

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS



**CARACTERIZACIÓN EVOLUTIVA PRELIMINAR DE LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LAS ÁREAS ALEDAÑAS AL
YACIMIENTO SANTA LUCÍA.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología.
(Mención Geología Ambiental)**

Autora: Ing. Olga Klimchuk

Tutor: Dr. C. Elmidio Estévez Cruz

Pinar del Río
2014

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por la autora y/o respaldado por la Empresa Geominera Pinar del Río y la Universidad de Pinar del Río. Por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones y solo ellas podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia (mi esposo e hijos) que ha mostrado la suficiente paciencia y comprensión, y de los que he recibido el aliento necesario para desarrollar esta investigación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutor por sus orientaciones y el apoyo brindado durante todo el trabajo.

A los profesores del departamento de Geología de la universidad (Pepito, Carlos Díaz Guanche y especial a Carlos Javier) que me brindaron su ayuda y apoyo en el momento preciso.

A los colegas de EMINCAR (Eusebio, Medina, Ramoncito, Sobrino, Sandra) que me ayudaron con su experiencia y entusiasmo a la realización de este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación estuvo encaminada a caracterizar el comportamiento de la contaminación ambiental, provocada por la explotación del yacimiento Santa Lucía y su incidencia en las áreas aledañas. El trabajo constituye una generalización de los diferentes estudios ambientales desarrollados en el yacimiento, que permite valorar el efecto que han tenido las diversas medidas tomadas para revertir el deterioro ambiental y detener la contaminación. Como parte del trabajo se desarrolló una campaña de muestreo, en la cual se tomaron dos muestras de aguas superficiales, una de efluente de mina, seis de sedimentos y tres de menas. Además, se utilizaron los datos de las diferentes investigaciones de carácter ambiental, ejecutadas en los años 2011, 2010, 2009 y 1997-98, para poder contrastar las concentraciones de metales pesados en diferentes momentos. Los análisis químicos para determinar la concentración de elementos potencialmente tóxicos se realizaron por el método instrumental ICP-AES con digestión por HCl 2N y agua regia inversa. A las muestras de mena se les realizó análisis minerográfico en el laboratorio del IGP. Los resultados analíticos de los elementos potencialmente tóxicos en efluentes, aguas superficiales y sedimentos fueron evaluados en el tiempo para establecer regularidades en su comportamiento y además, comparados con las normas aprobadas para determinar el grado de contaminación.

La investigación permitió demostrar que la contaminación y el deterioro ambiental del área de estudio ha sido continua y la misma no ha cesado a pesar de las medidas que se han tomado para revertir la situación. Por otra parte, la acidez de las aguas superficiales y efluentes revelada en todas las campañas de estudio, indica la persistencia en el tiempo del drenaje ácido de mina y por consiguiente la dispersión de elementos potencialmente tóxicos en el medio circundante. Las concentraciones de Fe, Zn y Cd en las aguas superficiales; de Zn, Cd y As en los efluentes de minas y Pb, Zn, Cu y Cd en los sedimentos son variables en el tiempo, pero sus valores exceden los límites máximos permisibles para estos elementos.

ABSTRACT

The present investigation aims at evaluating the evolution in the time of the environmental pollution caused by the exploitation of Santa Lucía deposit and its incidence in the surrounding areas. The work constitutes a generalization of the different environmental studies developed in the location, allowing to evaluate the effect of diverse measures taken to revert the environmental deterioration and to stop the contamination. A sampling campaign was developed, in which two samples of superficial waters are taken, one of mine effluent, six of sediments and three of ore. The data of the different environmental campaigns executed in the years 2011, 2010, 2009 and 1997-98, were also used. The chemical analyses to determine the concentration of elements potentially toxic were carried by instrumental method ICP-AES with HCl 2N digestion and agua regia. The ore samples were studied by mineragraphic analysis in the laboratory of the IGP. The analytic results of the elements potentially toxic in effluents, superficial waters and sediments were evaluated in the time to establish regularities in their behavior and also compared with the norms approved to determine the degree of pollution.

The investigation allowed demonstrating that the contamination and the environmental deterioration of the study area has been continued and not ceased in spite of the measures taken to revert the situation. On the other hand, the acidity of the superficial waters and effluents, revealed in the all campaigns, indicates the persistence in the time of the acid mine drainage and consequently the dispersion of potentially toxic elements in the surrounding areas. The concentrations of Fe, Zn and Cd in the superficial waters Zn, Cd and As in the of mines effluents and Pb, Zn, Cu and Cd in the sediments are variable in the time, but their values exceed the permissible maximum limits for these elements.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Antecedentes bibliográficos.....	4
I.1. Trabajos previos sobre las afectaciones del medio ambiente provocados por la explotación del yacimiento Santa Lucía.	4
I.2. Características físico-geográficas.	7
I.3. Geología de la región y del área de investigación.	8
I.4. Fenómenos físico-geológicos.	10
I.5. Relieve.	11
I.6. Hidrogeología.	12
I.7. Suelos.....	14
I.8. Características de la flora y fauna de la zona de Santa Lucía.....	15
I.9. Clima.....	16
I.10. Descripción de la línea base ambiental del territorio y principales fuentes contaminantes.....	18
I.11. Impacto sobre el medio ambiente del territorio por la actividad minera.	19
I.12. Impactos que pueden surgir con la futura explotación del yacimiento Santa Lucía.....	22
Capítulo II. Materiales y métodos utilizados.....	24
II.1. Revisión bibliográfica.	25
II.2. Trabajos de campo.....	25
II.2.1. Muestreo de las menas.....	25
II.2.2. Muestreo de los efluentes de mina.	27
II.2.3. Muestreo de las aguas superficiales.....	29
II.2.4. Muestreo de los sedimentos.....	30
II.3. Trabajos de laboratorio.....	32
II.4. Trabajos de gabinete.....	34
Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.	35
III.1. Menas primarias y secundarias.	35
III.1.1. Composición química de las menas.	35
III.1.2. Composición mineralógica de las menas.	36
III.1.3. Análisis de fases de plomo y zinc de las muestras de menas.	37

III.2. Efluentes de mina.....	39
III.3. Aguas superficiales.	44
III.4. Sedimentos.	56
III.4.1. Granulometría de los sedimentos.	58
III.4.2. Análisis mineralógico de los sedimentos.	61
III.5. Factores que provocan la migración de los elementos potencialmente tóxicos.	62
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Mapa de ubicación del área de investigación.....	7
Figura I.2. Afectación en el cauce del arroyo Santa Lucía en la laguna La Sabana.....	21
Figura II.1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.....	24
Figura II.2. Tipos de menas.	27
Figura II.3. Ubicación de los puntos de muestreo de los efluentes de mina.....	28
Figura II.4. Ubicación de los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de seca y lluvia.	29
Figura II.5. Ubicación de los puntos de muestreo de los sedimentos de diferentes campañas (año 2012, 2011, 2010 y 2009).	31
Figura III.1. Comportamiento de los valores de pH de diferentes campañas en los 4 puntos.....	40
de muestreo de los efluentes de minas.....	40
Figura III.2. Concentraciones de Pb, As (a) y Zn, Fe, Al (b) desde la campaña del año 1998 hasta el 2010 con sus respectivos LMPP en el socavón.....	41
Figura III.4. Concentraciones de Zn, As, Cd y Al en las campañas de los años 2009, 2010 y del 2012 con sus respectivos LMPP en el canal de drenaje.....	43
Figura III.5. Comportamiento de la acidez del agua desde el año 1997 al 2014 a) años 2012-14, b) año 2011, c) año 2010, d) año 2009, e) año 1997-98.....	45
Figura III.6. Valores de pH en los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de seca con el incremento de la distancia a la cantera.....	49
Figura III.7. Valores de pH en los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de lluvia con el incremento de la distancia a la cantera en dos direcciones.	51
Figura III.8. Concentraciones de los EPT (Zn, Pb, Fe y Cd) en las muestras de aguas superficiales, desde la campaña del año 1997-98 hasta el 2012 a las distancias de 1000 m y 2200 m de la cantera.	53
Figura III.9. Comportamiento de los EPT (Fe, Zn, Pb,) en las aguas superficiales con el aumento de la distancia de la cantera en las campañas del 2009 y 2010.	55
Figura III.10. Comportamiento de Pb (a), Zn (b), Cu (c) y Cd (d) en los sedimentos con el aumento de la distancia desde la cantera.....	57
Figura III.11. Comportamiento de Pb (a), Zn (b) y Cu (c) en los sedimentos a las distancias de 1000 m y 1800 m desde el año 2009 hasta el 2012.....	58

Figura III.12. Perfil longitudinal del arroyo de la cantera Santa Lucía con los
resultados del análisis granulométrico. 60

INDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Dirección y velocidad del viento predominante mensual.....	17
Tabla I.2. Principales indicadores climáticos.	18
Tabla II.1. Ubicación de las muestras de menas de las campañas de los años 2012, 2010 y 2009.	26
Tabla II.2. Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo de efluentes de mina en los años 2013-14.	28
Tabla II.3. Ubicación y descripción de las muestras de sedimentos de diferentes campañas.....	30
Tabla II.4. Descripción de los métodos de análisis químicos en LACEMI.	33
Tabla III.1. Valores mínimos, máximos y promedios de los elementos de la composición química de las menas.....	35
Tabla III.2. Resultados de análisis mineragráfico de las menas.	36
Tabla III.3. Resultados de los análisis de fases de plomo de las muestras de menas. ...	38
Tabla III.4. Resultados de los análisis de fases de zinc de las muestras de menas.....	38
Tabla III.5. Valores de pH promedio en los puntos de muestreo de los efluentes de mina de todas las campañas.	39
Tabla III.6. Valores promedios de los elementos que superan los Límites Máximos Permisibles Promedios (LMPP) en el punto de muestreo del socavón.	40
Tabla III.7. Valores promedios de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del depósito de barita.....	42
Tabla III.8. Valores promedios de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del canal de drenaje.	43
Tabla III.9. Valores de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del alcantarillado.....	44
Tabla III.10. Valor máximo, mínimo y promedio de pH en las muestras de las aguas superficiales de cada campaña.	46
Tabla III.11. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia a la cantera por el curso de los arroyos. Período de seca.....	47
Tabla III.12. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia a la cantera en las direcciones SE y NO (escurrimiento desde el socavón). Período de seca.....	48

Tabla III.13. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia de la cantera por el curso de los arroyos que drenan al NE y hacía el SE. Período de lluvia.	50
Tabla III.14. Resumen por campañas de las concentraciones de EPT en las muestras de aguas superficiales.	52
Tabla III.15. Clasificación y el grado de selección de los sedimentos.	59
Tabla III.16. Composición mineralógica de los sedimentos realizada en diferentes campañas.....	61

INDICE DE ANEXOS

Anexo textual 1. Laboratorios donde se realizaron los análisis químicos de varias campañas.....	71
Anexo textual 2. Ubicación y descripción de las muestras de efluentes de minas de diferentes campañas.....	73
Anexo textual 3. Valores de pH de los efluentes de minas de varias campañas.....	76
Anexo textual 4. Ubicación y descripción de las muestras de aguas superficiales de diferentes campañas.....	79
Anexo textual 5. Resultados de pH de las muestras de aguas superficiales de diferentes campañas.....	82
Anexo textual 6. Comportamiento de los EPT en las aguas superficiales a las distancias de 1000 m y 2200 m en varias campañas.....	84
Anexo textual 7. Resultados de análisis químicos de las menas.	86
Anexo textual 8. Resultados de análisis químicos de las muestras de efluentes de mina de varias campañas.	88
Anexo textual 9. Resultados de análisis químicos de las muestras de sedimentos de las campañas de los años 2012, 2011, 2010 y 2009.	91
Anexo textual 10. Granulometría de las muestras de sedimentos.	93
Anexo textual 11. Resultados de análisis químicos de las muestras de aguas superficiales de varias campañas.	94
Anexo textual 12. Afectaciones de aguas, suelos, paisaje, flora y fauna por el DAM. Caso del lugar del puente de la carretera Santa Lucía- Minas.....	96
Anexo gráfico 1. Mapa geológico del Distrito Metalogénico Matahambre-Santa Lucía a escala 1:50 000 (Burov et al, 1985).	97
Anexo gráfico 2. Mapa de la concentración de los EPT en los efluentes de mina en los diferentes estudios.....	98
Anexo gráfico 3. Vistas de la cantera Santa Lucía y las áreas aledañas contaminadas por el DAM. Años 2004, 2009 y 2013.	99
Anexo gráfico 4. Llanura de inundación afectada por la contaminación ambiental generada por la explotación de la cantera Santa Lucía. Las áreas se digitalizaron empleando imágenes del Google Earth de los años 2004, 2009, 2013. La imagen base corresponde al año 2004	101

Anexo gráfico 5. Mapa de la concentración de los EPT en las aguas superficiales en los diferentes estudios..... 102

Anexo gráfico 6. Mapa de la concentración de los EPT en los sedimentos de diferentes estudios..... 103

INTRODUCCIÓN

La evolución del ser humano y el desarrollo de las civilizaciones han estado íntimamente ligados a la utilización de los recursos minerales. El cobre, el bronce y el hierro, fueron los primeros recursos minerales emblemáticos utilizados por el hombre. A estos se fueron incorporando otros muchos, como el oro, la plata, el plomo, el mercurio, los mármoles y demás piedras ornamentales y de construcción, o las arcillas para la fabricación de piezas de adobe o ladrillos. En resumen, los recursos minerales son imprescindibles para un sinnúmero de actividades económicas del hombre. Sin embargo, el aprovechamiento de los recursos minerales a través de la minería, como la gran mayoría de las acciones humanas, ocasiona daños inmediatos a la naturaleza (García, 2004).

Aunque no existen datos suficientes para medir el costo del impacto ambiental de la minería y la metalurgia, sí se sabe que es muy significativo en comparación con otras ramas industriales. La industria minero-metalúrgica, por lo tanto, es considerada como de alto impacto, pues afecta el ambiente desde el subsuelo hasta la estratósfera (Alfonso, 2005).

La introducción de nuevas tecnologías con procesos productivos más baratos y selectivos, equipamientos más sencillos y un menor impacto en el medio, ha alcanzado en la última década, una importante prioridad para muchas entidades metalúrgicas en el mundo. El yacimiento Santa Lucía se encuentra ubicado en la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río, cuyas actividades mineras a cielo abierto comenzaron en 1980 en una primera etapa y se reanudaron en una segunda etapa en los años noventa del pasado siglo, siendo una de las actividades económicas fundamentales de la región y al mismo tiempo, una de las fuentes generadoras de conflictos ambientales (Madrazo, 2008).

En la cantera Santa Lucía, aflora una parte del cuerpo mineral en el que predominan la pirita y otros minerales sulfurosos, los que al interactuar con el aire y agua provocan el Drenaje Ácido de Mina (DAM), que afecta directamente a las aguas superficiales y subterráneas, caracterizado por una disminución significativa de su pH, además de un enriquecimiento notable en sulfatos y metales pesados (Madrazo et.al., 2009).

La generación del DAM es el resultado de una serie compleja de reacciones químicas donde inciden los siguientes aspectos:

- Presencia de sulfuros.
- Presencia de minerales con potencial neutralizador.
- Granulometría del material susceptible de producir el proceso.

- Consideraciones climáticas. Presencia de bacterias.

Cuando comenzó la explotación del yacimiento no se tuvo en cuenta la recuperación ambiental del área, por no contar con legislaciones que regulasen dicha actividad. Actualmente y desde los años 90 son promulgadas la Ley No. 81 del Medio Ambiente de 1997 y Ley No. 76 de Minas de 1995, la que estipula en su Artículo 41, que todos los concesionarios están obligados a preservar adecuadamente el medio ambiente y las condiciones ecológicas del área objeto de la concesión, elaborando estudios de impacto ambiental y planes para prevenir, mitigar, controlar, rehabilitar y compensar dicho impacto derivado de sus actividades; tanto en dicha área como en áreas y ecosistemas vinculados a aquellos que pueden ser afectados.

El depósito Santa Lucía ha sido objeto de explotación minera, lo cual ha permitido liberar a los ambientes superficiales diversos elementos contaminantes; a pesar de la elaboración del “Proyecto de rehabilitación del yacimiento Santa Lucía” en 2002 por Gómez Y. esto no se acompañó de la implementación completa de acciones efectivas que permitieran mitigar los impactos ambientales generados a corto o mediano plazo, agravándose así la situación socio-ambiental de la zona.

De lo anteriormente expuesto, se deriva entonces el siguiente **problema científico**: Se desconoce el comportamiento en el tiempo de la contaminación ambiental provocada por la actividad minera y la eficacia de las medidas de mitigación tomadas para reducir el impacto ambiental.

Objetivo general:

Realizar una caracterización evolutiva preliminar de la contaminación ambiental provocada por la explotación del yacimiento Santa Lucía.

En correspondencia con el problema, el **objeto de la investigación** es la contaminación ambiental vinculada a la explotación del depósito Santa Lucía.

Los objetivos específicos son:

1. Caracterizar los efectos producidos por el drenaje ácido de mina y la concentración de metales pesados en las aguas y sedimentos del área aledaña a la cantera Santa Lucía y su escombrera.
2. Estudiar la correspondencia entre el DAM y contaminación ambiental por los metales pesados en los efluentes de mina, aguas superficiales y sedimentos.

3. Caracterizar la composición química y mineralógica (análisis de fase) de la mena primaria y secundaria, escombreras y de la roca de caja, así como su contribución a la generación del drenaje ácido de minas.

4. Establecer los principales factores que provocan la migración de los elementos potencialmente tóxicos y su influencia en la posible extensión de la contaminación ambiental

La hipótesis planteada es: Si se logra entender los procesos geoquímicos que controlan la liberación e inmovilización de los elementos potencialmente tóxicos en el depósito Santa Lucía y se estudia el comportamiento de la contaminación ambiental es posible, entonces, valorar la efectividad de las medidas ambientales aplicadas desde el cierre de las operaciones.

Tareas de Investigación:

- Muestreo de aguas superficiales, efluentes de mina, sedimentos y menas.
- Mediciones de pH en aguas superficiales y efluentes de minas.
- Análisis químico de muestras de aguas superficiales, efluentes de minas y sedimentos.
- Análisis químico y mineralógico de la mineralización primaria y secundaria □
Construcción de mapas de pH y de contenidos de metales pesados.
- Interpretación de los factores favorecedores de la acción contaminante de la cantera y su escombrera.

Capítulo I. Antecedentes bibliográficos.

El capítulo comienza con el resumen de las investigaciones realizadas en el área de estudio y a continuación se describen las características físico-geográficas, la geología de la región y del área de la investigación, incluyendo los fenómenos físico-geológicos, relieve, hidrogeología, suelos, clima y las características de la flora y fauna de la zona de Santa Lucía. Al final se presenta la descripción de la Línea Base Ambiental de la zona y las principales fuentes contaminantes, el impacto sobre el medio ambiente del territorio por la actividad minera y los impactos que pueden surgir con la futura explotación del yacimiento Santa Lucía.

I.1. Trabajos previos sobre las afectaciones del medio ambiente provocados por la explotación del yacimiento Santa Lucía.

Existen muchas investigaciones en varios países sobre las afectaciones del medio ambiente, particularmente el DAM, provocadas por la explotación de los yacimientos sulfurosos a cielo abierto, así como también el yacimiento Santa Lucía fue investigado en este aspecto con diferentes objetivos. A continuación se brinda un resumen de algunas de las investigaciones realizadas.

Ponce et al. (1997) realizaron el estudio de los impactos producidos en la zona de explotación minera del yacimiento Santa Lucía. Este trabajo constituyó la primera investigación que abordó la cuestión ambiental, pero la cantidad de muestras tomadas fueron insuficientes por lo que, los resultados poseen un carácter preliminar.

Klimchuk et al. (1999) caracterizaron y presentaron el inventario de los recursos del municipio de Minas de Matahambre y sus potencialidades, así como describieron las zonas de riesgo y fuentes contaminantes provocados por diversas industrias y el alcantarillado del municipio, lo que sirvió al gobierno municipal para las soluciones de los problemas relacionados con el planeamiento espacial, su uso racional y la estrategia para el desarrollo del área. Se realizó un escaso muestreo para un área muy grande.

Gómez et al. (2002) elaboraron un resumen de acciones para lograr la estabilidad del medio ambiente en la mina, la planta de trituración y de todas las áreas afectadas, en el período de tiempo más corto posible. Entre las medidas fundamentales propusieron, la construcción de una presa en la misma área que ocupa la cantera, con vistas a acumular

las aguas provenientes de los niveles superiores de la mina y que estas sean tratadas para disminuir su agresividad al ser vertidas al medio; continuar la acción de cubrir la mena sulfurosa primaria de los niveles inferiores de la cantera con estéril extraído; monitoreo de la calidad de las aguas; reforestación de los depósitos de estéril, áreas aledañas a la planta de trituración y las áreas donde se ha afectado la capa vegetal. En el momento de confección de este proyecto se estaba realizando el estudio de los depósitos de menas oxidadas para el procesamiento para Au y Ag, por lo tanto no se hizo la planificación de la ejecución de los trabajos de rehabilitación para estos depósitos por desconocer el resultado de los estudios geológicos.

CESIGMA SA (2007) realizó el estudio del impacto ambiental para el proyecto polimetálico Castellanos que incluye el yacimiento Santa Lucía. Este estudio contiene la línea base ambiental. En el trabajo se concluye que los valores anormales del pH (ácidos) se encontraron en aquellas corrientes que drenan escombreras, áreas con depósitos de cola y excavaciones o canteras de extracción de mineral. Todas las muestras presentan concentraciones de arsénico, bario, cromo y níquel por debajo de sus respectivos límites de detección. Se manifiestan concentraciones elevadas (respecto a los estándares adoptados para las comparaciones) de metales, especialmente el zinc.

Gamonal (2009) proporcionó la información sobre el funcionamiento de humedales construidos en el tratamiento de drenaje ácido de mina, explicando el mecanismo utilizado en el proceso de remoción e identificando las principales ventajas y limitaciones de esta tecnología. Los humedales construidos se han considerado como una de las posibles soluciones a largo plazo del drenaje ácido de la mina. Varias investigaciones han revelado los resultados positivos con respecto al uso de humedales artificiales para tratar las aguas contaminadas por actividades mineras.

Lizárraga (2008) investigó el grado de afectación que la presa de cola representa para la calidad de los escurrimientos superficiales y a su entorno, teniendo en cuenta que, éstos pueden ser utilizados para consumo humano.

Madrazo (2008) estableció el plan de acción que permita mitigar los impactos generados por las actividades minero - metalúrgicas y su interacción en Santa Lucía. Se propone utilizar el Plan de Acción como base metodológica para aplicar a todos los yacimientos minerales existentes que se encuentran en la etapa de abandono y no cuenten con proyectos de recuperación o nuevos proyectos minero – metalúrgicos.

Sánchez (2009) determinó las fuentes de contaminación y el grado de afectación de los metales pesados en los suelos y aguas de las áreas aledañas al yacimiento Matahambre,

aunque no se realizaron los análisis químicos a las aguas de los pozos criollos para analizar el contenido de EPT en ellos.

Delgado et al. (2010) propusieron soluciones para minimizar el impacto del drenaje ácido con metales disueltos a las aguas y los desechos sólidos (estériles y colas del proceso). No se realizó el estudio conceptual con PROYECT o certificación de los cálculos realizados.

Romero et al. (2010) concluyeron que la oxidación de las menas sulfurosas de la inactiva mina Santa Lucía generó el drenaje ácido de mina (DAM) enriquecido con los elementos disueltos SO_4^{2-} , Fe y Zn. Las partículas de menas transportadas y el DAM contaminan las aguas superficiales y sedimentos hasta la distancia de 2500 m de la mina, sin embargo, las aguas superficiales y efluentes de minas se caracterizan por las concentraciones relativamente bajas de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) de As, Ba y Pb que tienden a la atenuación natural.

Alonso et al. (2011) determinaron asociaciones mineralógicas de elementos potencialmente tóxicos y geodisponibles en menas primarias, residuos sólidos y líquidos en el pasivo ambiental minero (PAM) “Santa Lucía” mediante el empleo de técnicas instrumentales modernas y ensayos analíticos. Los trabajos que abordan la caracterización de las fases sólidas que aportan los elementos potencialmente tóxicos son aún insuficientes, por eso este trabajo posee gran importancia al incluir la mineralogía analítica en los estudios de impacto ambiental.

García (2011) realizó una investigación para definir y caracterizar los principales problemas ambientales que se manifiestan debido a la explotación minera y abandono de este depósito mineral, en especial, lo referido a la incidencia del drenaje ácido de mina y la contaminación por metales pesados en las áreas aledañas al mismo. También se determinó la influencia que juega el relieve en la contaminación ambiental del área. Para darle solución a los impactos ambientales negativos identificados se propuso la implementación de un plan de medidas de mitigación y monitoreo.

Romero (2012) propuso un modelo descriptivo para el yacimiento Santa Lucía que cumpla las exigencias de los formatos internacionalmente conocidos y que ayude en la confección del mapa metalogénico.

Gallardo et al. (2013) establecieron el plan de acción que permita mitigar los impactos generados por las actividades minero - metalúrgicas y su interacción con la localidad de Santa Lucía.

Utilizando una óptica geoquímico-ambiental López et al. (2014) alertaron acerca de las probables implicaciones que sobre el medio ambiente pueden ocasionar el destino inadecuado de los residuos de la minería en etapas como exploración, explotación y procesamiento de minerales auríferos y propusieron realizar los estudios de impacto ambiental en las áreas de influencia de los yacimientos estudiados que indiquen medidas mitigadoras específicas para cada caso.

En resumen, se puede decir que aunque en el depósito Santa Lucía se han llevado a cabo varios trabajos de investigación, dirigidos al estudio de la contaminación ambiental, muchos de los cuales han propuesto medidas para mitigar los daños causados, sin embargo ha faltado el estudio integrador que generalice los resultados de las investigaciones anteriores y caracterice la situación actual de la contaminación ambiental en la cantera Santa Lucía.

I.2. Características físico-geográficas.

El yacimiento Santa Lucía se ubica a 2 km al sur del pueblo Santa Lucía del municipio Minas de Matahambre al NW de la provincia Pinar del Río (Figura I.1.).

El área de estudio está limitada por las coordenadas Lambert (sistema CubaNorte) siguientes:

X mín.= 194 000 X máx. = 199 000 Y min. = 314 000 Y máx.= 319 000

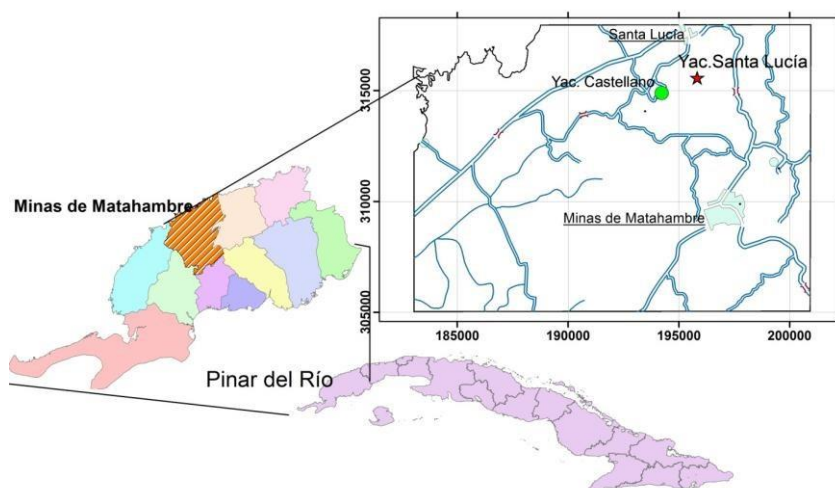


Figura I.1. Mapa de ubicación del área de investigación.

La base económica del municipio Minas de Matahambre se sustenta en sus propias potencialidades naturales, a partir del peso de la rama forestal, del sector agropecuario y

de la minería. El turismo, a pesar de sus favorables condiciones (playas, accesos, valores naturales y paisajísticos) no ha encontrado eco suficiente dentro del espectro económico del municipio, pero bien pudiera convertirse en una línea futura de desarrollo. La actividad portuaria es escasa, muy vinculada a la rama química presente en Santa Lucía. En general, puede plantearse que, la asimilación de los recursos naturales disponibles es aún insuficiente y puede ser potenciada considerablemente.

Cruzan al municipio cuatro vías de interés nacional, a las que se une un entramado de vías de interés específico y municipal, donde subsiste la falta de mantenimiento y el deterioro. El sistema de acueducto no tiene en definitiva potencial para disponer el servicio a toda la población del municipio, mientras que el alcantarillado solo sirve al 18,1% de la misma. Dentro de las organizaciones económicas de mayor relevancia, figuran la Empresa Forestal Integral Minas de Matahambre, la Empresa Geominera de Pinar del Río, las Empresas Pecuaria y de Cultivos Varios de Minas de Matahambre y la de Acopio y Beneficio del Tabaco.

I.3.Geología de la región y del área de investigación.

El territorio de la provincia Pinar del Río se divide en tres diferentes regiones geológicas o zonas tectono-estratigráficas bien reconocidas: Guaniguanico, Bahía Honda (al norte) y San Diego de Los Baños (al sur), las cuales aparecen separadas entre sí por fallas regionales abruptas o subverticales de primer orden. La falla Pinar separa las zonas Guaniguanico y San Diego de Los Baños, mientras que la falla Consolación del Norte separa las zonas Guaniguanico y Bahía Honda. Ambas fallas fueron originadas durante la orogenia vinculada con la colisión entre las placas caribeña y norteamericana, probablemente con la etapa más tardía de la misma durante el Eoceno (GAMMA SA, 2013).

El territorio donde se encuentra enclavado el yacimiento Santa Lucía desde el punto de vista geológico pertenece según Iturralde-Vinent (1998) al terreno Guaniguanico que presenta elementos mezclados de origen continental y oceánico en correspondencia con la formación del substrato plegado de esta parte del territorio nacional. Desde el punto de vista regional está formado por varias secciones litoestratigráficas (Cangre, Los Órganos, Rosario Sur, Rosario Norte y Quiñones-Guajaibón) los cuales afloran en un amplio sector del Norte de Pinar del Río como flujos deformados de rumbo NE-SW. Estas deformaciones tienen vergencia N-NW y son el resultado de las superposición de varias unidades de mantos de sobrecorrimientos, empujadas hacia el N-NW que posteriormente

fueron deformadas como una cúpula periclinal cuyo eje se hunde hacia el este. Los mantos tectónicos en Guaniguanico tienen poca inclinación (Bralower e Iturralde-Vinent, 1997; Protrowska, 1976;) citado por Iturralde-Vinent (1998).

Las zonas de Los Órganos y Cangre ocupan la mayor parte del terreno Guaniguanico, justo al norte de la falla Pinar. Presenta una complicada estructura interna destacándose dos subzonas reconocidas: Los Órganos y Rosario.

Desde el punto de vista litológico (Anexo gráfico 1) en el área de Santa Lucía se presentan cinco unidades geológicas debidamente cartografiadas, las cuales son:

- Depósito de manglar (bmQ₄) formada por arcillas limosas con restos de flora y fauna.
- Depósitos aluviales marinos (amQ₃₋₄): arenas finas, arcillas y arcillas arenosas con gravas de cuarzo y pedernales.
- Formación Santa Teresa (st K_{1n}-K_{2cm}) formada por silicitas con intercalaciones de areniscas y limolitas verdes.
- Formación Esperanza (ezJ_{3ox}-P₂) está formada por areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas calcáreas y calizas subordinadas.
- Formación San Cayetano (scJ₁-J_{3ox}) formada por areniscas cuarzosas, limolitas, lutitas, conglomerados y calizas en la parte alta.

El campo mineral Santa Lucía–Castellano, constituye la mayor reserva de minerales sulfurosos de plomo y zinc del país.

La litología pertenece al Miembro Castellano (J₃^{ox}) de la Formación San Cayetano (J₁ – J₃) y está representada en el área del yacimiento fundamentalmente por:

Areniscas: Ubicadas en el lado yacente y pendiente del cuerpo mineral, consisten en una serie de areniscas silicificadas con intercalaciones de limolita y pizarras. Las areniscas forman cerca del 70 % del macizo rocoso y están alteradas por procesos secundarios de silicificación, piritización, cloritización y sericitización. Son características la pirita y calcopirita relacionadas con la zona de stockwork ubicada en el yacente de la mineralización polimetálica.

Pizarras (esquistos grafiticos, sericiticos): Su distribución espacial las ubica tanto al lado yacente como en el pendiente del cuerpo mineral. Presentan interestratificaciones muy finas de pirita bien cristalizada. Son comunes las intercalaciones de limolita, dolomitas y calizas. Las pizarras forman alrededor del 80 al 90 % de este grupo litológico. El contacto entre las rocas de caja y la mineralización es concordante. Están muy plegadas y se alteran mostrando hinchamientos provocados por los minerales arcillosos.

La fracturación superficial que se presenta es muy intensa en las rocas descritas para la zona, también se refleja en el drenaje de las aguas subterráneas, en la zona de estudio predomina el escurrimiento superficial.

En el yacimiento se pueden separar dos tipos tecnológicos de menas: □ Menas oxidadas.

□ Menas sulfurosas primarias.

Los estudios realizados, demostraron la factibilidad económica de la extracción de las menas polimetálicas por el método a cielo abierto, al resultar superior económicamente comparado con el método subterráneo; no obstante tener este último mejor selectividad y menor impacto ambiental (GAMMA SA, 2013).

I.4. Fenómenos físico-geológicos.

Existen un grupo de fenómenos físico-geológicos, que ocurren como el resultado de la combinación de los factores naturales del relieve con los inducidos por la actividad del hombre. Estos fenómenos por sus características propias, van a establecer el índice de vulnerabilidad de un punto o de un área que se somete a la acción de procesos externos, y que pueden alcanzar su estado crítico de inestabilidad o deformación ante una situación de factores detonadores.

En áreas mineras abiertas y descubiertas de vegetación y suelos como lo es la cantera de Santa Lucía, donde los procesos erosivos son más intensos, se genera un volumen considerable de sedimentos que al ser arrastrados por el escurrimiento superficial, llegan a acumularse y colmatar temporalmente las vías de drenaje (Foto I.1.). Estas acumulaciones a su vez, constituyen el cuerpo de moderadas avalanchas en épocas de lluvias intensas. El proceso descrito, tiene una tendencia resultante a la colmatación posterior y progresiva de los valles fluviales, que se observa en los cambios de pendiente, y que favorece el empantanamiento local y la acumulación de suelos muy blandos, con propiedades físico-mecánicas muy desfavorables, que pueden migrar fácilmente y afectar a obras hidrotécnicas en explotación.



Figura I.1. Vías de drenaje colmatadas por la acumulación de sedimentos aluviales.

Es importante destacar que todos los fenómenos físico-geológicos descritos, se consideran los principales elementos de riesgos del terreno, donde se evidencia su relación con las zonas desprovistas de capa vegetal. En la actualidad estas zonas están asociadas a los trabajos anteriores en la fase de explotación de la cantera Santa Lucía o a los caminos de acceso a la zona.

I.5. Relieve.

El área de estudio se encuentra ubicada en dos regiones geomorfológicas: Arroyos-La Esperanza y Alturas de Pizarras del Norte dentro del Grupo de regiones Llanuras del Norte de Pinar del Río y Cordillera de los Órganos, respectivamente.

En general, el relieve lo forma una zona elevada que alcanza alturas máximas de 176 m, con llanuras y colinas que descienden suavemente hacia el mar. En base a esta característica y a la diferencia de cotas absolutas, se pueden dividir 3 zonas, con diferentes características que se extienden (GAMMA SA, 2013).

1.- Zona más elevada y desmembrada, con fuertes variaciones del relieve de 50 metros.

En esta zona se ubica el campo mineral Santa Lucía - Castellanos, con cotas máximas de 135 metros. La zona de oxidación de las menas polimetálicas sulfurosas y las rocas silicificadas por los procesos hidrotermales posteriores han servido de casco de protección contra la erosión.

2.- Zona media, ubicada entre la carretera de Santa Lucía a Dimas, hasta una posible zona de fracturas regionales caracterizada por una hilera de colinas con cotas absolutas de 2 a

5 m hasta 17 m. Se caracteriza por un relieve poco desmembrado. Las cotas bajas coinciden con el valle del río La Palma y sus arroyos, hasta la primera terraza de abrasión.

3.- Zona ubicada más al norte de la anterior limitada por el mar. Se caracteriza por un relieve bajo y plano. Las cotas absolutas oscilan entre 0.5 y 5 m. La superficie es suavemente ondulada. El desagüe superficial es libre, siendo en las zonas bajas prácticamente ausente. La presencia de pantanos e inundaciones indican que el drenaje superficial está dificultado y pasa a los manglares.

El campo mineral Santa Lucía-Castellanos se ubica en alturas tectónico-erosivas, de bloque, aplanadas y altitud de hasta 176 metros.

Desde el punto de vista morfoestructural las llanuras son de zócalo plegado, en bloques y las alturas son sistemas de bloques en manto de sobrecorrimento. Los procesos exógenos predominantes son los erosivos y denudativos. Un factor importante para el desarrollo de tales procesos es la intensa intemperización que ocurre en los esquistos de la Formación San Cayetano.

I.6. Hidrogeología.

El análisis hidrogeológico detallado de la región permite diferenciar 3 estructuras hidrogeológicas de mayor importancia:

- 1.- Horizonte acuífero dentro de los depósitos Cuaternarios (Q).
- 2.-Complejo acuífero en los sedimentos carbonatados de la Fm. Esperanza (J₃-K₁).
- 3.-Complejo relativamente impermeable dentro de la Fm. San Cayetano del Jurásico (Jsc).

Horizonte acuífero del cuaternario (Q) está ampliamente desarrollado sobre los depósitos carbonatados de la Formación Esperanza al norte del yacimiento Castellanos. Está representado por los depósitos de cobertura, arcillas con fragmentos de calizas y cascajos, arcillas arenosas y arenas gruesas de espesor que varía desde los primeros metros hasta 20-30 m. La profundidad de yacencia de los niveles estáticos del agua es de 0.30 a 8.56 m, a medida que se avanza del piedemonte hasta la costa. La amplitud de las oscilaciones de los niveles de agua del acuífero freático es de 1.3-2.8 m y en algunos casos pueden llegar a 4.82-5.49 m (según los datos de los piezómetros). Las conductividades hidráulicas de estos sedimentos están entre 0.02 y 0.68 m/día. La composición química del agua varía desde bicarbonatado-cálcicas hasta cloruradosódicas con una mineralización desde 0.14 hasta 22 g/l.

Complejo acuífero Esperanza (J₃-K₁) se extiende desde la falla regional paralela a la carretera hacia Río del Medio hasta la costa, avanza paralelo a la misma en dirección este-oeste. Según Vologdin (1963), la litología está representada por depósitos carbonatados con intercalaciones de esquistos carbonosos y diques de diabasas, gabros y basaltos. Desde este acuífero, mediante pozos, se abastece el poblado de Santa Lucía con una población aproximada de 12 000 habitantes y la Planta de Sulfometales.

Las aguas subterráneas son del tipo fisuradas cársicas, con una amplia red de grietas y cavernas hasta unos 70 m de profundidad, en algunos lugares puede ser superior. Las profundidades de los niveles estáticos varían de 4.93 a 9.02 m, en la cercanía del litoral son inferiores a 1 m. Las calizas de acuerdo con el grado de agrietamiento y carsificación tienen conductividades hidráulicas entre 0.5 y 22 m/día (Peláez, 1982).

La composición química del agua es clorurada cálcica con una mineralización desde 0.14 hasta clorurado sódicas con 22 g/l.

Complejo relativamente impermeable San Cayetano (Jsc) ocupa todo el relieve alto hasta el piedemonte y en este macizo rocoso es que están situados los cuerpos minerales (Díaz y otros, 1993). Está representado por una interestratificación de areniscas, pizarras, esquistos carbonosos y calizas con ángulos de buzamiento de 60-80° en dirección Norte. Se caracteriza por una baja acuosidad relacionada con las areniscas agrietadas, mientras en las dislocaciones tectónicas esta aumenta considerablemente. La profundidad de los niveles estáticos en la parte baja del relieve es de 2.2 a 3.2 m (pozos de monitoreo 1 y 5). En general, esta capa está considerada como un impermeable regional desde donde no se pueden esperar grandes caudales de afluencia de agua.

El área estudiada se ubica en la vertiente norte de las Alturas de Pizarras del Norte. El drenaje superficial condicionado por las tipicidades del relieve orográfico local, dominado por bajas elevaciones y una llanura costera terminal, está determinado por el régimen de alimentación pluvial predominante. En consecuencia, también cabe distinguir dos temporadas, claramente diferenciadas entre sí, por sus respectivas acuosidades y la magnitud relativa y origen predominante de los eventos extremos, que en cada una de ellas se presentan. Así se tiene que, durante la temporada de mayor acuosidad, las avenidas son más frecuentes y son provocadas por tormentas convectivas o las asociadas a huracanes o a tormentas tropicales, mientras que durante la temporada menos acuosa o estiaje, predominan los caudales y niveles mínimos y las avenidas, si ocurren, son originadas por la penetración de frentes y sus turbonadas prefrontales acompañantes.

I.7. Suelos

En el área de investigación se desarrollan los suelos Ferralítico Rojo Lixiviado-III, Alítico Rojo Amarillento (BAA)-VI y Lithosol-XXVIII de acuerdo con la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Instituto de Suelos, 1999). □ Suelo Ferralítico Rojo Lixiviado-III

Se trata de suelos de variedad arcillosa, con horizonte B árgico por lixiviación intensa del perfil medianamente productivos (en los casos de buena profundidad del solum) debido a que poseen pH ácido y muy baja saturación por bases cambiables, así como que son suelos medianamente a poco humificados (en ocasiones menos de 2 % de materia orgánica en la capa arable).

□ Suelo Alítico Rojo Amarillento (BAA)-VI

Este tipo de suelo en el área, es predominantemente del subtipo típico, aunque ocasionalmente puede encontrarse el subtipo laterizado. Siempre se desarrollan sobre materiales transportados y corteza de intemperismo ferralitizados o caolinitas. Por su saturación son suelos que oscilan desde medianamente desaturados (40-75 %) hasta fuertemente desaturados (<40 %), presentando una profundidad de 20 a 50 cm, por lo que se clasifican como medianamente profundos. La humificación de la capa arable es generalmente <2.0 % por lo que se puede evaluar como poco humificado. Este tipo de suelo presenta poca erosión, con una pérdida del horizonte A <25 %. En todos los casos tienen textura loam arenosa y presentan un contenido de grava variable, que oscila desde mediana graviliosidad (16-50 %) hasta muy poca graviliosidad (<2.0 %). Por el tipo de pendiente fluctúan entre pendientes casi llanas (1.1-2.0 %) hasta pendientes alomadas, con un valor de hasta 16.1 hasta 30.0 %. □ Suelo Lithosol-XXVIII

Comprenden aquellos suelos que presentan una alteración químico-mineralógica y biológica poco desarrollada. La limitada alteración de los materiales se debe a la eliminación de la parte fina por erosión o de aportes eventuales de material arenoso, o a una roca muy dura, de relativa juventud; resultan de poca evolución.

Son suelos con perfil ACD o AD, poco profundos (menos de 20 cm de solum) con alto contenido de grava y fragmentos de piedra de la roca madre en superficies, ya que son extremadamente rocosos. En ellos ocurre muy poca alteración de los minerales primarios. Ocupan relieves ondulados a fuertemente inclinados.

Siempre se acompañan del subtipo antrópico y por su género se desarrollan en todos los casos sobre esquistos o pizarras cuarcítico micáceas. Son fuertemente desaturados, poco profundos (<20 cm) y poco humificados (<2.0 %).

La erosión es completamente variable pasando desde muy fuerte hasta poca erosión, la textura es fundamentalmente loam arenoso. Por su contenido de gravas este tipo de suelo es más uniforme y el mismo varía desde fuerte gravillosidad (51-90 %) hasta mediana gravillosidad, con valores de 16 hasta 50 %. Aquí se lograron obtener datos sobre el contenido de piedras, que lo nominalizan como pedregoso (0.2-3.0 %) y moderadamente pedregoso (0.01-0.1 %).

La pendiente es también bastante uniforme, variando desde fuertemente ondulado con valores de 8.1-16.0 % y alomado, con valores de 16.1-30.0 %.

I.8. Características de la flora y fauna de la zona de Santa Lucía.

Vegetación. Desde el punto de vista fitogeográfico, el área que comprende el yacimiento Santa Lucía, pertenece al distrito Alturas de Pizarras (Urquiola, A.J., Novo 1993 en: Madrazo, 2009) o distrito Pinarense (Borhidi, 1996 en: Madrazo, 2009). Este distrito es considerado pobre en endémicos propios, por constituir un corredor de especies endémicas compartidas con distritos vecinos como el Sabaloense al sur, suroccidente y noroccidente y Cajalbanense al nordeste de la provincia. La formación vegetal agrupa diferentes comunidades vegetales que se presentan, como, pinares, bosques de galería y sabanas antrópicas; en este caso además en el área se presentan los bosques de mangles, el complejo de vegetación de costa arenosa y vegetación segetal y ruderal.

La línea base del área (Urquiola et al. 1983 en: Madrazo, 2009), arroja la existencia de siete comunidades vegetales, cuatro naturales: bosque de mangles, siempreverde micrófilo, latifolios en galería y de pinos; además de tres antrópicas: plantaciones de pinos, sabanas y cultivos activos o en barbecho.

La flora de las comunidades vegetales naturales, estaba compuesta por: 227 especies, pertenecientes a 66 familias, existiendo 42 endemismos (18,5 %), ninguno local.

La mayor parte del área se encuentra antropizada, debido a la urbanización, cultivos, explotación forestal y minería.

Los cultivos ocupan pequeñas áreas y consisten en *yuca*, *boniato*, *malanga* y *legumbres*, asociados a actividades productivas locales a pequeña escala. Se dan como importantes desde el punto de vista científico-conservacionista, seis especies: *Befaria cubensis*, *Roigella correifolia*, *Lyonia myrtilloides*, *Vaccinium ramonii*, *Quercus oleoides* ssp.

sagraeana y *Pachyanthus poiretii*, aunque se reportan como endémicas amenazadas de extinción solo dos *Aster grisebachii* y *Xiphidium xanthorhizon*.

Las plantaciones de *Pinos* ocupan áreas de llanuras y alturas, bordeando el yacimiento minero por el N y NW, las que muestran un estado satisfactorio.

Fauna. La fauna contaba al igual que la vegetación con 60 especies de ellas 27 endemismos (45 %) 18 específicas y nueve intraespecíficas y da como importantes desde el punto de vista científico-conservacionista, dos endemismos del distrito: *Peltaphryne gundlachii* (*sapito matraca*) y *P. longinasa* (*sapito pinalero o yoyito*), además de la existencia de tres joyas de la ornitofauna cubana: *Mellisugahelenae* (*pájaro mosca*), *Todus multicolor* (*cartacuba*) y *Priotelus temnurus* (*tocororo*), esta última nuestra ave nacional.

Las aves se consideran el mejor bioindicador de los *vertebrados*, por su estrecha relación con la estructura de la vegetación, son fácilmente medibles, particularmente por sus cantos (Camprodon, 2001 en: Madrazo, 2009).

Fue notable como en las áreas más alteradas se carecía de la mayoría de las especies endémicas que se sostienen sobre ecosistemas de pinares, como por ejemplo: Tocororo, Chillina, Carpintero verde, Sijú platanero, entre otros.

I.9. Clima

El área estudiada presenta un régimen pluviométrico caracterizado por una media anual de precipitaciones de 1400 mm, bien diferenciados estacionalmente en dos temporadas, una “húmeda”, con un 70 a 75% de las precipitaciones anuales, comprendida entre los meses de mayo y octubre, y otra menos lluviosa o “seca” que abarca los restantes meses del año hidrológico de noviembre a abril (Tabla I.1.).

Las características climáticas del territorio están condicionadas fundamentalmente por los efectos combinados de la asimilación de la energía solar, la circulación general de la atmósfera, la posición geográfica y las particularidades del relieve. Esta interacción conlleva a la formación de un tipo climático con humedecimiento alto y estable, baja evaporación y temperaturas frescas (Díaz, 1989 en: GAMMA SA, 2013).

La componente principal del viento es del este con velocidades entre 3 y 5 m/s (Tabla I.1.). El flujo del III y IV cuadrante prácticamente tienen muy poca representación durante el año (Atlas Climático de Cuba, 1987)

Tabla I.1. Dirección y velocidad del viento predominante mensual.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dirección	E	E	E	SE	E	E	E	E	E	E	E	E
Velocidad (m/s)	4.0	4.1	4.1	4.4	3.6	3.4	3.6	3.9	3.4	4.1	4.6	5.0

Velocidad máxima anual del viento.

Probabilidad (%)	1	2	4	5	10
Velocidad (m/s)	64.7	55.8	48.0	45.3	39.3

Las máximas velocidades anuales de los vientos se asocian al paso de sistemas frontales, centros de bajas presiones extratropicales, tormentas locales y disturbios de carácter tropical como las tormentas y huracanes. Estos últimos, aunque menos frecuentes, son los responsables de las velocidades máximas del viento (ONE, 2012)

La posición geográfica del territorio, hace que esté bajo los efectos del paso de tormentas tropicales y huracanes procedentes principalmente del mar Caribe. Son sistemas, que en un corto período de tiempo producen significativas variaciones al comportamiento normal de los principales elementos hidrometeorológicos (Tabla I.2.). Se caracterizan por lluvias intensas y fuertes vientos, aunque la estadística climatológica reporta variaciones en este sentido, así no siempre los huracanes más intensos son los que más precipitación aportan. La probabilidad de ser afectado el territorio por un huracán es muy alta en comparación con otras áreas del país (1 cada 3 años como promedio). De acuerdo con el mapa publicado en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba (Vega, 1989 en: GAMMA SA, 2013) la probabilidad de que no ocurra un huracán en un año es del 64.1 %. El período de mayor peligrosidad corresponde a los meses de septiembre y octubre con un 75 % de frecuencia con relación a la temporada.

Tabla I.2. Principales indicadores climáticos.

Elemento climático	Rango medio
Precipitación anual (mm)	1 600-1 800
Coeficiente de variación anual de la precipitación (%)	0.22-0.25
Días con lluvia > 1.0 mm	90-120
Evaporación media anual (mm)	1 400-1 800
Temperatura del aire media anual (° C)	20-24
Temperatura media del aire de Enero (° C)	18-22
Temperatura media del aire de Julio (° C)	25-27
Velocidad del viento (m/s)	3.3-3.9

1.10. Descripción de la línea base ambiental del territorio y principales fuentes contaminantes.

El estudio del medio ambiente siempre se relaciona con la expresión espacial de los fenómenos, la cual se manifiesta en la integración de los subsistemas Naturaleza, Población y Economía. Como resultado de esta integración, se definen en el espacio geográfico, distintas unidades ambientales que sirven como base para su evaluación espacial, a partir de la síntesis natural y socioeconómica (CESIGMA SA, 2007). Las unidades funcionales ambientales se agrupan en marinas (fondos marinos, arenosos, sustrato artificial y arrecife) y terrestres (manglar, complejo de costa arenosa, bosque de pinos, restos de bosque latifolio semideciduo y encinos, plantaciones de pinos y eucaliptos, vegetación secundaria herbácea, palmas, árboles aislados y cultivos, ríos y arroyos, lagunas, estanques y embalses, urbana, minera y viales.

Entre los impactos se destacan:

□ Contaminación por aguas ácidas, debido a la composición química y mineralógica de las menas que se encuentran aflorando actualmente (menas sulfurosas) se generan aguas ácidas en mayor medida a partir de las escombreras producto de exposición y aumento de las superficies de contactos. El drenaje ácido proveniente de la cantera tiene un efluente líquido con pH inferior a 3.0 unidades, altamente agresivo (ácido). El drenaje ácido proveniente de las escombreras, fluye desde todos los depósitos de escombros (escombreras) hacia las cabezadas de los sistemas fluviales que corren hacia el noreste (Río Santa Lucía y Río Las Coloradas). El pH es inferior a 3-4 unidades.

□ Aumento del escurrimiento sólido por aumento de la carga de sedimentos en las corrientes fluviales, ya que se incorporan sedimentos a las corrientes fluviales desde todas las escombreras y presas de cola por no existir obras encaminadas a controlar estos aportes.

□ El drenaje ácido emanado desde el socavón de Santa Lucía por la explotación de la pirita. En la actualidad sufre los drenajes ácidos del lavado de los cuerpos minerales del yacimiento Santa Lucía, a través de las corrientes fluviales del río Santa Lucía.

□ Muerte y migración de la fauna por destape y desbroce, construcción de viales, depósito de escombreras y colas y extracción minera. Aunque se ha visto fauna doméstica que se ha adaptado a las condiciones actuales.

□ Alteraciones estéticas del paisaje, en visuales alejadas y desde puntos altos se observan las superficies de las explotaciones.

□ Afectación a los pobladores de Santa Lucía y La Sabana, los cuales sufren de forma directa las emisiones de polvo, ruido (explosiones y transporte) y posiblemente gases de las emanaciones del destape de los cuerpos minerales, su oxidación o su lavado. En el municipio Minas de Matahambre se reportan 6 fuentes principales de contaminación registradas por la comisión municipal del Medio Ambiente y el CITMA (Hernández, 2010):

1. Fábrica Patricio Lumumba (Sulfometales)
2. Planta de Oro Castellano
3. Cantera Santa Lucía
4. Núcleo urbano del poblado de Santa Lucía
5. Núcleo urbano del poblado de Minas de Matahambre
6. Aserrío de Pons

Otras fuentes que se deben añadir son:

- Laboreos antiguos (socavones) que drenan aguas ácidas al arroyo Manacas.
- Aserradero de Minas de Matahambre □ Cantera Castellano

I.11. Impacto sobre el medio ambiente del territorio por la actividad minera.

La rama minera de Minas de Matahambre posee diferentes yacimientos metálicos (oro, plata, plomo, zinc) y no metálicos (fosforita, piedra y barita) que abundan en diferentes localidades como Pons, Isabel María, Minas y la propia Santa Lucía. Las principales acciones que han provocado los impactos existentes actualmente en el territorio son:

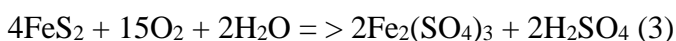
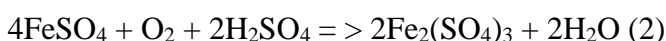
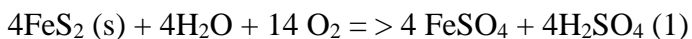
- Tala del bosque de pinos y encinar para desarrollar asentamientos, cultivos, actividad ganadera y minera.
- Desbroce, descortezado y minado del suelo para la extracción del mineral.
- Construcción de viales y terraplenes.
- Construcción de viviendas y edificaciones.
- Actividad minera (extracción de material, transportación y procesamiento del material, presas de colas).
- Operación de la Planta de Sulfometales (producción de plomo).

La cantera Santa Lucía se destaca dentro de los principales generadores del drenaje ácido de mina en el territorio.

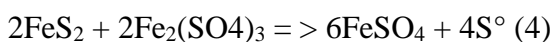
El drenaje ácido de mina es el agua contaminada originada de la explotación minera, ya sea superficial o profunda, típicamente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados y ocurre cuando los minerales de sulfuro se ponen en contacto con el oxígeno y el agua, condiciones favorables para su oxidación química o a la oxidación rápida por bacterias tales como *Thiobacillus ferrooxidans* (Martínez, 2005).

La pirita, el mineral más común de sulfuro, se puede oxidar por mecanismos directos.

Estos mecanismos son ilustrados por la serie siguiente de ecuaciones:



La ecuación (1) muestra la oxidación directa de la pirita con formación de sulfato ferroso, que es entonces oxidado a sulfato férrico, en la ecuación (2) los "microorganismos pueden catalizar significativamente el índice de oxidación de la pirita especialmente cuando median la oxidación de Fe (II) a Fe (III)" (Wildeman y Laudon, 1989 en: Gamonal, 2009). El ion férrico formado puede entonces oxidar rápidamente el mineral según la ecuación (4):



o puede ser hidrolizado produciendo el hidróxido férrico como precipitado: $\text{Fe}^{+3} + 3\text{H}_2\text{O} = > \text{Fe}(\text{OH})_3 (\text{s}) + \text{ion ferroso de } 3\text{H}^+ \quad (5)$

El ión ferroso (ecuación 4) puede entonces ser oxidado biológicamente al ion férrico, y del sulfuro elemental al ácido sulfúrico.

En el área de investigación, el drenaje que lava el destape de los cuerpos minerales, que llega a las partes más bajas a través de las líneas de drenaje, debido a la escasa disección

y el mal drenaje, penetra lateralmente en áreas de cultivos, provocando afectaciones, no cuantiosas pero que disminuyen aún más la baja fertilidad natural de los suelos y daño a los animales domésticos, lo que unido a la intensidad de la explotación agrícola hacen mermar la producción de alimentos.

Los hábitats en el noreste de este paisaje se encuentran afectados desde el pasado, por la explotación de la pirita para la fabricación de ácido sulfúrico en la Planta de Sulfometales en el socavón Santa Lucía, más tarde por las prospecciones geológicas y las pruebas de explotación de las menas oxidadas del yacimiento.

La principal afectación se produce hacia el noreste, donde las cañadas que alimentan dos de las principales corrientes lineales, del principal afluente noroccidental del arroyo Santa Lucía, exhiben afectaciones en su cauce, siendo la más visible la que ocurre en la llamada laguna de La Sabana (Foto I.2.), donde toda la flora cercana al perímetro mojado de estas corrientes ha desaparecido debido a la agresividad del agua con su carga ácida.



Figura I.2. Afectación en el cauce del arroyo Santa Lucía en la laguna La Sabana.

La lluvia ácida producida en estas zonas, es consecuencia de la reacción entre este tipo de contaminante y el agua de lluvia. Al mismo tiempo, este factor al combinarse con el incremento de la temperatura, asociado al cambio climático, provoca una intensificación y expansión de los procesos de aridez y sequía, como consecuencia de los procesos de evaporación. Se aprecia que producto a los intensos procesos de evaporación, se produce la precipitación espontánea de sales de los metales disueltos (CuSO_4 , PbSO_4 , FeSO_4 , y

otras) de las acumulaciones acuosas generadas de los propios acuíferos subterráneos (GAMMA SA, 2013).

La salud humana también está expuesta directamente debido al efecto nocivo que tienen estos gases sobre las vías respiratorias. En tal sentido, el impacto negativo generado, califica como severo y de intensidad muy alta.

Los mayores depósitos de As de la corteza terrestre se encuentran en forma de pirita, galena, calcopirita, y esfalerita (Moreno, 2010).

Las concentraciones elevadas de los EPT como Pb, Ba y As puede provocar daño a la salud del ser humano. En el caso del Pb, es un contaminante tóxico para los humanos, su difícil remoción del cuerpo hace que se acumule en varios órganos y puede dañar el sistema nervioso central. La intoxicación aguda produce síntomas como diarrea, vómito, cólico, convulsiones y dolor de cabeza. El Ba presenta la peligrosidad y riesgo cuando es óxido de Ba, es irritante para la piel y los ojos y cuando es ingerido, produce náuseas, diarreas, parálisis musculares y arritmias cardíacas. El As es extremadamente tóxico, la ingestión de pequeñas cantidades de As puede causar efectos crónicos por su acumulación en el organismo. Envenenamientos graves pueden ocurrir cuando la cantidad tomada es de 100 mg. Se ha atribuido al As propiedades cancerígenas (Wikipedia).

I.12. Impactos que pueden surgir con la futura explotación del yacimiento Santa Lucía.

El depósito Santa Lucía tiene concluida la prospección y sólo una parte de él está explorada, quedando reservas en la profundidad y los flancos por cuantificar. Los recursos calculados (en categorías de indicados + inferidos) ascienden a 27.09 MM t con 6.11 % de Zn y 1.94 de Pb. La tecnología que se propone para el beneficio de las menas es el método de beneficio hidrometalúrgico convencional con la variante de la automatización de los sistemas de la planta de beneficios.

La futura explotación de las menas del yacimiento polimetálico Santa Lucía incluirá el procesamiento de sus menas en la planta de molienda y de beneficio y la transportación de los concentrados para su exportación. Este proyecto representará una obra de gran magnitud para la región (que ya ha sido impactada por explotaciones anteriores) y producirá nuevos impactos, tanto positivos como negativos que son analizados a partir de sus acciones impactantes.

El área de impacto del proyecto tiene dos alcances: el área de influencia directa que coincide con el territorio donde se desarrollan las diferentes actividades de la explotación

(extracción, procesamiento y transporte) y el área de influencia indirecta que está definida por el alcance de los impactos que se desarrollan a partir de estas actividades en los diferentes componentes del medio ambiente, o sea, hasta donde llegan la contaminación provocada por los contaminantes del proceso de producción por agua (drenajes ácidos que desembocan en arroyos o ríos), aire (dispersión de partículas y gases por el viento) y suelo (cadena alimentaria), llegando a afectar a animales y personas en el caso de influencia negativa. A otro nivel están los impactos socioeconómicos positivos que pueden ser locales, regionales y nacionales producto del beneficio económico que reporta la actividad minera (GAMMA SA, 2013).

Las acciones del proyecto que pudieran ejercer influencia en el territorio desde el punto vista ambiental son los que modifican el uso del suelo, implican la emisión de contaminantes (sólidos, líquidos y gases), aumentan los niveles sonoros (maquinarias, transporte, molienda, otros), implican sobreexplotación de recursos (agua) y modificación del paisaje, repercuten en las infraestructuras y modifican el entorno social, económico y cultural (impacto socioeconómico) (Jaula, 2011).

Capítulo II. Materiales y métodos utilizados.

En este capítulo se describen los pasos principales que se desarrollaron de forma secuencial y que condujeron al cumplimiento de los objetivos propuestos y a la consecución de los resultados. Teniendo en cuenta el problema planteado, la información existente y las herramientas disponibles para la solución de las tareas que se pretendieron resolver, la metodología propuesta se divide en 5 etapas fundamentales: revisión bibliográfica, trabajos de campo, trabajos de laboratorio, determinación de los elementos contaminantes según las normas y trabajos de gabinete. En la Figura II.1. se resumen los pasos que se realizaron para llegar a los resultados obtenidos.

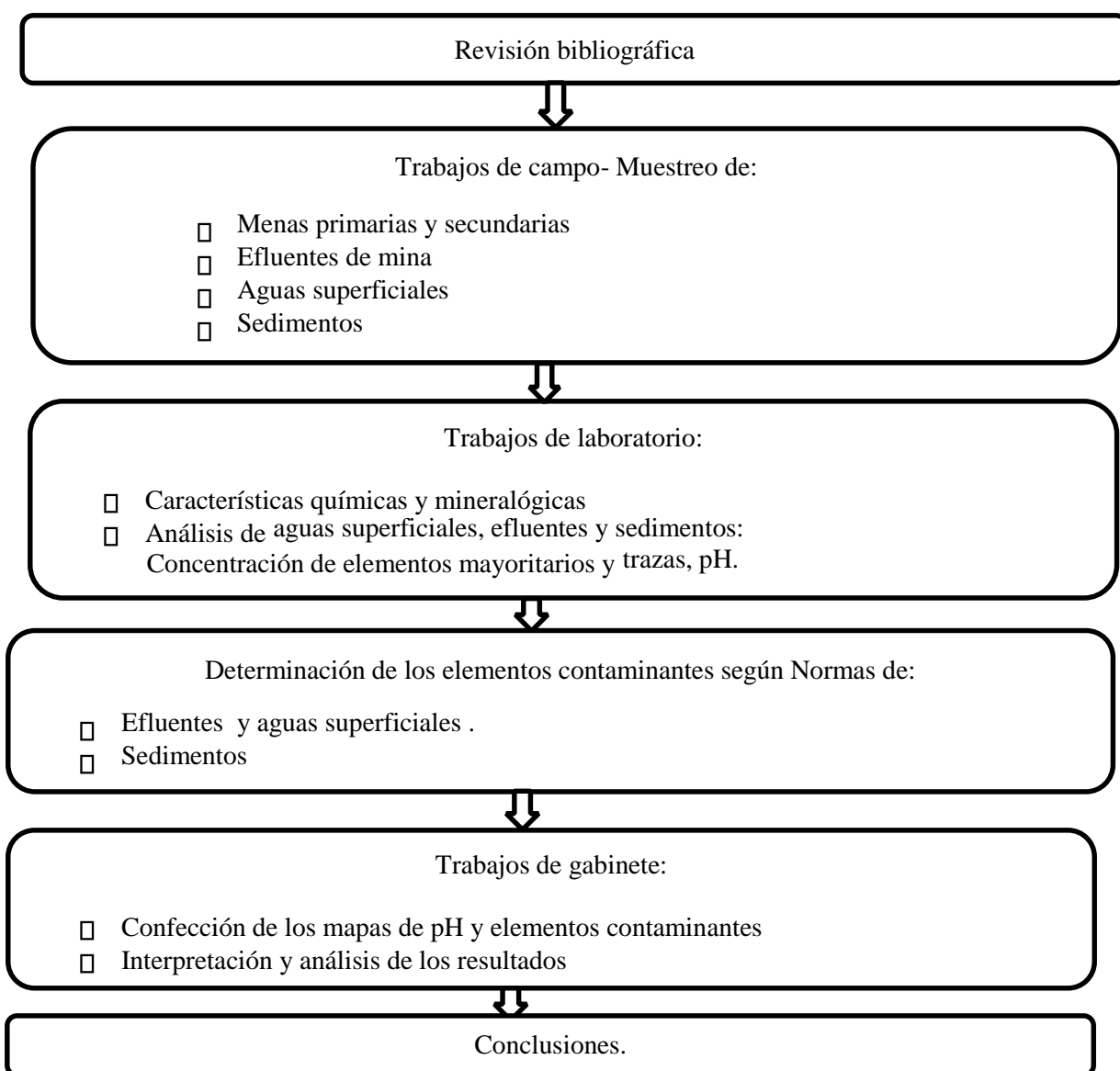


Figura II.1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

II.1. Revisión bibliográfica.

Inicialmente los trabajos estuvieron encaminados a la recopilación de información metodológica y sobre la temática de la investigación; se consultaron un grupo de informes, artículos, tesis de doctorados y maestrías relacionadas con la minería y la contaminación del medioambiente, tanto en el ámbito nacional como internacional para de alguna manera lograr una mejor comprensión de los objetivos trazados y de esta forma dar solución al problema planteado de acorde a las necesidades más apremiantes. En esta etapa se analizaron conceptos básicos de la temática como:

Contaminación: Es la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente. De otra manera, es la aparición de una cualidad ambiental ante la cual la comunidad expuesta presenta una respuesta inadecuada (Sánchez, 2009).

Drenaje Ácido de Mina: consistente en la emisión o formación de aguas de gran acidez, por lo general ricas en sulfatos, y con contenidos variables en metales pesados, a partir de minas de sulfuros metálicos (Hinojosas, 2002).

II.2. Trabajos de campo.

Los trabajos de campo consistieron en la toma de muestras de menas, efluentes de mina dentro de la cantera y aguas superficiales, sedimentos en ríos y arroyos. En la última campaña se tomaron 3 muestras de menas, 1 de efluente de mina, 2 muestras de aguas superficiales y 6 de los sedimentos. Al mismo tiempo se utilizaron los datos de los mismos componentes de las campañas de los años anteriores del 1997-98, 2009, 2010 y 2011 (13 de menas, 77 de efluentes de mina, 44 de aguas superficiales y 13 de sedimentos).

II.2.1. Muestreo de las menas.

Para caracterizar los tres tipos de menas presentes en el yacimiento Santa Lucía se tomaron 3 muestras, una por cada tipo (M #1, M #1A, M #2). La ubicación de ellas conjuntamente con 13 muestras de menas de las campañas de los años 2010 y 2009 se muestra en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Ubicación de las muestras de menas de las campañas de los años 2012, 2010 y 2009.

No	Año	Punto	Coordenadas	
			x	y
1	2012	M#1	196335	315765
2	2012	M#1A	196375	315800
3	2012	M#2	196235	315750
4	2010	M-1	195945	316110
5	2009	y1	196175	315525
6	2009	y2	196250	315575
7	2009	y3	196125	315625
8	2009	y4	196175	315750
9	2009	y5	196150	315800
10	2009	t1	196175	315875
11	2009	t2	196250	315975
12	2009	t3	196300	315875
13	2009	t4	196125	316020
14	2009	t5	196175	316000
15	2009	t6	196100	316130
16	2009	t7	196000	316175

A las muestras de la última campaña de los tres tipos identificados de menas: barítica de plomo y zinc de grano grueso (SLSMBRE-1); sulfurosa de plomo y zinc, bandeada, de grano fino (SLSMBAN-1) y sulfurosa de plomo y zinc, masiva, de grano fino (SLSMPIR-1) (Figura II.2.) se realizaron los ensayos metalúrgicos a escala de laboratorio utilizando sus resultados para caracterizar la composición química, mineralógica y determinar la fuente de los EPT.



Figura II.2. Tipos de menas.

II.2.2. Muestreo de los efluentes de mina.

Las filtraciones derivadas de las escombreras, depósitos de baja ley y las excavaciones mineras abandonadas, tanto subterráneas como a cielo abierto, fueron muestreadas con vistas a evaluar la acidez y las concentraciones de los elementos disueltos potencialmente tóxicos que pueden ser transportados desde la cantera hasta las áreas circundantes. El muestreo de los efluentes de mina en todas las campañas se realizó generalmente en 4 puntos o localizaciones: socavón, depósito de barita, canal de drenaje y alcantarilla. En la última campaña se tomó una muestra del efluente de mina y se utilizaron los resultados de análisis de 77 muestras de las campañas de años anteriores, incluyendo 7 muestras del monitoreo de los años 2013-2014, los cuales fueron comparados con la NC 27:2012 Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado-Especificaciones.

La descripción y ubicación de las muestras de efluentes de mina aparecen en el Anexo textual 2 y las muestras de monitoreo en la Tabla II.2.

Tabla II.2. Ubicación y descripción de los puntos de monitoreo de efluentes de mina en los años 2013-14.

No	Punto	Época	Descripción	Coordenadas	
				X	Y
1	7-A	Seca	Alcantarilla(2014)	196100	315900
2	7-D	Seca	Escombrera de barita(2014)	196320	315940
3	5-C	Seca	Canal de drenaje (2013)	196385	315850
4	5-D	Seca	Escombrera de barita(2013)	196320	315940
5	6-D	Lluvia	Escombrera de barita(2013)	196320	315940
6	5-A	Seca	Alcantarilla(2013)	196100	315900
7	6-A	Lluvia	Alcantarilla(2013)	196100	315900

En la Figura II.3. se representan los 4 puntos de muestreo de los efluentes de mina: socavón, depósito de barita, canal de drenaje y alcantarilla.

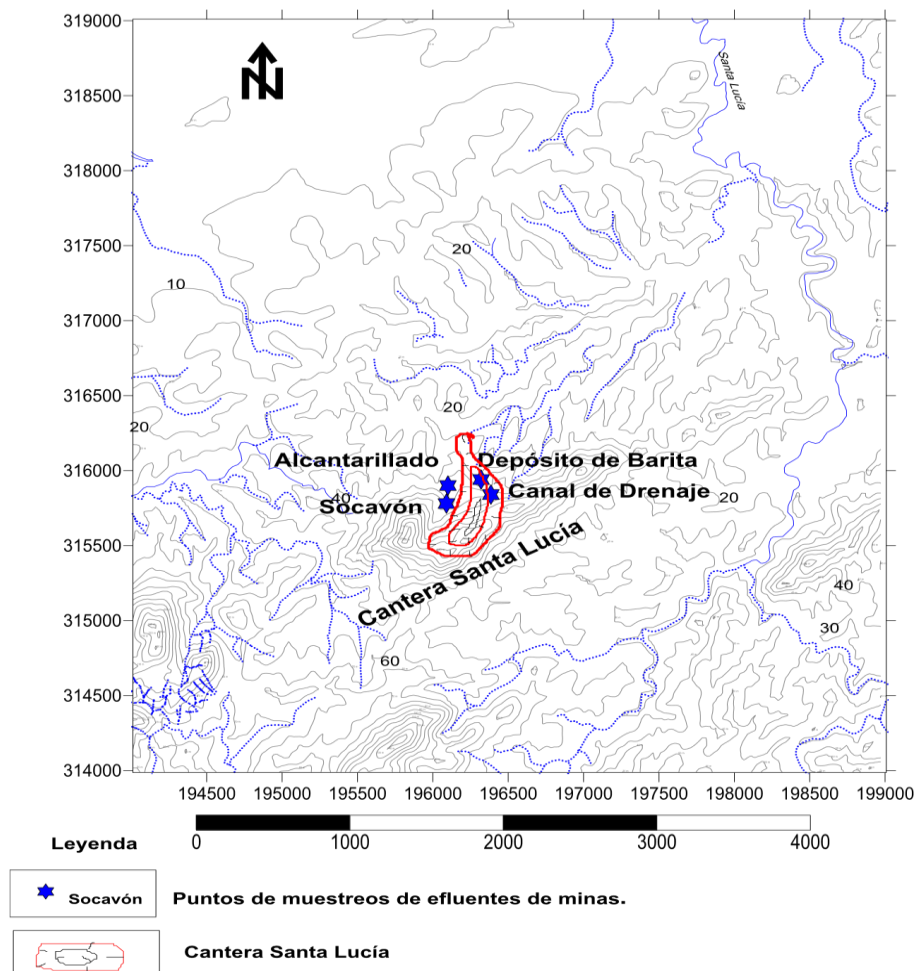


Figura II.3. Ubicación de los puntos de muestreo de los efluentes de mina.

II.2.3. Muestreo de las aguas superficiales.

Para determinar la calidad de las aguas superficiales y evaluar la contribución de los efluentes de mina a la contaminación ambiental se tomaron muestras en ríos y arroyos en período seco, durante el cual las precipitaciones en la zona fueron deficitarias y las corrientes superficiales presentaban sus niveles y caudal base. En total, en la última campaña se tomaron 2 muestras de aguas superficiales y además, se utilizaron los resultados de 44 muestras de las estudios anteriores (1997- 2011), las cuales fueron recogidas tanto en época de lluvia como de seca. En el Anexo textual 4 y la Figura II.4. se muestra su descripción y ubicación.

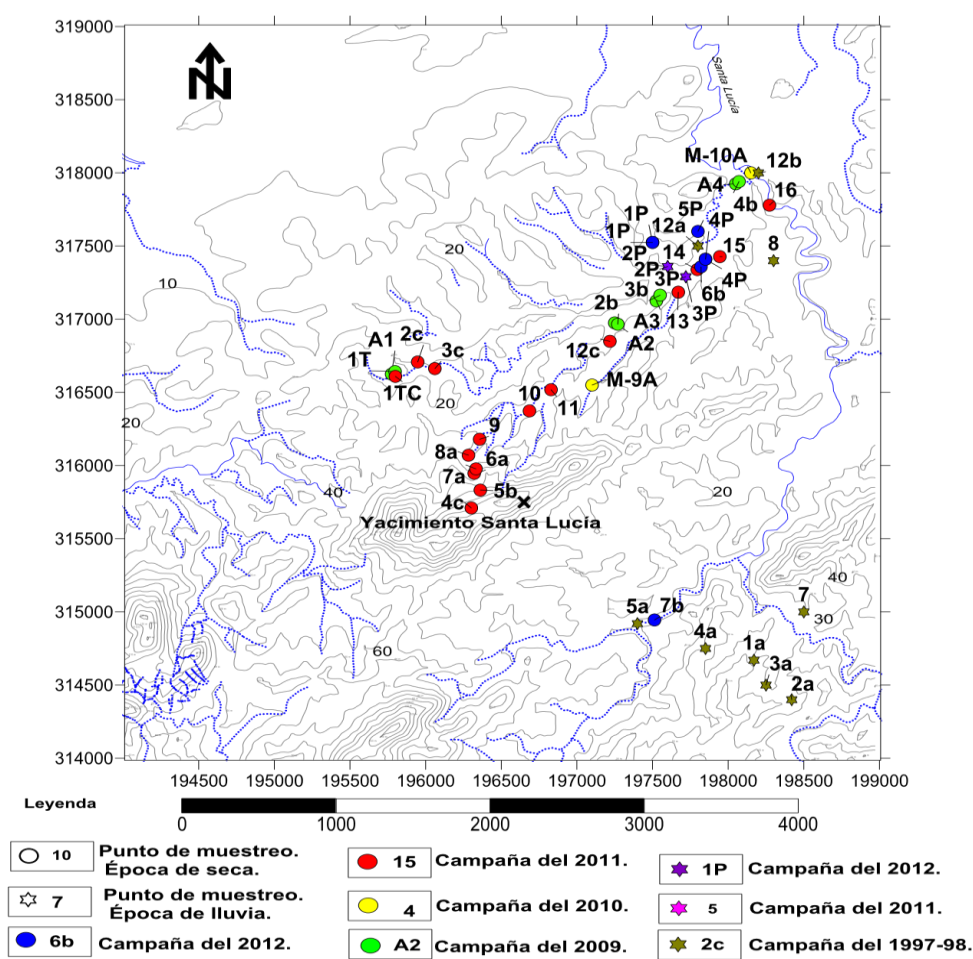


Figura II.4. Ubicación de los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de seca y lluvia.

Los resultados de los análisis de laboratorio se compararon, según el caso, con los estándares de agua potable establecidos por NC 827:2012 Agua potable-Requisitos Sanitarios.

II.2.4. Muestreo de los sedimentos.

En paralelo con las muestras de aguas superficiales se muestrearon los sedimentos de los lechos de corrientes con el objetivo de evaluar el nivel o concentración de elementos potencialmente tóxicos asociados a la fase sólida.

Las 6 muestras de sedimentos se ubicaron en el área de la propia cantera en la salida del socavón, a un lado del socavón, canal de drenaje, escombrera de barita hasta el arroyo secundario, efluente del río Santa Lucía, puente de la carretera Minas y Santa Lucía y río Las Coloradas. La ubicación y descripción de las mismas, junto con las 13 muestras de las campañas de los años anteriores se muestra en la Tabla II.3. y la Figura II.5.

Tabla II.3. Ubicación y descripción de las muestras de sedimentos de diferentes campañas.

No	Año	Punto	Época	Punto	Descripción	Coordenadas	
						X	Y
1	2012	M1	Seca	M1	Fragmentos de minerales sulfurosos y de la zona de oxidación.	196335	316098
2	2012	M2	Seca	M2	Sedimentos arenosos más finos.	196904	316406
3	2012	M3	Seca	M3	Puente en la carretera entre Minas y Santa Lucía.	197820	317358
4	2012	M4	Seca	M4	Pequeño charco de agua en la cima del yacimiento Santa Lucía	196498	315595
5	2012	M8	Seca	M8	Río Las Coloradas, puente en la carretera Santa Lucía-Minas.	197513	314945
6	2012	M9	Seca	M9	Arroyo en la finca del Chino Tapicero	197092	314965
7	2011	M-2	Seca	M-2	Sedimento del afloramiento de la mina	195945	316110
8	2011	M-4	Seca	M-4	Sales verdes de la salida del socavón	196085	315780
9	2011	M-5	Seca	M-5	Salida del socavón	196085	315780
10	2011	M-6	Seca	M-6	Un lado del socavón	196080	315785

A las muestras de sedimentos se les realizaron análisis granulométrico con vistas a clasificar y evaluar el grado de selección de los sedimentos. Para realizar los ensayos de granulometría el procedimiento analítico empleado por la Empresa Central de Laboratorios "José Isaac del Corral" (LACEMI) fue el de vía húmeda, con 0.01 % de límite inferior y 100 % como límite superior, y se adoptó la siguiente clasificación granulométrica:

Grava	>4.75 mm
Arena	4.75 mm-0.074 mm
Gruesa	4.75 mm-2.00 mm
Media	2.00 mm-0.425 mm
Fina	0.425 mm-0.074 mm
Limo	<0.074 mm y >0.005 mm

Para determinar la contaminación de los sedimentos y sus afectaciones por el drenaje ácido, los resultados se compararon con una Legislación Española (Real Decreto 1310/1990, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España), al no estar disponible la norma nacional.

Los análisis mineralógicos para los sedimentos no fueron realizados en la última campaña, pero están disponibles los resultados de trabajos anteriores.

II.3. Trabajos de laboratorio.

Los análisis químicos de las muestras de aguas superficiales, efluentes de mina, sedimentos y menas se realizaron en LACEMI con el objetivo de determinar las concentraciones de los EPT.

Las especificaciones del método de análisis químico, utilizado por el laboratorio LACEMI, se muestra en la Tabla II.4.

Para la determinación de los parámetros seleccionados se utilizaron los siguientes equipos, métodos y técnicas:

Para la determinación de pH se utilizó el medidor de pH de clase digital, marca HANNA, modelo HI-8314, de manufactura rumana, del año 2007, con rango 1-14.

El pesaje de las muestras para su análisis se realizó con balanzas digitales marca Sartorius, modelo SL 6100, de manufactura suiza, del año 2001, con rango de precisión de 0.001 g.

Los análisis de contenidos de metales de Pb, Zn, Cu, Fe se realizaron por el método de Absorción Atómica en un equipo Spectraa-220, modelo VARIAN, de manufactura australiana, del año 2005.

Los análisis de Au y Ag se efectuaron por el método de docimasia que incluye la fundición y copelación de la muestra en hornos tipo mufla de marca THERMOLINE, modelo F30400, de fabricación argentina. Las muestras para el análisis químico fueron analizadas en varios laboratorios como se muestra en el Anexo textual 1.

Además del análisis químico a las muestras de menas se efectuó el análisis mineragráfico en el laboratorio del Instituto de Geología y Paleontología (IGP) de la última campaña, de las campañas de los años 2011 y 2010 en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM) y del 2009 en el laboratorio de Canadá (Activation Laboratories).

Tabla II.4. Descripción de los métodos de análisis químicos en LACEMI.

Descripción del método			Límite inferior	Límite superior
Metales por ICP: Digestión con HCl 2N				
Al	Metal Extraíble	EEA-ICP	0.01%	0.60%
Ba	Metal Extraíble	EEA-ICP	0.4 g/t	600 g/t
Cd	Metal Extraíble	EEA-ICP	1 g/t	6000 g/t
Co	Metal Extraíble	EEA-ICP	1 g/t	6000 g/t
Cr	Metal Extraíble	EEA-ICP	3 g/t	6000 g/t
Cu	Metal Extraíble	EEA-ICP	0.6 g/t	6000 g/t
Fe	Metal Extraíble	EEA-ICP	0.01%	24.00%
Mn	Metal Extraíble	EEA-ICP	0.5 g/t	42 g/t
Ni	Metal Extraíble	EEA-ICP	2 g/t	6000 g/t
Pb	Metal Extraíble	EEA-ICP	10 g/t	6000 g/t
Zn	Metal Extraíble	EEA-ICP	1 g/t	6000 g/t
Metales por ICP: Digestión con agua regia inversa				
As	Metal Total	EEA-ICP	5 g/t	-
Hg	Metal Total	EEA-ICP	5 g/t	-

II.4. Trabajos de gabinete.

En esta etapa se realizó el procesamiento de toda la información existente y de la generada durante el trabajo de campo y laboratorio. Se confeccionaron tablas, mapas, figuras y gráficos, así como la creación de las bases de datos necesarias para su tratamiento con los diferentes sistemas informáticos (Microsoft EXCEL y SURFER 11) y poder valorar el comportamiento de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en el de cursar del tiempo. Aunque se conoce las limitaciones de la base de datos disponible, pues los diferentes estudios no tomaron un número homogéneo de muestras y tampoco consideraron los mismos puntos de muestreo, se concibieron vías para minimizar estos problemas y poder contrastar las concentraciones de EPT en diferentes momentos. De esta forma se intenta, de manera preliminar, establecer si la contaminación se ha atenuado, mantenido o incrementado.

Como parte del procesamiento se recopilamos las imágenes satelitales (Google Earth) del área de estudio, correspondientes a diferentes años, para analizar la intensidad y extensión de las afectaciones a los ecosistemas circundantes y sus variaciones en el tiempo. Las imágenes de los años 2004, 2009, 2013 fueron georeferenciadas e interpretadas en Arcgis 10.1.

Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados.

En este capítulo se exponen los principales resultados de la aplicación de la metodología propuesta, se caracteriza el comportamiento de la contaminación ambiental y su situación actual, que se extiende fuera de los límites del depósito mineral, provocada por el drenaje ácido y los EPT en las aguas superficiales, efluentes de mina, sedimentos, suelos y vegetación. Finalmente, se evalúan las principales regularidades espaciales y temporales encontradas en los contenidos de los metales pesados y se valoran la efectividad de las medidas tomadas para reducir las afectaciones al medio ambiente.

III.1. Menas primarias y secundarias.

En el capítulo anterior 2.2.1 fue mencionado que en el área estudiada se tomaron las muestras de tres tipos de menas a las cuales se les realizaron los análisis químicos y mineralógicos. Se utilizaron los resultados de 13 muestras de menas de otras campañas. El estudio de las menas estuvo dirigido a establecer la geodisponibilidad de los EPT y determinar los principales minerales en los que estos se manifiestan.

III.1.1. Composición química de las menas.

Los resultados de análisis químicos de las 3 muestras de menas de la última campaña, así como, de las campañas de los años 2011 y 2009 se muestran en el Anexo textual 7.

En la siguiente Tabla III.1. se muestran los valores mínimos, máximos y promedios de los elementos que tienen mayores concentraciones en las menas.

Tabla III.1. Valores mínimos, máximos y promedios de los elementos de la composición química de las menas.

Elemento	UM.	Mínimo	Máximo	Promedio
Plomo (Pb)	%	2.4	4.1	3.4
Zinc (Zn)	%	3.6	4.7	4.1
Asufre (S)	%	17.8	45.6	34.5
Bario (Ba)	mg/l	58	434	288
Arsénico (As)	mg/l	340	1422	1009
Cadmio (Cd)	mg/l	129	429	262
Antimonio (Sb)	mg/l	166	319	250

Estos resultados (tabla III.1) demuestran que, las menas del yacimiento Santa Lucía se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de EPT, dichos metales se liberan con relativa facilidad durante la lixiviación ácida de los sulfuros que los contienen.

III.1.2. Composición mineralógica de las menas.

La composición mineralógica de las menas fue determinada en varias investigaciones (campana del año 2012, e información de las campañas de los años 2011, 2010 y 2009). En la última campana se realizó el análisis minerográfico de los tres tipos de menas y los resultados se muestran en la Tabla III.2.

Tabla III.2. Resultados de análisis minerográfico de las menas.

Tipo de mena		
Barítica	Pirítica masiva	Pirítica bandeada
<u>Estructura:</u> -semimasiva-vetítica, - brechosa densamente diseminada, -semimasiva bandeada, -brechosa semimasiva	<u>Estructura:</u> -masivas -finamente bandeadas	<u>Estructura:</u> -bandeadas - brechosas bandeadas
<u>Composición:</u> Pirita: 60% Esfalerita: 7% Galena: 5% Marcasita: 3% Pirrotina: rg	<u>Composición:</u> Pirita melnicovita: 85% Esfalerita: 4% Galena: 2%	<u>Composición:</u> Pirita: 75 _80% Esfalerita: 5_ 6% Marcasita: 1% Galena: <1%

En la composición de los tres tipos de menas existe un predominio marcado de pirita, esta ocupa entre el 60% hasta 85% de la mena. No se detectan minerales de Cd ni As, por lo que, estos metales deben aparecer en la estructura cristalina de otros sulfuros como esfalerita y la pirita. El carácter pirítico de la mena facilita la generación del DAM. En la campana del año 2011 las determinaciones fueron las siguientes (García , 2011):

M-1 (Mena pirito-polimetálica con Barita)

1. Pirita
2. Barita
3. Esfalerita
4. Hidromica
5. Cuarzo
6. Szomolnokite
7. Montmorillonita
8. Jarosita
9. Goethita

En la campaña del año 2010 en la mena primaria (Alonso, 2011) determinaron:

M-1

1. Pirita
2. Szomolnokite
3. Cuarzo
4. Material amorfo
5. Esfalerita
6. Barita
7. Jarosita
8. Yeso

M-2

1. Rozenita
2. Melanterita
3. Szomolnokite
4. Material amorfo
5. Halotrichita

En el año 2009 fue determinada la composición mineralógica de las menas primarias y secundarias en las muestras y1, y2, y3, y4, y5, t1, t2, t3, t4, t5, t6 y t7 (Romero, 2010). Los minerales de las menas primarias son: cuarzo (SiO_2), illita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), flogopita $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), galena (PbS). Entre los minerales secundarios se encuentran: jarosita, barita, anglesita, yeso, plumbojarosita, hematita, gohetita.

III.1.3. Análisis de fases de plomo y zinc de las muestras de menas.

Se realizaron los análisis de fases de plomo y zinc para cada tipo de menas y sus resultados se muestran en las Tablas III.3. y III.4.

Tabla III.3. Resultados de los análisis de fases de plomo de las muestras de menas.

No de Orden	No de Muestra	Fases de Pb en %			
		Total	Sulfato	Carbonato	Sulfuro
1	1	2.19	1.58	<0.10	0.59
2	2	4.08	2.37	<0.10	1.66
3	3	4.05	0.40	0.99	2.66

Del análisis de las fases de plomo en las tres muestras de menas se puede señalar que, en las muestras 1 y 2 predominan los sulfatos (1.58% y 2.37% respectivamente) y los carbonatos casi están ausentes (<0.10), lo que indica el predominio de las menas oxidadas. Sin embargo, en la muestra 3 la mayor parte corresponde a los sulfuros (2.66%), lo cual refleja el carácter primario de la mena. Aunque en la muestra 2 existe el predominio de los sulfatos, también posee un porcentaje alto de sulfuro, indicando la alteración supergénica de las menas primarias y el comienzo de la liberación de los EPT.

Tabla III.4. Resultados de los análisis de fases de zinc de las muestras de menas.

No de Orden	No de Muestra	Fases de Zn en %			
		Total	Silicato	Óxido, sulfato y carbonato	Sulfuro
1	1	3.52	<0.10	0.92	2.60
2	2	1.17	<0.10	0.31	0.86
3	3	2.35	<0.10	0.61	1.74

Los resultados de los análisis de fases de zinc de las muestras de menas destacan que, los sulfuros son superiores a los óxidos, sulfatos y carbonatos en las tres muestras y los silicatos tienen un valor menor que 0.10% indicando la presencia de las menas primarias. En resumen, se puede decir, que los diferentes tipos de menas que se han estudiado de la parte que aflora del cuerpo mineral, poseen algún grado de alteración, como lo demuestra la composición mineralógica y el análisis de fase. Los resultados reflejan la oxidación de los sulfuros que afloran y la formación de las condiciones que favorecen al proceso del DAM, lo cual experimentan las rocas primarias del depósito.

III.2. Efluentes de mina.

Las muestras de efluentes de mina fueron tomadas generalmente en los 4 puntos alrededor del yacimiento: socavón, canal de drenaje de la cantera, depósito de barita y alcantarilla. En la última campaña del año 2012 fue tomada solamente una muestra del efluente de mina en el canal de drenaje. A la misma se le determinó el pH y se realizó el análisis químico para diferentes elementos. Se contó también con los resultados de pH de 7 muestras de monitoreo de los años 2013 (5 muestras) y del año 2014 (2 muestras), (UEB Geólogo Mineros, Resultados de monitoreo de las aguas superficiales y efluentes de mina de los años 2009-2014), además con 68 muestras de las campañas de los años anteriores. Los valores promedios de pH para estos 4 puntos en diferentes momentos se representan en la Tabla III.5. El pH muestra valores muy estables, con mínimas fluctuaciones en el tiempo.

Tabla III.5. Valores de pH promedio en los puntos de muestreo de los efluentes de mina de todas las campañas.

Año	LMPP	Socavón	Depósito de barita	Canal de drenaje	Alcantarillado
2014	6-9	-	2.2	-	2.1
2013	6-9	-	2.3	2.6	2.6
2012	6-9	2.7	1.4	2.3	1.8
2011	6-9	3.0	2.1	2.9	2.2
2010	6-9	2.9	2.1	3.1	2.5
2009	6-9	3.0	2.5	3.1	2.1
1997-98	6-9	2.5	-	-	-

LMPP- Límite Máximo Permisible Promedio

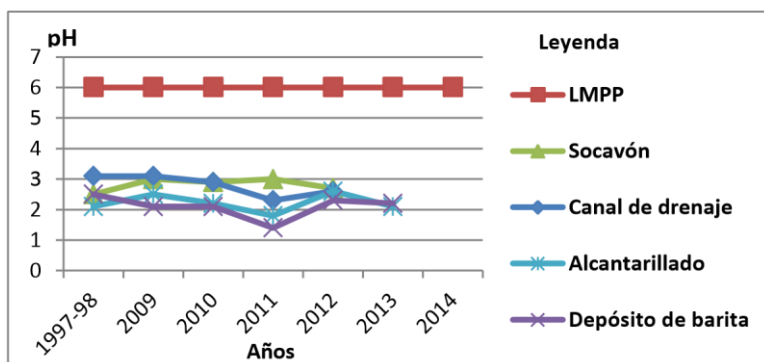


Figura III.1. Comportamiento de los valores de pH de diferentes campañas en los 4 puntos de muestreo de los efluentes de minas.

En la Figura III.1. y Anexo textual 3 se observa que el pH fluctúa entre 1.4 y 3.1 en los cuatro puntos muestreados en las campañas desde el año 1997 hasta el 2014, lo que indica la generación durante todos estos años del drenaje ácido de mina, fundamentalmente por la oxidación de la pirita, por otra parte, se demuestra que, las condiciones que propician el DAM no han desaparecido y se mantiene la interacción entre los minerales sulfurosos y los agentes del intemperismo.

Los análisis químicos de las muestras de efluentes de mina aparecen en el Anexo textual 8. El análisis de los elementos potencialmente tóxicos presentes en los cuatro puntos de muestreo de los efluentes de mina se realizó para cada localización por separado.

Tabla III.6. Valores promedios de los elementos que superan los Límites Máximos Permisibles Promedios (LMPP) en el punto de muestreo del socavón.

Años	Zn (mg/l)	LMPP- Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	LMPP- Al (mg/l)	Pb (mg/l)	LMPP- Pb (mg/l)	As (mg/l)	LMPP- As (mg/l)
1998	4000	5	3000	1241	10	0.1	1	0.08	0.5
2010	3760	5	7196	484	10	7.2	1	23.6	0.5

Los resultados de las muestras tomadas del socavón demostraron que, desde la campaña del año 1998 hasta la del 2010, el Pb, Fe y As tuvieron un aumento, pero el Zn y Al una ligera disminución, aunque todos estos elementos están muy por encima de los LMPP (Tabla III.6., Figura III.2 a,b y Anexo gráfico 2). Los altos contenidos de Al detectados en los efluentes, son el resultado de la descomposición de los silicatos en ambientes muy ácidos lo que facilita la movilización de este metal. Las fluctuaciones de las

concentraciones de los EPT obedecen a la heterogeneidad de las menas sulfurosas, donde en función del tipo de mena (pirítica, polimetálica y barítica) que se está oxidando, así serán entonces, los contenidos de metales pesados en los efluentes. Todo esto complicado por la disponibilidad de agua que en un determinado momento, interactúa con las menas sulfurosas y lixivia los EPT.

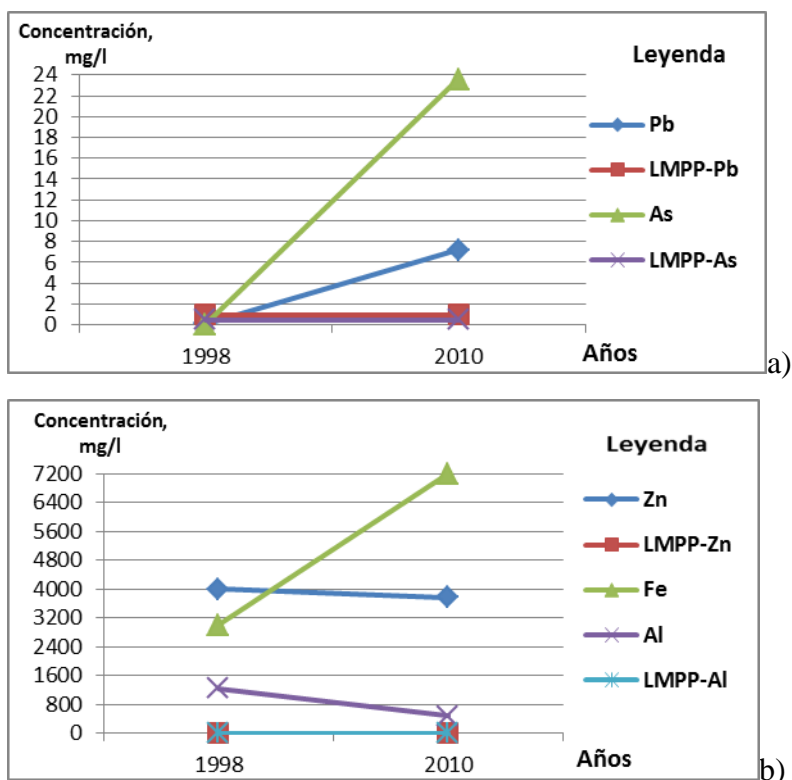


Figura III.2. Concentraciones de Pb, As (a) y Zn, Fe, Al (b) desde la campaña del año 1998 hasta el 2010 con sus respectivos LMPP en el socavón.

En el depósito de barita los elementos con los valores superiores del LMPP son: Zn, Pb, Al, Cd y As. En la Tabla III.7. se representan sus contenidos promedios y los LMPP correspondientes.

Tabla III.7. Valores promedios de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del depósito de barita.

Años	Zn (mg/l)	LMPP- Zn (mg/l)	Al (mg/l)	LMPP- Al (mg/l)	Pb (mg/l)	LMPP- Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	LMPP- Cd (mg/l)	As (mg/l)	LMPP- As (mg/l)
2009	1990	5	163	10	0.5	1	1.1	0.3	0.2	0.5
2010	12005	5	2620	10	6.9	1	58	0.3	256	0.5

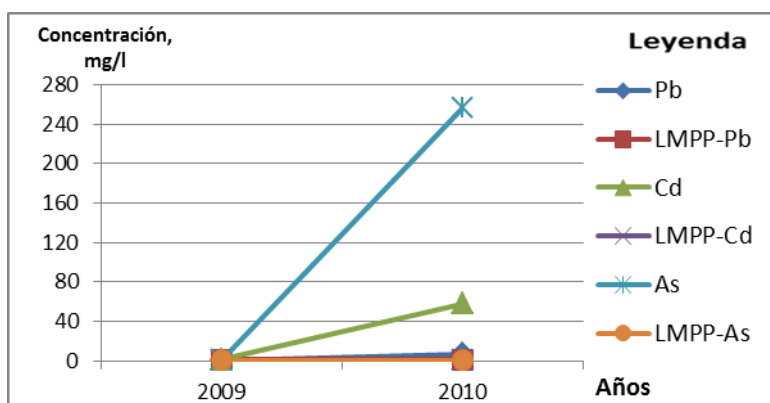
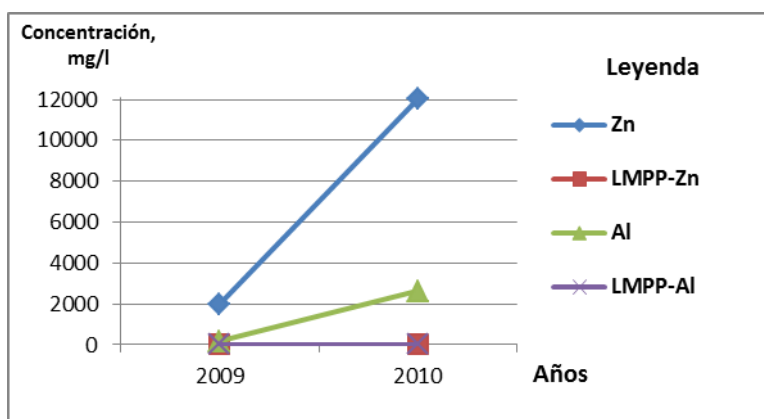


Figura III.3. Concentraciones de Zn, Al, Pb, Cd y As en las campañas de los años 2009 y 2010 con sus respectivos LMPP en el depósito de barita.

Todos estos elementos mostraron un aumento desde la campaña del año 2009 hasta la del 2010 y sus concentraciones se encuentran por encima de los LMPP establecidos por la norma (Tabla III.7. y Figura III.3.).

El punto del canal de drenaje se caracterizó por el aumento de Zn, As y Cd desde la campaña del año 2009 hasta la del 2012 y la disminución de los contenidos del Al (Tabla III.8. y Figura III.4. a, b y c).

Tabla III.8. Valores promedios de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del canal de drenaje.

Años	Zn (mg/l)	LMPP- Zn(mg/l)	Al (mg/l)	LMPP- Al(mg/l)	Cd (mg/l)	LMPP- Cd(mg/l)	As (mg/l)	LMPP- As(mg/l)
2009	585	5	140	10	1.5	0.3	0.005	0.5
2010	2615	5	334	10	4.6	0.3	0.69	0.5
2012	2545	5	0,12	10	423	0.3	0.84	0.5

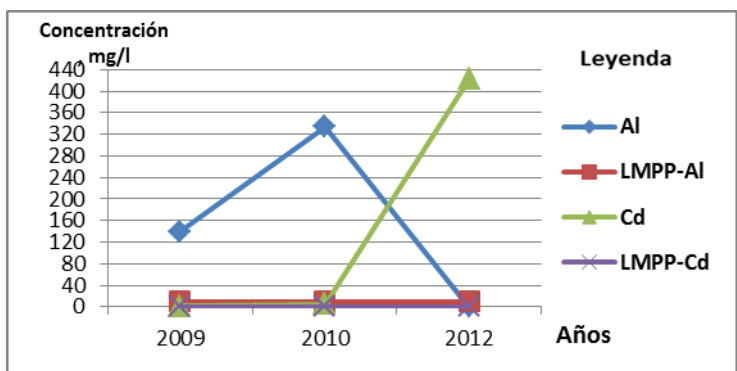
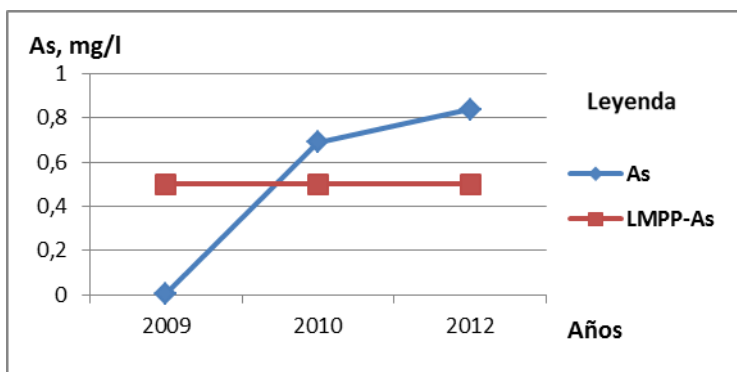
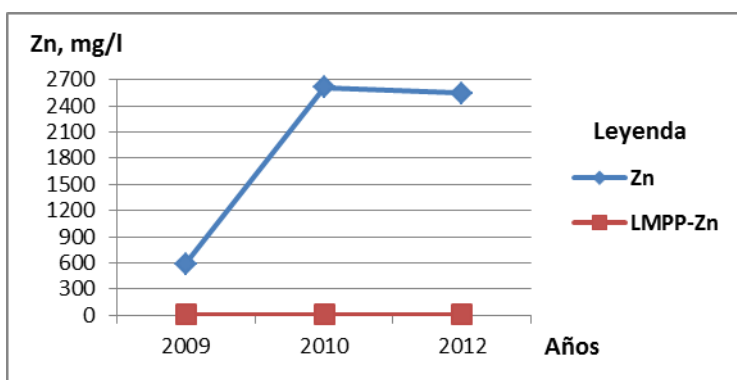


Figura III.4. Concentraciones de Zn, As, Cd y Al en las campañas de los años 2009, 2010 y del 2012 con sus respectivos LMPP en el canal de drenaje.

En el punto del alcantarillado no se pudo graficar, ya que se cuenta con una sola muestra del año 2010 la que se representa en la Tabla III.9.

Tabla III.9. Valores de los elementos que superan los LMPP en el punto de muestreo del alcantarillado.

Años	Zn (mg/l)	LMPP- Zn (mg/l)	Al (mg/l)	LMPP- Al (mg/l)	Pb (mg/l)	LMPP- Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	LMPP- Cd (mg/l)	As (mg/l)	LMPP- As (mg/l)
2010	674	5	105	10	101	1	1	0.3	114	0.5

En la composición de los efluentes llama la atención los elevados contenidos de Fe y Zn, en los diferentes años, lo cual es consecuencia de la profunda oxidación de la pirita y la esfalerita, facilitando la generación de efluentes con pH muy bajos (fuente potencial de DAM).

Algunos autores consideran que, las concentraciones de los EPT As, Pb y Ba en los efluentes son relativamente bajas (Romero et al., 2010), lo cual se explica por la presencia de minerales secundarios prácticamente insolubles que controla la movilidad hidromórfica de estos elementos (anglesita, plumbojarosita y barita), por lo que, las concentraciones disueltas se atenúan de forma natural. Sin embargo, este comportamiento no se observa en todas las campañas realizadas, ni en todos los sectores estudiados (Klimchuk et al., 2014). Los datos obtenidos en los años 2010 y 2012 muestran concentraciones elevadas de estos elementos, lo cual es indicativo de que los mismos son lixiviados y movilizados a partir de los sulfuros que los contienen.

III.3. Aguas superficiales.

El sistema fluvial de la zona del yacimiento Santa Lucía se localiza en la vertiente norte de Cuba; perteneciente a la cuenca hidrográfica Santa Lucía vertiente oeste, la cual drena sus aguas desde las elevaciones del mismo nombre de sur a norte. El río Santa Lucía es la principal corriente permanente de la zona, siendo el único que vierte sus aguas directamente al mar, el resto de las corrientes lo hacen hacia la zona litoral baja. El escurrimiento en el área se caracteriza por una densa red de corrientes temporales y efímeras (Gómez et al., 2010), lo cual facilita la dispersión de los EPT y la contaminación de los diferentes componentes del medio.

La existencia de corrientes fluviales en dirección suroeste-noreste que drenan directamente de la cantera debe ser considerada como un factor que influye en los procesos erosivos y acumulativos y, por consiguiente, ser portador de la carga contaminante proveniente de la cantera (García, 2011).

En las muestras de aguas superficiales se determinó el pH y la concentración de metales pesados. En el análisis de los valores de pH de diferentes campañas, se puede apreciar que, la inmensa mayoría de las muestras no cumplen con los límites permisibles de 6.58.5 que establece la NC 827:2012 Agua potable-Requisitos Sanitarios (Anexo textual 5 y Figura III.5. a, b, c, d y e).

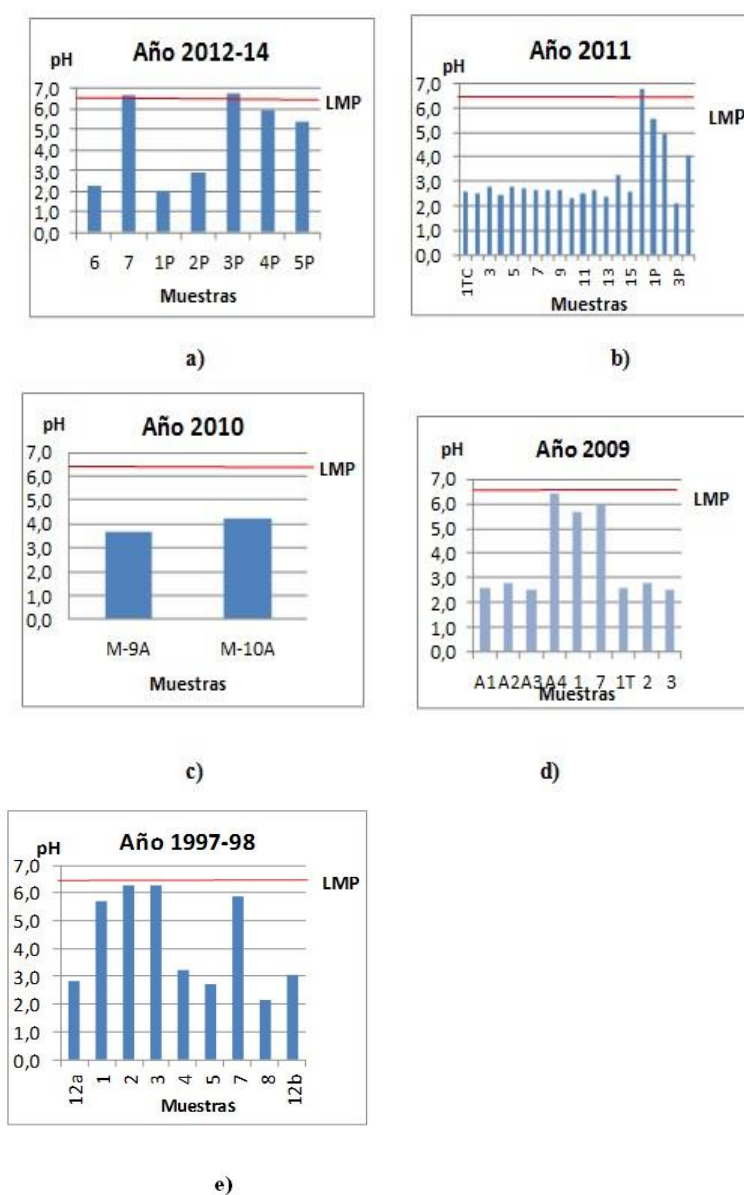


Figura III.5. Comportamiento de la acidez del agua desde el año 1997 al 2014 a) años 201214, b) año 2011, c) año 2010, d) año 2009, e) año 1997-98.

La estadística elemental de los valores de pH de todas las muestras de agua indica el carácter ácido de las aguas superficiales, lo cual es reflejo de su afectación por el DAM (Tabla III. 10). Los valores promedios de acidez se mantienen estables (alrededor de 4) a lo largo de los 15 años que abarcan los datos disponibles, lo que hace pensar que el drenaje ácido no se ha interrumpido y por consiguiente, la dispersión y contaminación por metales pesados.

Tabla III.10. Valor máximo, mínimo y promedio de pH en las muestras de las aguas superficiales de cada campaña.

Año	Valor máximo de pH	Valor mínimo de pH	Valor promedio
2012	6.7	2.0	4.6
2011	6.8	2.1	3.1
2010	4.2	3.7	4.0
2009	6.4	2.5	4.3
1997-98	6.3	2.2	4.2

Con vista a identificar regularidades espaciales y temporales en la contaminación ambiental se realizó un análisis del comportamiento de los valores de pH a diferentes distancias y direcciones respecto a la cantera por cada época del año. Los intervalos de distancia se seleccionan considerando los puntos donde se ha aglomerado el muestreo de las diferentes campañas de investigación. Además se consideraron aquellas zonas más proclives a la acumulación de EPT. Se escogieron las distancias de 400 m, 1000 m y 2200 m por el curso de los arroyos que drenan de la cantera hacia el NE, 1200 m desde el punto de escurrimiento del socavón hacia el NW y 1200 m hacía SE.

De la Tabla III.11. y la Figura III.6. se observa que, a medida que aumenta la distancia, el pH tiende a incrementar sus valores, así en el año 2011 a la distancia de 400 m este alcanzó valores entre 2.4-2.8, a 1000 m se obtuvieron valores entre 2.3-3.7 y a 2200 m entre 2.4-6.8. En la última campaña los valores de pH a la distancia de 2200 m oscilaron entre 2.3 y 6.0. El incremento de los valores de pH con el aumento de la distancia indica que, las aguas que drenan se neutralizan, pues los volúmenes aportados por otros tributarios, no provenientes de la cantera, provocan la dilución y por consiguiente la disminución de las concentraciones de H_3O^+ .

Tabla III.11. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia a la cantera por el curso de los arroyos. Período de seca.

Distancia								
400m			1000m			2200m		
Año	Punto	pH	Año	Punto	pH	Año	Punto	pH
2011	4c	2.4	2011	10	2.3	2012	6b	2.3
	5b	2.8	2011	11	2.5	2012	1P	2.0
	6a	2.7	2011	12c	2.6	2012	4P	6.0
	7a	2.7	2010	M-9A	3.7	2012	5P	5.4
	8a	2.7	2009	A2	2.8	2011	13	2.4
	9	2.6	2009	2b	2.8	2011	14	3.3
						2011	15	2.6
						2011	16	6.8
						2011	1P	5.5
						2011	4P	4.1
						2010	M-10A	4.2
						2009	A3	2.5
						2009	A4	6.4
						2009	3b	2.5
						2009	4b	6.4

El comportamiento de los valores de pH en otras dos direcciones se muestra en la Tabla III.12.

Tabla III.12. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia a la cantera en las direcciones SE y NO (escurrimiento desde el socavón). Período de seca.

Distancia					
1200 m (escurrimiento del socavón)			1200m (hacia SE)		
Año	Punto	pH	Año	Punto	pH
2011	A1	2.6	2012	7b	6.7
2011	1T	2.6			
2011	1TC	2.6			
2009	2c	2.5			
2009	3c	2.8			

En la Figura III.6. se representan los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de seca con sus respectivos valores de pH en diferentes direcciones y distancias de la cantera. Solamente una muestra, perteneciente al año 2011 y a una distancia superior a 2 km de la fuente de contaminación, posee un pH del rango del valor permisible.

En la muestra del año 2012 en la dirección SE, el pH es igual a 6.7 indicando que, las aguas son neutras y no están influenciadas por el DAM, sin embargo, a la distancia de 1200 m de la cantera por la corriente que drena del socavón hacia el NW se registran, en las campañas de los años 2009 y 2011, valores estables de pH entre 2.5-2.8, marcando la influencia del escurrimiento de aguas ácidas provenientes de la excavación minera (Tabla III.12.).

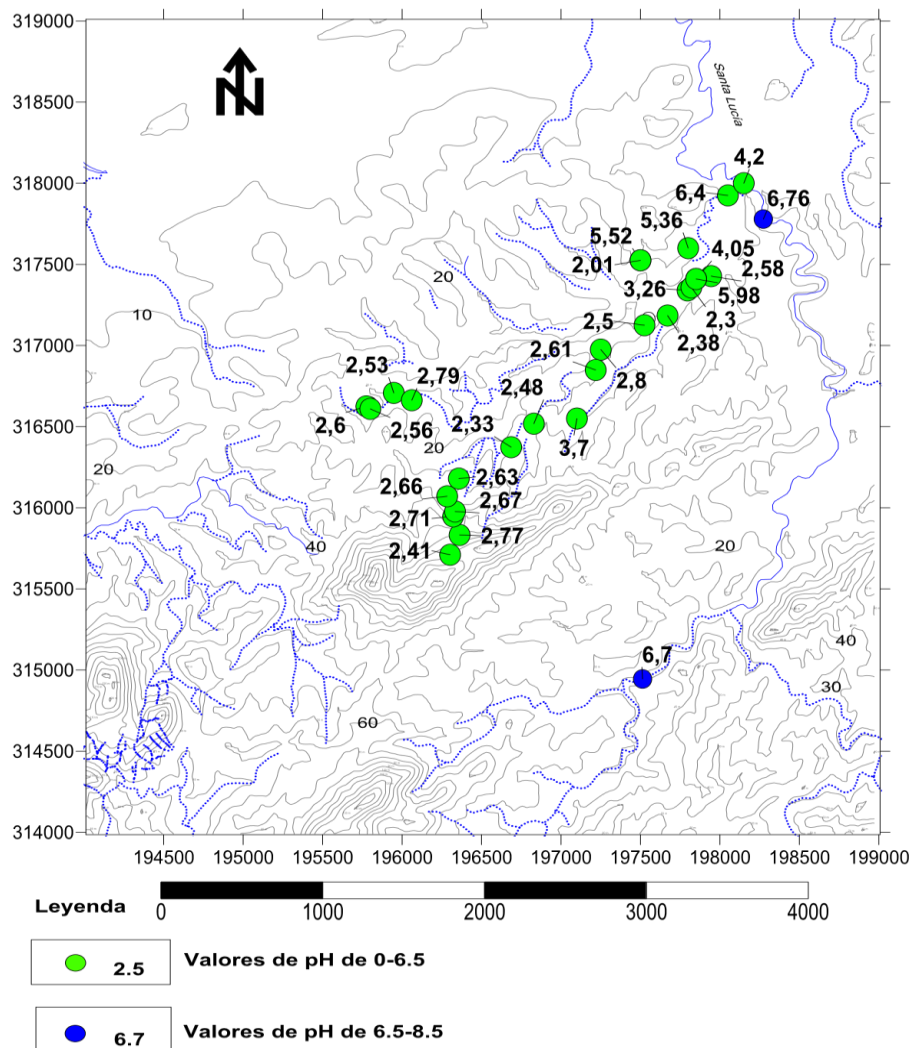


Figura III.6. Valores de pH en los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de seca con el incremento de la distancia a la cantera.

Para el período de lluvia se analizó el pH de las muestras de aguas superficiales en dos direcciones: por el curso de los arroyos a 2200 m de la cantera (NE) y hacía el SE en dirección al puente “ Las Coloradas” a 1600 m de la cantera (Figura III.7. y Tabla III.13.).

Tabla III.13. Comportamiento de los valores de pH con el aumento de la distancia de la cantera por el curso de los arroyos que drenan al NE y hacía el SE. Período de lluvia.

Distancia					
2200 m			1600m		
Año	Punto	pH	Año	Punto	pH
2012	2P	2.9	1997-98	1a	5.7
2012	3P	6.7	1997-98	2a	6.3
2011	2P	5.0	1997-98	3a	6.3
2011	3P	2.1	1997-98	4a	3.2
1997-98	8	2.2	1997-98	5a	2.7
1997-98	12a	2.2	1997-98	7	5.9
1997-98	12b	3.1			

Se puede destacar que, de las 13 muestras de todas las campañas solamente una cumple con los requisitos de la norma (valor de 6.7). A la distancia de 1600 m de la cantera en dirección SE, los valores de pH son algo superiores, este sector no parece estar bajo la influencia de la cantera, pues no existen corrientes fluviales en dirección noroeste- sureste que pudieran transportar la carga contaminante desde el yacimiento. La presencia de aguas ácidas en época de lluvia se debe a la actividad de las corrientes intermitentes, que juegan un importante papel en la traslación de los contaminantes al drenar zonas donde afloran otros cuerpos sulfurosos.

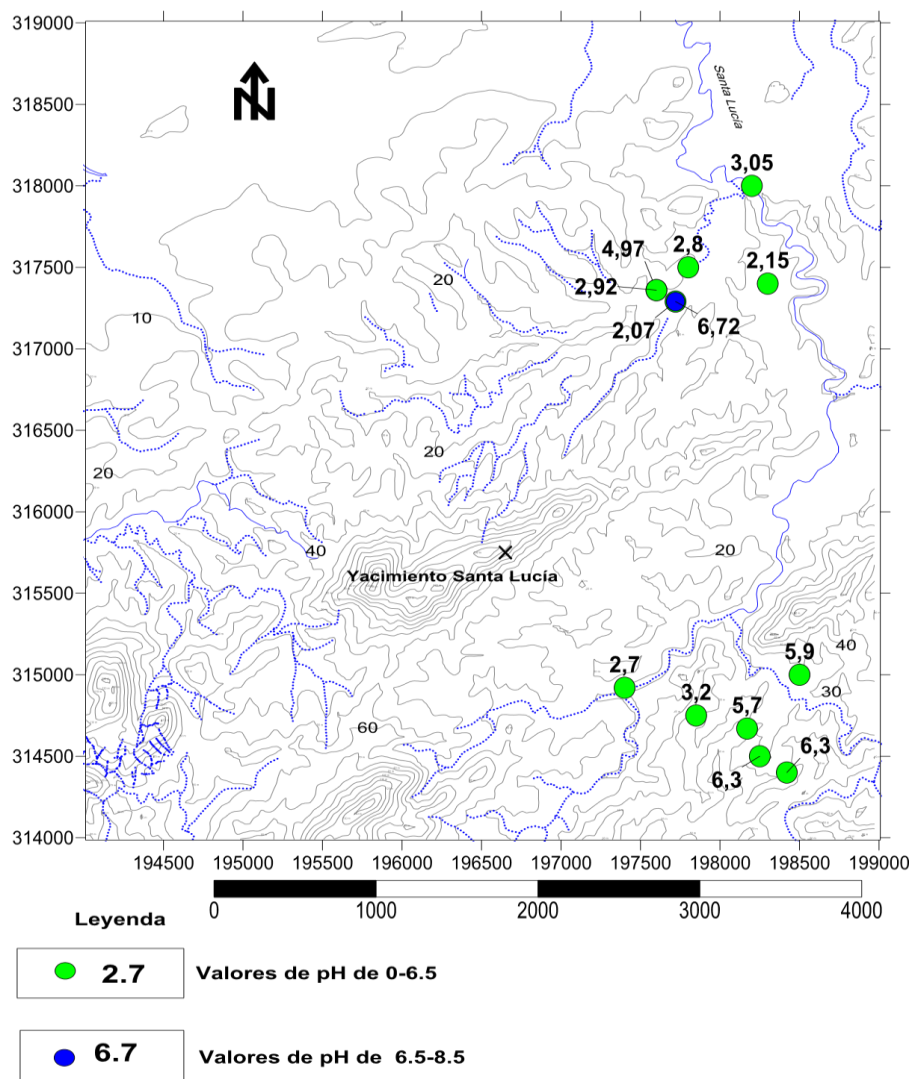


Figura III.7. Valores de pH en los puntos de muestreo de las aguas superficiales de la época de lluvia con el incremento de la distancia a la cantera en dos direcciones.

En los estudios realizados también se determinaron las concentraciones de metales pesados incluyendo los Elementos Potencialmente Tóxicos (Zn, Pb, Fe y Cd). Los resultados de los análisis químicos de las muestras de aguas superficiales aparecen en el Anexo textual 11. El resumen por campañas de los contenidos de EPT en las muestras de aguas superficiales se muestra en la Tabla III.14.

Tabla III.14. Resumen por campañas de las concentraciones de EPT en las muestras de aguas superficiales.

Año	Punto	Fe	Zn	Pb	Cd
		LMA= 0.3mg/l	LMA= 5mg/l	LMA= 0.05mg/l	LMA= 0.005mg/l
2012	6	16*	181*	0.05	0.7*
2012	7	7*	0.2	0.05	0.004
2010	M-9A	460*	<1.7	<0.4	-
2010	M-10A	460*	<2.1	<0.4	-
2009	A1	253*	165*	0.91*	0.0656*
2009	A2	9*	30*	1.18*	0.011*
2009	A3	37*	31*	4.27*	0.013*
2009	A4	11*	0.3	0.02	0.0003
1998	12a	66.5*	227*	0.34*	1.59*
Valor Medio	-	156.63	70.92	1.07	0.34
Factor de Concentración		522.08	14.18	21.49	68.11

*El valor que supera LMA según la NC 827:2012 Agua potable-Requisitos Sanitarios.

En todos los casos, las concentraciones de Fe superan las cantidades máximas admisibles en agua, lo que constituye una confirmación del carácter pirítico de la mena que aflora en el yacimiento. Por otra parte, los factores de concentración calculados según el cociente de los contenidos medios de los EPT y las concentraciones máximas admisibles en muestras de agua, demuestran la alta solubilidad de los metales pesados, su capacidad de migración en ambientes de elevada acidez y por consiguiente la disponibilidad de los EPT para la contaminación ambiental. Las concentraciones de EPT disueltos son inferiores a los reportados en los efluentes de mina, pero se registran altas concentraciones de elementos asociados con los sulfuros (Fe, Zn, Pb, Cd y Ba).

De igual forma, que para el pH, se realizó el análisis del comportamiento de EPT (Fe, Pb, Zn y Cd) en las aguas superficiales en la dirección del curso de los arroyos a 1000 m y 2200 m de distancia del foco contaminante (Anexo textual 6 y Figura III.8).

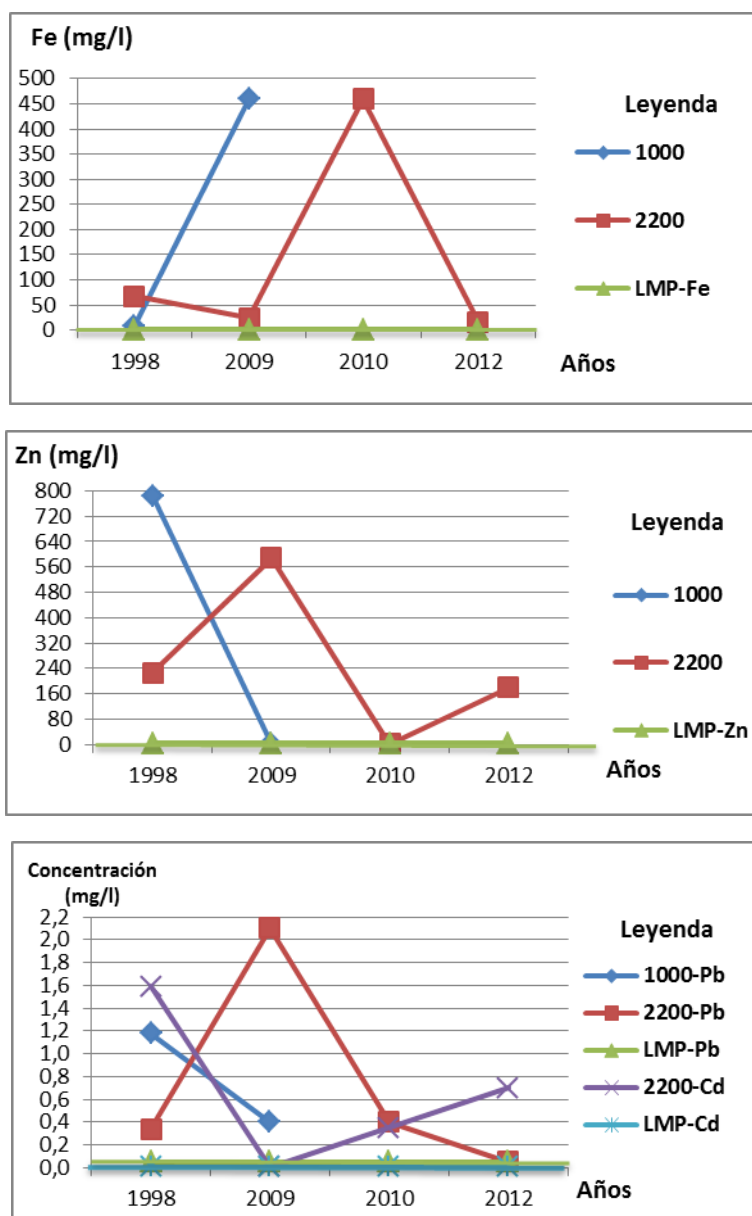


Figura III.8. Concentraciones de los EPT (Zn, Pb, Fe y Cd) en las muestras de aguas superficiales, desde la campaña del año 1997-98 hasta el 2012 a las distancias de 1000 m y 2200 m de la cantera.

Como generalidad no se logra establecer tendencias en las concentraciones de los EPT, la mayoría de los elementos varían erráticamente de un año a otro, solamente el contenido de Pb decrece sostenidamente del año 2009 al 2012 a la distancia de 2200m (Figura III.8.c). También se observa que, desde la campaña del año 1997-98 hasta el 2012 a la distancia de 1000 m el aumento de las concentraciones de Fe desde el año 1998 hasta el

2009 y la disminución de Zn y Cd. A la distancia de 2200 m el comportamiento de estos elementos es variable, destacándose en la última campaña la disminución de Fe y Pb y el aumento de Zn y Cd.

Las concentraciones de Fe y Pb en la campaña del año 2009 tienen un aumento desde 1000 m hasta 2200 m y el Zn una disminución, sin embargo en el año 2010 todos estos elementos se mantienen con las mismas concentraciones aunque son superiores de los LMA por la norma (Figura III.9). En el Anexo gráfico 5 se observa la distribución espacial de los contenidos de EPT en las aguas superficiales. En sentido general, se observa una disminución de las concentraciones de EPT con respecto a la distancia de la fuente contaminante, los contenidos más elevados se sitúan hacia al NW de la cantera coincidiendo con la zona de salida de los efluentes provenientes del socavón.

Los valores elevados de los EPT se deben a los procesos de lixiviación ácida de los sulfuros en las menas primarias: pirita, galena y esfalerita. El Fe puede migrar en forma de sulfato o de soluciones coloidales, mientras que, la causa de los valores elevados de Zn radica en la facilidad con que se disuelve como sulfato o cloruro y de esta forma es arrastrado por las aguas superficiales (Domínguez, 2014). El hecho de no existir carbonatos en la roca de caja o como minerales de ganga evita la formación de carbonatos de Zn y su inmovilización.

Según los análisis químicos de la última campaña las concentraciones de Ba, As y Pb en las aguas superficiales son bajas, inferiores a los LMP (Anexo textual 11), esto puede ser consecuencia de la relativamente baja movilidad de estos elementos en ambiente ácido, como lo consideran Romero et al., (2010).

En resumen, el efecto contaminante del Drenaje Ácido de Mina y los metales pesados, especialmente Fe, Zn y Cd se extiende fuera de los límites del depósito mineral y provoca contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, suelos y vegetación de una región mucho más amplia, que se extiende más de 2 km en la dirección del drenaje de las aguas superficiales.

Aunque las aguas superficiales no se utilizan para el consumo humano, ni animal, resulta importante llamar la atención sobre las altas concentraciones de contaminantes disueltos (Fe, Al, Cd, Mn, Pb, Zn), asociados con el DAM, generado por la cantera, especialmente por el hecho de que estas aguas atraviesan tierras de cultivo y por lo tanto, los EPT pueden terminar incorporados en los productos agrícolas y en la dieta de las poblaciones cercanas, sino se hace un manejo adecuado de las mismas. Por otra parte, aunque se reconoce que la zona es muy impermeable y predomina la escorrentía superficial no se debe descartar

la posibilidad de la contaminación de las aguas subterráneas producto de la infiltración de las aguas contaminadas por zonas de fallas e intensa fracturación.

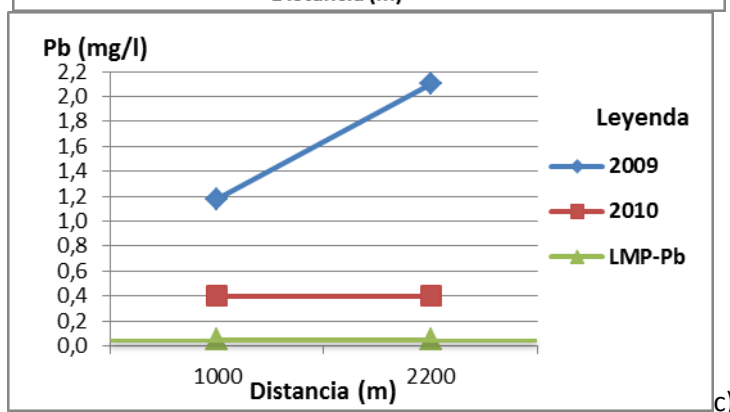
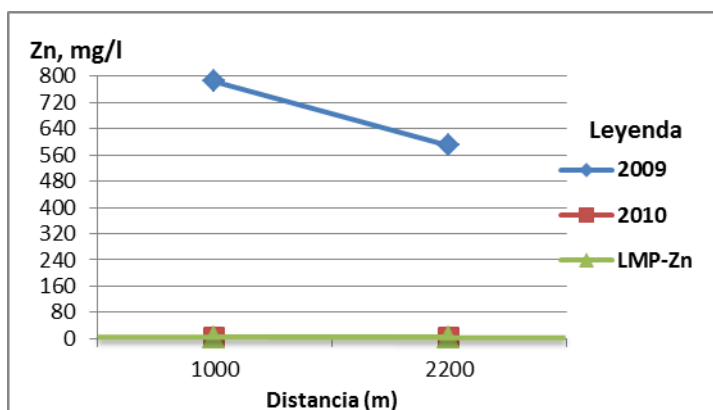
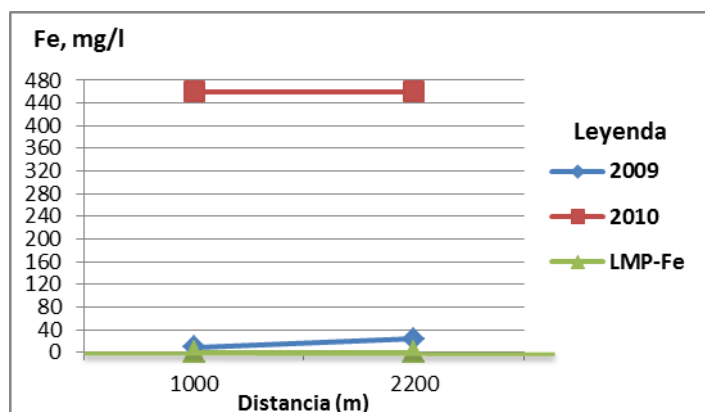


Figura III.9. Comportamiento de los EPT (Fe, Zn, Pb,) en las aguas superficiales con el aumento de la distancia de la cantera en las campañas del 2009 y 2010.

Un ejemplo que confirma la contaminación de las aguas superficiales y otros componentes del medio ambiente como suelo, paisaje, etc. se presenta en las llanuras de inundación de las corrientes que drenan desde la cantera y atraviesan el puente de la carretera Santa Lucía- Minas. Esta área ha evolucionado en el tiempo como se demuestra en el Anexo textual 12. En un primer momento, en la etapa comprendida de 1979-1985

cuando se realizaba la extracción del yacimiento y se neutralizaban correctamente las aguas ácidas, los efluentes de aguas superficiales corrían río abajo por el drenaje natural sin existir depósitos de sedimentos en las riberas del río. En una segunda etapa, comprendida desde 1985 hasta la actualidad, se observa la contaminación del suelo, en particular, grandes volúmenes de sedimentos se han depositado en la ribera del río por una extensión de 1.8 km y un ancho promedio de 100 m, la acción del drenaje ácido de minas ha inhibido el desarrollo de la vegetación.

Por otra parte, el estudio de las zonas afectadas por el DAM en los últimos 10 años (2004, 2009 y 2013) (Anexos gráficos 3) permite confirmar que, las afectaciones se han mantenido y las condiciones ambientales no se han recuperado a pesar del tiempo transcurrido desde el cese de las operaciones mineras y las medidas tomadas (Anexos gráficos 4). Una estimación preliminar de las pérdidas provocadas por la contaminación de las tierras agrícolas se presenta en el Anexo textual 12.

III.4. Sedimentos.

A las muestras de los sedimentos de la última campaña (6 muestras) se les realizaron los análisis químicos, granulométricos y mineralógicos. Para dar respuesta al objetivo propuesto se utilizaron también, los resultados de 13 muestras pertenecientes a estudios anteriores (Anexo textual 9).

El análisis del comportamiento de los EPT en los sedimentos respecto a la distancia de la fuente contaminante desde la campaña del año 2009 hasta la del 2012, se muestra en la Figura III.10. y Anexo gráfico 6.

El análisis del comportamiento de los elementos potencialmente tóxicos con el aumento de la distancia desde la cantera demostró, la disminución de los valores de Pb y Zn desde 250 m hasta 1000 m y el aumento de Cu en el año 2010, pero en el año 2012 el comportamiento de los cuatro elementos (Pb, Zn, Cu y Cd) fue similar, o sea, disminución desde 250 m hasta 1000 m y el aumento desde 1000 m hasta 1800 m, siendo sus concentraciones superiores del Valor Límite (VL) establecido por la norma en todos los años. Otro elemento importante a destacar, son las altas concentraciones que se reportan en los sedimentos que se encuentran en la superficie de la cantera o en sus proximidades, probablemente vinculadas con partículas de menas liberadas durante la explotación. Al igual que ocurre con las aguas superficiales se manifiesta una reducción de los contenidos con el incremento de la distancia a la cantera.

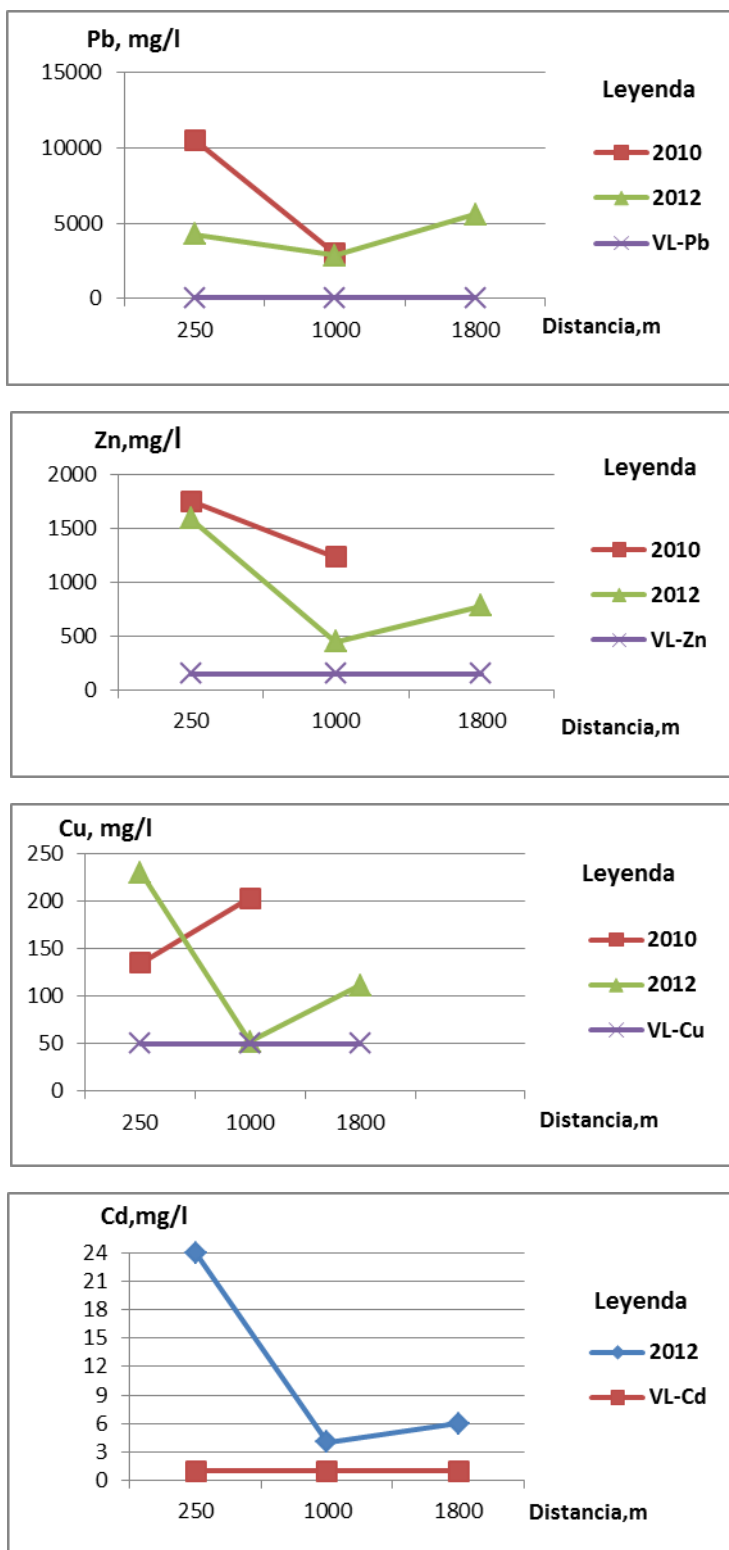
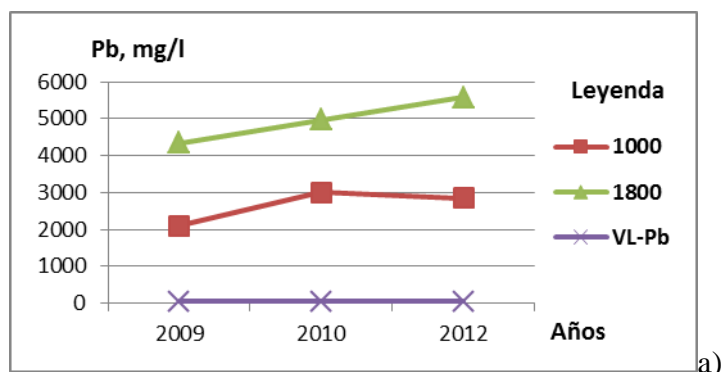


Figura III.10. Comportamiento de Pb (a), Zn (b), Cu (c) y Cd (d) en los sedimentos con el aumento de la distancia desde la cantera.

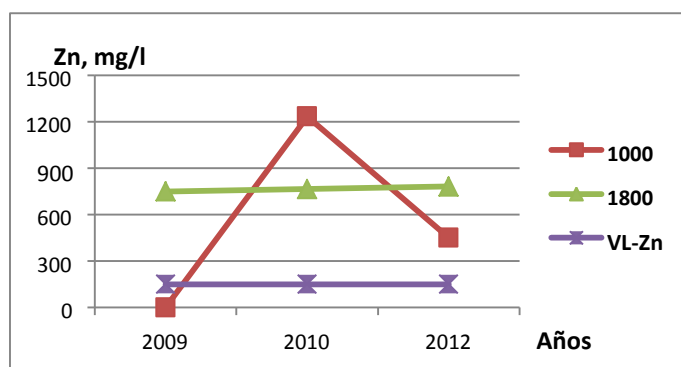
En la distancia de 1000 m de la cantera se observó el aumento de las concentraciones de Pb y Zn desde el año 2009 hasta el 2010 y la disminución del Cu, pero desde el año 2010

hasta el 2012 el Pb y Zn disminuyen y aumenta el Cu. En la distancia de 1800 m los tres elementos tienen el comportamiento igual, un ligero aumento desde el año 2009 hasta el 2012 (Figura III.11).

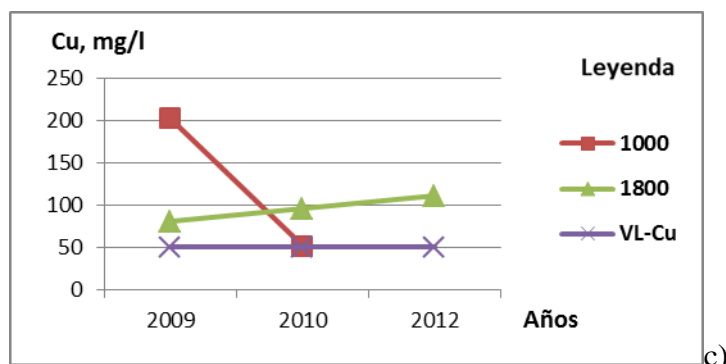
Estos resultados muestran que los materiales arrastrados y transportados por las corrientes superficiales constituyen fuentes de EPT que pueden contaminar el medio ambiente.



a)



b)



c)

Figura III.11. Comportamiento de Pb (a), Zn (b) y Cu (c) en los sedimentos a las distancias de 1000 m y 1800 m desde el año 2009 hasta el 2012.

III.4.1. Granulometría de los sedimentos.

Los ríos son en gran parte los mayores agentes de transporte de sedimentos hacia los lagos, mares y océanos. Durante el transporte, el material es seleccionado de acuerdo al

tamaño de las partículas y a la energía cinética de la corriente. Las rocas de mayor dimensión y fragmentos de minerales formarán depósitos de gravas. Los minerales resistentes, como el cuarzo, formarán, en fracción menor, depósitos de arena. Finalmente, las partículas más pequeñas como las arcillas constituirán depósitos de lodo (GAMMA S.A, 2013).

La cantera de Santa Lucía al estar ubicada en una zona elevada, está expuesta a intensos procesos de erosión-denudación que favorecen la traslación de partículas (sólidas, coloidales e iones) hacia el noreste, resultando las corrientes fluviales las portadoras de la carga contaminante. Por otra parte, la zona llana o de pendiente plana se convierte en receptora del material desplazado por la pendiente o arrastrado por las corrientes fluviales, constituyéndose en una zona de acumulación de sedimentos húmedos con contenidos elevados de metales pesados.

Se realizaron los análisis granulométricos a las 6 muestras de sedimentos de la campaña del año 2012 y sus resultados (Anexo textual 10) se contrastaron con el perfil longitudinal de la corriente que fluye de la cantera.

Los datos granulométricos se procesaron para clasificar los sedimentos en grupos texturales y determinar el grado de selección de los mismos (Tabla III.15).

Tabla III.15. Clasificación y el grado de selección de los sedimentos.

Muestra	Clasificación	Selección
M-1	Arena gravosa limosa- Gravelly Muddy Sand	Muy mal seleccionada
M-2	Arena gravosa limosa- Gravelly Muddy Sand	Muy mal seleccionada
M-3	Limo-Mud	Muy mal seleccionada
M-4	Limo arenoso levemente gravosoSlightly Gravelly Sandy Mud	Muy mal seleccionada
M-8	Arena gravosa limosa Gravelly Muddy Sand	Muy mal seleccionada
M-9	Arena gravosa limosa Muddy Sandy Gravel	Muy mal seleccionada

Se construyó un perfil representativo del arroyo de la cantera de Santa Lucía, en el cual la caracterización de la pendiente permite identificar los sectores donde prevalecen los procesos erosivos y los acumulativos (sedimentación).

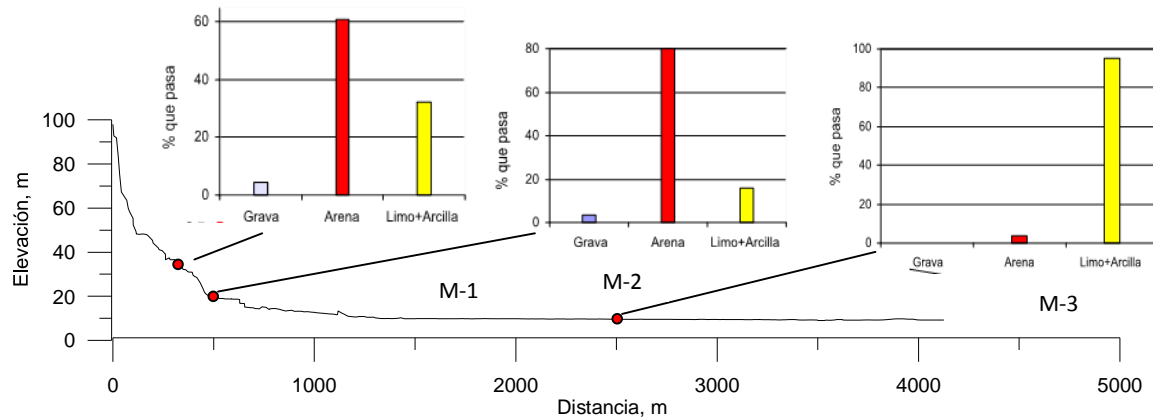


Figura III.12. Perfil longitudinal del arroyo de la cantera Santa Lucía con los resultados del análisis granulométrico.

En la Figura III.12. se representa el perfil que corresponde con el drenaje de la cantera Santa Lucía, donde se observa en un tramo de 2 km, el comportamiento de la granulometría de los sedimentos acumulados producto de la acción de los flujos de esta corriente. En el punto M-1 que corresponde a la base de la elevación, donde las corrientes de aguas superficiales son ocasionales, vinculadas a las precipitaciones, se destaca un alto contenido de fragmentos de rocas gruesas hasta 50 centímetros de diámetro que descansan sobre las rocas de la formación San Cayetano y bloques de óxidos de hierro con mineralización sulfurosa, característicos del sombrero de hierro. En correspondencia con esto, se puede observar que, en la granulometría predomina la arena gruesa (Figura III.12). Esta gradación de los suelos va cambiando aguas abajo del perfil hasta el punto M-2, donde ya se nota un cambio significativo en la granulometría asociado a un cambio de pendiente y a la afluencia de otros arroyos desde el norte; en este caso se comienza a observar un incremento de los procesos de acumulación, al elevarse el porcentaje de la fracción fina de la arena, y de los limos y arcillas. En el punto M-3, cercano al puente de la carretera que une a Santa Lucía con Matahambre se observaron las fracciones más finas (limo y arcilla) de sedimentos, y en los árboles se aprecian las marcas, a la altura de 1 m que denotan los niveles que han alcanzado las inundaciones en épocas de fuertes lluvias. En general, los procesos de erosión y deposición de los sedimentos asociados a los flujos fluviales y pluviales, a los que se debe la migración de los elementos químicos, están

determinados por la intensidad del escurrimiento como principal fenómeno que condiciona estos procesos. Este fenómeno para la localidad se hace muy intenso, inclusive con lluvias no muy fuertes, donde juegan un papel destacado la pendiente y la baja permeabilidad de los suelos.

Indudablemente que las partes llanas o de pendiente plana constituyen una zona de acumulación de sedimentos húmedos de granulometría fina (limo y arcilla) que favorecen contenidos elevados de metales pesados (retención o inmovilización de los EPT), como queda demostrado por los análisis químicos y el deterioro ambiental de la llanura de inundación.

III.4.2. Análisis mineralógico de los sedimentos.

Se utilizaron los datos de los resultados del análisis mineralógico de los sedimentos de las campañas de los años 2009, 2010 y 2011 que están resumidos en la Tabla III.16.

Tabla III.16. Composición mineralógica de los sedimentos realizada en diferentes campañas.

Año	Muestra	Minerales
2009	s1 y s2	Cuarzo, illita, hematita, goethita, magnetita, yeso, bidantita.
2010	M-5, M-6, M-7, M-8	Cuarzo, hematita, goethita, barita, pirita, hidromica, jarosita, esmectita, material amorfo.
2011	M-2, M-3, M-4, M5, M-6	Cuarzo, hematita, goethita, barita, pirita, hidromica, jarosita, esmectita, melanterita, caolinita, material amorfo.

Los sedimentos están formados por los minerales de ganga de alta resistencia como el cuarzo, minerales arcillosos y minerales secundarios como los óxidos e hidróxidos de Fe, yeso y jarosita. El único sulfuro primario que logra sobrevivir el transporte es la pirita, lo cual es lógico esperar si se considera la abundancia de este mineral y las diferentes formas cristalinas en que se manifiesta (cúbica, globular, piritoédrica, etc.). La presencia de barita en los sedimentos es resultado de su alta densidad y resistencia (mineral pesado), lo cual favorece su migración mecánica.

III.5. Factores que provocan la migración de los elementos potencialmente tóxicos.

El principal factor que, provoca la migración de los metales pesados en el área está dado por los procesos de oxidación de los sulfuros metálicos presentes en la zona de oxidación y que generan drenaje ácido de mina (DAM), afectando desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo a los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas.

Producto a los trabajos de ejecución, explotación y abandono quedaron al descubierto grandes volúmenes de mena sulfurosa, que bajo la acción de los agentes hipergénicos han provocado la oxidación (principalmente de la pirita) creándose condiciones de liberación de ácido sulfúrico y de Fe^{3+} , este hierro libre pasa a una forma más estable, formando óxidos de hierro (FeOOH), como la goethita, hematina, y sulfatos como jarosita, pero por otra parte, el ácido sulfúrico que se genera provoca el descenso del pH y esto hace que otros sulfuros metálicos se oxiden, con la subsecuente liberación de sus metales pesados como el plomo (presente en la galena (PbS), cadmio y el arsénico.

Por esto y por las características propias del tipo genético de yacimiento, (sulfuroso), en el área de estudio el proceso del DAM se verá favorecido en gran medida y pasará a ser el principal factor que provoca la migración de los metales pesados.

De manera general se puede decir, que la principal forma de incorporación de los metales en nuestra área, está dado por el transporte fluvial de los residuos mineros de la propia zona de oxidación, a través de arroyos y cañadas que drenan el área. Esto ocurre fundamentalmente durante la época de lluvia, transportándose las partículas de los contaminantes desde los taludes hacia zonas bajas. El agua residual, proveniente de la zona de oxidación, provoca la incorporación de metales pesados a los arroyuelos y ríos, los cuales se ven favorecidos por el DAM, generado por los procesos de oxidación que ocurren en este tipo de roca con alto contenido de sulfuros metálicos una vez expuestos a la superficie.

CONCLUSIONES

- El estudio del comportamiento de la acidez (pH) de las aguas superficiales por más de 10 años permitió establecer que la generación del DAM se ha mantenido en el tiempo, los valores de pH fluctuaron entre 2.0-6.8 con valores medios de 3.1-4.6. El deterioro ambiental del área de estudio ha sido continuo y el mismo no ha cesado a pesar de las medidas que se han tomado para revertir la situación.
- La llanura de inundación de las corrientes superficiales que drenan de la cantera han sido muy afectadas por la contaminación ambiental. El análisis de su desarrollo a lo largo de los últimos años empleando técnicas de sensores remotos permitió confirmar que las afectaciones se han mantenido y las condiciones ambientales no se han recuperado. Las amplias zonas desprovistas de vegetación y la inutilización de tierras agrícolas son consecuencia de las escorrentías superficiales ácidas.
- Los EPT en las aguas superficiales muestran concentraciones muy por encima de los LMA establecidos por la NC 827:2012 Agua potable-Requisitos sanitarios. Como regularidad las concentraciones son variables tanto en el espacio como en el tiempo. Sin embargo, se puede establecer a la distancia de 1000 m el aumento de los contenidos de Fe y la disminución de Zn y Cd desde el año 1998 hasta el 2009, y a la distancia de 2200 m se observó la disminución de Fe y Pb y el aumento de Zn y Cd respecto a la última campaña.
- Aunque algunos autores consideran que las concentraciones de los EPT como As, Pb y Ba en los efluentes son relativamente bajas, los datos obtenidos en los años 2010 y 2012 muestran concentraciones elevadas de estos contaminantes, lo que indica que, ellos son lixiviados y movilizados a partir de los sulfuros que los contienen. La atenuación natural de estos elementos a partir de sulfatos formados por la oxidación de los sulfuros no garantiza la total retención de los EPT liberados.
- En la composición mineralógica de los tres tipos de menas que afloran en las paredes de la cantera el porcentaje mayor corresponde a la pirita desde 60% hasta 85% y en menor medida a esfalerita, galena, marcasita y pirrotina. La oxidación completa de los sulfuros explica los valores muy bajos de pH y las altas concentraciones de Fe y Zn en los efluentes de mina. No se detectan minerales de Cd ni As, por lo que estos metales deben aparecer en la estructura cristalina de otros sulfuros como esfalerita y la pirita.

- El análisis de fases de las menas de Pb y Zn, tomadas en los frentes de la cantera, reveló altos contenidos de minerales secundarios (sulfatos y óxidos), producidos por la oxidación de los sulfuros, lo cual demuestra la rapidez con que se altera la mineralización sulfurosa al entrar en contacto con el aire y el agua.
- Por las características propias del tipo genético del yacimiento con menas muy ricas en piritas y con granulometría muy fina, donde el proceso de drenaje ácido de mina constituye el principal factor que provoca la lixiviación y migración de los metales pesados, la contaminación ambiental no cesará hasta tanto no se evite la interacción de las menas sulfurosas de las escombreras, paredes y fondo de la cantera con los agentes del intemperismo, o se logre neutralizar convenientemente los efluentes de minas y aguas superficiales que drenan del foco de contaminación.

RECOMENDACIONES

- Actualizar el “Proyecto de Rehabilitación del Yacimiento Santa Lucía” y ejecutar las medidas propuestas en él.
- Como está establecido en la Ley No. 81 del Medio Ambiente de 1997 y Ley No. 76 de Minas de 1995, en su Artículo 41, la Empresa Geominera Pinar del Río debe trabajar por cumplir la mitigación, control y rehabilitación para así compensar el impacto derivado de la explotación del yacimiento Santa Lucía.
- Para el tratamiento del DAM provocado por la explotación del yacimiento Santa Lucía se propone la aplicación de construcción de humedales artificiales, que han alcanzado resultados positivos en varios países del mundo (América del Norte, Sudáfrica y Australia).
- Proyectar una red de monitoreo para el seguimiento de la contaminación provocada por la explotación del yacimiento Santa Lucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, A. (2005), “Recuperación ambiental del área de préstamo Los Cayuelos, Guanahacabibes”, Tesis en opción al grado de Máster. Mención Geología Ambiental. Universidad Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba.
- Alonso J.A., Cabrera Ll., Pinto A., Cozzi G., Delgado B., Gallardo D., Valdivia G., Casanova A. y Díaz A. (2011). “Mineralogía Ambiental de Procesos de Drenaje Ácido de Mina en Residuales del Pasivo Minero Santa Lucía y su Vinculación con Elementos Potencialmente Tóxicos y Geodisponibles”, INFOMIN, Vol.3, No1, C. Habana, Cuba, 15-24.
- Atlas Climático de Cuba (1987). Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, Instituto de Meteorología, La Habana. 13 p.
- Borhidi A. (1996). “Phytogeography and vegetation ecology of Cuba”, Academia Kiadó, Budapest.
- Bralower e Iturralde–Vinen M., (1997). “Micropaleontological dating of the collision between the North American Plate and the Greater Antilles Arc in Western Cuba. Palaios”, vol.12, p. 133-150
- Burov, V., Martínez, D., Yusainov, Y., Fernández de Lara, R., Dervenev, V., Upensky, A. (1985). “Informe de los trabajos de levantamiento geológico escala 1:50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río en 1981-85 (Hojas 3382 I-IV, 3383 I, II, III, 3384 II, 3482 IV a-c, 3483 III c)”, Empresa Geominera Pinar del Río, 389 pp.
- Camprodon et.al., (2001). “Conservación de la biodiversidad y gestión forestal. Su aplicación en la fauna vertebrada”, Edición Universidad de Barcelona, 123p.
- CESIGMA SA, (2007). “Estudio de Impacto Ambiental Proyecto de Explotación del yacimiento Oro Castellano”.
- Delgado D. B., Millan M.E, Lubían M. T, Cobo M. y Cortés M.N. (2010), “Proyecto Identificación de Pasivos Ambientales Mineros y Remediación Ambiental del Drenaje Ácido en Santa Lucía”, CIPIMM, 16 p.
- Díaz, J. (1989). Internal Relief Map, Cuban National Atlas, National Geography Institute of Spain, Section IV Relief, (iv.14), Madrid.
- Díaz C. A. y otros, (1993).” Informe Exploración Orientativa de cobre Castellano (objetivo cancelado Grupo C)”, Empresa Geominera Pinar del Río.

- Dominguez, L. E. (2014). “Comportamiento de los elementos potencialmente tóxicos en aguas y sedimentos de zonas aledañas al yacimiento Júcaro, Bahía Honda”, Trabajo de Diploma, Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Cuba, 75p.
- Esquivel L, (2006). “Responsabilidad y Sostenibilidad Ecológica. Una ética para la vida”, Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona, España, 307 p.
- Gallardo D., Cabrera I., Bruguera N. y Madrazo F.(2013) “Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río”, Avances, vol.15, No1, Pinar del Río, Cuba, 94-108.
- GAMMA, (2013). “Actualización del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Explotación Minero Metalúrgica de Plomo y Zinc Castellanos, Santa Lucía, Pinar del Río”, 286 p.
- Gamonal, P. (2009). “Tratamiento de drenaje ácido de minas en humedales construidos”, IHE Delft, Perú.
- García, C. (2004). “Impacto y Riesgo Ambiental de los Residuos Mineros” Metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión”, Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Minera, Geología y Cartografía, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 424p.
- García, Ch. (2011). “Estudio Ambiental de las Áreas Afectadas por la Actividad Minera del Depósito Santa Lucía”, Trabajo de Diploma, Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, Cuba, 91 p.
- Gómez Y., (2002). “Proyecto de Rehabilitación Yacimiento Santa Lucía”, Empresa Geominera Pinar del Río,
- Gómez Y., (2010). “Actualización del Proyecto de Rehabilitación Yacimiento Santa Lucía”, Empresa Geominera Pinar del Río.
- Hernández G., E. (2010). “Gestión de Pasivos Mineros del Yacimiento Castellanos”, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Cuba, 80 p.
- Hinojosa C. M., (2002). “Drenaje Acido de San Quintín: Estudio y Alternativas de Remediación”, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén.
- Instituto de Suelos (1999). Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Edit. AGRINFOR, 64 p.
- Iturralde-Vinent, M.A. (1998). “Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba: Acta Geológica Hispánica”, Vol.33, 9-56.

- Jaula B., (2011). “Medio Ambiente, Desarrollo Sostenible y una Perspectiva Socialista desde Cuba”, Editorial J. Martí, La Habana.
- Klimchuk O., Díaz G.C. y otros, (1999), “Informe Estudio Geólogo Ambiental Integral del Municipio Minas de Matahambre”, Empresa Geominera Pinar del Río, 81p.
- Klimchuk, O., Estévez C. y Hernández, E. (2014), “Evolución ambiental en las áreas afectadas por la contaminación del yacimiento Santa Lucía, Pinar del Río”, (Inédito), 9 p.
- Lazárraga M.L.(2008), “Afectación de una presa de jales de sulfuros masivos a la hidrogeoquímica de los escurrimientos superficiales aledaños”, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra (Geología Ambiental), Universidad Nacional Autónoma de México, México, 208 p.
- Ley No 81/97. Ley de Medio Ambiente.
- Ley No.76/95.Ley de Mina.
- López et. al. (2014), “Nota técnica mineralogía, geoquímica y algunas medidas de protección ambiental en yacimientos de oro de Cuba”, UNEXPO, Venezuela.
- Madrazo E. F. (2008). “Plan de Acción para mitigar los impactos ambientales negativos generados por la actividad minero-metalúrgica en la zona de Santa Lucía”, Tesis de Maestría en Gestión Ambiental, Universidad Hermanos Saíz Montes de Oca, Pinar del Río, Cuba, 86p.
- Madrazo E. F. (2009), “Análisis de los impactos negativos generados por la actividad minero-metalúrgica en la zona de Santa Lucía”.
- Martínez, M., (2005), “Caracterización de las fuentes contaminantes y zonas de riesgos en la región minera Santa Lucía – Matahambre”, Tesis de Maestría en Geología. Universidad Hermanos Saíz Montes de Oca, Pinar del Río, Cuba.
- Moreno E. (2010), “Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías”, Tesis Doctoral, Dpto. De Química Agrícola, Universidad Autónoma de Madrid.
- Norma Cubana NC 27:2012 Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado- Especificaciones.
- Norma Cubana NC 827:2012 Agua potable-Requisitos sanitarios.
- ONE (2012): Anuario Estadístico de Minas de Matahambre. Disponible en <http://www.one.cu/aed2011/21Pinar%20del%20Rio/Municipios/03%20Minas%20de%20Matahambre/Index.htm>

- Peláez, R. (1982). “Estudio hidrogeológico e ingeniero-geológico del Campo Mineral Las Uniones), Empresa Geominera Pinar del Río.
- Ponce S. N. (1997). “Evaluación y Predicción de Impactos Ambientales en la minería (Informe del Proyecto I+D).”, IGP.
- Real Decreto 1310/1990. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España. Resultados de monitoreo de las aguas superficiales y efluentes de minas de los años 2009-2014. Empresa Geominera Pinar del Río, UEB Geólogo Mineros.
- Romero E. M. (2012), “Modelación Descriptiva Preliminar del Yacimiento Santa Lucía”, Tesis de Diploma, Departamento de Geología, Universidad Pinar del Río, Cuba, 111 p.
- Romero F.M., Prol L. R, Canet C., Núñez A.L. y Pérez V.R. (2010), “Acid Drainage at the Inactive Santa Lucia Mine, Western Cuba: Natural Attenuation of Arsenic, Barium and Lead, and Geochemical Behavior of Rare Earth Elements”, *Applied Geochemistry* 25 (2010), 716-727.
- Sánchez Y. (2009), “Análisis del comportamiento de los metales pesados en el Campo Metalífero Matahambre”, Trabajo de Diploma, Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río, 85 p.
- Urquiola A.J., Novo R. y Palacios M.E. (1993). “Informe de Línea Base Yacimiento Castellano-Santa Lucía”, Empresa Geominera Pinar del Río.
- Vologdin N., (1963), “Estructura geológica y minerales útiles de la parte noroeste de la provincia Pinar del Río”, Empresa Geominera Pinar del Río.

ANEXOS

Anexo textual 1. Laboratorios donde se realizaron los análisis químicos de varias campañas.

Año	Laboratorio	Elementos determinados			
		Aguas superficiales	Efluentes	Sedimentos	Menas
2012	Laboratorio Central de Rocas y Minerales (LACEMI)	Cu, Cr, Ba, Cd, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg, As, Al, K, Mg, Na, SO ₄ , NH ₄ , Ca, Cl, NO ₂ , NO ₃ , pH.	Cu, Cr, Ba, Cd, Fe, Ni, Pb, Zn, As, Al, NH ₄ , Ca, Co, Hg y pH.	Fe, Ba, Pb, Zn, As, Cu, Al, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Ni, Sr.	Cu, Cr, Ba, Cd, Pb, Zn, BaSO ₄ , As, Co, Hg, Mo, Au, Ag, S, Bi, Ga, Ge, In, Sd, Se, Sr, Te, Ti, P.
2011	CIPIMM	pH.	pH.	Al, Mn, Pb, Zn, Fe, Mg.	Al, Mn, Pb, Zn, Fe, Mg, Ca.
2010	CIPIMM	Ba, Fe, Zn, Pb, St, pH	Cu, Cr, Ba, Cd, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, As, Al, K, Mg, Na, SO ₄ , NH ₄ , Ca, NO ₂ + NO ₃ , Co, Au, Ag y pH	Cu, Co, Cr, Ba, Cd, Fe, Mn, Pb, Zn, As, St, Al, Mg, Na, Ca, Ag.	
2009	Canadá y la Universidad Nacional Autónoma de México	Ba, Cu, Zn, Pb, Fe, Mg, Mn, Al, Na, SO ₄ , As, Cd, Ca, Si, pH	Cu, Cd, As, Fe, Mn, Pb, Zn, Ba, Al, Ca, K, Mg, SO ₄ y pH	Fe, Ba, Pb, Zn, As, Cu.	Zn, Pb, Fe, Ba, As.

1997-98	Laboratorio Central de Rocas y Minerales (LACEMI)	Cu, Cr, Ba, Cd, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg, As, Sr, Al, K, Mg, Na, SO ₄ , NH ₄ , Ca, Cl, NO ₂ , NO ₃ , pH	Cu, Cd, Co, Cr, As, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Ba, Al, Ca, K, Mg, y pH		
---------	---	---	---	--	--

Anexo textual 2. Ubicación y descripción de las muestras de efluentes de minas de diferentes campañas.

No	Año	Punto	Época	Descripción	Coordenadas	
					x	y
1	2012	1a	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
2	2012	1-S	Lluvia	Socavón	196090	315780
3	2012	2-S	Seca	Socavón	196090	315780
4	2012	1-C	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
5	2012	2-C	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840
6	2012	3-C	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840
7	2012	4-C	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
8	2012	1-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
9	2012	2-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
10	2012	3-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
11	2012	4-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
12	2012	1-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
13	2012	2-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
14	2012	3-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
15	2012	4-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
16	2011	M-1A	Seca	Cantera Santa Lucía	195945	316110
17	2011	M-2A	Seca	Salida del socavón	196090	315780
18	2011	M-3A	Seca	Lateral del socavón	196090	315780
19	2011	1-S	Seca	Socavón	196090	315780
20	2011	2-S	Lluvia	Socavón	196090	315780
21	2011	1-C	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
22	2011	2-C	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840

23	2011	1-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
24	2011	2-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
25	2011	3-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
26	2011	4-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
27	2011	1-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
28	2011	2-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
29	2011	3-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
30	2011	4-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
31	2010	MSTL-1	Seca	Cantera Santa Lucía	196385	315840
32	2010	MSTL-2	Seca	Depósito de barita	196320	315940
33	2010	MSTL-3	Seca	Socavón	196090	315780
34	2010	MSTL-4	Seca	Alcantarilla	196100	315900
35	2010	M-1Am	Seca	Cantera Santa Lucía	196385	315840
36	2010	M-2Am	Seca	Salida del socavón	196090	315780
37	2010	M-3Am	Seca	Lateral del socavón	196090	315780
38	2010	13	Seca	Socavón	196090	315780
39	2010	15	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
40	2010	18	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
41	2010	1-S	Seca	Socavón	196090	315780
42	2010	2-S	Lluvia	Socavón	196090	315780
43	2010	3-S	Lluvia	Socavón	196090	315780
44	2010	1-C	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
45	2010	2-C	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840
46	2010	3-C	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840
47	2010	1-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
48	2010	2-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
49	2010	3-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940

50	2010	1-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
51	2010	2-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
52	2010	3-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
53	2009	L1	Seca	Yacimiento Santa Lucía	196320	315940
54	2009	L2	Seca	Yacimiento Santa Lucía	196320	315945
55	2009	L3	Seca	Yacimiento Santa Lucía	196385	315850
56	2009	5	Seca	Efluente de mina	196239	315673
57	2009	6	Seca	Efluente de mina	196314	315760
58	2009	7	Seca	Efluente de mina	196391	315931
59	2009	1-S	Seca	Socavón	196090	315780
60	2009	2-S	Seca	Socavón	196090	315780
61	2009	3-S	Lluvia	Socavón	196090	315780
62	2009	1-C	Seca	Canal de drenaje	196385	315840
63	2009	1-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
64	2009	2-D	Seca	Escombrera de barita	196320	315940
65	2009	3-D	Lluvia	Escombrera de barita	196320	315940
66	2009	1-A	Seca	Alcantarilla	196100	315900
67	2009	2-A	Lluvia	Alcantarilla	196100	315900
68	199798	11	Seca	Drenaje del socavón	196090	315780
69	199798	9	Lluvia	Canal de drenaje	196385	315840
70	199798	10	Lluvia	Salida del socavón	196090	315780
71	199798	11A	Lluvia	Al lado del depósito de mineral oxidado	198350	317450

Anexo textual 3. Valores de pH de los efluentes de minas de varias campañas.

No	Año	Punto	pH
1	2014	7A	2.1
2	2014	7D	2.2
3	2013	2S	2.7
4	2013	5C	2.6
5	2013	5D	2.3
6	2013	6D	2.0
7	2013	5A	2.6
8	2013	6A	2.8
9	2012	1a	2.7
10	2012	1S	2.6
11	2012	1C	1.8
12	2012	2C	2.2
13	2012	3C	2.2
14	2012	4C	2.2
15	2012	1D	1.3
16	2012	2D	1.8
17	2012	3D	2.1
18	2012	4D	1.4
19	2012	1A	1.5
20	2012	2A	2.4
21	2012	3A	2.1
22	2012	4A	2.0
23	2011	M-1A	3.0
24	2011	M-2A	3.0
25	2011	M-3A	3.4
26	2011	1S	2.6

27	2011	2S	2.5
28	2011	1C	2.9
29	2011	2C	2.0
30	2011	1D	2.3
31	2011	2D	2.2
32	2011	3D	1.2
33	2011	4D	2.0
34	2011	1A	2.3
35	2011	2A	3.0
36	2011	3A	1.8
37	2011	4A	2.2
38	2010	M-1Am	2.7
39	2010	M-2Am	3.0
40	2010	M-3Am	2.9
41	2010	MSTL-1	2.4
42	2010	MSTL-2	2.1
43	2010	MSTL-3	2.9
44	2010	MSTL-4	2.1
45	2010	1S	2.7
46	2010	2S	2.8
47	2010	3S	2.8
48	2010	1C	3.1
49	2010	2C	2.3
50	2010	3C	2.3
51	2010	1D	2.2
52	2010	2D	1.8
53	2010	3D	2.1
54	2010	1A	3.0
55	2010	2A	2.0

56	2010	3A	3.1
57	2009	L1	2.6
58	2009	L2	2.7
59	2009	L3	2.5
60	2007	5	2.6
61	2007	6	2.7
62	2007	7	2.5
63	2009	1S	3.9
64	2009	2S	2.9
65	2009	3S	2.4
66	2009	1C	3.8
67	2009	1D	2.2
68	2009	2D	2.1
69	2009	3D	2.1
70	2009	1A	2.1
71	2009	2A	2.2
72	1997	9	2.9
73	1997	10	2.2
74	1997	11A	2.8
75	1998	11	2.5

Anexo textual 4. Ubicación y descripción de las muestras de aguas superficiales de diferentes campañas.

<i>No</i>	<i>Año</i>	<i>Punto</i>	<i>Epoca</i>	<i>Descripción</i>	<i>Coordenadas</i>	
					<i>x</i>	<i>y</i>
1	2014	5P	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197800	317600
2	2013	4P	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197850	317410
3	2012	6	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197820	317358
4	2012	7	Seca	Río Las Coloradas	197513	314945
5	2012	1P	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197500	317525
6	2012	2P	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197600	317360
7	2012	3P	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197720	317290
8	2011	1TC	Seca	Aguas superficiales	195800	316609
9	2011	2	Seca	Aguas superficiales	195947	316708
10	2011	3	Seca	Aguas superficiales	196061	316663
11	2011	4	Seca	Aguas superficiales	196302	315710
12	2011	5	Seca	Aguas superficiales	196362	315832
13	2011	6	Seca	Aguas superficiales	196321	315947
14	2011	7	Seca	Aguas superficiales	196333	315977
15	2011	8	Seca	Aguas superficiales	196283	316071
16	2011	9	Seca	Aguas superficiales	196357	316180
17	2011	10	Seca	Aguas superficiales	196686	316373
18	2011	11	Seca	Aguas superficiales	196829	316518
19	2011	12	Seca	Aguas superficiales	197218	316849
20	2011	13	Seca	Aguas superficiales	197670	317185
21	2011	14	Seca	Aguas superficiales	197796	317339

22	2011	15	Seca	Aguas superficiales	197945	317428
23	2011	16	Seca	Aguas superficiales	198273	317779
24	2011	1P	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197500	317525
25	2011	2P	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197600	317360
26	2011	3P	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197720	317290
27	2011	4P	Seca	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197850	317410
28	2010	M-9A	Seca	Arroyo Santa Lucía	197100	316550
29	2010	M-10A	Seca	Río Santa Lucía	198150	318000
30	2009	A1	Seca	Aguas superficiales	195775	316625
31	2009	A2	Seca	Aguas superficiales	197250	316975
32	2009	A3	Seca	Puente de la carretera Minas-Santa Lucía	197525	317125
33	2009	A4	Seca	Aguas superficiales	198050	317925
34	2009	1T	Seca	Aguas superficiales	195798	316642
35	2009	2	Seca	Aguas superficiales	197270	316965
36	2009	3	Seca	Aguas superficiales	197550	317164
37	2009	4	Seca	Aguas superficiales	198072	317941
38	1997-98	1	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	198170	314670
39	1997-98	2	Lluvia	Corriente temporal de parteaguas sur	198420	314400
40	1997-98	3	Lluvia	Corriente temporal de parteaguas sur	198250	314500
41	1997-98	4	Lluvia	Corriente temporal de parteaguas Santa Lucía	197850	314750
42	1997-98	5	Lluvia	Intersección de dos corrientes	197400	314920

43	1997 -98	7	Lluvia	Curso superior del río S.Lucia, 250m del punto1	198500	315000
44	1997 -98	8	Lluvia	Agua estancada del río Santa Lucía(puente)	198300	317400
45	1997 -98	12b	Lluvia	Aforo en el río S Lucía	198200	318000
46	1997 -98	12a	Lluvia	Puente de la carretera Minas-S.Lucía	197800	317500

Anexo textual 5. Resultados de pH de las muestras de aguas superficiales de diferentes campañas.

No	Año	# de muestra	pH
1	2014	5P	5.4
2	2013	4P	6.0
3	2012	6	2.3
4	2012	7	6.7
5	2012	1P	2.0
6	2012	2P	2.9
7	2012	3P	6.7
8	2011	1TC	2.6
9	2011	2	2.5
10	2011	3	2.8
11	2011	4	2.4
12	2011	5	2.8
13	2011	6	2.7
14	2011	7	2.7
15	2011	8	2.7
16	2011	9	2.6
17	2011	10	2.3
18	2011	11	2.5
19	2011	12	2.6
20	2011	13	2.4
21	2011	14	3.3
22	2011	15	2.6
23	2011	16	6.8
24	2011	1P	5.5
25	2011	2P	5.0
26	2011	3P	2.1
27	2011	4P	4.1
28	2010	M-9A	3.7

29	2010	M-10A	4.2
30	2009	A1	2.6
31	2009	A2	2.8
32	2009	A3	2.5
33	2009	A4	6.4
34	2009	1T	2.6
35	2009	2	2.8
36	2009	3	2.5
37	2009	4	6.4
38	1997	1	5.7
39	1997	2	6.3
40	1997	3	6.3
41	1997	4	3.2
42	1997	5	2.7
43	1997	7	5.9
44	1997	8	2.2
45	1997	12b	3.1
46	1998	12a	2.8

Anexo textual 6. Comportamiento de los EPT en las aguas superficiales a las distancias de 1000 m y 2200 m en varias campañas.

<i>Distancia</i>	<i>1998</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>LMP-Fe</i>
1000	-	9	460	-	0.3
2200	67	24	460	16	0.3
<i>Distancia</i>	<i>1998</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>LMP-Zn</i>
1000	-	784	1.7	-	5
2200	227	589	2.1	181	5
<i>Distancia</i>	<i>1998</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>LMP-Al</i>
1000	-	15.4	-	-	0.2
2200	20.2	22	-	127	0.2
<i>Distancia</i>	<i>1998</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>LMP-Pb</i>
1000	-	1.18	0.4	-	0.05
2200	0.34	2.1	0.4	0.05	0.05
<i>Distancia</i>	<i>1998</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	<i>LMP-Cd</i>
1000	-	0.011	-	-	0.005
2200	1.59	0.007	-	0.7	0.005

<i>Año</i>	<i>1000</i>	<i>2200</i>	<i>LMP-Fe</i>
1998	-	67	0.3
2009	9	24	0.3
2010	460	460	0.3
2012	-	16	0.3
<i>Distan.</i>	<i>1000</i>	<i>2200</i>	<i>LMP-Zn</i>
1998	-	227	5
2009	784	589	5
2010	1.7	2.1	5

2012	-	181	5
Distan.	1000	2200	LMP-AI
1998	-	20.2	0.2
2009	15.4	22	0.2
2010	-		0.2
2012	-	127	0.2
Distan.	1000-Pb	2200-Pb	LMP-Pb
1998	-	0.34	0.05
2009	1.18	2.1	0.05
2010	0.4	0.4	0.05
2012	-	0.05	0.05
Distan.	1000	2200-Cd	LMP-Cd
1998	-	1.59	0.005
2009	0.011	0.007	0.005
2010	-	0.35	0.005
2012	-	0.70	0.005

Anexo textual 7. Resultados de análisis químicos de las menas.

a) Año 2012

%								g/t									
Pto	Pb	Cu	Zn	BaSo4	S	Hg	P	Cd	As	Ba	Bi	Co	Ga	Ge	In	Se	Sr
M# 1	2.40	<0.05	3.63	6.94	39.90	<1	0.009	227	1422	373	50	17	28	< 10	< 2	41	10
M# 1A	4.10	<0.05	4.70	3.35	45,,9	<1	0.003	429	1260	434	56	41	32	< 10	< 2	48	2
M# 2	3.98	<0.05	3.88	65.91	17.84	<1	0.004	129	340	58	7	1	< 10	< 10	< 2	6	218

b) Año 2011

Pto	Fe (mg/l)	Pb(mg/l)	Zn(mg/l)	Al (mg/l)	Mn(mg/l)	Ca(mg/l)	Mg(mg/l)
M-1	0.20	5.50	1.70	0.08	0.15	0.18	0.20

c) Año 2009

Punto	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	Ba (%)	As (mg/kg)	Cu (mg/kg)
y1	10.4	2.19	14	6.17	5737	172
y2	2.0	1.62	29	7.17	1846	86
y3	0.1	1.51	16	0.55	235 3	747
y4	0.4	0.33	25	0.54	964	141
y5	0.1	0.12	43	0.08	506	97
t1	1.5	0.04	11	2.07	1448	88
t2	2.3	0.08	21	7.49	3578	160
t3	2.1	0.21	19	6.97	2163	172
t4	4.8	0.66	10	7.81	2082	10
t5	0.1	0.32	5	0.94	83	85
t6	0.1	0.05	11	1.14	107	4962
t7	3.5	2.86	7	24.73	1940	10

Anexo textual 8. Resultados de análisis químicos de las muestras de efluentes de mina de varias campañas.

a) Año 2012

UM: mg/l

Punto	Ba	Al	Cu	Fe	Zn	As	Cd	Hg	Ca	Cr	Ni	Co
1	0.054	0.12	0.31	1.6	2545*	0.84*	422.7*	171.9*	3.83	28.29*	2.7	<0.02

*Concentraciones de los elementos que superan el LMP

Punto	Al	Cu	Zn	As	Cd	Cr	Pb
1-C	143.1*	3.8	426*	<0.001	1.7*	0.099	3.32*
1-D	119.8*	3.0	420 *	1.11*	2.3*	0.082	3.02*
1-A	21.6*	1.5	395*	<0.001	1.1*	0.028	0.30

b) Año 2010

UM: mg/l

Punto	Ba	Al	Cu	Fe	SO4	Zn	NH4	As	Cd	Ca	Cr	Mg	Mn	Ni	Pb	Co
MSTL-1	0.1	292*	0.16	7581	22045	3903*	86.1	3.98*	2.38*	259	2.74*	850	164	0.47	16.75*	0.45
MSTL-2	0.1	168*	3.24	1447	6308	1121*	98.9	4.35*	3.03*	92	2.74*	146	12	0.47	5.38*	0.11
MSTL-3	0.5	213*	0.15	6056	21630	4429*	141.1	11.19*	4.76*	208	2.74*	555	175	0.45	12.89*	0.35
MSTL-4	0.1	105*	1.72	439	2935	674*	113.9	1.03*	1.62*	76	2.74*	101	39	0.45	4.61*	0.24

Punto	Al	Cu	Fe	Na	Zn	As	Cd	Ca	K	Cr	Mg	Mn	Ni	Pb	Co
13	755*	5	15517	26.8	6771*	36*	25*	439	41	0.5	527	269	1	2.4*	0.8
15	5072*	299*	56834	49.6	22888*	508*	113*	322	366	2.5	866	814	2	8.5*	3.5
18	334*	0.4	4480	20.8	2615*	0.7*	5*	479	17	0.3	718	105	LD	1.9*	0.3

Punto	Ba	Fe	Zn	Pb
M-1Am	<0.2	6.29	1.88	3.9*
M-2Am	<0.2	7.72	3.78	1.3*
M-3Am	<0.2	14.12	81*	6.4*

c) Año 2009

mg/l

Punto	Ba	Al	Cu	Fe	Na	SO4	Zn	As	Cd	Ca	K	Mg	Mn	Pb
L1	0.035	174*	0.15	4620	43.6	6754	2090*	0.293	1.23*	420	3.0	780	91	0.64
L2	0.002	151*	0.10	4330	30.9	6399	1890*	0.191	0.997*	374	1.3	708	79	0.33
L3	0.015	140*	1.79	264	27.5	2149	585*	0.005	1.53*	113	0.6	92	48	0.66

d)Año 1998

mg/l

Punto	Fe	Cu	Al	Ba	K	Zn	Pb	As	Cd	Ca	Cr	Mg	Mn	Ni	Se
11	>3000	4.8	1241*	<0.01	<1	>4000*	<0.1	<0.08	<0.005	332.3	0.35	401.3	>60	1.59	<0.04

Anexo textual 9. Resultados de análisis químicos de las muestras de sedimentos de las campañas de los años 2012, 2011, 2010 y 2009.

a) Año 2012

Punto	Fe(%)	Ba	Pb	Zn	As	Cu	Al(%)	Cd	Co	Cr	Hg	Mn	Ni	Sr
M1	4.04	10085	6495*	2026*	310	64*	0.74	11*	3	11	< 5	99	5	27
M2	5.59	6201	2852*	450*	494	52*	0.44	4*	2	8	< 5	38	2	30
M3	6.87	4934	5589*	782*	370	111*	1.31	6*	2	17	< 5	44	3	31
M4	6.10	7847	2044*	1152*	203	397*	1.41	36*	6	15	< 5	261	10	53
M8	2.04	809	169*	122	29	55*	0.55	2*	2	9	< 5	155	4	10
M9	7.64	3395	736*	300*	143	51*	0.88	5*	4	17	< 5	317	6	29

b) Año 2011

UM: %

Punto	Al	Mn	Pb	Zn	Fe	Mg
M-2	0.15	0.039	1.4	0.2	2.8	0.18
M-4	0.02	0.124	0.1	4.0	-	0.08
M-5	0.13	0.015	0.1	0.4	1.9	0.12
M-6	0.17	0.015	0.2	0.2	4.6	0.15

c) Año 2010

UM: %

Punto	Al	Mn	Pb	Zn	Na	Fe	Ca	Mg	Cu	St
5	0.17	0.03	0.80	0.22	0.09	6.82	0.16	0.18	0.02	13.06
6	0.17	0.02	0.24	0.25	0.04	4.99	0.05	0.15	0.02	6.62
7	0.23	0.01	0.51	0.08	0.20	4.77	0.17	0.18	0.03	5.70
8	0.22	0.01	0.17	0.04	0.17	1.73	0.21	0.30	0.02	2.55

Punto	Al	Pb	Zn	Cu	Fe	Ba	As	Cd	Co	Cr	Ag
13	0.40	941*	1378*	94*	10	250.4	2058.7	46*	3.9	23.8	3.2
15	0.31	8215*	2729*	139*	12	25.4	99.4	20*	6.8	6.5	4.9
18	0.30	12789*	770*	130*	7	461.1	378.8	13*	3.4	8.9	2.0

d) Año 2009

Punto	Fe (%)	Ba (%)	Pb (%)	Zn (%)	As (mg/kg)	Cu (mg/kg)
s1	10.96	0.58	0.21	0.08	330	75*
s2	13.45	0.99	0.66	0.07	327	87*

Anexo textual 10. Granulometría de las muestras de sedimentos.

Muestra: M-1				Muestra: M-2				Muestra: M-3			
Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.	Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.	Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.
4.75	23.5	5	5	4.75	15.9	4	4	4.75	0.0	0	0
2.00	29.1	6	10	2.00	22.0	5	8	2.00	0.0	0	0
0.425	112.0	22	32	0.425	92.9	21	29	0.425	1.9	0.4	0.4
0.074	177.1	34	66	0.074	248.3	55	84	0.074	14.1	3.2	3.6
<0.074	167.4	32	98	<0.074	72.0	16	100	<0.074	425.0	95.3	98.9
Total	520.6	98		Total	452.8	100		Total	446.0	98.9	
Muestra: M-4				Muestra: M-8				Muestra: M-9			
Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.	Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.	Tamices (mm)	g. reten	% reten.	% Acum.
4.75	9.4	2	2	4.75	35.5	11	11	4.75	124.2	25	25
2.00	7.0	2	4	2.00	43.0	13	24	2.00	158.5	31	56
0.425	10.1	2	7	0.425	163.7	49	73	0.425	135.7	27	83
0.074	32.0	8	14	0.074	50.7	15	88	0.074	52.6	10	93
<0.074	339.0	84	98	<0.074	37.2	11	100	<0.074	34.2	7	100
Total	404.2	98		Total	331.2	100		Total	506.6	100	

Anexo textual 11. Resultados de análisis químicos de las muestras de aguas superficiales de varias campañas.

a) Año 2012

UM:mg/l

Punto	Fe	Cu	Al	Na	SO4	Zn	NH4	As	Cd	Ca	Ba	Cl	Cr	Mg	Mn	Hg	Ni	Pb
6	16*	2.2*	126.6*	5	1977*	180.8*	<0.25	<0.80	0.7*	54	0.1	184*	0.081*	54	15*	<0.020	<0.010	0.05
7	7*	0.02	0.4*	11	<10	0.2	<0.25	<0.80	0.004	15	0.2	140*	<0.020	6	1*	<0.020	<0.010	0.05

b) Año 2010

UM: mg/l

Punto	Ba	Fe	Zn	Pb	St
M-9A	<0.2	460*	<1.7	<0.4	85
M-10A	<0.2	460*	<2.1	<0.4	140

c) Año 2009

UM: mg/l

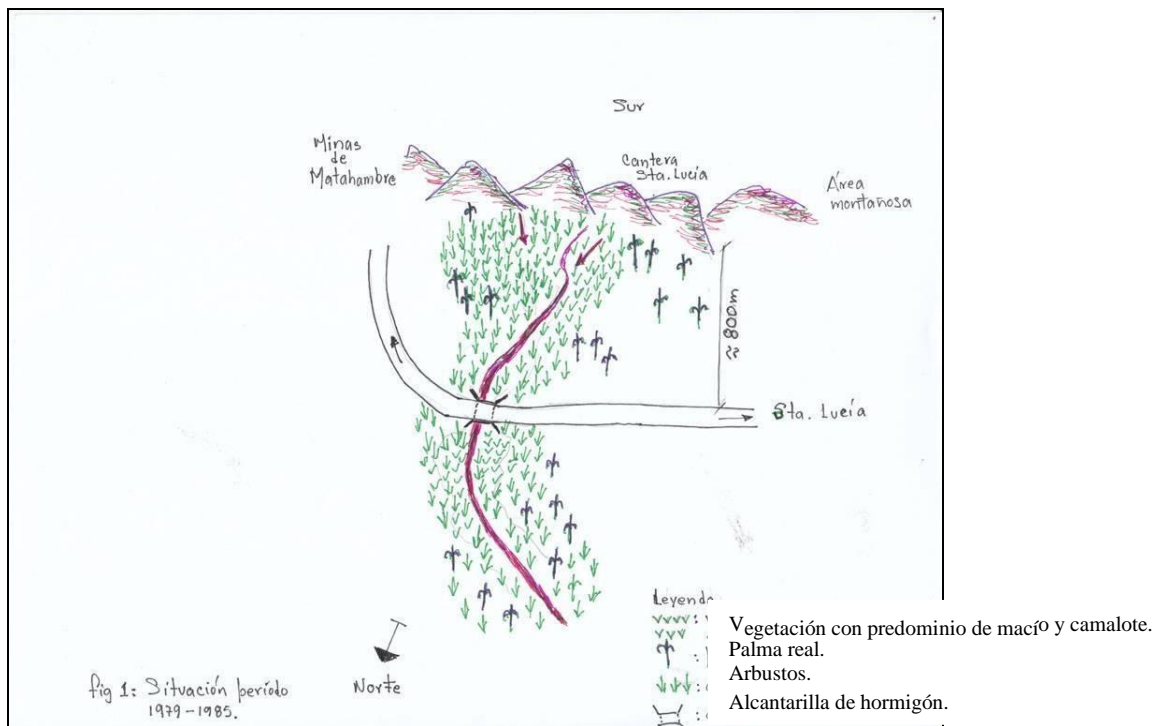
Punto	Fe	Cu	Al	Na	SO4	Zn	Ba	As	Cd	Ca	Mg	Mn	Pb	Si
A1	253*	0.03	4.8*	32	2589*	165*	0.011	0.06*	0.0656*	557*	416*	21.3*	0.91*	16
A2	9*	0.22	15.4*	75	784*	30*	0.033	0.024	0.011*	69	22.4	3.97*	1.18*	14
A3	37*	0.20	43.6*	27	1144*	31*	0.010	0.005	0.013*	23	20.6	4.54*	4.27*	22
A4	11*	0.02	0.03	14	34	0.3	0.196	0.004	0.0003	7	4.6	3.59*	0.02	6

d) Año 1998

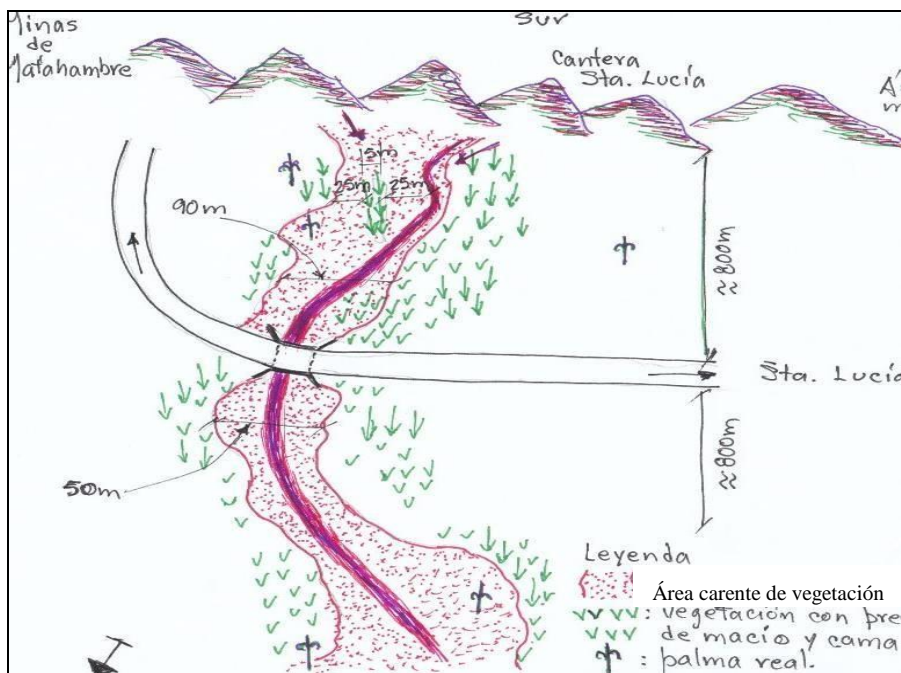
UM: mg/l

Punto	Ba	Fe	Al	Cu	Na	SO4	Zn	NH4	As	Cd	Ca	Cl	Cr	Co	Mg	Mn	Hg	Ni	Pb
12a	5.65	67*	20.2*	0.7	30	1048*	227*	0.4*	<0.08	1.59*	51	38*	<0.02	0.15	51	14*	<0.02	0.14*	0.3*

Anexo textual 12. Afectaciones de aguas, suelos, paisaje, flora y fauna por el DAM.
Caso del lugar del puente de la carretera Santa Lucía- Minas.

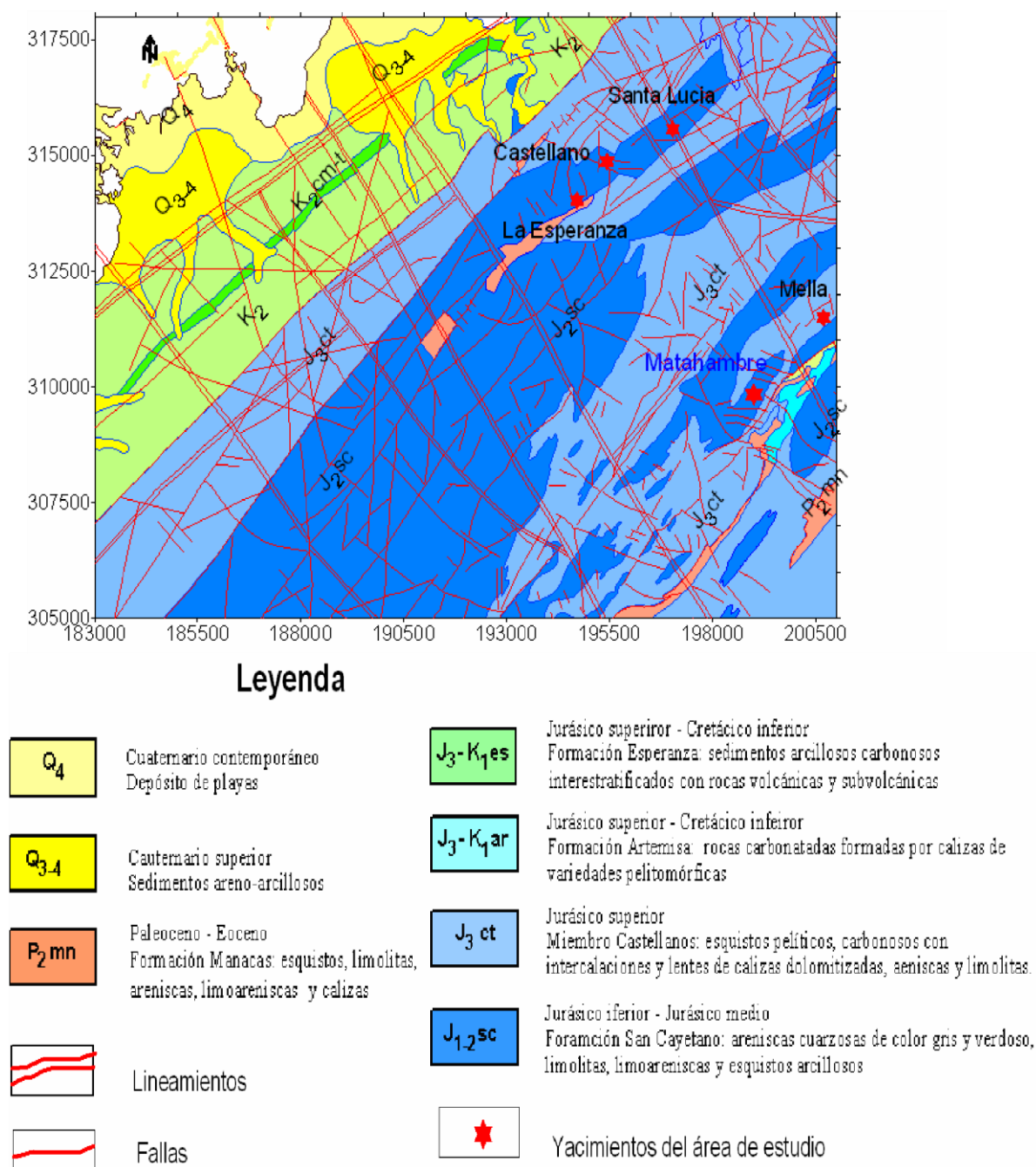


Etapas de 1979-1985.

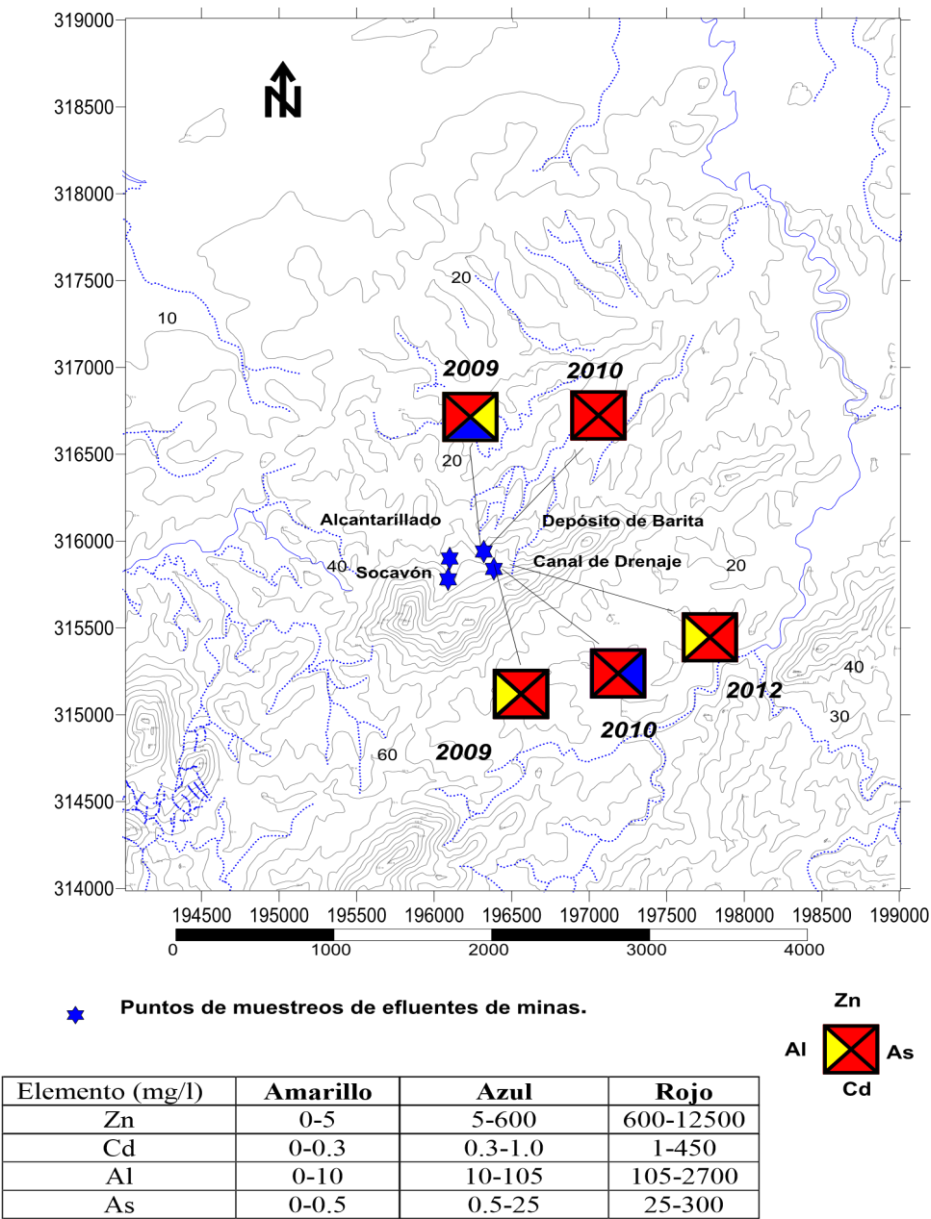


Etapas de 1985-2014.

Anexo gráfico 1. Mapa geológico del Distrito Metalogénico Matahambre-Santa Lucía a escala 1:50 000 (Burov et al, 1985).



Anexo gráfico 2. Mapa de la concentración de los EPT en los efluentes de mina en los diferentes estudios.



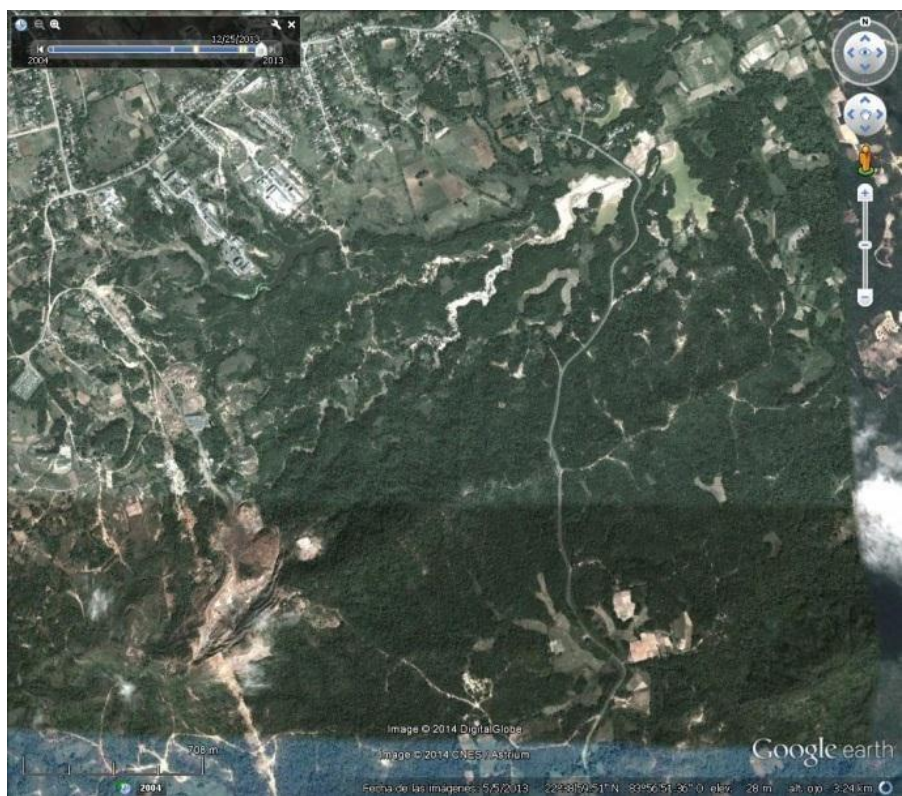
Anexo gráfico 3. Vistas de la cantera Santa Lucía y las áreas aledañas contaminadas por el DAM. Años 2004, 2009 y 2013.



Año 2004

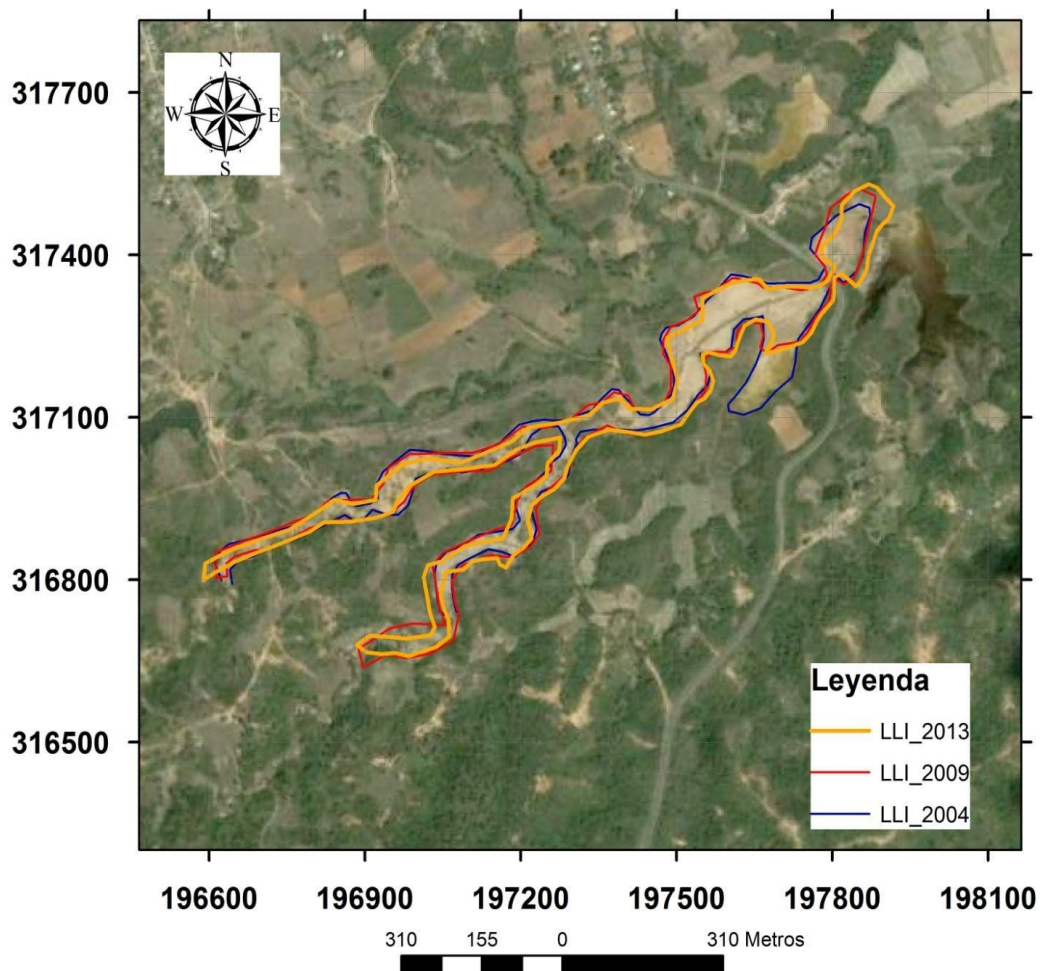


Año 2009



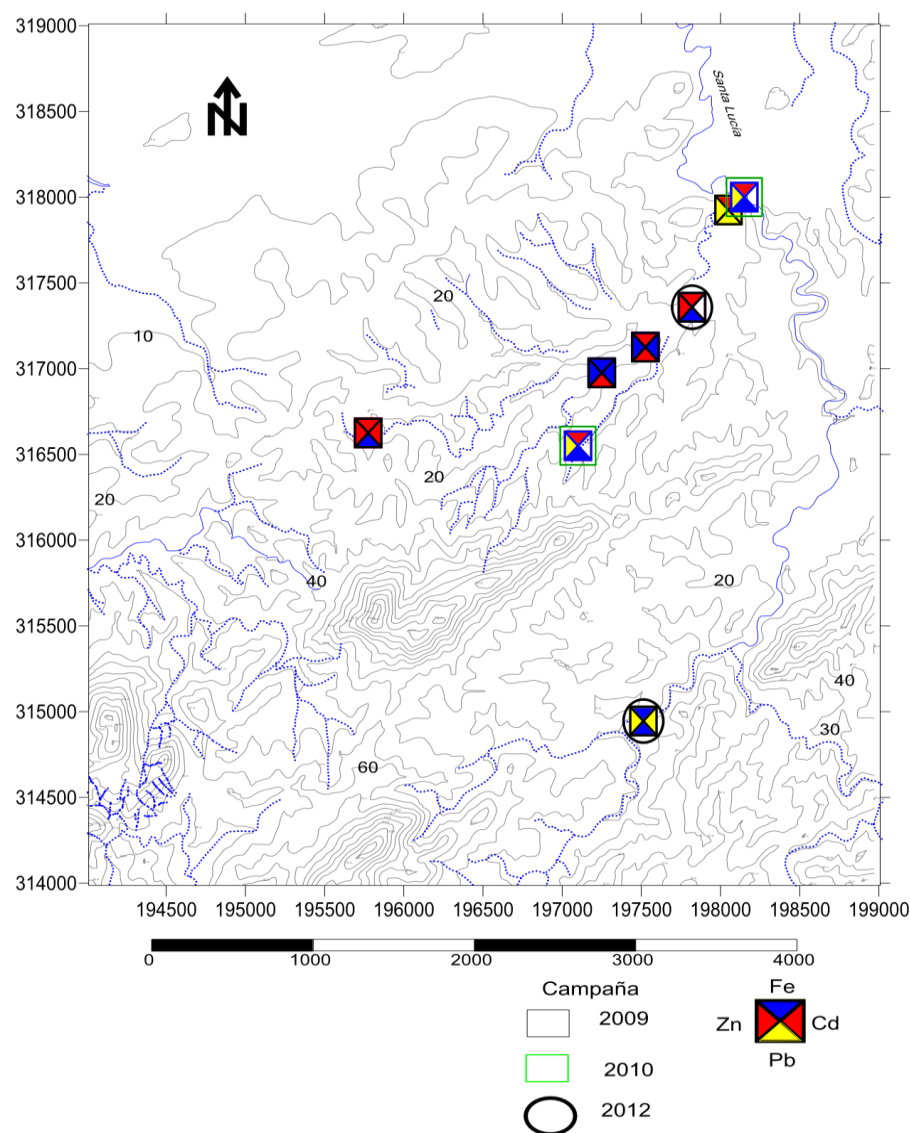
Año 2013

Anexo gráfico 4. Llanura de inundación afectada por la contaminación ambiental generada por la explotación de la cantera Santa Lucía. Las áreas se digitalizaron empleando imágenes del Google Earth de los años 2004, 2009, 2013. La imagen base corresponde al año 2004



LLI-límites de las zonas afectadas por la contaminación, correspondientes a los años 2004, 2009 y 2013.

Anexo gráfico 5. Mapa de la concentración de los EPT en las aguas superficiales en los diferentes estudios.



Elemento (mg/l)	Amarillo	Azul	Rojo
Zn	0-5	5-31	31-181
Cd	0-0.005	0.005-0.02	0.02-0.7
Fe	0-0.3	0.3-10	10-460
Pb	0-0.05	0.05-1.0	1.0-4.5

Anexo gráfico 6. Mapa de la concentración de los EPT en los sedimentos de diferentes estudios.

