histórico y amplia dispersión físico-espacial, ya sea por la explotación de recursos naturales como por la disposición de diferentes tipos de residuos, metales pesados, instalaciones abandonadas, entre otros factores, sin ningún tipo de remediación o mitigación; los que se convierten en riesgos para la vida y la salud de los habitantes cercanos a dichas zonas.

Los bajos niveles de mitigación de los impactos y la correcta utilización de instrumentos de gestión para diagnosticar, pronosticar y diseñar medidas de recuperación de las afectaciones, constituyen elementos esenciales a tener en cuenta para lograr resultados ambientales favorables en el tratamiento y remediación de los PA (Bruguera, Gallardo y Díaz, 2020). Entre las principales actividades socioeconómicas que generan una amplia huella ambiental sobre los ecosistemas, resaltan: la prospección y explotación de los recursos minerales, los procesos metalúrgicos inducidos para su tratamiento, el aprovechamiento de los recursos mineros no metálicos para el desarrollo de la industria de materiales de construcción; la explotación de los recursos del bosque, con el consiguiente bajo aprovechamiento del potencial maderero y no maderero disponible, por limitaciones tecnológicas. La generación e inadecuada disposición de altos volúmenes de residuos sólidos por diversas actividades humanas, propician la

fragmentación de los ecosistemas. Estos pasivos, requieren acciones de manejo integrales para minimizar sus riesgos.

Los cambios en los ecosistemas naturales, producto de las actividades mineras, agro-forestales, sanitarias, químicas y otras, han provocado la fragmentación del paisaje y el deterioro de los recursos naturales, a nivel de poblaciones y de procesos ecológicos. La destrucción de los hábitats naturales es la principal causa de la pérdida de biodiversidad. La deforestación para el incremento de tierras agropecuarias, la minería a cielo abierto, la construcción de infraestructuras y el crecimiento de la urbanización, se encuentran entre las causas más importantes de la fragmentación de los ecosistemas (Aduvire, 2006).

La Organización Marítima Internacional en 1969, empleaba el término "daño ambiental". En 1980, la Ley de Respuesta Ambiental, Compensación y Responsabilidad Ambiental (CERCLA) en EUA, asume el término "environmental liabilities", en los procesos contables empresariales, para denotar las deudas ambientales. En la década de los '90 del pasado siglo, se establece el pasivo ambiental, como la obligación legal de realizar un gasto en el futuro para actividades efectuadas en el presente o el pasado (EPA, 2010).

En la región de América Latina y el Caribe como regularidad, las autoridades empresariales y gubernamentales de Argentina, Chile, Bolivia, Colombia y Perú, asumen los pasivos ambientales, como el conjunto de variaciones negativas ocasionadas por la acción antrópica, en las condiciones naturales, que afectan el equilibrio de los ecosistemas y el buen vivir de las comunidades (Bruguera, et al, 2021).

En el 2010, la Agencia de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanas (ASGMI), publicó su manual para el inventario de minas abandonas o paralizadas, en el que reconoce como PAM, elementos, tales como instalaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, como un riesgo potencial permanente para la salud de la población, la biodiversidad y el medio ambiente (ASGMI, 2010). Además, Bruguera, Gallardo y Díaz (2021), sostienen que los pasivos ambientales generan daños ambientales en términos de contaminación del agua, suelo, aire, deterioro de los recursos y de los ecosistemas, por la producción o por accidentes imprevistos, a lo largo de su historia.

Chile, cuenta con un catastro nacional de los pasivos ambientales mineros y desarrolla un sistema de gestión (CEPAL, 2018). Para La Rota (2017), los PAM vienen a ser los daños no compensados producidos por una determinada empresa al medio ambiente a lo largo de su ciclo

de vida. Constituye un riesgo al ambiente y la calidad de vida de las personas. Oblasser (2016) desarrolla una herramienta de Gestión Integral de Pasivos Ambientales Mineros, desde la prevención y corrección de los PAM. Considera esencial, el fomento de mecanismos de financiamiento y el desarrollo de tecnologías para la reactivación de pasivos, por el principio de minería secundaria, como un instrumento clave para evitar la generación de futuros pasivos ambientales (CITMA, 2019).

Cuba es uno de los países que no reconoce en sus normas legales ambientales vigentes (ANPP, 1997) el tratamiento regulatorio y de gestión a los pasivos ambientales. El abordaje de los PA en los últimos 30 años, ha considerado esta categoría solo desde los impactos provocados por la minería. Esto restringe la diversidad y naturaleza de las fuentes. Diversas, son las actividades socioeconómicas y procesos geonaturales generadores de pasivos ambientales. Se propone analizar los principales referentes disponibles acerca de los PA y reportar nuevos determinantes teóricos en su abordaje.

Fuentes, Iturralde y Hernández (2013) analizan el PA la cantera Vizcaya abandonada, donde se efectuó la extracción de caliza para la producción de materiales de construcción. Constituye una fuente de contaminación de las aguas subterráneas, a la que se analiza la pluma de contaminantes.

En el estudio de los PA en la región e Santa Lucía no se evalúan los impactos de otras actividades socioeconómicas generadoras de peligros tecnológicos y sanitarios, lo que restringe el alcance de la investigación. Se analiza, únicamente el ecosistema acuático y en especial, el lotico (río Santa Lucía) en esta región con graves afectaciones ambientales (Cañete *et al.*, 2011).

En el año 2018 el Consejo de Ministros de la República de Cuba aprobó la Política para el perfeccionamiento del Sistema Ambiental. En ella se reconoce por vez primera, que un pasivo ambiental se materializa en un sitio geográfico contaminado o degradado por la explotación de los recursos naturales o la emisión de residuos, que no fueron recuperados o remediado oportunamente para impedir la dispersión de los contaminantes y continúan causando efectos negativos al ambiente (CITMA, 2018, Pons, 2018).

En la región de Santa Lucía, los estudios precedentes acerca de los inventarios de PA (Delgado *et al.*, 2011, Gallardo, 2018) así como del análisis de los impactos de la actividad extractiva y los procesos tecnológicos asociados, no han realizado un abordaje de los PA acumulados mediante la diversidad de actividades socioeconómicas generadoras de PA, ni el uso de

Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis espacial integral de los impactos generados, lo que limita su gestión.

GEOMINERA (2019) realiza una evaluación de impactos para la recuperación ambiental del yacimiento Santa Lucía. Proponen medidas de mitigación para el área de explotación, sin tener en cuenta la interacción con los ecosistemas y los PA, derivados de la actividad metalúrgica. Milián (2015), diseña un procedimiento para la rehabilitación minero ambiental de los yacimientos polimetálicos en Pinar del Río. Los autores, aplican el método de escenarios comparados para proponer medidas de mitigación de los impactos. Las propuestas no contemplan un enfoque ecosistémico y el objeto de análisis son solo pasivos ambientales de la minería.

Se sostiene como problema de investigación el hecho de que los inventarios de pasivos ambientales en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, han sido restringidos a los impactos de la minería y no han tenido caracterizaciones ambientales y cartográficas integrales, para asegurar su gestión efectiva por los responsables. El objetivo de la investigación consiste en desarrollar una caracterización ambiental y cartográfica de los PA de la región de Santa Lucía, municipio Minas de Matahambre. El alcance de esta caracterización considera un inventario de los PA sobre nuevos presupuestos teóricos que sostiene una mayor diversidad de fuentes de generación y su respectiva clasificación, así como un SIG de estos PA para la región de acuerdo a su distribución espacial y características generales.

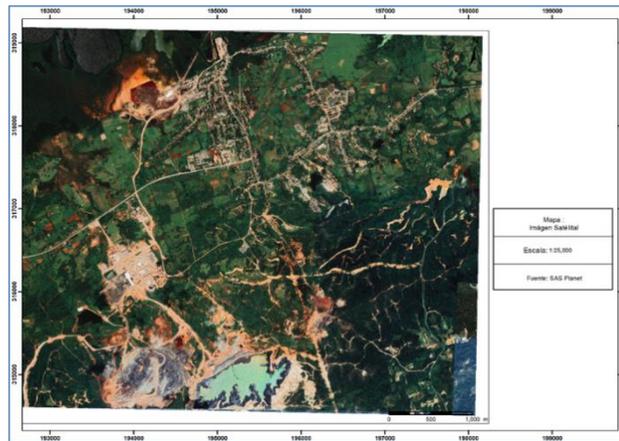
## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El área de estudio se localiza en el municipio Minas de Matahambre al noroeste de la provincia de Pinar del Río (Cuba), los límites naturales del territorio se marcan con el río Santa Lucía, el río Nombre de Dios, con la Sierra de los Órganos y el Golfo de Santa Lucía. Se encuentra delimitada por las coordenadas Lambert (NAD 1927 Cuba Norte):

$$X_{\min} = 195\ 000 \quad X_{\max} = 199\ 000$$

$$Y_{\min} = 315\ 000 \quad Y_{\max} = 318\ 000$$

Se empleó una imagen satelital de SAS Planet de 2020, que se muestra en la figura 1 y se efectuó una superposición de la imagen satelital sobre la hoja cartográfica de Santa Lucía, para asegurar la máxima precisión en los elementos biogeonaturales de la región.



**Figura 1.** Mapa de la imagen satelital de SAS Planet 2020 de la región de Santa Lucía. Fuente: Álvarez, Bruguera, Hernández y Ramírez, 2020.

Para desarrollar el levantamiento cartográfico de los PA en la zona, se delimitó el área de estudio en la región de Santa Lucía, donde se concentra el universo total de los pasivos del inventario. Se dividió la zona de estudio en subregiones, con el objetivo de lograr abarcar la mayor cantidad de áreas posibles en la realización del levantamiento cartográfico de los PA, a través de tres cuadrantes en los cuales esta división permitió ubicar por regiones geográficas los distintos itinerarios a realizar. Partiendo de la aplicación del método geológico de itinerarios irregulares se trazaron los recorridos para el levantamiento cartográfico.

Para el análisis del estado del abordaje y gestión de los pasivos ambientales (PA) a nivel nacional e internacional se realizó una amplia búsqueda de información científico – tecnológica actualizada en las principales bases de datos disponibles en plataformas tales como: *ReserachGate*, *Academia.edu* y *Google Académico*, con acceso y soporte a las principales revistas y bases de datos de publicaciones seriadas más relevantes acerca del tema.

Las herramientas utilizadas para el procesamiento y confección de los mapas y el SIG previsto en el trabajo investigativo estuvieron apoyadas por SAS Planet y ArcMap con los cuales se llevaron a cabo las fases metodológicas típicas de un proyecto de SIG. Para la confección de los mapas se trabajó sobre la base del MDT disponible a escala 1:25000 que permitió la representación cartográfica con más exactitud, lo cual se corresponde con lo descrito por Palacio (2017) para el tratamiento y desarrollo de SIG.

La plataforma SAS Planet empleada fue la versión 200606, proyección Mercator en WGS 1984 y EPSG: 3395, para la UTM zona 17N. Esta valiosa herramienta permitió la captura georreferencial a gran escala del área de estudio logrando una imagen satelital proveniente del

servidor convencional *Google Earth* de alta resolución. El SIG se representa por primera vez en objetos cartográficos únicos, mediante la superposición de mapas temáticos de atributos de los PA del inventario. Esto propicia la interrelación de los rasgos entre pasivos y la obtención de patrones a seguir para nuevos análisis geoambientales de la zona.

El empleo de los instrumentos de modelación geoespacial para el análisis y caracterización de los PA de la región minera de Santa Lucía, facilita el manejo efectivo de los impactos provocados sobre los recursos naturales y los ecosistemas, según los propósitos del proyecto. El desarrollo de un SIG de los PA de la región, contribuye a su análisis integral y determinación de posibilidades de remediación a partir de su respuesta y reversibilidad, mediante un modelo cartográfico integral que propicia la interrelación de los rasgos entre pasivos y la obtención de patrones a seguir para nuevos análisis geoambientales sin precedentes para la zona.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

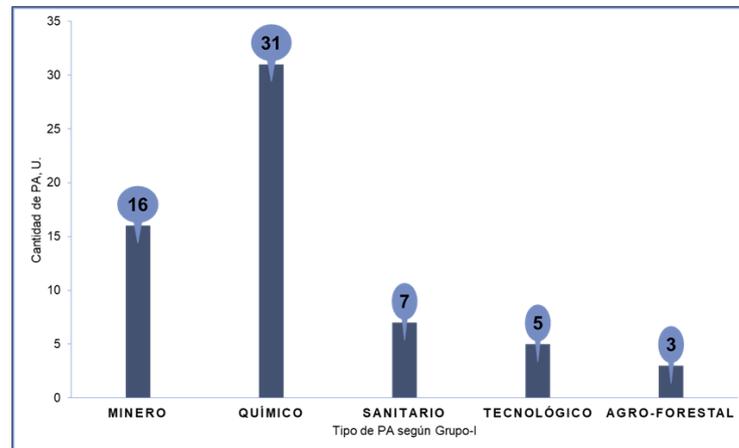
Los cambios en los ecosistemas naturales de la región, producto de las actividades mineras, agro-forestales, sanitarias, químicas y otras, ha provocado la fragmentación de los ecosistemas y el deterioro de los recursos naturales, a nivel de poblaciones y de procesos ecológicos. Se sostiene en el desarrollo de la investigación, dos tipos de fuentes que generan PA: naturales y antrópicas, en correspondencia con lo reportado por Bruguera, Gallardo y Díaz (2020).

Este enfoque considera todo tipo de actividad socioeconómica que afecta estado ambiental previo o dispone inadecuadamente sus residuos. Se correlaciona la proporción entre explotación del recurso natural, la emisión de residuos, la naturaleza del pasivo ambiental, los componentes activos de este y su ciclo de vida. Así mismo, establece la premisa que debe sostenerse en el abordaje de los PA en cuanto a la perdurabilidad, persistencia y reversibilidad de sus efectos.

A partir de este enfoque, resulta adecuado, considerar al PA, como aquel estado alterado de las condiciones iniciales naturales del medio ambiente por causas antrópicas que ocasiona o puede ocasionar potencialmente daños a los ecosistemas. Para facilitar el inventario y la organización del SIG, se ha considerado la clasificación específica establecida para los tres grupos de pasivos ambientales reportadas por (Bruguera, Gallardo y Díaz, 2020). Correlaciona la proporción directa entre la explotación de los bienes naturales disponibles y la emisión de residuos en su entorno inmediato, próximo o indirecto.

En el trabajo se consideró para el análisis la clasificación establecida de acuerdo a la naturaleza de la causa antrópica que genera el PA en minero (PAM), químicos (PAQ), sanitarios (PAS),

tecnológico (PAT) y agroforestal (PAF). El inventario de la región reporta 62 PA de acuerdo a esta clasificación, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 2.** Inventario de pasivos ambientales según la naturaleza de la causa humana que lo genera. Fuente: Bruguera, Gallardo y Díaz, 2020.

Los autores sostienen que un pasivo ambiental minero (PAM), es generado por los procesos de extracción minera y beneficio metalúrgico de menas metálicas y no metálicas, a partir de fuentes primarias renovables y no renovables, con modelos productivos incompletos, que implica la disposición de subproductos y derivados meníferos con componentes activos, que generan una fuente de riesgo en su ciclo de vida. Para la región de estudio, se reportan como pasivos de esta naturaleza, los que se muestran en la figura siguiente:



**Figura 3.** Pasivo ambiental minero (PAM) en la región de Santa Lucía. (A)-Frente de explotación del yacimiento Castellanos, (B)-Frente explotación abierto de la cantera Santa Lucía sin rehabilitar, (C)-Depósito 3 de cenizas de pirita tostada en la zona costera. Fuente: Bruguera, Gallardo y Díaz, 2020.

El pasivo ambiental químico (PAQ), se considera al provocado por procesos de manejo incompleto de sustancias químicas naturales o sintéticas, como derivados de actividades productivas o del empleo y uso industrial, investigativo, docente, energético, metalográfico, farmacéutico y fitosanitario de sus componentes activos con potencial peligroso, durante su ciclo de vida. Para la región de estudio, los procesos precedentes y actuales, han provocado la generación de este tipo de PAQ, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 4.** Pasivo ambiental químico (PAQ) en la región de Santa Lucía. (A)-Presa de las colas del proceso de flotación de plomo y zinc, (B)-Nichos con desechos peligrosos en la zona costera, (C)-Aguas ácidas confinadas en la zona costera por el talud producto al lavado de las cenizas tostadas. Fuente: Bruguera, Gallardo y Díaz, 2020

Por su parte, el pasivo ambiental sanitario (PAS), se considera al generado en los procesos de manejo incompleto de residuos, derivados de actividades productivas, de servicios y de consumo en instalaciones sanitarias, residenciales, agropecuarias, alimentarias y de disposición de materiales con elementos bioquímicos activos, que generan una fuente de riesgo para los componentes del medio ambiente en su ciclo de vida. El pasivo ambiental tecnológico (PAT), es el que se asocia con infraestructuras de instalaciones y dispositivos abandonados o temporalmente inactivos de procesos tecnológicos precedentes para la producción industrial de bienes y servicios con elementos estructurales, no estructurales y funcionales activos; que generan riesgos latentes o potenciales para los componentes del medio ambiente o la modificación y fragmentación del paisaje.

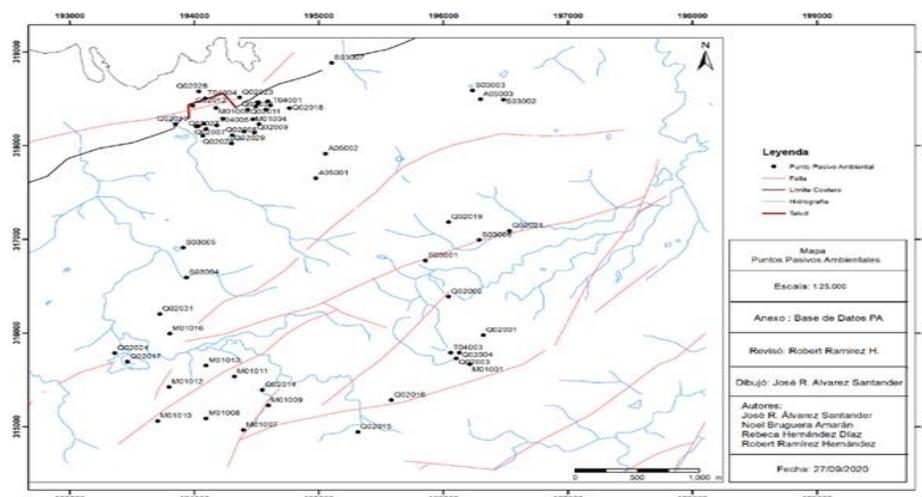
Asimismo, el pasivo ambiental agroforestal (PAF), está condicionado por depósitos de materiales derivados de procesos agropecuarios y forestales (depósitos de biomasa cañera y forestal); biomasa agrícola (residuos de cosecha de arroz, cítricos, café, otros); biomasa industrial (alimenticia, papelera, textil, otros); biomasa actividad pecuaria (ganadera mayor y menor); con elementos biológicos y físico-químicos activos, que generan una fuente de riesgo o provocan la fragmentación y alteración de la funcionalidad ecosistémica para los componentes del medio ambiente en su ciclo de vida.

En la región objeto de estudio se han ejecutado procesos minero-metalúrgicos que han generado volúmenes considerables de materiales con alto potencial contaminante, entre los que resaltan, los depósitos de ceniza de pirita tostada ( $\text{FeS}_2$ ) producto a la explotación metalúrgica, con más de 986 000 t dispuestas al medio en la zona costera. En el año 1999, se reinicia en la planta Sulfometales la producción de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a partir del azufre primario, por un esquema corto de producción metalúrgica. Otras fuentes de contaminación en la región, se distinguen por la presencia de más de 300.0 t de arsénico (As) y 7.0 t de pentóxido de vanadio

(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en torres de absorción con alto deterioro estructural. Resaltan los 17 nichos de confinamiento con desechos peligrosos generados en los procesos industriales, entre otros depósitos de PA.

Del inventario de los 62 pasivos ambientales identificados en el inventario se aprecia, en la región de Santa Lucía, el 76% son pasivos ambientales químicos (PAQ) y mineros (PAM), lo cual se corresponde con las características socio-económica y evolución histórica de esa región. Además, el 11% son sanitarios (PAS), el 8% son de naturaleza tecnológica (PAT) y el 5% agroforestal. Teniendo en cuenta, los tipos de procesos tecnológicos desarrollados en la región de estudio, se distinguen mayoritariamente los pasivos químicos y mineros, expresados en los drenajes ácidos y los filtros de neutralización empleados para su tratamiento físico-químicos, además los amplios inventarios de productos químicos caducos y desechos peligrosos disponibles en las instalaciones de la zona, los frentes de explotación de los dos yacimientos explotados, entre otras fuentes de PAQ y PAM.

Como resultado del inventario de los PA para la región de estudio Santa Lucía, se desarrollaron las representaciones cartográficas según los tipos de pasivos y los elementos biogeoambiental de interés para el SIG, logrando integrar toda la información geográficamente referenciada, permitiendo analizar la información espacial, editar los datos y presentar los resultados de todas las operaciones geoespaciales realizadas. Como parte de los resultados de esta representación geográfica haciendo uso de los SIG y en particular del software ArcGIS, se desarrolló el mapa de cada tipo de PA. En la figura siguiente se representan los 62 PA en su relación con la red hidrográfica y la tectónica de la región.



**Figura 5.** Mapa de ubicación de los PA del inventario para la región de Santa Lucía en relación a la red hidrográfica y la tectónica. Fuente: Álvarez, Bruguera, Hernández y Ramírez, 2020.

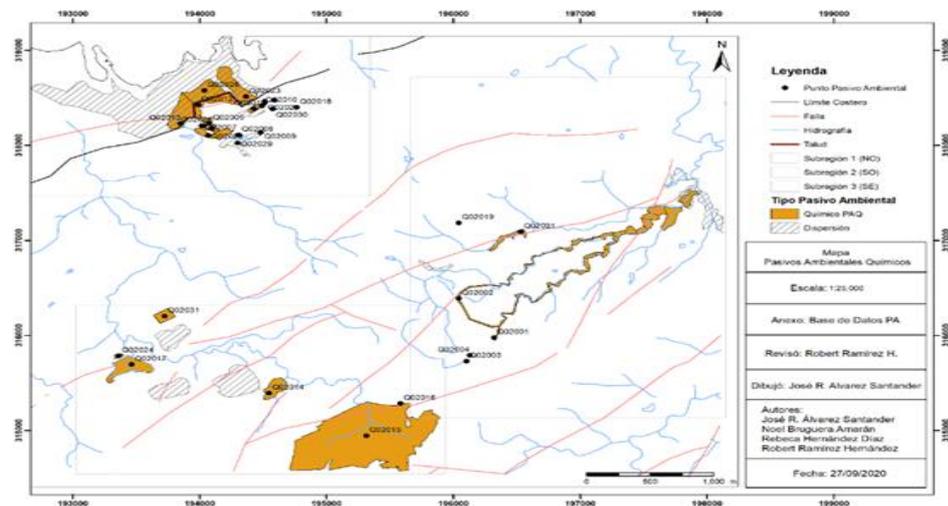
Según el esquema tectónico de la región, demuestra la existencia de una falla que corta las tres subregiones donde se concentran los PA. Teniendo en cuenta que para los yacimientos SEDEX, las fallas normales son las tipologías características de esta región, con lo cual se infiere que propicia la dispersión e infiltración de los elementos contaminantes hacia los fondos marinos y hacia los acuíferos subterráneos de la zona. Representadas por las fallas de inversas-sobrecorrimiento, que delimitan escamas y otras fallas inversas conjugadas. También están presentes las fallas inversas con desplazamiento (Falla Manacas, Limonar), fallas con buzamiento abrupto con desplazamiento vertical (Falla Laguna, Macurije). Con lo cual se establece que para las fallas inversas ejerce como mecanismo de contención de la dispersión y acumulación de los sedimentos portadores de contaminantes en los ecosistemas acuáticos, en particular los marinos (Álvarez, et. al., 2020). Teniendo en cuenta, ambas hipótesis sostenidas por los autores, se requiere desarrollar estudios posteriores sobre los tipos de fallas, contactos geológicos y lineamientos que prevalecen en la zona objeto de estudio, con lo cual se concluya la incidencia del tipo de falla en el comportamiento del proceso de dispersión de los contaminantes.

La información aportada por el SIG, se representa espacialmente los 14 PAM del inventario en las tres subregiones del área objeto de estudio. Como se aprecia, el 81% de los PAM se registran en las subregiones del oeste de la región de estudio, es decir subregión 1 y 2, correspondiendo con los dos yacimientos y los depósitos de residuos mineros, generados por la actividad extractiva en los procesos actuales y precedentes.

A partir del modelo digital del terreno (MDT) para esta área de Santa Lucía los pasivos mineros identificados en la subregión-1 (NO), se encuentran en el primer intervalo de elevación enumerado entre 0 y 32 m sobre el NMM, correspondiendo con las zonas más bajas del terreno en posición perpendicular a la línea de costa, lo cual facilita el escurrimiento y dispersión de los elementos contaminantes, durante eventos de lluvia o vientos hacia la zona costera. Esto se corresponde con los resultados reportados en estudios precedentes (Gallardo, 2018), en cuanto a las determinaciones analíticas semicuantitativas de las muestras tomadas de sedimentos del fondo marino y en manglar en esa porción costera. Se reporta un índice de acidez alto (pH) de 2.63 unidades en las tres muestras analizadas. Además, una concentración de plomo (Pb- 1,21 mg/l), 2,48 mg/l de azufre total y 0,17 mg/l de Fe, siendo excesivamente altos para los niveles exigidos por la NC: 521/2007 (ONN, 2007).

En cuanto a la relación de los PA con las unidades geológicas representadas en la zona, los pasivos de la subregión NO descansan sobre la formación Santa Teresa, lo que propicia una interacción química con las rocas típicas de la formación, específicamente las silicitas, agravando los impactos en el subecosistema acuático marino y sobre la formación Esperanza, con secuencia carbonatadas.

En cuanto al inventario de los 31 pasivos ambientales de naturaleza química (PAQ), se muestran en el mapa siguiente los que tienen la mayor representatividad en la región objeto de estudio, provocado por los procesos precedentes y actuales ejecutados en Santa Lucía, como una zona que posee una alta vocación minero-metalúrgica.



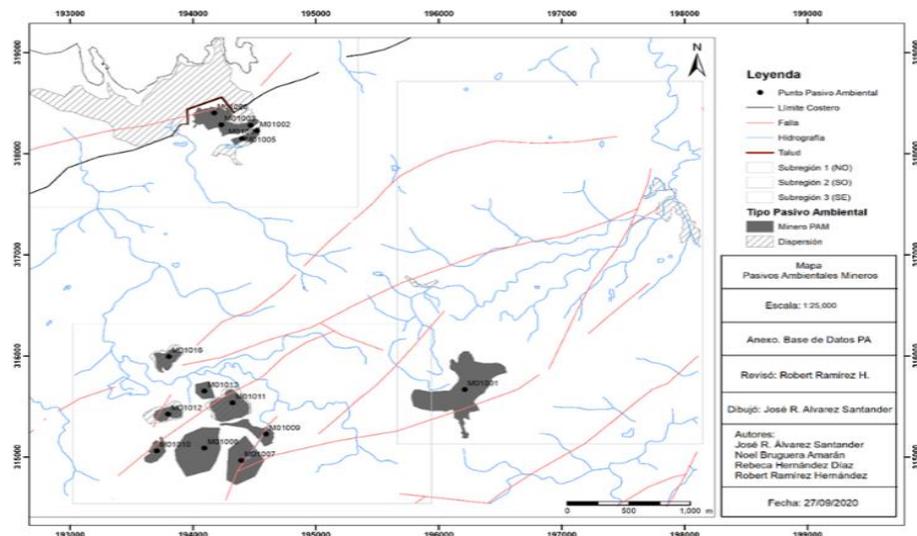
**Figura 6.** Mapa del inventario de PAQ para la región minero-metalúrgica de Santa Lucía. Fuente: Álvarez, Bruguera, Hernández y Ramírez, 2020.

Los 31 PAQ, se encuentran dispersos en las tres subregiones delimitadas para el área de estudio, representativos de extensos drenajes ácidos de minas (DAM) en los yacimientos Santa Lucía y Castellanos, así como por amplios inventarios de productos químicos ociosos, caducos y otros desechos peligrosos, los que no disponen de soluciones de manejo adecuadas y por consiguiente impactan negativamente sobre los ecosistemas receptores. En el caso específico del DAM del yacimiento Santa Lucía en sus dos vertientes, ocupa una extensión de 2,2 km, descargando sus drenajes ácidos en el cuerpo de agua de naturaleza lenticas conocida como La Laguna.

Como se constató en las visitas in situ a los escurrimientos de los DAM, las coloraciones rojopardas de los drenajes ácidos son representativas de fases oxidadas de la pirita (szomolnokita, rozenita, bianchita, melanterita y magnesio-copiapita), como resultados de la acción biótica y meteorización natural. Este proceso, genera la formación in situ de la sulfosal compleja

natrojarosita en las acumulaciones acuosas en el yacimiento Santa Lucía, durante el DAM y en los sedimentos analizados en el manglar, siendo representativos de elementos geodisponibles y con potencial contaminante para los ecosistemas receptores.

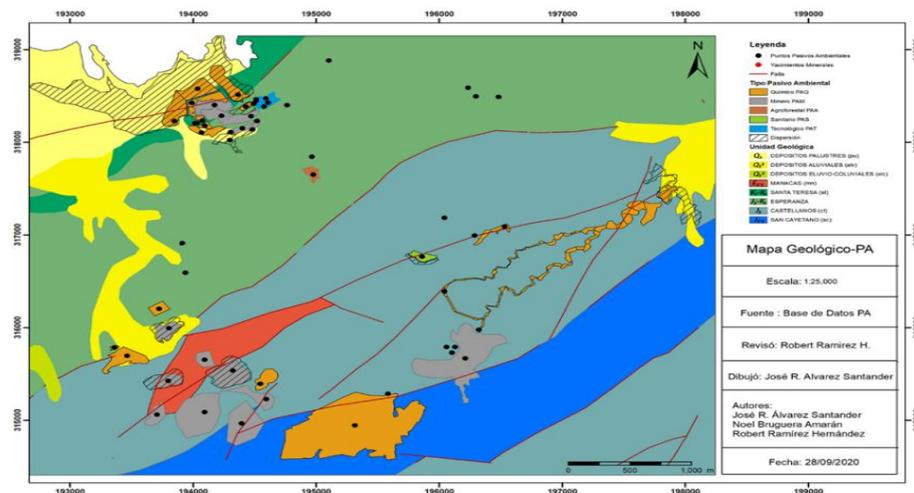
Para los pasivos ambientales de naturaleza minera, se muestra a continuación la representación del inventario de los 16 PAM identificados en Santa Lucía:



**Figura 7.** Mapa del inventario de PAM para la región minero-metalúrgica de Santa Lucía. Fuente: Álvarez, Bruguera, Hernández y Ramírez, 2020.

Como se aprecia, el 81% de los PAM se registran en las dos subregiones del oeste de la región de estudio, correspondiendo con los dos yacimientos y los depósitos de residuos mineros. A partir del MDT, para esta área de Santa Lucía los pasivos mineros identificados en la subregión-1 (NO), se encuentran en el primer intervalo de elevación enumerado entre 0 y 32m sobre el NMM, correspondiendo con las zonas más bajas del terreno en posición perpendicular a la línea de costa, lo cual facilita la dispersión de los contaminantes. Esto se corresponde con los resultados reportados por Gallardo (2018) en las determinaciones analíticas semicuantitativas de las muestras tomadas de sedimentos del fondo marino y en manglar en esa porción costera.

En cuanto a la relación de los PAM con las unidades geológicas representadas en la zona, los pasivos de la subregión NO descansan sobre la formación Santa Teresa, lo que propicia una interacción química con las rocas típicas de la formación, específicamente las silicitas, agravando los impactos en el subecosistema acuático marino y sobre la formación Esperanza, con secuencia carbonatadas. En cuanto a la correlación del inventario de PA con las unidades geológicas representadas en la región de Santa Lucía, se expone en el mapa siguiente:



**Figura 8.** Mapa de correlación geoespacial de los PA del inventario con las unidades geológicas representadas en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía. Fuente: Álvarez, et al, 2020.

Como se aprecia, el mayor número de pasivos ambientales del inventario de tipo PAQ y PAM, se concentran sobre la formación Esperanza y Santa Teresa para la subregión NO y para las restantes dos subregiones (SE y SO) se desarrollan sobre unidad geológica Castellano.

Asimismo, se constata que el mayor número de representaciones de los PA coincide sobre los depósitos aluviales y los palustres, correspondiendo con los ecosistemas acuáticos y mixtos (humedales costeros e interiores) más frágiles, lo que facilita un mayor grado de dispersión de los elementos contaminantes de estos pasivos químicos y mineros en estas zonas más vulnerables.

## CONCLUSIONES

Se sostiene y aporta una nueva concepción para clasificar y definir los pasivos ambientales a partir de la naturaleza de los factores antrópicos que los generan, la naturaleza de los componentes activos que los caracterizan y según la naturaleza de la respuesta a la acción de remediación que se propone, que constituye una valiosa herramienta sin precedentes en la literatura científico-tecnológica disponible.

Se alcanza el propósito de actualizar y registrar el inventario de PA en la región objeto de estudio, mediante el empleo de herramientas y modelos informáticos avanzados, con un registro de 62 PA y la obtención de un SIG que corrobora los análisis precedentes sobre las fuentes generadoras de contaminación ambiental en la zona y grado de dispersión.

Se obtiene por primera vez para la región una caracterización cartográfica del inventario de los pasivos ambientales generados por la explotación de los recursos disponibles y por la

disposición de sus residuos en una región con alta vocación minero-metalúrgica, integrada a los componentes geonaturales de la zona con evidente degradación de los ecosistemas y la biodiversidad asociada, lo que contribuirá a ejercer una gestión más efectiva de los responsables de los PA.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Acido de Mina. Generación y tratamiento. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Instituto Geológico y Minero de España. 140 p.
- Álvarez, J.R.; Bruguera, N.; Hernández, R.; Ramírez, R. (2020). Modelo Cartográfico Integrado de los Pasivos Ambientales (PA) en la región minero-metalúrgica de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba. (Tesis en opción al título de Ingeniero Geólogo). Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". 100p.
- ANPP (Asamblea Nacional del Poder Popular). (1997). Ley 81 del Medio Ambiente. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Edición extraordinaria. La Habana, Año XCV, No.7, 47p.
- ASGMI (Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos). (2010). Pasivos Ambientales Mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. Barquisimeto. 37 p.
- Bruguera, N.; Gallardo D. y Díaz J.A. (2020). Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba. Avances. 22(3). p469-490. Recuperado de <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/1627>.
- Bruguera, N.; Álvarez, J.R.; Gallardo D.; Ramírez R.; Hernández, R.; Estévez, E.; Hernández L.I.; Pozo J. (2021). Impactos de los pasivos ambientales en la fragmentación de los ecosistemas de la región minera de Santa Lucía, Cuba. Ponencia al VIII Congreso sobre Manejo de Ecosistemas y Biodiversidad. XIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. CUBAMBIENTE´2021. La Habana, Cuba 5 al 9 de julio. pp. 810-823.
- Bruguera, N.; D. Gallardo y Díaz. (2021). Los pasivos ambientales en el contexto de la política ambiental cubana. Ponencia al V Congreso de Política, Derecho y Justicia Ambiental de la XIII Convención de Medio Ambiente y Desarrollo CUBAMBIENTE´2021. Fecha: 5-9 de julio de 2021. Sede: Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

- Cañete, C., Jornada, A.S., Marmos, J.L., Ponce, N., Milián, E., Barrios, E. (2011). Riesgos ambientales provocados por el pasivo ambiental de Santa Lucía, Pinar del Río. En: SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA. IV Congreso Cubano de Minería. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Palacio de Convenciones. La Habana.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2018). Reflexiones sobre el desarrollo en América Latina y el Caribe: conferencias magistrales 2016-2018. LC/PUB.2018/14, Santiago de Chile. 70 p.
- CITMA (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente). Delegación Territorial Pinar del Río. (2019). Estrategia Ambiental Territorial. 2016-2019. Pinar del Río, 19 p.
- CITMA (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente). (2018). Política para el Perfeccionamiento del Sistema Ambiental. Documento de consulta al Consejo de Ministros de la República de Cuba. 12 p.
- Delgado, B., Lubián, T., Del Río, M., Cortés, N., Milian, E. (2011). Metodología para inventariar pasivos mineros ambientales en la zona Santa Lucía. En: SOCIEDAD CUBANA DE GEOLOGÍA. IV Congreso cubano de minería. 4ta. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Palacio de Convenciones, La Habana.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2010). Assessing Relative Bioavailability in Soil at Superfund Sites. Recuperado de <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/bioavailability/index.htm>.
- Fuentes, R.I., Iturralde, M.A. y Hernández, A. (2013). Pasivos Ambientales Mineros y aguas subterráneas en la provincia de Matanzas. Estudio de caso. Cantera Vizcaya. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 14(2), 170-178.
- Gallardo, D., Bruguera, N., Díaz, J. A., Lastra, J. F. & Pons, J. A. (2017). Modelo de gestión ambiental para la recuperación de los ecosistemas asociados a la actividad minero-metalúrgica en el campo mineral Santa Lucía Castellanos. En VII Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana. 3-7 de abril.
- Gallardo, D. (2018). Modelo de gestión ambiental integral para el desarrollo de la actividad minero-metalúrgica asociada a los yacimientos sulfurosos en Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Pinar del Río, Cuba. Universidad de Pinar del Río. 100 p.

- GEOMINERA (Empresa GEOMINERA Pinar del Río). (2019). Informe sobre la historia ambiental del yacimiento Castellanos. En: Empresa Geominera. Departamento técnico, Minas de Matahambre. Pinar del Río, 6p.
- La Rota, A. M., & Torres, M. H. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. Rio de Janeiro. Saúde Debate, 41(112), 77-91.
- Milian, E. (2015). Procedimiento para la rehabilitación minera ambiental para los yacimientos polimetálicos de Pinar del Río. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín, Cuba. 100 p.
- Oblasser, Á. (2016). Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras. Bolivia, Chile, Colombia y Perú. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo, N° 163, 107 p.
- Palacio, A. (2017). Análisis de percepción en la gestión de espacios naturales y el uso de sistemas de información geográfica de participación pública. UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI. Tesis Doctoral. 100 p.
- Pons, J. A. (2018). Conferencia Magistral: Los Pasivos Ambientales. Caso de estudio de los depósitos de minerales lateríticos. Delegación Territorial del CITMA en Pinar del Río.

-----

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

**Contribución de los autores:**

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.