

## RESIDUOS MINEROS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA MINA INACTIVA MATAHAMBRE.

### MINE WASTE AND ENVIRONMENTAL POLLUTION IN THE INACTIVE MINE MATAHAMBRE

(Entregado 16/09/2015) – Revisado 19/02/2016)

**Ramón Guillermo Pérez Vázquez<sup>1</sup>, Francisco Martín Romero<sup>2</sup>, Rosa María Prol-Ledesma<sup>2</sup>, Laura Núñez Álvarez<sup>3</sup>, Arturo Hernández Escobar<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Geociencias, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. CUJAE. Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana 15, Cuba, <sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México D.F., México, <sup>3</sup> Técnica Geóloga ONG Geólogos del Mundo. Calle de los Salpores 0-83 Z.3, Barrio Jucanyá Panajachel, Departamento Sololá. Guatemala. (Oficina de información Vivamos Mejor), <sup>4</sup> Carrera de Ingeniería en Medio Ambiente, Universidad del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

<sup>1</sup> e-mail: [monico@civild.cujae.edu.cu](mailto:monico@civild.cujae.edu.cu)

#### RESUMEN

*El trabajo que presentamos a continuación es una parte de un trabajo más complejo que se realizó en la zona de Taxco en México y Santa Lucía y Matahambre en el noroeste de Pinar del Río, Cuba. En este caso se exponen los resultados del estudio detallado de las áreas aledañas a la mina subterránea inactiva cuprífera Matahambre, en la parte más occidental de la actual provincia de Pinar del Río, Cuba. Se estudiaron los residuos acumulados en la presa de cola y las áreas aledañas a la mina. Se tomaron muestras líquidas a lo largo del arroyo que drena desde dicha presa de cola y hasta una distancia de 200 metros, se pudo observar que ya a los 15 metros de distancia el drenaje dejaba de ser ácido. A partir de aquí se obtuvieron valores de pH de alrededor de 7.53. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos en la mina inactiva a cielo abierto Santa Lucía y Taxco. Se pudo concluir que en el yacimiento Matahambre no existe afectación al medio ambiente. Esto es debido a las condiciones en que se encuentra la presa de cola y la atenuación natural del cobre y demás Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). La utilización de dicha presa como un sitio de cultivo de hortalizas y vegetales, luego de aislarla con una capa de arena y capa vegetal con turba, ayuda considerablemente a aislar los depósitos que contienen minerales residuos del proceso de beneficio del yacimiento Matahambre, para evitar la aparición de drenaje ácido de mina. Esto podría ser una solución para otros sitios mineros donde la presa de cola o jales se encuentran a la intemperie y generan gran cantidad de drenaje ácido de mina.*

**Palabras clave:** Residuos mineros, drenaje ácido, presa de colas, Matahambre, Cuba

#### ABSTRACT

*The work that we present next is a part of a more complex work that was carried out in the area of Taxco in Mexico and Santa Lucía and Matahambre in the northwest of Pinar del Río, Cuba. In this case the results of the detailed study are exposed from the surrounding areas to the underground mine cupriferous Matahambre, at the western most part of the current Pinar del Río province, Cuba. The residuals accumulated in the tailing dump were studied and the surrounding*

*areas to the mine. We collect liquid samples throughout the draining stream from tailing dump until a distance of 200 meters, being able to observe that to 15 meters distance the drainage stopped to be acid. Starting from here pH values were obtained around 7.53. Later on the results obtained were compared with the inactive open pit Santa Lucía and Taxco mine. We could conclude that at the Matahambre deposit environment affectation does not exist. This is due to the tailing dump conditions and the natural attenuation of copper and other Potentially Toxic Elements (PTE). The use of this tailing dump like a place of cultivation of vegetables, after isolating her with a layer of sand and layer vegetable with crowd, helps considerably to isolate the deposits that contain residual minerals from process of benefit of the Matahambre deposit, avoiding the appearance of acid drainage. This could be a solution for other mining places where the tailing dump are to the bleakness and they generate great quantity of acid mine drainage.*

**Key words:** Mine-wastes, acid drainage, tailing dump, Matahambre, Cuba

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las actividades más comunes del hombre, desde los tiempos más remotos ha sido la minería, la que aun hoy día lo continua siendo (Sheoran et al., 2011; Macingova y Luptakova, 2012; Mukhopadhyay y Mukherjee, 2013). Desde la edad de piedra, hace 2,5 millones de años o más, ha venido siendo la principal fuente de materiales para la fabricación de herramientas. Esta actividad siempre ha implicado la extracción física de materiales de la corteza terrestre, con frecuencia en grandes cantidades para recuperar sólo pequeños volúmenes del producto deseado. Los materiales recuperados por la minería incluyen metales base, metales preciosos, hierro, uranio, carbón, diamante, gas de esquistos, sal de roca y potasio. Cualquier material que no pueda crecer a través de los procesos de la agricultura o creado artificialmente en un laboratorio o en una fábrica, es minado (Mukhopadhyay y Mukherjee, 2013). A nivel mundial, la explotación de minerales es una actividad que contribuye al desarrollo económico de la comunidad, pero se ha convertido en una causa inevitable del deterioro del medio ambiente.

Algunos metales pesados como por ejemplo Mn, Fe, Cu, Zn, Mo y Ni son esenciales como micronutrientes para organismos, plantas y animales, mientras que a otros no se les conoce función biológica (Sheoran et al., 2011). Pero por otra parte históricamente uno de los problemas más importantes que provoca la actividad minera en muchas regiones del mundo es la generación de abundantes desechos mineros y conjuntamente con esto el llamado Drenaje Ácido de Minas (DAM), el que consiste en aguas ácidas con pH menores de 4 y elementos químicos potencialmente tóxicos (EPT) disueltos en ellas (US-EPA, 2005); (Gaikwad et al., 2010); (Macingova y Luptakova, 2012). Estos elementos tóxicos pueden ser transportados grandes distancias y contaminar suelos, las costas, los manglares, aguas superficiales y subterráneas y la vida acuática (Gaikwad et al., 2011), incluso el ganado, la salud humana, pérdidas de habitat, desplazamientos de comunidades, la recreación y el turismo (Taylor, 2012).

El drenaje ácido de minas se produce en minas activas, pero generalmente en obras mineras abandonadas. El mismo se genera en los sitios donde se encuentran los depósitos de desechos mineros, las presas de colas o jales, debido a la oxidación de minerales sulfurosos que en condiciones de medio ambiente ácidos se hacen muy estables y se mantienen en disolución. Entre los elementos químicos más importantes dañinos se encuentran los metales pesados como el As, Pb, Cd, Fe, Cu, Zn, en algunos casos se puede encontrar Tl o Se. Por otra parte también es posible encontrar entre los EPT elementos de las tierras raras (ETR). Por consiguiente se puede afirmar que el drenaje ácido de mina y la presencia de residuos mineros es el principal problema medio ambiental derivado de la actividad minera (Lei Liang-qi, 2010). Se estima que la contaminación por metales pesados (de sus siglas en inglés AMD/ARD) tiene un impacto económico universal

combinado que excede los \$10 billones de USD y este impacto puede continuar por más de 2000 años (Taylor, 2012).

El DAM comienza cuando los sulfuros metálicos como pirita, pirrotina, esfalerita, arsenopirita, por solo mencionar algunos, sufren un proceso de oxidación. Este proceso además, está controlado por la difusión del oxígeno en el espacio inter granular de los sulfuros y por el agua presente en la superficie mineral de los mismos (Mukhopadhyay y Mukherjee, 2013). La tendencia de un depósito a generar acidez depende del balance entre los minerales potenciales productores de drenaje ácido (sulfuros) y los minerales (alcalinos) potenciales neutralizadores de drenaje ácido. Cuando en los residuos, el potencial de neutralización sobrepasa al potencial generador de ácido, el agua que drena tendrá un pH neutro o cercano a él. Con el tiempo estos consumidores de acidez se agotan, en este momento los residuos comenzarán a generar acidez, con la consecuente liberación de EPT (Romero, 2004). Por consiguiente, para la formulación de medidas mitigadoras, de remediación de zonas afectadas o predecir el posible impacto ambiental producido por la actividad minera es muy importante comprender los procesos geoquímicos que contralán la liberación o retención de los EPT.

Uno de los sulfuros más abundantes en los residuos mineros, y el que produce mayor acidez, es la pirita (Gaikwad et al., 2011), por lo que es el principal responsable de los procesos de producción de drenaje ácido de mina. Por ello, es fundamental conocer las reacciones y procesos implicados en la génesis del DAM a partir de este mineral. Mundialmente se han desarrollado una gran variedad de estrategias de remediación, con el objetivo de reducir la toxicidad y movilidad de metales. Normalmente, la opción para tratar suelos contaminados por éste tipo de procesos se basa en mecanismo de inmovilización y estabilización de metales, para evitar o disminuir la concentración de éstos en las fases solubles hasta límites permisibles (Michalková, 2013). Entre los tratamientos más empleados están el desarrollo de humedales aeróbicos, anaeróbicos o con materia orgánica, humedales de flujo vertical, lagos o estanques de tratamiento de DAM, birreactores y barreras reactivas permeables, (Kalin et al., 2006; Michalková, 2013). Todo esto es debido a que se ha comprendido el problema ambiental tan extendido que provoca el drenaje ácido de minas, que afecta a masas de agua y ecosistemas en diversas partes del mundo, provocando afectaciones al medio ambiente y por tanto enfermedades a la salud humana.

El presente trabajo presenta los resultados parciales de una investigación geoquímica y mineralógica detallada, realizada en varios emplazamientos en el noroeste de la provincia de Pinar del Río donde se encuentra el distrito metalogénico Santa Lucía – Matahambre y Taxco en México. En la actualidad en el mismo se encuentran yacimientos que han sido explotados total o parcialmente, uno mediante técnicas de minería subterránea como es el yacimiento Matahambre y otros a cielo abierto como Santa Lucía, Castellanos y Taxco. El objetivo final de esta investigación es el de desarrollar una estrategia de manejo ambiental efectiva. Para garantizar este gran objetivo fue necesario cumplimentar los siguientes objetivos parciales: (I) caracterizar los depósitos de desechos mineros, (II) estudiar los procesos de generación de DAM y evaluar la afectación al medio ambiental provocado por los EPT libres; (III) Identificar la fase que se encarga de controlar la movilidad de los elementos sulfurosos, principalmente As, Ba, Pb, Cu y Zn; y por último evaluar el transporte de los mismos.

## DISTRITO MINERO NOROESTE DE PINAR DEL RÍO, CUBA

El distrito minero del noroeste de Pinar del Río es rico en recursos minerales de varios tipos. El área de estudio se ubica en la zona noroeste de la provincia de Pinar del Río, Cuba Occidental. En esta área se realizaron estudios en los residuos mineros de la Mina Matahambre que pertenece

al municipio Minas de Matahambre, situado a 46 Km de la capital provincial, Pinar del Río, (Fig. 1).

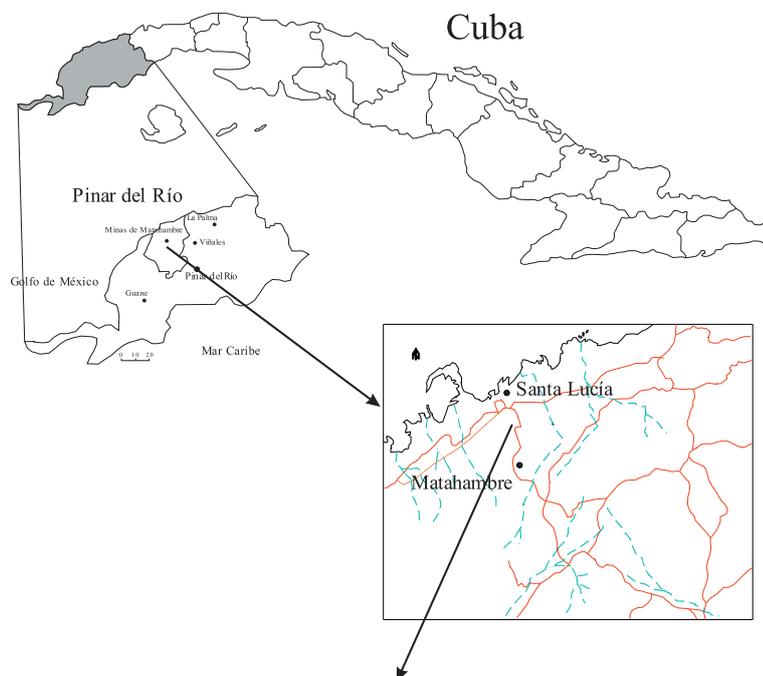
Durante más de 75 años este depósito ha estado en explotación continua para la obtención de un concentrado de cobre al 30 % por el método de beneficio de flotación, a partir de la calcopirita, mineral principal. En este período se han llegado a explotar hasta 3 Mt de mineral cuprífero, a razón de un promedio de 65.000 tm anuales, con una ley promedio de 5% en Cu. En conjunto, se calcula que el depósito comprendía unos 15 Mt (Whitehead et al., 1996). En la actualidad esta mina está inactiva.

## CONDICIONES FÍSICO GEOGRÁFICAS

El área de estudio se encuentra en una región de bajas montañas que pertenecen a la Sierra de los Órganos, la cual se extiende dirección SW-NE a través de toda la provincia, (Fig. 1). El relieve presenta una cadena de cuevas bajas extendidas conforme al rumbo general de las estructuras geológicas (noreste), con crestas laterales bien contorneadas de rumbo noroeste y sureste. Las divisorias de las aguas son estrechas, con cimas agudas, mientras que el descenso general del relieve y el afloramiento de sus formas se observa en el rumbo noreste. Las crestas más altas son las elevaciones Matahambre (243 m) y Rogelia (256 m) (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

Esta zona posee clima tropical, con dos períodos claramente definidos, el período seco desde Noviembre hasta Abril y el período de lluvia desde Mayo a Octubre. La humedad relativa media es de 80%, en la época seca la humedad relativa es de 78% y la temperatura de 25° – 28°C, en el período de lluvia la humedad relativa es de 82% y la temperatura de 21° – 25°C.

En el área del yacimiento de Santa Lucía la precipitación anual es de 1201-1400 mm y durante el periodo de lluvias de 1200 mm, lo que indica que la mayoría de las precipitaciones durante el año se dan en la época de lluvia. En la zona de Matahambre la precipitación anual es de 1837 mm, y durante el periodo de lluvias de 1400 mm.



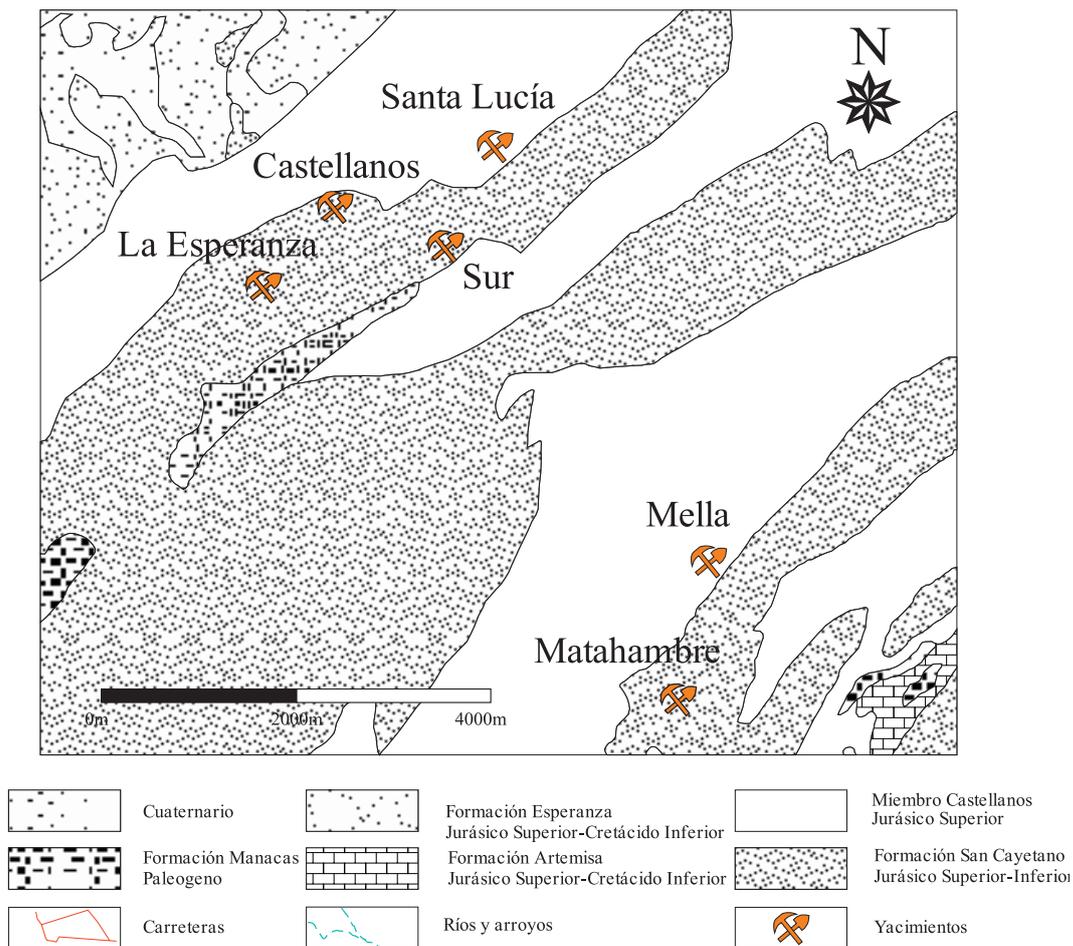


Figura 1: Mapa Geológico con la ubicación del Distrito Metalogénico Santa Lucía – Matahambre. Cuba

## GEOLOGÍA

Geológicamente, se ubica en los límites de la Zona Estructural de Guaniguanico. Los depósitos estratificados están representados por sedimentos terrígenos y carbonatados que abarcan un amplio rango de edades, desde el Jurásico inferior hasta depósitos actuales (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

Las formaciones sedimentarias que componen el territorio son: la formación San Cayetano, del Jurásico Inferior-Triásico, está compuesta por areniscas cuarzosas, limolitas, limoareniscas y esquistos arcillosos. Por encima de ésta se encuentra el miembro Castellano, formado por esquistos pelíticos, carbonosos, frecuentemente calcáreos, con intercalaciones y lentes de calizas dolomitizadas, areniscas y limolitas (Fig. 1).

En las series carbonatadas del Jurásico Superior se distinguen dos formaciones, que representan cambios laterales de facies en la sedimentación: la Formación Artemisa en la Sierra del Rosario y las formaciones Jagua y Guasasa en la Sierra de Los Órganos. La Formación Artemisa es esencialmente carbonatada, y se interpreta como depositada en condiciones hemipelágicas. La Formación Jagua, forma la base de la serie del Jurásico Superior en la Sierra de Los Órganos; se trata de rocas carbonatadas con sedimentos arcillosos. La parte más alta de la serie del Jurásico

superior en la Sierra de los Órganos ha sido denominada formación Guasasa; consta de dos miembros esencialmente carbonatados (micritas y calcarenitas). En los tramos basales de las series del Jurásico Superior se encuentran también manifestaciones de rocas intrusivas y efusivas máficas (Cobiella, 1996). La Formación Esperanza se encuentra en la parte norte del área y está representada por calizas carbonosas, así como variedades arenosas, limoarenosas silicificadas; las dolomitas y calizas dolomitizadas tienen escasa extensión. Por encima, se encuentra la Formación Manacas compuesta por esquistos, limolitas, areniscas, limoareniscas y calizas. Por último, las formaciones superficiales del Cuaternario superior, son principalmente sedimentos arenosarcillosos (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

La presencia de rocas magmáticas y volcánicas está exclusivamente representada por la escama Limonar, situada en la porción suroeste de la misma. Se trata de coladas, facies explosivas y chimeneas (Malinovski, 1967; Cobiella, 1996) destaca que en algunos puntos de la sierra del Rosario existen afloramientos importantes de intrusivos básicos (gabroides) intercalados en los sedimentos del Jurásico, asociados a coladas y diques de rocas máficas. Estos materiales han sido cartografiados con el nombre de formación El Sábalo, de edad Calloviano – Oxfordiano, la cual puede alcanzar hasta 400 m de potencia (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

Las series de edad Jurásico a Paleógenas han sido afectadas por un metamorfismo regional de edad Eoceno, con características epizonales, con escaso desarrollo de esquistosidad (Iturralde-Vinent, 1996 a, b).

## HISTORIA MINERA Y RESIDUOS MINEROS

En 1912 fue descubierto accidentalmente el Yacimiento Matahambre, a partir de afloramientos superficiales de malaquita. El primer trabajo geológico de detalle lo realizó el geólogo norteamericano E. Pennebaker en 1936 (Ore Deposits of Minas de Matahambre). En 1944 se descubrió la zona cuprífera denominada 44, así como el cuerpo de pirita y polimetálicos denominado cuerpo 70. Posteriormente, investigaron en la zona diversos geólogos que contribuyeron a clarificar las condiciones geológicas y mineras del yacimiento.

En la región se identifican dos campos minerales bien definidos. El yacimiento Matahambre forma parte del Campo Mineral Matahambre, junto con Cuerpo 70, Mella, Nieves y varias manifestaciones minerales de pequeño tamaño (Fig. 1). La mina Matahambre, actualmente cerrada, fue una de las explotaciones más profundas de América, alcanza los 1553 metros en el nivel 45. Durante más de 75 años, este yacimiento se explotó de manera continua para la obtención de un concentrado de cobre al 30 %, por el método de beneficio de flotación, a partir de la calcopirita, mineral principal del yacimiento. En este período se llegó a explotar hasta 3 Mt de mineral cuprífero, a razón de un promedio de 65.000 tm anuales, con una ley promedio de 5% en Cu. En conjunto, se calcula que el depósito comprendía unos 15 Mt (Whitehead et al., 1996). La explotación del yacimiento durante más de 70 años generó una gran cantidad de residuos. Parte de los mismos se inyectaban nuevamente en la mina para rellenar los espacios minados y el resto se acumulaba en la presa de colas (Fig. 2)



Figura 2. Residuos mineros de Matahambre.

## MINERALOGÍA DEL YACIMIENTO

Los depósitos de esta zona han sido interpretados como tipo SEDEX (Valdés-Nodarse et al., 1993; Simón, 1995; Maynard y Morton, 1995), de tipo filoniano (Valdés-Nodarse et al., 1993; Whitehead et al., 1996), encajado en las rocas de la Formación San Cayetano, que a su vez pertenece al Terreno Guaniguanico (Iturralde-Vinent, 1989).

Los cuerpos cupríferos que componen el yacimiento constituyen grupos de filones que están localizados, a su vez, en 4 zonas mineralizadas. Fuera de estos límites es sumamente difícil, por no decir imposible, encontrar cuerpos aislados (Pérez-Vázquez y Martínez, 1993).

Por lo tanto, la mineralización es de tipo filoniana con menas calcopiríticas. El contenido de cobre de los cuerpos varía desde 0.5-1.5 % hasta 15-20 %. Los principales minerales no metálicos son cuarzo, clorita, siderita y calcita. No se observan cambios analíticos en la mineralización del yacimiento hasta 1450 metros de profundidad, donde el contenido de pirita, y sobre todo el de pirrotina, aumenta considerablemente con la profundidad y hacia los flancos oeste y oeste noroeste del yacimiento (Pérez-Vázquez y Martínez, 1994).

La calcopirita puede presentar inclusiones de esfalerita de pequeño tamaño y morfología estrellada. No obstante, los sulfuros de zinc y plomo son raros y sólo se observan en las cercanías de las principales fallas. Estos últimos minerales están asociados generalmente a los carbonatos y a la pirita (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

El resto de los minerales, seleniuros, arseniuros, telururos y sulfoarseniuros, se encuentran dispersos entre los granos de calcopirita, o bien se disponen en cristales hipidiomorfos en la zona de contacto entre la calcita y la calcopirita (Pérez-Vázquez y Melgarejo, 1998).

La mineralización estratiforme en los tramos piríticos, en la base del cuerpo, está constituida por pirita de grano fino, que llega a constituir agregados masivos de pirita. Otros sulfuros como la calcopirita, galena, esfalerita, son mucho menos abundantes y ocupan posiciones intersticiales entre los cristales de pirita. Los tramos polimetálicos están constituidos esencialmente por esfalerita, con proporciones menores de calcopirita, galena, calcita, cuarzo y clorita. La esfalerita puede estar reemplazada por calcopirita y pirrotina, que son más escasas. El principal mineral de ganga en esta mineralización es calcita, con cantidades subordinadas de clorita y cuarzo.

A pesar de que en la zona son diversos los estudios mineralógicos realizados en el yacimiento de Matahambre, no se ha realizado con anterioridad a este estudio ninguna investigación ambiental en los residuos mineros de minas Matahambre.

Estos depósitos se comenzaron a acumular durante la etapa de funcionamiento de la mina y fueron abandonados al cierre de ésta, en el año 1997. Años más tarde, la zona de depósito de los residuos comenzó a ser utilizada como área de cultivos. Los residuos mineros más antiguos, se cubrieron con una capa de arena de 20 cm de espesor y sobre esta se depositó capa vegetal enriquecida con turba: Actualmente, esta zona está siendo cultivada para la obtención de hortaliza y vegetales, por agricultores (Fig. 3). En otras zonas de la misma área se está comenzando a cultivar directamente sobre los residuos. La zona de residuos más actuales fue utilizada como área de entrenamiento militar.



Figura 3. Siembra de hortalizas y vegetales en el área de la presa de cola de Matahambre.

## RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La posterior etapa consistió en la recopilación de toda la información útil de las áreas de estudio seleccionadas: cartografía y fotos aéreas, estudios y análisis previos realizados en las zonas, etc., que aportan una base geológica, geomorfología, mineralógica, química e hidroquímica.

El muestreo en los residuos mineros de Matahambre se centró en los depósitos abandonados de la presa de colas y las aguas de drenaje, (Tabla 1, Fig. 4).

Tabla 1. Muestreo de Matahambre.

Número de Muestras	Tipo	Lugar	Observaciones
26	Residuos Mineros	Terreno de Residuos	6 muestras de residuos no oxidados y 8 de oxidados, con las que posteriormente se hicieron muestras compuestas. 7 muestras en un talud (perfil) de los residuos y 5 en los límites y alrededores de los residuos
5	Líquido	En los Residuos	1 muestra de una laguna sobre los residuos, el resto procedentes del drenaje de los residuos a 0, 15, 50 y 200 m de distancia desde la base

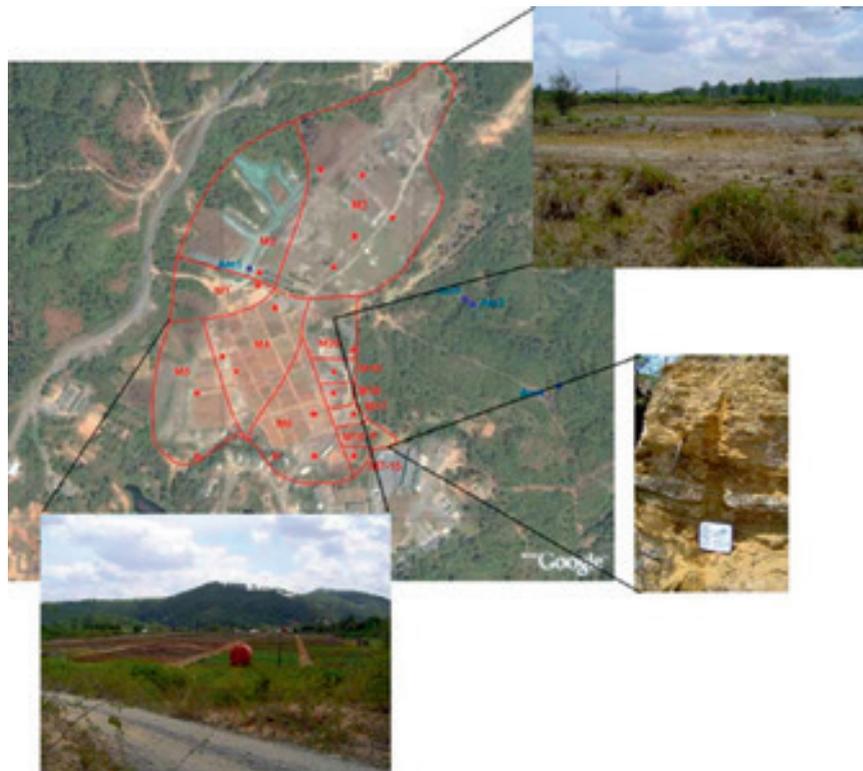


Figura 4. Ubicación de muestras, fotos e imágenes de los residuos mineros y el talud. En rojo, muestras de residuos. En azul, muestras líquidas de drenaje procedente de los residuos (Am 5 tomada a 200 metros, fuera de imagen). Las áreas recuadradas en rojo representan las áreas con las que se hicieron las muestras compuestas (Fuente: Google Earth).

## PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

Los análisis químicos y mineralógicos se han realizado tanto en laboratorios externos como propios de la UNAM, concretamente en los siguientes laboratorios cuyas acreditaciones se explican a continuación:

Laboratorios de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía de la UNAM (Acreditación EMA: FRA-156-021/02), donde se procesaron inicialmente las muestras para sus posteriores análisis, se realizaron medidas de parámetros generales (pH, CE, preparación, cuarteo, muestras compuestas, etc.).

Activation Laboratories de Canadá (Certificado (ISO/IEC) 17025 (ISO/IEC) 17025, que incluye ISO 9001 e ISO 9002 con especificación CAN-P-1758 y CAN-P-1579) donde se realizaron los análisis químicos de todas las muestras procedentes del Distrito Minero de Pinar del Río (Cuba).

Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de la Facultad de Geología de la UNAM, donde se realizaron los análisis mineralógicos por DRX (Difracción de Rayos X) de las muestras sólidas procedentes del Distrito Minero de Pinar del Río (Cuba) Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Facultad de Química de la UNAM, donde se realizaron los análisis mineralógicos por Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopia de Energía Dispersa (MEB-EDS) de las muestras sólidas seleccionadas procedentes ambas zonas de estudio.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### Residuos mineros

Las muestras procedentes de los residuos mineros de la Mina Matahambre se dividen en dos tipos: muestras oxidadas y no oxidadas. Se caracterizan por tener unas tonalidades cromáticas amarillas, rojizas y marrones en las partes oxidadas y grises en las partes que todavía no han sido oxidadas. Actualmente, se cultiva sobre estos residuos, con la colocación de una capa de arena entre 20 y 30 cm.

Se recogieron 19 muestras en campo que fueron agrupadas en 11 compuestas, en función de los datos preliminares de pH, conductividad, tipo, color y ubicación de las mismas en el área. Además, se recogieron 8 muestras en un talud (perfil) de los residuos (Tabla 2, Fig. 4).

Los parámetros preliminares determinados en las muestras tomadas en Matahambre varían desde pH ácidos a neutros, en los residuos más antiguos ya oxidados, y pH básicos, en los residuos más recientes no oxidados.

Tabla 2. Parámetros Generales de los Residuos Mineros de Matahambre.

Muestras Residuos	Tipo	pH	CE (ms/cm)
M 1	Residuo oxidado	4.53	1.19
M 2	Residuo no oxidado	7.08	0.29
M 3	Residuo no oxidado	7.31	0.16
M 4	Residuo no oxidado	6.02	2.27
M 5	Residuo oxidado	4.28	2.95
M 6	Residuo no oxidado	5.50	0.13
M 7	Talud (0-50 cm)	3.73	1.39
M 8	Talud (50-70)	3.82	1.51
M 9	Talud (70-100)	3.73	0.79

## RESIDUOS MINEROS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA MINA INACTIVA MATAHAMBRE

M 10	Talud (100-110)	3.67	1.09
M 11	Talud (110-130)	4.75	0.32
M 12	Talud (130-140)	3.84	0.28
M 13	Talud (140-160)	4.02	0.14
M 14	Talud (160-180)	5.10	0.07
M 15	Residuo oxidado	4.66	0.05
M 16	Residuo oxidado	4.91	0.10
M 17	Residuo oxidado	4.14	0.00
M 18	Residuo oxidado	3.66	0.00
M 19	Residuo oxidado	5.30	0.03

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los metales en las partes profundas de los residuos y comprender los procesos de movilización, retención y neutralización que tienen lugar en los mismos, se realizó la caracterización mineralógica en cuatro de las muestras del talud (perfil) mediante DXR y MEB (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados mineralógicos mediante a Difracción de Rayos X.

Muestra	Profundidad en el perfil	Minerales primarios	Minerales secundarios
M 8	50-70 cm	Cuarzo	clinocloro
M 10	100-110 cm	Cuarzo, pirita	clinocloro , goethita, jarosita, hematites
M 11	110-130 cm	Cuarzo	clinocloro , chamosita, celestina con Ba, goethita
M 13	140-160 cm	Cuarzo, pirita	clinocloro

En las muestras de la parte superior del perfil (M 8), que es la parte más oxidada, encontramos minerales primarios estables como el cuarzo y minerales secundarios formados a partir de los procesos oxidativos que están teniendo lugar. En estas capas superiores no hay presencia de pirita ya que ésta ha sido oxidada a partir del oxígeno y el agua, muy accesibles en esta parte superior.

En la parte media del perfil (M 10 y M 11), encontramos una costra endurecida formada a partir de la precipitación de minerales secundarios de hierro: goethita, jarosita (Fig. 4) y hematites, que se forman a partir del Fe libre procedente de minerales primarios oxidados (sulfuros de Fe). Estas costras de hierro denominadas en la literatura inglesa como “hardpan” han sido citadas en otros estudios de residuos mineros inactivos (Blowes et al., 1990; Lin, 1997; Johnson et al., 2000; Holmstrom et al., 2001; Ljungberg y Ohlander, 2001; McGregor y Blowes, 2002; Romero, 2004). En dichos residuos, las costras cementadas están formadas fundamentalmente por goethita y aparecen a una profundidad donde comienza a aumentar el pH. Estos precipitados de Fe tienen una alta capacidad de adsorción y coprecipitación de As, Cu y Zn (Lin, 1997), por lo tanto, pueden retener metales proporcionando un mecanismo natural de atenuación de EPT (Fig. 5 y 6).

En las zonas profundas de los residuos (M 13) el suministro de oxígeno y agua es muy bajo. Por lo tanto, los procesos de oxidación son menores y aparecen minerales primarios como la pirita, original del yacimiento, que no ha sido oxidada totalmente.

Se realizaron análisis de la costra de hierro cementada (M 10) mediante MEB para estudiar el comportamiento de los minerales que se forman en ella y comprobar si existe retención de metales

en los minerales secundarios. Se localizaron minerales secundarios de Fe, que retienen Cu (Fig. 5 y 6).

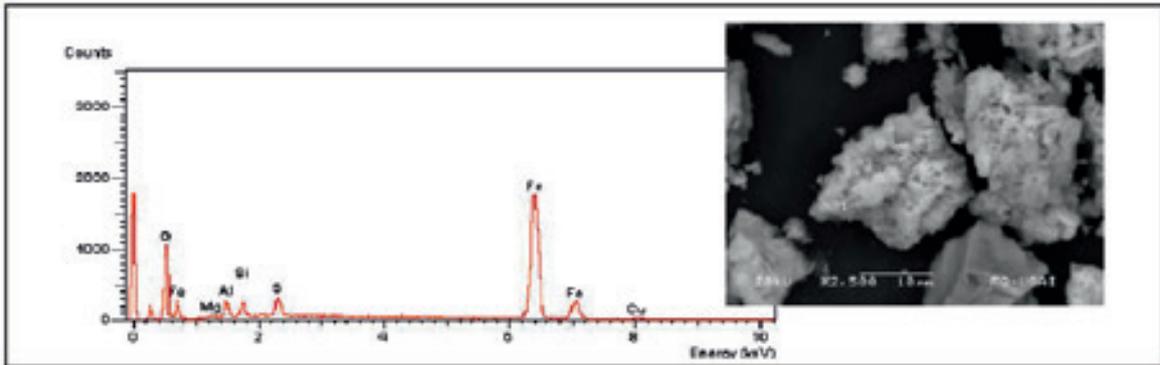


Figura 5. Identificación, en base a microanálisis por MEB-EDS, de procesos de retención de Cu en minerales secundarios de Fe (1).

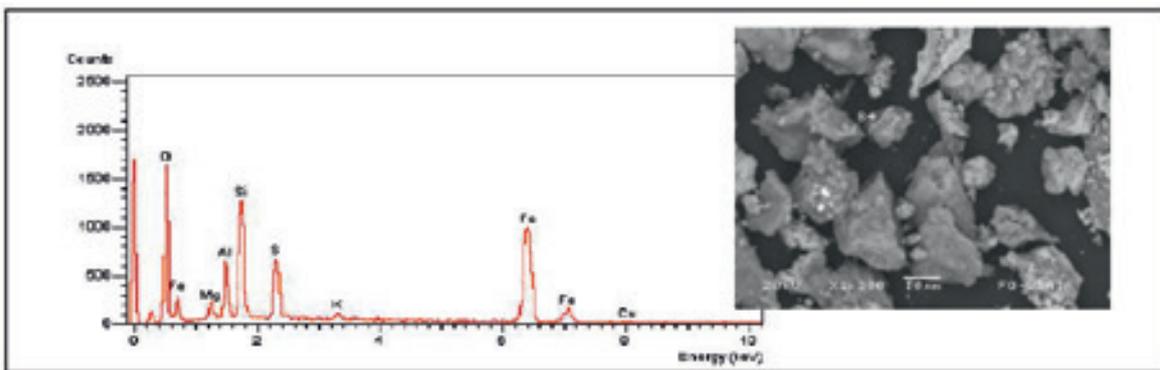


Figura 6. Identificación, en base a Microanálisis por MEB-EDS, de jarosita (9) que retiene Cu.

### Caracterización química

Los residuos mineros de Matahambre no poseen concentraciones excesivamente altas de metales, sólo el Cu aparece en altas concentraciones, el As y Zn aparecen en concentraciones medias (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de las concentraciones totales de EPT, en los residuos mineros de Matahambre.

Elemento	As	Ag	Ba	Be	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	V	Zn
Muestra	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg						
M 1	219	3.44	45.2	0.5	0.5	59.1	2530	16.3	76.9	25.6	71	221
M 2	101	2.19	59.7	0.2	0.11	44.8	542	10.5	51.4	13.7	42	88.1
M 3	47.8	1.52	104	0.3	0.26	60.9	1130	11.4	96	22.2	50	148

## RESIDUOS MINEROS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA MINA INACTIVA MATAHAMBRE

M 4	40.9	0.94	82.5	0.3	0.31	44.1	870	10. 2	78	10.9	45	140
M 5	84.7	1.45	73.7	0.3	0.13	52.2	716	13. 4	53.5	24.5	55	135
M 6	30.1	0.58	69.1	0.2	0.32	89.8	500	5.5 7	31.8	27.2	27	135
M 15	76.5	2.66	92.4	0.1	0.06	50.4	736	11. 5	12.4	19.4	40	56.3
M 16	14	0.40 8	37.7	0.1	0.5	60.5	290	4.9 5	11.2	9.06	21	50.7
M 17	112	1.89	113	0.3	0.07	62.9	785	11. 9	25.1	13.8	50	95.5
M 18	435	10.7	36.5	0.1	0.17	45	162 0	15. 5	20.7	37.7	38	107
M 19	112	2	53.2	0.1	0.05	63.2	375	10. 1	22.1	8.53	39	67.1

Las altas concentraciones de Cu, corresponden con la mineralogía del yacimiento de Matahambre, ya que éste es un yacimiento de cobre. Los resultados de las muestras tomadas en un perfil de los residuos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de las concentraciones totales en el talud de los residuos mineros de Matahambre.

Elemento	As	Ag	Ba	Be	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	V	Zn
Muestra	mg/ kg	%	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg						
M 7	77.7	1.21	122	0.2	0.07	53.1	331	10. 6	15.2	8.84	42	71.4
M 8	107	1.91	72.9	0.1	0.04	63.7	550	11. 4	18	10.8	43	68.2
M 9	100	1.54	42.1	0.2	0.06	68.8	477	9.1 5	20.3	9.04	37	73.7
M 10	156	2.7	54.3	0.1	0.09	72.3	924	10. 8	19.7	13.9	38	75.7
M 11	108	1.96	34.4	0.2	0.07	63.2	826	10. 5	24.1	7.81	42	108
M 12	59.8	0.76	57.5	0.2	0.05	84.7	443	8.5 6	24	4.24	36	62.4
M 13	94.1	1.12	101	0.2	0.08	63.6	459	11	22.7	10	43	75.1
M 14	46.4	0.94	55.1	0.2	0.06	76.7	371	9.5 8	21.4	5.21	41	77.2

Las muestras del perfil se dividen en tres zonas: una zona superior (M 7-M 9), donde el oxígeno y el agua oxidan a los sulfuros residuales, creando condiciones ácidas; una zona intermedia (M 10 y M 11), correspondiente a la costra dura compuesta por precipitados de Fe, donde aumenta el

pH y se observan las concentraciones más altas de metales (por acumulación); y una zona inferior (M 12-M 13), donde el pH es cercano al neutro y no existen procesos de oxidación (Fig. 7).

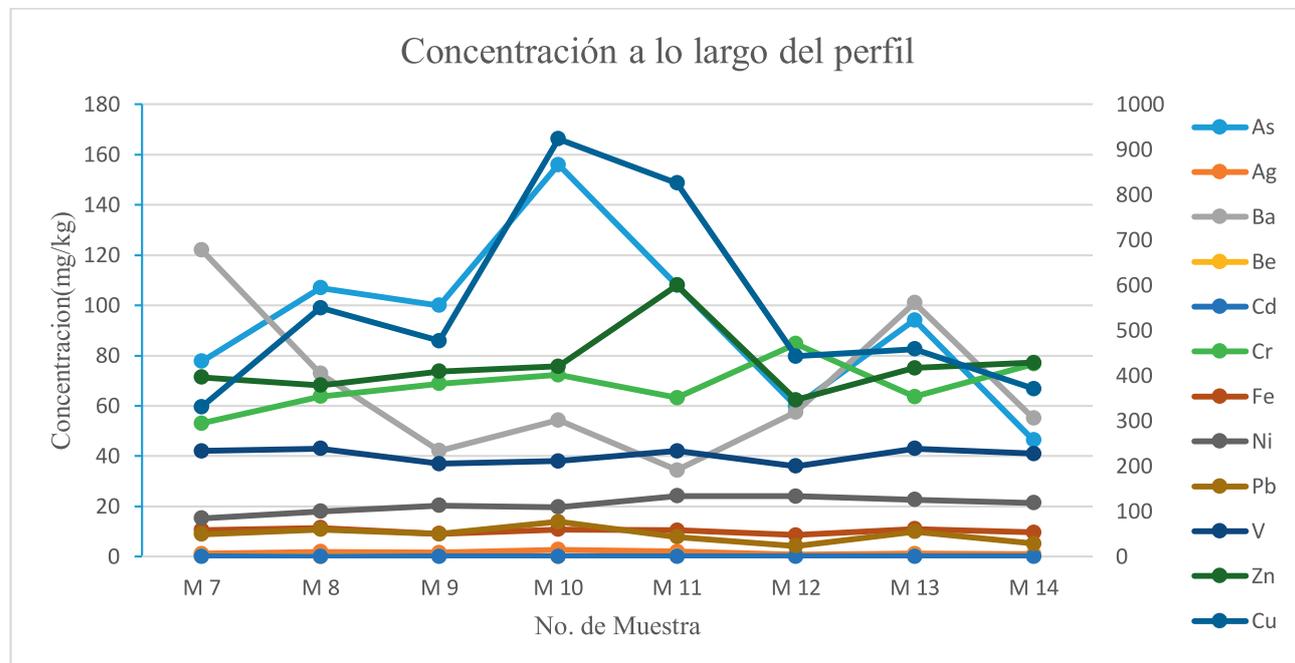


Figura 7. Variación de las concentraciones de EPT a lo largo del talud de la presa de cola. Se incluye eje secundario.

La capa intermedia (M 10) es la que mayores concentraciones de metales posee. Por lo tanto, esta “costra dura” juega un papel muy importante en la retención de metales. Se forma debido a la presencia de carbonato cálcico,  $Fe^{3+}$  y ausencia de oxígeno y agua. Estas condiciones inhiben la oxidación de sulfuros e incrementan el pH hasta valores cercanos al neutro, lo que provoca la precipitación de  $Fe^{3+}$ , que da lugar a goethita, jarosita y hematites, entre otros minerales de Fe, con trazas de Cu, Zn y Fe. La precipitación de estos minerales de Fe en la matriz porosa forma un cemento que modifica la permeabilidad de la matriz, haciéndola impermeable y, por lo tanto, restringe la difusión del oxígeno y agua y actúa como una barrera de acumulación de metales, ya que estos precipitados de Fe tienen una alta capacidad de adsorción y coprecipitación de Cu, Zn y As (Lin, 1997). Por lo tanto, las capas cementadas de Fe en los residuos de Matahambre, juegan un papel muy importante en la retención de Cu.

### Lixiviados

Las muestras líquidas procedentes del drenaje de los residuos fueron recogidas a lo largo de un arroyo en la base de estos residuos.

### Caracterización química

Estas muestras poseen concentraciones relativamente bajas de EPT y valores de pH neutros (Tabla 5 y Fig. 8).

Tabla 5. Resultado de las concentraciones solubles en el arroyo en la base de los residuos mineros de Matahambre

Muest/Elem	Distancia desde los residuos	As	Pb	Cd	Cu	Fe	Zn	pH	Ce
LD=mg/L		0.005	0.00001	0.01	0.0002	0.01	0.0005		(ms/cm)
Am 1	sobre los residuos	0.0014	0.00054	0.00012	0.0228	0.26	0.178	7.39	0.023
Am 2	1 m (en arroyo)	0.001	0.0155	0.00478	10.4	6.92	2.03	2.97	3.6
Am 3	15 m (en arroyo)	0.0004	0.00191	0.00128	0.0185	0.56	0.578	7.03	2.87
Am 4	50 m (en arroyo)	0.0008	0.00342	0.0009	0.0121	2.46	1.31	7.77	2.27
Am 5	200 m (en arroyo)	0.0004	0.00375	0.0002	0.0138	0.12	0.0598	7.78	0.7

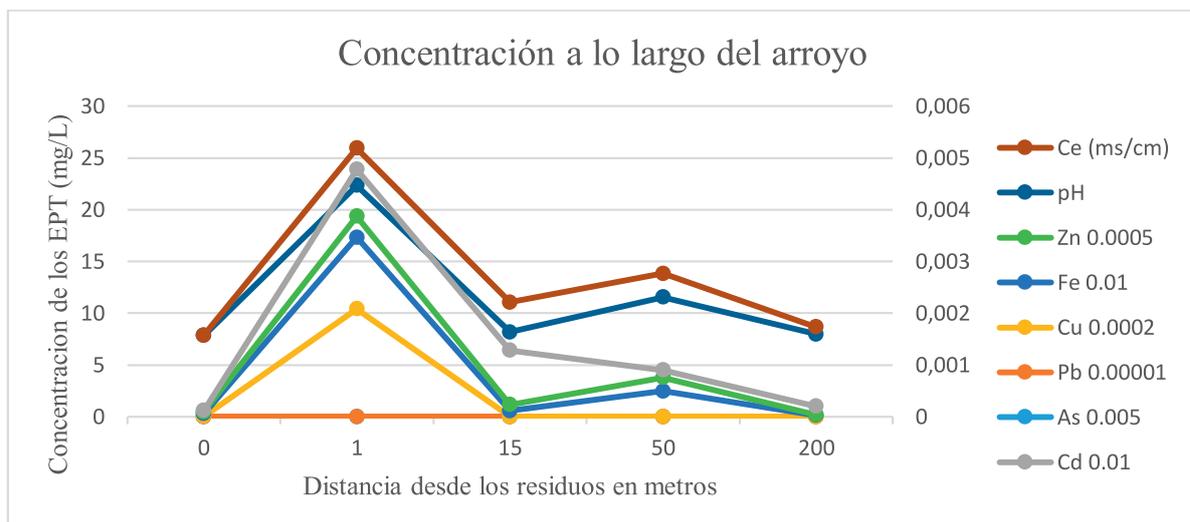


Figura 8. Variación de concentración de EPT en los lixiviados a lo largo del arroyo. Se incluye eje secundario.

De las muestras tomadas a lo largo del arroyo (Am 2-Am 5) situado en la base de los residuos, únicamente en la primera muestra (Am 2) el pH es ácido y el Cu aparece en concentraciones altas. Pero a medida que aumenta la distancia a los residuos, a lo largo del arroyo, las concentraciones de EPT van disminuyendo (muy significativamente para el Cu) y el pH se va neutralizando. Esto demuestra un proceso de atenuación natural a lo largo del arroyo y una mínima afección ambiental en la zona por parte de los residuos mineros de Matahambre.

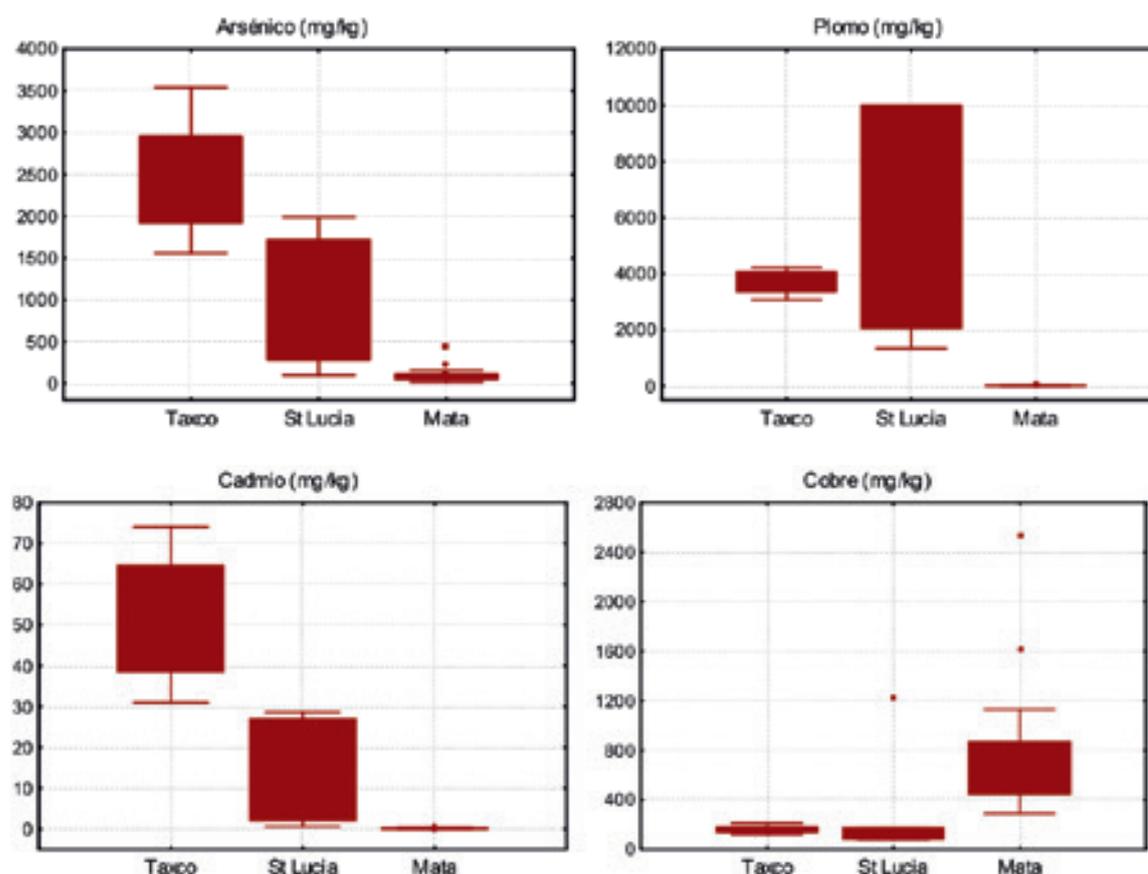
Cuando comparamos los resultados obtenidos en Taxco (México), Santa Lucía (Noroeste de Cuba) y los resultados obtenidos en este trabajo, para arsénico, cadmio, plomo, cobre, hierro y zinc, tanto en muestras sólidas (Fig. 9) como líquidas (Fig. 10) podemos observar lo siguiente:

Con la comparación de los resultados de las concentraciones de las muestras sólidas (Fig. 9) de los residuos procedentes de los emplazamientos mineros se observa que, según la génesis de cada

yacimiento, éstos tienen diferentes concentraciones de EPT. Los residuos mineros de Taxco poseen las concentraciones más altas en As y Cd. Las concentraciones de Fe y Zn en el yacimiento de Santa Lucía superan ampliamente a las de El Fraile y Matahambre. Además, el yacimiento de Matahambre sólo sobrepasa las concentraciones de los anteriores en Cu.

Las muestras líquidas (Fig. 10), obtenidas bien mediante muestreo in situ o bien mediante extracciones líquidas (no se ha incluido la bocamina por no ser posible aplicar métodos estadísticos con una muestra), se observa que, para los tres emplazamientos estudiados, el yacimiento de Santa Lucía es el que mayores concentraciones de EPT libera al medio, además de ser el que menor pH y mayores conductividades eléctricas muestra. Le siguen, aunque muy por debajo, sólo para superar al anterior en las concentraciones solubles de Cu, los residuos mineros de Taxco. Éste, aunque en menor medida que el anterior, libera cantidades considerables de As al medio. Por último, los residuos mineros de Matahambre liberan cantidades despreciables de EPT al medio.

Aunque esta agua no se utiliza para tomar por los pobladores de los alrededores de la mina, es importante alertar que la concentración de algunos contaminantes de estas aguas no se encuentran por encima de las normas de calidad del agua potable aceptadas por la Organización Mundial de la Salud (conocida por sus siglas en inglés como WHO) (WHO, 2008). Como se observa en la tabla 5 en estas aguas no se aprecian disueltas altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe y otros metales como Al, Cd, Mn, Pb y Zn.



## RESIDUOS MINEROS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA MINA INACTIVA MATAHAMBRE

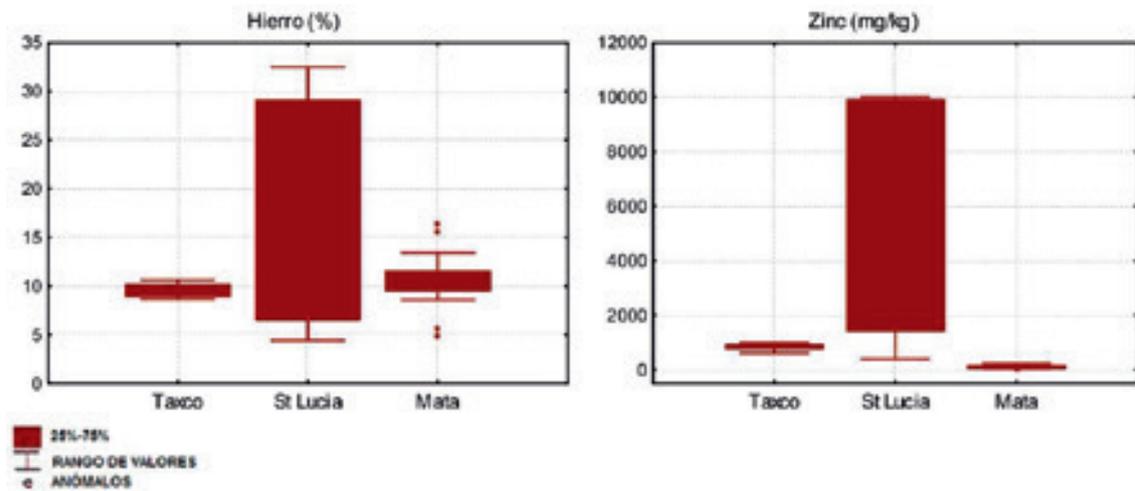
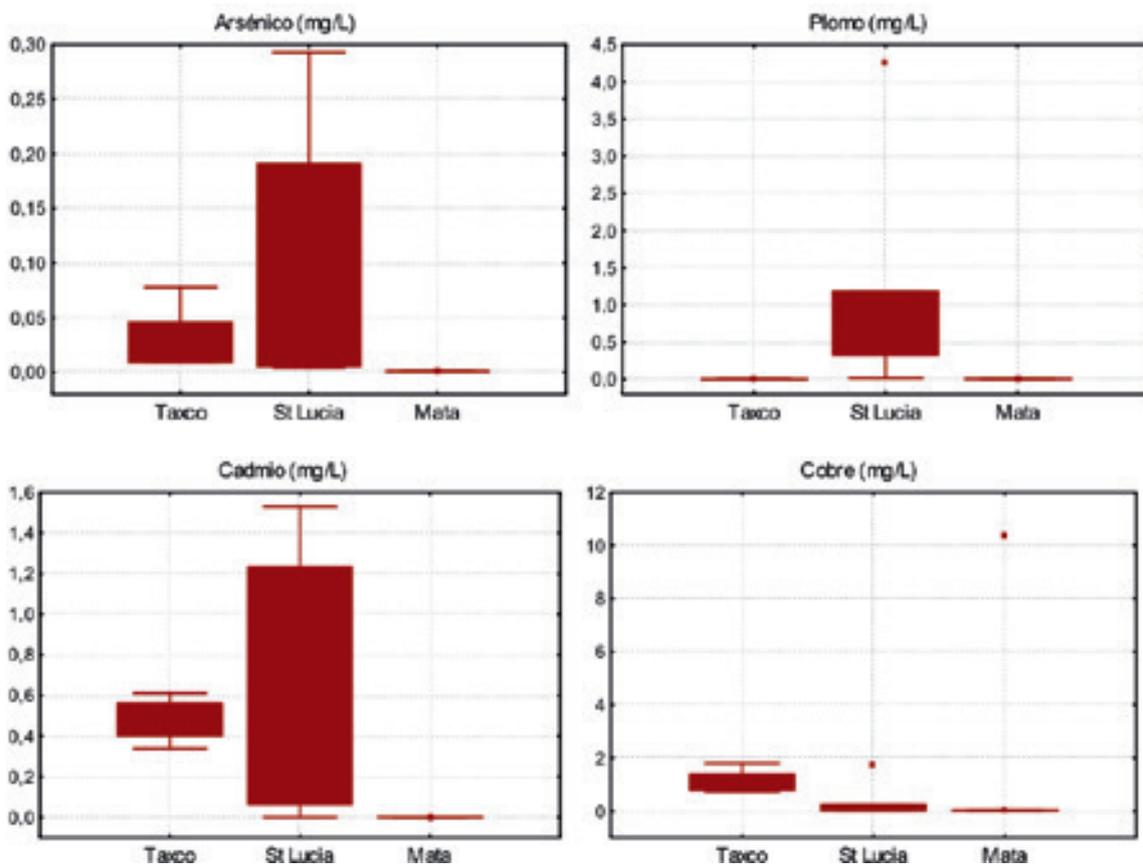


Figura 9. Gráfica comparativa de las concentraciones de EPT totales en las muestras sólidas tomadas en los tres emplazamientos de residuos mineros (Taxco, Santa Lucía y Matahambre).



## RESIDUOS MINEROS Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA MINA INACTIVA MATAHAMBRE

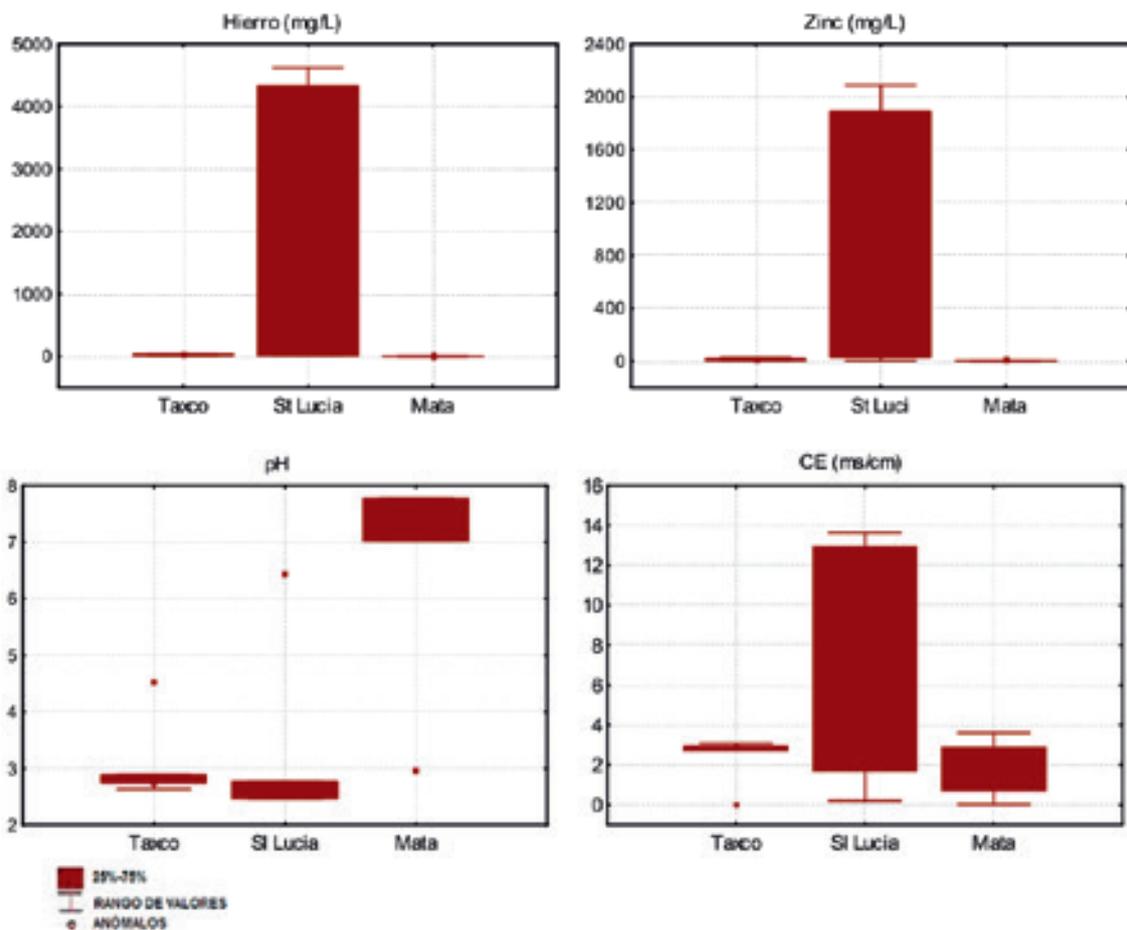


Figura 10. Gráfica comparativa de las concentraciones de EPT solubles en las muestras líquidas tomadas o extraídas en los tres emplazamientos de residuos mineros (Taxco, Santa Lucía y Matahambre).

Por otro lado, los resultados de los estudios en el Distrito Minero de Pinar del Río indican que en los residuos mineros de Matahambre la afección al medio ambiente es mínima. Esto se debe a que las concentraciones iniciales de EPT que contienen los residuos no son excesivamente altas (únicamente para el Cu) y a que los mecanismos de retención natural, mediante procesos de sorción en fases minerales estables en capas cementadas de hierro, juegan un papel muy importante para remediación del DAM.

Estas fases minerales secundarias de Fe retienen las altas concentraciones de Cu existentes en éstos depósitos y evitan que sean liberadas al medio. Además, los bajos contenidos de metales que logran ser liberados son disueltos en las aguas del arroyo, y proporcionan un mecanismo de atenuación y neutralización natural.

Por otra parte, la costra dura de óxidos e hidróxidos de hierro en la presa de cola impide la penetración de los agentes del intemperismo y por tanto la oxidación de los minerales que allí se encuentran y por tanto su liberación al medio ambiente. La utilización de dicha presa como un sitio de cultivo de hortalizas y vegetales, luego de aislarla como una capa de arena, capa vegetal con turba, ayuda considerablemente a aislar los depósitos que contienen minerales residuos del proceso de beneficio del yacimiento Matahambre. Esto podría ser una solución para otros sitios mineros donde la presa de cola o jales se encuentran a la intemperie.

## CONCLUSIONES

1. En el yacimiento Matahambre no existe afectación al medio ambiente debido a las condiciones en que se encuentra la presa de cola y la atenuación natural del cobre y demás EPT.
2. Con la comparación de los resultados de las concentraciones de las muestras sólidas (Fig. 9) de los residuos procedentes de los emplazamientos mineros se observa que, según la génesis de cada yacimiento, éstos tienen diferentes concentraciones de EPT. Los residuos mineros de Taxco poseen las concentraciones más altas en As y Cd. Las concentraciones de Fe y Zn en el yacimiento de Santa Lucía superan ampliamente a las de El Fraile y Matahambre. Además, el yacimiento de Matahambre sólo sobrepasa las concentraciones de los anteriores en Cu.
3. La utilización de dicha presa como un sitio de cultivo de hortalizas y vegetales, luego de aislarla con una capa de arena y capa vegetal con turba, ayuda considerablemente a aislar los depósitos que contienen minerales residuos del proceso de beneficio del yacimiento Matahambre, para evitar la aparición de drenaje ácido de mina. Esto podría ser una solución para otros sitios mineros donde la presa de cola o jales se encuentran a la intemperie y generan gran cantidad de drenaje ácido de mina.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer especialmente al Dr. Francisco Martín Romero del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), principal coordinador del proyecto y por su apoyo personal y profesional, en definitiva la pieza clave de este trabajo. A los Doctores del Instituto de Geofísica de la UNAM: Rosa María Prol y Carles Canet Miquel. Al personal de los diversos Institutos y Laboratorios de la UNAM: Pilar Fernández, Edgar Hernández, Heriberto Rosas, Alexandra Lara y Gerardo Martínez del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía; a Teresa Pi Puig del Laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología; y a Iván Puente Lee del Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Facultad de Química de la UNAM. No puede faltar Laura Núñez Álvarez estudiante de postgrado, quien participó activamente en las campañas de campo, laboratorio y gabinete. Sin ella hubiera sido imposible este trabajo.

Esta investigación fue financiado principalmente por el proyecto IN118709 y CONA-CYT-SEMARNAT-2004-01-350, México y apoyado por el proyecto: Determinación de las afectaciones al medio ambiente provocadas por la actividad geólogo minera en el noroeste del municipio Minas de Matahambre, ejecutado por el departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río. Código: 0562. Pinar del Río, Cuba.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blowes DW, Reardon EJ, Jambor JL, Cherry JA, 1990. The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochim Cosmochim Acta* 55: 965 –978.

- Cobiella JL, 1996. Estratigrafía y eventos jurásicos en la cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, 13(3), 11-25.
- Gaikwad, R.W.; Sapkal, V.S.; Sapkal, R.S., 2010. Ion exchange system design for removal of heavy metals from acid mine drainage wastewater. *Acta Montanistica Slovaca*, vol 15, núm. 4, pp. 298 – 304.
- Gaikwad, R. W.; Sapkal, V. S.; Sapkal, R. S., 2011. Acid mine drainage: a water pollution issue in mining industry. *International journal of advanced engineering technology*, vol 2, núm. 4, pp. 2578 – 262
- Holmstrom, H., Salmon, U.J., Carlsson, E., Petrov, P., Ohlander, B., 2001. Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation. *Sci. Total Environ.* 273, 111–133.
- Iturralde-Vinent MA, 1996a. Magmatismo de Margen Continental en Cuba. Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba. Project 364. Caribbean OpHiolites and Volcanic Arc. Special Contribution No. 1, 121-130.
- Iturralde-Vinent MA, 1996b. Introduction to Cuban Geology and Geophysics. Ofiolitas y Arcos Volcanicos de Cuba. Project 364. Caribbean OpHiolites and Volcanic Arc. Special Contribution No. 1, 3-35.
- Iturralde-Vinent, M.A., 1998. *Naturaleza geológica de Cuba*. La Habana, Editorial Científico-Técnica, 246 pp.
- Johnson RH, Blowes DW, Robertson WD, 2000. The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario. *Contam Hydrol* 41: 49-80.
- Kalin, M; Fyson, A; Wheeler, W., 2006. The chemistry of conventional and alternative treatment system for the neutralization of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, vol 366, pp. 395 – 408.
- Lei Liang-qi, Song Ci-an, Xie Xiang-li, LI Yan-hong, Wang Fei., 2010. Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS mine, Western Australia). *Transactions of nonferrous metals society of China*, vol 20, pp. 1488 – 1493
- Levy, D.B., Custis, K.H., Casey, W.H., Rock, P.A., 1997. A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. *Appl. Geochem.* 12, 203–211.
- Lin, Z., 1997. Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. *Sci. Total Environ.* 198, 13–31.
- Ljungberg J, Ohlander B, 2001. The geochemicals dynamics of oxidizing mine tailings at Laver, northern, Sweden. *J Geochem Explor* 74: 57-72.
- Macingova, E; Luptakova, A., 2012. Recovery of metals from acid mine drainage. *Chemical engineering transactions*, vol 28, pp. 109 – 114. DOI: 10.3203/CTE 1228019

- Malinovski EP, 1967. Informe Preliminar Sobre las Investigaciones Geológico Estructural efectuada en el Campo Mineral Matahambre, Provincia de Pinar del Río. Informe Geológico. Archivo Empresa Minera de Occidente. Minas de Matahambre. Pinar del Río. Cuba. 56 pp.
- Maynard JB, Morton J, 1995. Lead-zinc-barite deposits in Jurassic rocks of Western Cuba: indicators of a cratonic rift tectonic setting. GSA Annual Meeting, Abstracts with Programs, 239.
- McGregor RG, Blowes DW. 2002. The pPhysical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. J Geochem Explor 76: 195-207
- Michalková, E; Schwarz, M; Pulišová, P; Máša, B; Sudovský, P., 2013. Metals recovery from acid mine drainage and possibilities for their utilization. Polony journal of environment studies, vol 22, núm. 4, pp. 1111 – 1118
- Mukhopadhyay, S; Mukherjee, R., 2013. Environmental effect of acid mine drainage on pond ecosystem at Asansol coalfield area, Burdwan district, West Bengal. International journal of environmental sciences, vol 3, núm. 6, pp. 2186 – 2198
- Pérez-Vázquez RG y Melgarejo JC, 1998. El yacimiento Matahambre (Pinar del Río, Cuba): estructura y mineralogía. Acta Geológica Hispánica, volumen 33, No. 1 – 4. Página 133 – 152.
- Pérez-Vázquez RG, Martínez M, 1993. Estudio de la composición mineralógica del cuerpo 59 en el yacimiento Matahambre. Informe Geológico. Archivo Empresa Minera de Occidente. Minas de Matahambre. Pinar del Río. Cuba. 62 pp.
- Pérez-Vázquez RG, Martínez M, 1994. Estudio mineralógico de los cuerpos cupríferos de las estructuras metalíferas 44 y 63 en los niveles más profundos del yacimiento Matahambre. Informe Geológico. Archivo Empresa Minera de Occidente. Minas de Matahambre. Pinar del Río. Cuba. 58 pp.
- Romero FM, 2004. The solid-pHase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. Tesis de doctorado en Ciencias. UNAM, México D.F.
- Simón AA, 1995. The Matahambre-Santa Lucía ore district, Western Cuba. GSA Annual Meeting, Abstracts with Programs, 239.
- Taylor, J.R. Global heavy metal pollution (AMD / ARD) impacts. 1st International Acid and Metalliferous Drainage Workshop in China – Beijing [en línea] [ref. de 1 de Diciembre 2012]. Disponible en Web: [http://earthsystems.com.au/wp-content/uploads/2012/03/Global\\_heavy\\_metal\\_pollution\\_AMD\\_ARD\\_impacts-AMD\\_Workshop\\_China-2012.pdf](http://earthsystems.com.au/wp-content/uploads/2012/03/Global_heavy_metal_pollution_AMD_ARD_impacts-AMD_Workshop_China-2012.pdf)

- US-EPA, 2005. Prevention of Acid Mine Drainage Generation from Open-pit Highwalls—Final Report EPA/600/R-05/060. Mine Waste Technology Program Activity III, Project 26.
- Valdés-Nodarse EL, Díaz Carmona A, Davies JF, Whitehead RE, Fonseca L, 1993. Cogenetic sedex Zn-Pb and stockwork Cu ore, Western Cuba. *Exploration & Mining Geology*, 2, 297-305.
- Whitehead RE, Davies JF, Valdés-Nodarse EL, Díaz Carmona A, 1996. Mineralogical and chemical variations, Castellanos Shale-hosted Zn-Pb-Ba deposit, Northwestern Cuba. *Econ. Geol.*, 91, 713-722.
- WHO (World Health Organization), 2008. *Guidelines for Drinking-Water Quality: Incorporating 1st and 2nd Addenda*, vol. 1. Recommendations, third ed. (WEB version), Geneva. ISBN 978 92 4 154761 1.