



PRINCIPALES ASOCIACIONES MINERALÓGICAS DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS Y GEODISPONIBLES EN MENAS Y RESIDUALES DEL PASIVO MINERO “SANTA LUCÍA”

José A Alonso⁽¹⁾, Ileana Cabrera⁽¹⁾, Andrés Pinto⁽²⁾, Guillermo Cozzi⁽²⁾, Blasa Delgado⁽¹⁾, Damaris Gallardo⁽³⁾, Gisselle Valdivia⁽¹⁾, Abdel Casanova¹, Anolan Díaz⁽¹⁾, Nery Díaz⁽¹⁾, Antonio Aguila⁽¹⁾, Lucía Canel¹, Roxana Trueba⁽¹⁾ y José Carlos Rodríguez⁽¹⁾

(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Grupo Empresarial GEOMINSAL, MINBAS, Cuba, e-mail: joseantonio@cipimm.minbas.cu

(2) Instituto de Tecnología Minera (INTEMIN), Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR): e-mail andres.pinto@segemar.gov.ar; guillermo.cozzi@segemar.gov.ar

(3) Empresa Territorial de Medio Ambiente Pinar del Río; Cuba, e-mail: damarisdgm@uma.vega.inf.cu

RESUMEN

Se exponen los resultados finales del proyecto SEGEMAR-CIPIMM que durante el período 2009-2010 ejecutaron ambas instituciones, con el objetivo de determinar las asociaciones mineralógicas de elementos potencialmente tóxicos y geodisponibles en muestras de menas primarias y residuales, colectadas en campañas de seca y lluvia en el Pasivo Minero (PAM) “Santa Lucía”, mediante el empleo de Técnicas Analíticas de Avanzada, dado al alto índice de contaminación de diferentes elementos tóxicos geodisponibles solubles (ETG) a los acuíferos de dicha región, debido a los intensos procesos de Drenaje Ácido de Mina (DAM) que allí tienen lugar.

Las elevadas concentraciones de ETG detectadas en residuales líquidos, todas por encima de los valores límites que establece la norma cubana 27/1999 de aguas residuales, corroboran los resultados anteriores reportados por el CIPIMM, la ONRM y el CITMA de nuestro país.

En las menas primarias, se confirma mediante el empleo de la técnica instrumental de DRX, el conjunto de reacciones DAM, con formación inicial del sulfato de Fe II monohidratado (szomolnokita) por oxidación de la pirita.

En los abundantes escurrimientos que se observan formando costras blancas sobre la superficie de las menas primarias, se identificaron además: rozenita y melanterita, que indican la hidratación continua de estas sales, acompañada de la copiapita y coquimbita, estas últimos sulfatos de Fe III señalan la acción catalítica de las bacterias acidófilas del género *thiobacillus ferrooxidans* presentes en el PAM y la posterior reducción de estos a melanterita.

Por su parte, en el socavón se observan sales de colores azules-celestes y verde-amarillentos que se distribuyen de forma irregular alrededor de una planicie que rodea al mismo, acompañados de melanterita, rozenita y bianchita (fase portadora del ETG Zn). Todos los sulfatos identificados, conocidos como “yellowboys”, constituyen las fuentes principales de ETG: Fe^{2+} , SO_4^{2-} y Zn^{2+} que aumentan las cargas contaminantes de escorrentías, arroyo secundario y el río Santa Lucía.

Se concluye finalmente que en los diferentes sedimentos analizados, no existe aporte significativo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que aumenten con posterioridad la carga contaminante de ETG al río “Santa Lucía”.

ABSTRACT

The final results of the Project SEGEMAR-CIPIMM that during 2009-2010 was carried out by both institutions are exposed with the objective to determine the mineralogical associations of potentially toxic and geo-available elements in our primary ores and residuals, collected in the dry and rainy campaigns in the “Santa Lucía” Mining Passive (PAM) using the Leading Edge Analytical Techniques, due to the high index of pollution of different geo-available soluble toxic elements (ETG) to the water sources of this region, because of the Acid Drainage of the Mine (DAM) that take place there.



The high ETG concentrations detected in liquid wastes, all of them over the limit values established by the Cuban Standard 27/1999 for waste waters, corroborated the previous results reported by CIPIMM, ONRM and CITMA of our country.

In the primary ores, it is confirmed through the use of the instrumental XRD technique, there is a group of DAM reactions with the initial formation of monohydrated Fe II sulfate (zsomolnokite) by the oxidation of pyrite.

In the abundant leakages that are observed forming white scales on the primary ores surfaces, there were also identified: rozenite and melanterite, which indicate the continuous hydration of these salts, accompanied by copiapite and coquimbite, these last ones Fe III sulfates point to the catalytic action of the acidophil bacteria of the Thiobacillus Ferrooxidans, present in the PAM and their further reduction to melanterite.

Besides, in the gallery can also be observed light blue and green-yellow salts irregularly distributed around the flat surrounding it and accompanied by melanterite, rozenite and bianchite (bearing phase of the ETG Zn). All the sulfates identified, known as "yellowboys", constitute the main sources of ETG: Fe^{2+} , SO_4^{2-} y Zn^{2+} that increase the polluting loads of leakages, secondary river and the Santa Lucía river.

Finally it is concluded that in the different sediments analyzed, there is not a significant apportion of potentially toxic elements (EPT) that further increase the polluting load of the ETG to the "Santa Lucía" river.

INTRODUCCION

Como parte de la política ambiental que desarrolla Cuba a partir del otorgamiento de rango constitucional al Medio Ambiente y al ser incluido en la constitución de la República en 1976 en el artículo 27, la promulgación de la ley 33 de enero 1981 acerca de: "La protección del Medio Ambiente y del uso racional de los recursos naturales", las resoluciones emitidas hasta la promulgación de la "Ley 81 del Medio Ambiente en 1997" y de Minas en 1994, el Grupo GEOMINSAL en correspondencia con la política y estrategia del Ministerio de la Industria Básica desarrolla de forma continua a lo largo de todos estos años su propia estrategia ambiental para la actividad minera, con una adecuada gestión sobre el tema y en particular de gran relevancia para el desarrollo futuro del sector minero sostenible del país.

En el marco de las premisas anteriormente señaladas y con vistas a mejorar el entorno ambiental, se pensó en la realización de un proyecto para realizar trabajos de caracterización y la elaboración de propuestas para reducir en la mayor medida posible la contaminación que produce desde hace años la mena piritó-polimetálico con mineralización de barita "Santa Lucía" y "Castellanos". Estas concesiones mineras se localizan en las cercanías del poblado Santa Lucía, en el municipio Minas de Matahambre, provincia de Pinar del Río, cercanas a la costa norte. Corresponden sus menas a la clasificación geólogo- industrial piritó-polimetálica y se asocia a rocas vulcanógeno-sedimentarias de la Fm. San Cayetano. Presentan diferentes tipos morfológicos de los cuerpos minerales, ya sean en forma de capas y lentes concordantes, con una textura masiva bandeada. Los minerales meníferos se encuentran como sulfuros y sulfatos: pirita, esfalerita, galena y barita (1). Por ello constituyó desde la década de los años 70, uno de los principales recursos económicos de interés para la economía cubana, como fuente de materia prima para la producción de ácido sulfúrico en el Complejo Industrial fábrica de sulfometales. Dicha zona la conforman tres PAMs: la mina "Santa Lucía", "Castellanos" y la planta sulfometales.

Las mayores afectaciones al medio han sido ocasionadas por la apertura y cierre de las menas sulfurosas del flanco oriental del yacimiento "Santa Lucía", operación que de forma continua se desarrolló durante 20 años para la obtención de la pirita rica en azufre, así como también la explotación de las menas oxidadas (sombrero de hierro) para la recuperación del oro en el caso de las menas de "Castellanos", señalándose como aspecto de interés que en ambas minas no se han tomado aún las medidas necesarias para el cierre seguro y eficiente de las mismas que considere los aspectos medioambientales establecidos por el CITMA de nuestro país.



El DAM es un proceso físico-químico en el cuál ocurre la oxidación química de las menas y en la que participan microorganismos biológicos que catalizan la reacción de los sulfuros primarios: pirita, esfalerita y galena en estos pasivos mineros, elevando de forma significativa a valores extremos el pH ($< 3,0$) de las aguas residuales o escorrentías que vierten sus cudales hacia los dos ríos más importantes de las zonas aladañas a los depósitos: el río “Santa Lucía” y “La Palma” respectivamente.

Siempre fue de interés en el CIPIMM estudiar con profundidad los serios problemas actuales de contaminación ambiental que ocasiona al ecosistema la zona minero-industrial de Santa Lucía y Castellanos, en lo que se refiere fundamentalmente a los aspectos que se relacionan con la calidad e influencia de la carga contaminante de metales pesados a las aguas y efluentes de dicha región. Debido a que dicha zona es muy extensa y la cantidad de muestras obtenidas son excesivas para la realización de todos los ensayos y análisis de los resultados en el plazo de un año de que se dispone para el proyecto, decidimos en esta primera etapa del año 2009 concentrar los esfuerzos y recursos disponibles en el proyecto en la mina “Santa Lucía” y de forma muy general en la mena Castellanos y las cenizas de la planta de sulfometales y como una segunda etapa que debe comenzar a partir del año 2010, darle continuidad e integración a todos los resultados de conjunto y de esta forma contribuir al logro mediambiental sustentable de la región objeto de estudio, por ello se propuso la realización de un nuevo proyecto en la mena “Castellanos” y complementar el de los residuos que se generaron en la planta de sulfometales para la producción de ácido sulfúrico “Patricio Lumumba” de “Santa Lucía”, los que resultan altamente contaminantes al ecosistema que rodea al poblado de Santa Lucía.

En Cuba los trabajos que abordan la caracterización de las fases sólidas que aportan dichos EPT son aún insuficientes, por no contar en el país con todas las técnicas instrumentales de análisis mineralógicos necesarias para la caracterización integral de las muestras sólidas y su relación con los analitos contaminantes presentes en las aguas y residuales líquidos. Es por esto, que surgió este nuevo proyecto con la finalidad de darle respuesta a esta problemática ambiental y por consiguiente, la importancia que representaría el de incluir los trabajos de mineralogía analítica en los estudios de impacto ambiental para el correspondiente otorgamiento de la licencia durante la apertura y/o cierre de PAMs .

Por lo expuesto, el objetivo general del proyecto fue el siguiente:

Determinar las asociaciones mineralógicas de elementos potencialmente tóxicos y geodisponibles en menas primarias, residuos sólidos y líquidos en el PAM “Santa Lucía” mediante el empleo de técnicas instrumentales modernas y ensayos analíticos tales como:

- Difractometría de polvos de rayos-X (DRX).
- Análisis Químico de componentes mayoritarios y trazas.
- Análisis Mineralógico.
- Análisis del pH de los efluentes que proceden de las escorrentías, aguas del río “Santa Lucía”, las soluciones de los diferentes muestras de los sedimentos recolectados en las menas de ambos yacimientos y de agua de mar del muelle de la planta de sulfometales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Todas las muestras analizadas, que incluyen los residuos sólidos y líquidos, se caracterizaron mediante Análisis Químico (AQ), A. Mineralógico y de Fases (AMF) respectivamente.

Los Análisis Químicos se realizaron en el Laboratorio en la DCM del CIPIMM mediante el empleo del procedimiento técnico elaborado al efecto, empleando para ello el método de fusión de la muestra



con metaborato de litio y lectura vía ICP-AES y/o Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) según el elemento específico y el rango de contenido a evaluar.

Los difractogramas se realizaron por el método de polvo, y se registraron en un equipo Philips modelo PW 1710 con las siguientes características:

Goniómetro	vertical
Sistema de focalización	Bragg-Brentano
Radiación	K α Fe
Filtros	Mn
Diferencia de potencial aplicada	30 kV
Corriente anódica	20 mA
Registro angular	6 - 80 $^{\circ}$ (2 θ)

Todos los difractogramas se registraron según la variante de medición punto a punto; paso angular de 0,05 $^{\circ}$ y tiempo de medición en cada posición de 3 segundos. La calibración del equipo se chequeó con patrón externo de silicio.

Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa Origin, versión 8.0. Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la base de datos PCPDFWIN compatible con Windows para Office 2000, versión 1.30, de la JCPDS-ICDD 2002.

Para los análisis por Microscopía Óptica se utilizó un Microscopio Estereoscópico Polarizador de la firma JENAPOL acoplado a una PC con cámara de video SONY.

En la Tabla I (Ver Anexo 1) se presenta la localización de las muestras de menas primarias, residuales sólidos, líquidos y aguas de río, seleccionadas en diferentes zonas del PAM con sus correspondientes coordenadas geodiferenciadas (GPS). En la tabla II se presenta además el muestreo que se realizó en los residuales líquidos y aguas.

Tabla I.- Descripción macroscópica de las muestras sólidas (sedimentos, sales) y líquidas (escorrentías, aguas de río y residuales) cercanas a los depósitos "Santa Lucía" con sus correspondientes coordenadas GPS y tomadas en el muestreo realizadd en Abril de 2009 y 2010.

CÓDIGO	SELECCION DE MUESTRAS Y LOCALIZACION EN EL PASIVO MINERO "SANTA LUCIA"
M-1	Mineral de mena primaria (lutita piritizada de color negro, compacta, densa, pesada) parcialmente alterada del frente de cantera (N 22 $^{\circ}$ 38,718 W 83 $^{\circ}$ 56,364, altitud 366 pies) tomada en época de muestreo Abril 2010
M- 2	Roca pirítica con costra blanquecina de agregados de cristales de espesor de 5 a 10 mm, que afloran en toda la cantera y cuya distribución es relativamente regular (N 22 $^{\circ}$ 38,718 W 83 $^{\circ}$ 56,364, altitud 366 pies) tomada en época de muestreo Abril 2010
M-3	Agregados de cristales euhedrales y subeudrales de color celeste a celeste-verdoso que provienen de la meteorización de la cantera (N 22 $^{\circ}$ 38,718 W 83 $^{\circ}$ 56,364, altitud 366 pies) tomada en época de muestreo de Abril 2010
M-3A	Alteración superficial de color amarillo de cristales que se desagregan fácilmente y cuya distribución es irregular y poca desarrollada respecto a la anterior de color blanquecino (N 22 $^{\circ}$ 38,718 W 83 $^{\circ}$ 56,364, altitud 366 pies) tomada en época de muestreo del 2010
M- 4	Sales de colores verde-amarillentas de aspecto euhedral y subhedral, mameliformes que se distribuyen de forman irregular a la salida del socavón de Santa Lucía (N 22 $^{\circ}$ 38,607 W 83 $^{\circ}$ 57,395) tomada en época de muestreo del 2009



M-4A	Sales de colores verde-amarillentas de aspecto euhedral y subhedral, mameliformes que se distribuyen de forma irregular a la salida del socavón de Santa Lucía (N 22° 38,607 W 83° 57,395) tomada en época de muestreo del 2010
M-5	Sedimentos de color ocre ubicados en la planicie de inundación a la salida del socavón que tapizan la superficie de los fragmentos de roca, con distribución localizada e irregular (N 22° 38,607 W 83° 57,395) tomada en época de muestreo del 2009
M-6	Sedimentos de color ocre que provienen de un embalse de una laguna con geles oxidados de hierro y (N 22° 38,607 W 83° 57,395) tomada en época de muestreo del 2009
M-7	Sedimento que proviene del arroyo secundario, compuesto de una arena fina de color castaño (N 22° 38,607 W 83° 57,395) tomada en época de muestreo del 2009
M-8	Sedimentos del efluente del río Santa Lucía donde desembocan los residuales líquidos del socavón y de la cantera (N 22° 38,607 W 83° 57,395)
M-9	Sedimentos ocrosos tomados a un costado de la escuelita de Santa Lucía
M-10	Colas que provienen del proceso de recuperación del oro de la concesión minera Castellanos, muy similares en su composición sustancial a las menas del sombrero de hierro Santa Lucía
M-1A	Muestra de agua que procede de la escorrentía dentro de la propia mina de "Santa Lucía"
M-2A	Muestra de agua tomada a la salida del socavón de la mina Santa Lucía
M-3A	Muestra de agua que proviene de la escorrentía en un lateral del socavón de la mina Santa Lucía
M-9A	Muestra de agua del arroyo secundario Santa Lucía
M-10A	Muestra de agua del río Santa Lucía

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química

En la Tabla II se muestran los resultados de los Análisis Químicos que se obtuvieron para las muestras de rocas y sedimentos analizadas en diferentes zonas de los depósitos y de forma paralela en la tabla III los ensayos que corresponden a los efluentes líquidos y aguas de río respectivamente (Alonso J.A, Pinto A *et al.* 2009).

Ponce N *et al.* (1998), Alfonso E *et al.* (1995), Figueredo M *et al.* (1998), Cañete C *et al.* (2007), y Delgado B *et al.* (2009) entre otros, determinaron en diferentes campañas de muestreo realizadas en la zona de estudio, contenidos anómalos de ETG presentes en los efluentes y escorrentías que se asocian a dicho PAM, demostrándose en todos los casos que tanto el Pb^{2+} , Zn^{2+} , $Fe^{2+,3+}$ como el ión SO_4^{2-} se encuentran por encima de los valores permisibles que establece la Norma Cubana 27/1999 para el vertimiento de aguas residuales en aguas terrestres y del alcantarillado.

Los resultados que se obtuvieron en las muestras tomadas en la cantera (tabla II), reflejan para los casos de M-2 y M-3, si estas se comparan con la mena primaria (M-1), un incremento de los valores de la pérdida por ignición (PPI), el hierro, azufre y zinc, por encima de los límites máximos permisibles que establece la norma cubana 27/1999, dada la formación de sulfosales de hierro II hidratadas como se confirma mediante los resultados obtenidos por DRX, destacándose en estas muestras una interesante regularidad de distribución elemental al concentrarse selectivamente el elemento Zn^{2+} en dichas sales, lo que contribuye de manera significativa al incremento de la contaminación de ETG a los acuíferos que rodean al PAM, dada la solubilidad elevada de estas sales en medio acuoso y pH ácido.

Del mismo modo, en la muestra M-4 que se tomó en una planicie a la salida del socavón del PAM, tiene lugar el mismo proceso de asociación del Zn^{2+} con los sulfatos de hierro II hidratados, en este caso del tipo melanterita según se reportó con anterioridad por DRX en la etapa inicial de trabajo (Alonso J.A, Pinto A *et al.* 2009).



Por su parte, los resultados de las muestras de sedimentos (M-5 a la M-9), demuestran que no existe contaminación de EPT en ellos, pues los contenidos de Fe^{2+} , SO_4^{2-} y Zn^{2+} se encuentran entre los valores límites que se establecen según la norma cubana 27/1999. Del mismo modo, los elevados contenidos de Pb^{2+} en la muestra de colas (M-10) asociada al sombrero de hierro del PAM Castellanos, muy similar además en su composición sustancial a la de su análogo Santa Lucía, indica la asociación mineralógica de este elemento potencialmente tóxico a estas menas oxidadas, en particular a la fase plumbojarosita como se demostró por DRX y por ello no se lixivia en las sales y sedimentos del PAM.

Por último, los resultados de las muestras de agua colectadas (Tabla III), corroboran que las mismas presentan valores de pH muy ácidos y concentraciones anómalas -por encima de los valores límites que establece la NC 27/1999- asociadas al Fe, S (total) y Zn, que provienen fundamentalmente de la lixiviación ácida de las sulfosales formadas por lixiviación de la pirita en presencia de microorganismos por procesos DAM (muestras 1 y 2). Como un aspecto de interés se señala la acidez de las muestra M-9A y 10A, que indican la presencia de iones H_3O^+ y S^{2-} disueltos dentro de la matriz del sólido y que al combinarse en disolución acuosa dan lugar a la formación de ácido sulfúrico dada la ocurrencia de los procesos DAM

Tabla III.- Análisis Químicos de elementos tóxicos geodisponibles para las muestras de aguas y residuales líquidos de "Santa Lucía" con sus correspondientes valores de pH

Nro. Muestra	pH	St (mg/l)	Fe (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Ba (mg/l)
M-1A	2.72	6,760	6,290	3,9	1,880	< 0.2
M-2A	2.96	7,820	7,720	1,3	3,780	< 0.2
M-3A	2.90	15,760	14,120	6,4	81,0	< 0.2
M-9A	3.70	85	460	< 0.4	< 1.7	< 0.2
M-10A	4.20	140	460	< 0.4	< 2.1	< 0.2

Difractometría de polvos de Rayos-X

En la tabla IV se presentan los resultados obtenidos por difractometría de polvos de rayos -X, además en las figuras 1 y 2, los difractogramas típicos que identifican las sales hidratadas de hierro II y que señalan la asociación de los ETG solubles (Fe^{2+} , S y Zn^{2+}), además se muestran la composición sustancial de la mena pirítica primaria alterada, los sedimentos muestreados para verificar su grado de contaminación y la muestra del sombrero de hierro que justifica la asociación mineralógica del EPT Pb^{2+} .

Tabla IV.- Resultados obtenidos por difractometría de polvos de rayos-X

Nro. Muestra	FASES IDENTIFICADAS EN EL DIFRACTOGRAMA DE POLVOS
M-1	Pirita, szomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) , muy poco cuarzo, poca: esfalerita, barita, jarosita y yeso, poco material amorfo (nidos de sulfatos)
M-2	Rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) , melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) , szomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) , poco material amorfo y probable presencia de halotrichita ($\text{Fe, Al}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$)
M-3	Melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) , rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) , muy poca copiadita , muy poco yeso, poco material amorfo, muy poco yeso y probable presencia de halotrichita ($\text{Fe, Al}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$)
M-3A	Magnesiocopiapita [$(\text{Fe, Zn, Mg})_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$]
M-4	Rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) , melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) y muy poco material amorfo



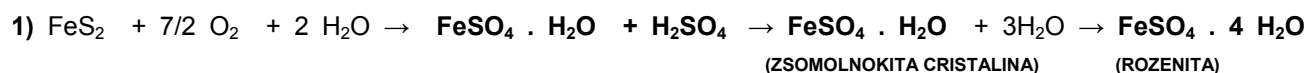
M- 4A	Melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)
M- 5	Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), hidromica (arcilla), pirita (FeS_2), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), barita (BaSO_4), esmectita (montmorillonita) y material amorfo (óxidos de hierro)
M- 6	Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), barita (BaSO_4), pirita (FeS_2), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), arcilla caolinita, hidromica (arcilla), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y material amorfo (óxidos de hierro)
M- 7	Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), hidromica (arcilla), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), barita (BaSO_4), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), pirita (FeS_2) y material amorfo (óxidos de hierro)
M- 8	Cuarzo ($\alpha\text{-SiO}_2$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), hidromica (arcilla), barita (BaSO_4), material amorfo (óxidos de hierro)
M- 9	Goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), plumbojarosita ($\text{PbFe}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), cuarzo, abundante material amorfo (óxidos de hierro), barita (BaSO_4), galena (PbS), hidromica (arcilla)
M-10	Goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), halloysita (arcilla), cuarzo, apreciable material amorfo, hematita, gibbsita y arcilla hidromica

Los resultados que se obtuvieron para los sedimentos confirman que las mismas no aportan elementos parcialmente tóxicos a la carga contaminante del río y arroyo del PAM Santa Lucía hasta el presente, pero contienen pirita que con el tiempo pudiera oxidarse por procesos DAM, aunque su contenido es pequeño. Con relación a la fase barita identificada, esta no constituye ningún peligro de contaminación en ninguna de las muestras analizadas, puesto que la misma es muy poco soluble en agua, aún en medio ácido.

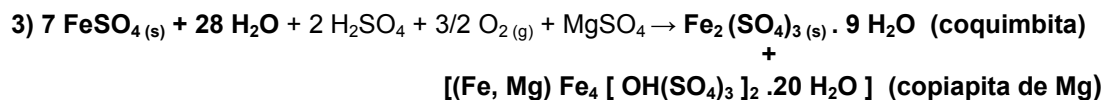
A partir de los resultados de DRX obtenidos y teniendo en cuenta los planteamientos de Henning K.H, Stör M, (1986), las etapas más probables que se plantean para la formación de reacciones DAM, común para los PAMs "Santa Lucía" y "Castellanos" en presencia de bacterias acidófilas del género *thiobacillus ferrooxidans* es la siguiente:

PAM "Santa Lucía"

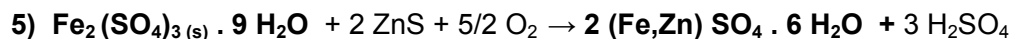
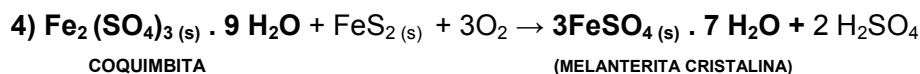
A) Oxidación de la pirita a sulfato de hierro II e hidróxido de hierro III:



B) Oxidación del sulfato de hierro II – III catalizada por *Thiobacillus Ferrooxidans*:



C) Reacción del sulfato de Fe (III) con la pirita:





(ESFALERITA)

(BIANCHITA)

Mineralogía Óptica

En las observaciones de microscopía óptica que se realizaron se aprecia que los minerales asociados a la mena primaria de “Santa Lucía”, existe como consecuencia de la intensa lixiviación producto de los procesos DAM, la formación de sales blancas de rozenita que forman agregados en agujas y nódulos producto de la alteración de la pirita (figuras 3 y 4).

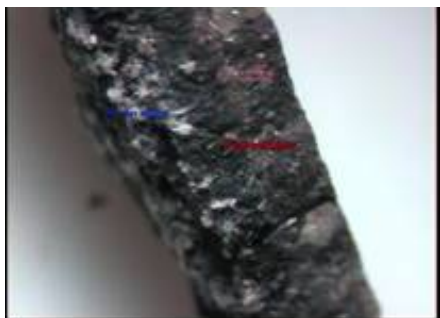


Figura 3.- M1, Agregado de pirita, esfalerita barita

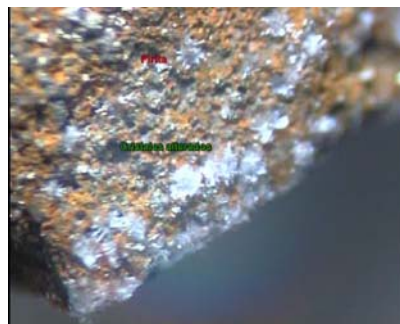


Figura 4.- M1, Alteración en nódulos y agujas

Las figuras anteriores reflejan muy bien como toda la capa superficial del cuerpo mineral se encuentra en estos momento en estadio de transformación producto de la fuerte lixiviación de que ha sido objeto en un largo periodo de tiempo y esto se acentúa en la M2, la que teniendo relativamente la misma posición (como se ve en la imagen (figura 5) presenta una modificación mineral mas fuerte llegando a transformarse gran cantidad de los agregados de pirita en nódulos radiales con agujas de color blanco y gran parte de la roca en óxidos de hierro.



Figura 5.- Agregados aciculares de color blanco de rozenita (M2)

CONCLUSIONES

1. Las principales asociaciones mineralógicas de EPT en el PAM “Santa Lucía” son las siguientes: pirita (Fe,S), esfalerita (Zn, S), galena (Pb, S), barita (Ba, S) y jarosita (Fe y/o Pb, SO_4^{2-}).
2. En el PAM “Santa Lucía”, las fuentes de aporte fundamentales de ETG (S, Fe y Zn), que aumentan la carga contaminante del río y arroyo de “Santa Lucía” por encima de los valores que establece la norma cubana 27/1999 son las oxisales de hierro II hidratadas de colores blanquecinos, amarillo-verdosas y celeste-verdosas o “yellowboys”: *szomolnokita*, *rozenita*, *bianchita* y *melanterita*, además de las oxisales oxidadas de Fe III (*copiapita* y *coquimbita*), que se distribuyen sobre la



superficie de las menas primarias y de forma irregular en áreas del socavón que rodean al PAM, elevando la acidez de las aguas de escorrentías, el río y arroyo (por presencia de ácido sulfúrico) debido a los procesos DAM en presencia de bacterias acidófilas.

3. Se demuestra que en todos los sedimentos analizados que rodean al PAM, existe un pequeño aporte a la contaminación de EPT por presencia de pirita (Fe,S), jarosita (Pb, Fe, S) y barita (Ba, S), sin embargo, estos no se consideran aún en forma geodisponible.
3. Se comprueba mediante la combinación de técnicas analíticas modernas: DRX y Microscopía Óptica, el complejo de reacciones DAM más probable por oxidación del sulfuro primario (pirita), proceso catalizado por microorganismos acidófilos del género *Thyobacillus Ferrooxidans*, comprobándose además la secuencia de reacciones de hidratación: sulfatos amorfos de hierro II - de morfología globular-; copiapita, halotrichita, zsomolnokita, rozenita y melanterita respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso J.A, Pinto A, Cabrera I, Cozzi G, Gallardo D, Valdivia G, Díaz A (2009). Principales asociaciones mineralógicas de los elementos contaminantes presentes en residuales de la industria minero-metalúrgica (I etapa). Proyecto conjunto MINCYT- CITMA (código MYNCIT-CITMA: CU 08/10).
- Alfonso Olmo E, Vera A, Pacheco P, Figueredo M y otros (1995). Caracterización y tratamiento de efluentes sólidos y líquidos generados por el Complejo "Oro Castellanos" y "Santa Lucía"; Informe Técnico, CIPIMM.
- Cañete C, Jornada A, Ponce N (2007). Estudio de la degradación ambiental de la minería en la región de "Santa Lucía" en el Occidente de Cuba, Informe Técnico no. 5668, Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM), MINBAS, Cuba.
- Delgado B, Lubián T, del Río M, Cortés N, Millán E (2009). Identificación de Pasivos Ambientales Mineros y remediación ambiental del Drenaje Acido de la Mina Santa Lucía. Informe de Investigación, Primera Etapa, Proyecto 62020, CIPIMM, MINBAS
- Figueredo Frías M (1998). Caracterización y tratamiento de los desechos sólidos y líquidos de la planta de sulfometales. Medidas de mitigación ambiental, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química, ISPJAE.
- Henning K.H, Stör M, 1986. Electron micrographs (TEM, SEM) of clays and clay minerals, Ed Akademie –Verlag Berlín, ISBN 3-05-500168 -0, ISSN 0323-8946, DDR-2200.
- Ley de Minas para el control de la actividad de la exploración y explotación minera en Cuba (1994). Gaceta Oficial de la República de Cuba
- Ley 81 del Medio Ambiente y del uso racional de los Recursos Naturales (1997), Gaceta Oficial de la República de Cuba.
- Norma Cubana 27/1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y del alcantarillado.



Anexos

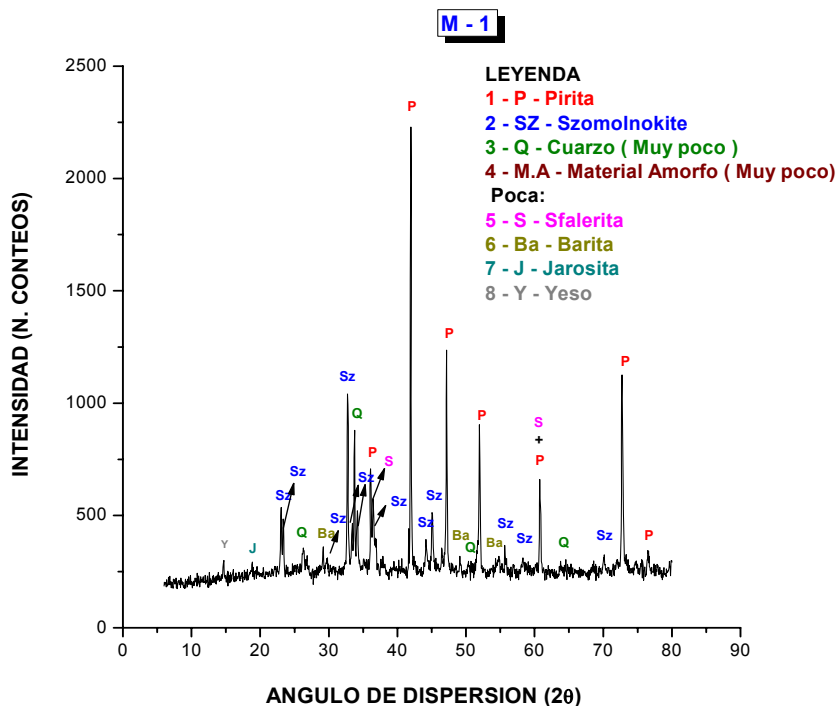


Figura 1.- Difractograma de la mena primaria pirito-polimetálica con barita de Santa Lucía (M-1)

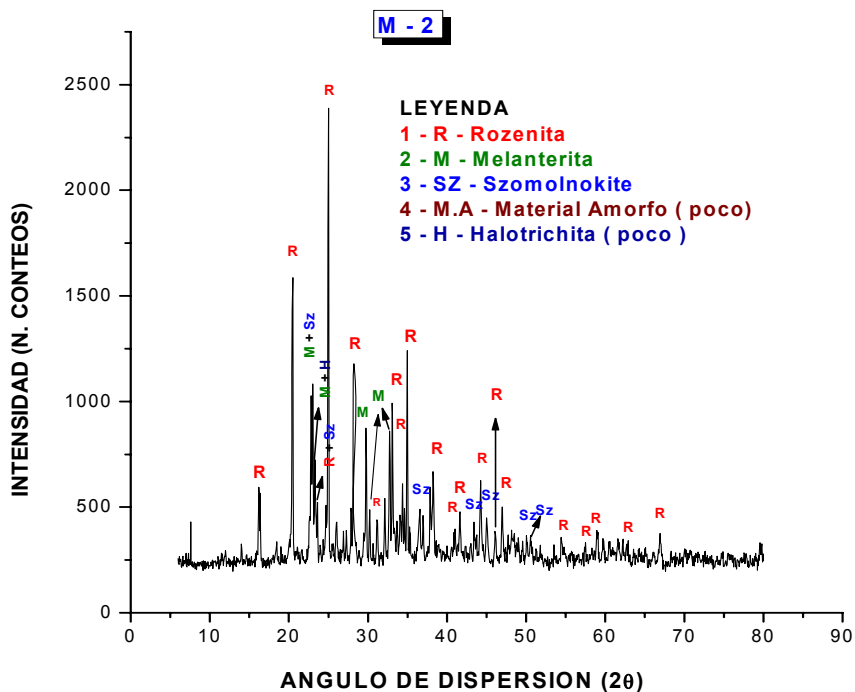


Figura 2.- Difractograma de los escurrimientos de colores blancos y aspecto plumoso que se observan sobre la superficie de las menas primarias de Santa Lucía (M-2)



Tabla II.- Análisis Químicos de elementos mayoritarios para las muestras de menas primarias y residuos sólidos de Santa Lucía

Nro. Muestra	% Cu	% St	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% PbO	% ZnO	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% PPI	% Na ₂ O	% K ₂ O
Cantera													
M-1	0.010	24.43	21.87	0.11	0.55	1.32	12.24	5.38	0.092	0.37	32.94	0.23	0.41
M-2	0.010	20.44	23.87	0.43	0.22	5.69	4.12	5.89	0.024	2.90	57.66	0.12	0.13
M-3	0.040	19.96	22.16	0.41	0.01	11.21	0.56	6.15	0.006	2.34	59.59	0.20	0.06
Socavón													
M-4	0.0031	19.12	32.02	0.33	0.05	8.08	0.46	6.28	0.21	1.59	55.70	0.14	0.13
M-4A	0.0028	19.42	20.69	0.16	0.06	5.01	0.50	0.08	0.01	0.13	54.76	0.16	0.15
Sedimentos													
M-5	0.023	13.06	19.44	0.04	0.86	0.27	54.48	0.66	0.23	0.30	2.46	0.24	1.94
M-6	0.015	6.62	14.23	0.02	0.26	0.31	67.53	0.64	0.07	0.25	1.32	0.12	2.60
M-7	0.025	5.70	13.61	0.01	0.55	0.10	71.85	0.88	0.24	0.30	3.23	0.54	1.62
M-8	0.021	2.55	4.93	0.01	0.18	0.05	85.67	0.84	0.30	0.49	0.85	0.46	1.02
M-9	0.018	8.26	16.53	4.97	0.12	0.13	58.42	3.83	0.06	0.54	4.86	0.32	1.56
Sombrero Fe													
M-10	0.0'30	10.05	43.61	0.04	10.09	0.23	24.25	0.04	0.06	0.40	3.25	0.29	0.20