

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE QUÍMICA



“IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN RESIDUOS MINEROS, PROVENIENTES DE LA MINERÍA INFORMAL DE LAS PROVINCIAS DE PAUCARTAMBO Y QUISPICANCHIS DE LA REGIÓN DEL CUSCO”

TESIS PRESENTADO POR:

BACH. ANALI CHAVEZ CRUZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE QUÍMICO

DIRECTORES:

Dra. NORMA TISOC LATORRE

Dr. DINO L. QUISPE GUZMÁN

CUSCO - PERÚ

2022

**FINANCIADA POR LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
BAJO EL ESQUEMA FINANCIERO E041-2017-02-UNSAAC, DENOMINADO “PROYECTOS DE
INVESTIGACIÓN” CON CONTRATO 022-2018-UNSAAC.**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE FINALIZACIÓN DE TESIS

Presente.-

Previo un atento y cordial saludo, por intermedio de la presente los abajo firmantes Dra. Norma Tisoc Latorre y Dr. Dino L. Quispe Guzmán, en nuestra condición de directores del trabajo de tesis **“IDENTIFICACIÓN DE FASES MINERALES QUE CONTENGAN ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN RESIDUOS MINEROS PROVENIENTES DE LA MINERÍA INFORMAL DE LA REGIÓN CUSCO”**, presentado por la bachiller Srta. **Anali Chavez Cruz**, para optar el título profesional de Químico.

En cumplimiento a lo establecido en el reglamento de grados y títulos de la Escuela Profesional de Química, referido al asesoramiento de tesis, informo que el tesista ha culminado su investigación de conformidad con el plan de tesis aprobado. Informamos que los trabajos experimentales se han realizado en colaboración con la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y la Universidad de Huelva España.

Así mismo informamos, que se ha estado revisando periódicamente el informe de tesis, donde se ha encontrado algunas observaciones al contenido del trabajo, las mismas que fueron subsanadas por el tesista. Por lo tanto, en nuestra condición de directores de tesis declaramos que es **SUFICIENTE**, para ser puesto a consideración de los señores dictaminantes.



Dra. Norma Tisoc Latorre
Docente de la E. P Química

UNSAAC



Dr. Dino L. Quispe Guzmán
Docente de la E. P Química

UNSAAC

DEDICATORIA

A mi padre Sergio, mi madre Raymunda y mi hermana Rocio del Pilar, por ser mi soporte a lo largo de este tiempo, por darme su apoyo y cariño.

¡Que nadie se quede afuera, va por todos!

AGRADECIMIENTOS

Al término de este trabajo de tesis, quiero agradecer a todas las personas que me ayudaron y acompañaron en todo este tiempo, desde el inicio de mi etapa universitaria, hasta hoy.

Agradezco a mis directores de tesis, Dra. Norma Tisoc Latorre y Dr. Dino L. Quispe Guzmán, sin vuestra infinita paciencia, todos sus aportes y conocimientos profesionales, esto no hubiera llegado a su término, ustedes formaron parte importante de este trabajo. También agradezco a ustedes por darme la oportunidad de pertenecer al proyecto de investigación “ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE OXIDACIÓN DE RESIDUOS MINEROS GENERADORES DE LIXIVIADOS CON ELEVADA CARGA DE ELEMENTOS CONTAMINANTES EN LA REGIÓN CUSCO”, financiado por la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco bajo el esquema financiero E041-2017-02-UNSAAC, denominado “PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN” con contrato 022-2018-UNSAAC.

Quiero agradecer de igual modo, a los investigadores del Grupo de Investigación Geoquímica de la Universidad de Huelva, España; donde se nos ha permitido realizar los análisis de difracción de rayos X la toma de imágenes de las muestras mediante microsonda electrónica.

Al Dr. Justiniano Quispe y Dr. Carlos Landauro por haberme acogido en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, donde se me ha permitido realizar los análisis de fluorescencia de rayos X.

Agradezco a mis padres y hermana, ustedes han sido el motor que impulsa mis sueños y esperanzas; ustedes que fueron mi soporte cuando más lo necesitaba y en todo momento me alentaban a continuar y seguir adelante; de manera especial a mi querida madre quien acompañó mis noches de estudio. Estoy muy orgullosa de tenerlos junto a mí.

Finalmente, agradezco a mis familiares, amigos y compañeros que me ayudaron y acompañaron en todo momento, brindándome su tiempo, consejos y sabiduría para lograr mis objetivos.

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado el análisis químico y caracterización mineralógica de residuos mineros provenientes de la minería informal en la Región Cusco. Las muestras se han recolectado de depósitos de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, donde se extrae oro por medio de procesos artesanales e informales.

El análisis químico se ha realizado mediante fluorescencia de rayos X (XRF) y espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), estas técnicas proporcionan información sobre la composición elemental de las muestras. La técnica de difracción de rayos X (XRD) se ha utilizado para la caracterización mineralógica. Finalmente, la morfología de los minerales se pudo observar mediante microsonda electrónica (EPMA).

Los resultados obtenidos en el análisis químico muestran la presencia de elementos potencialmente tóxicos como zinc (202 mg/Kg), plomo (154.70 mg/Kg), mercurio (291.80 mg/Kg) y hierro (13.38 %) de los contenidos más elevados. En la caracterización mineralógica se han identificado fases minerales de esfalerita, galena, cinabrio y pirita. Finalmente, estos resultados se han corroborado por microsonda electrónica, obteniéndose imágenes de fases cristalinas de sulfuros metálicos que tienen elementos potencialmente tóxicos en su composición.

Palabras clave: *residuos mineros, sulfuros, pirita, drenajes ácidos, elementos tóxicos, XRD, ICP- MS, XRF, EPMA*

ABSTRACT

In this work, the chemical analysis and mineralogical characterization of mining residues from informal mining in the Cusco Region have been carried out. Samples have been collected from mining waste deposits of provinces Paucartambo and Quispicanchis, where gold is extracted through artisanal and informal processes.

Chemical analysis has been carried out using X-ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP-MS), these techniques provide information on the elemental composition of the samples. X-ray diffraction (XRD) has been used for mineralogical characterization. Finally, the morphology of the minerals could be observed by Electronic Microprobe (EPMA).

The results obtained in the chemical analysis show the presence of potentially toxic elements such as Zinc, Lead, Mercury and Iron. In the mineralogical characterization, mineral phases of Sphalerite, Galena, Cinnabar and Pyrite have been identified. Finally, these results are corroborated by the Electronic Microprobe, where images of crystalline phases of metallic sulphides have been obtained that have potentially toxic elements in their composition.

Key words: *mining waste, sulfides, pyrite, acid drainage, toxic elements, XRD, ICP- MS, XRF, EPMA.*

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
Identificación y determinación del problema	3
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
Problema General.....	5
Problemas específicos	5
Delimitación de la Investigación	6
Espacial	6
Temporal	6
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
FORMULACIÓN DE OBJETIVOS	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
HIPÓTESIS	8
LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	9
CAPÍTULO I	9
1. MARCO TEÓRICO	9
1.1 Antecedentes de estudio	9
1.1.1 Antecedentes Internacionales.....	9
1.1.2 Antecedentes Nacionales	12
1.2 Bases Teóricas	15
1.2.1 Actividad minera en Perú	15
1.2.2 Clasificación de la minería en el Perú.....	18
1.2.3 Minería informal en el Perú	20
1.3 Definición de Términos Básicos	23
1.3.1 Minería.....	23

1.3.2	Mineralogía	24
1.3.3	Mineral.....	24
1.3.4	Clasificación de los minerales	25
1.3.5	Sulfuros	27
1.3.6	Residuos mineros.....	29
1.3.7	Generación de los Drenajes Ácidos de Mina (AMD)	30
1.3.8	Oxidación de otros sulfuros.....	32
1.3.9	Elementos tóxicos.....	33
1.4	Técnicas Instrumentales	34
1.4.1	Fluorescencia de Rayos X	34
1.4.2	Difracción de Rayos X.....	38
1.4.3	Espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente	39
1.4.4	Microsonda Electrónica.....	42
CAPÍTULO II.....		47
2	METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	47
2.1	Tipo de Investigación	47
2.2	Variables	47
2.2.1	Variables Dependientes	47
2.2.2	Variables Independientes.....	47
2.3	Zona y procedimiento de muestreo.....	48
2.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	52
2.4.1	Fluorescencia de Rayos X	52
2.4.2	Difracción de Rayos X.....	54
2.4.3	Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente	56
2.4.4	Microsonda Electrónica.....	56
CAPÍTULO III		59
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
3.1	Resultados de Fluorescencia de Rayos X.....	59
3.1.1	Discusión de resultados.....	64
3.2	Resultados de Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente	

3.2.1	Discusión de resultados.....	67
3.3	Resultados de la difracción de rayos X.....	67
3.3.1	Discusión de resultados.....	70
3.4	Resultados de la toma de imágenes mediante la Microsonda Electrónica	71
3.4.1	Discusión de resultados mediante microsonda electronica	74
3.5	Resultados de las Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	75
	Análisis de Componentes Principales (ACP)	75
	CONCLUSIONES.....	82
	RECOMENDACIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	85
	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS, IMÁGENES Y GRÁFICOS

TABLAS

<i>Tabla 1.- Estratos de la minería en Perú.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2: Criterios de clasificación minera según el tipo de concesión minera.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3: Marco Institucional del Ministerio de Energía y Minas.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4: Clasificación de los minerales según STRUNZ.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla5. Resultados de Fluorescencia de rayos X de las muestras de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 6: Comparación de los valores de LMP entre los establecidos en el catálogo de medidas ambientales para el pequeño productor y productor minero artesanal y los encontrados en los residuos mineros de la provincia de Paucartambo.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 7: Resultados de la Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8: Valores propios y varianza explicada de los contenidos totales.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 9: Matriz de cargas (loadings) de los contenidos totales.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 10: Matriz de puntuaciones de los contenidos totales.....</i>	<i>79</i>

IMÁGENES

<i>Imagen 1: Proyectos mineros en construcción y posible inicio 2021 en Perú.....</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 2: Mapa metalogenético del Perú 2006, publicado en enero de 2007.....</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 3: minerales sulfurados más comunes.....</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 4: Esquema general de un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.....</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 5: Localización de las zonas de muestreo.....</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 6: Zona de muestreo de la provincia de Paucartambo.....</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 7: Zona de muestreo de la provincia de Quispicanchis.....</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 8: a) Muestras rotuladas de residuos mineros b) Secado de muestras de residuos mineros. Laboratorio de Mineralogía – UNSAAC.....</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 9: Preparación de muestra para el análisis mediante XRF a) Muestras molidas y tamizadas b) Muestras pesadas c) Muestras centrifugadas.....</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 10: Fluorescencia de rayos X, marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 11: Difractómetro de rayos X, marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, de la Universidad de Huelva.....</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 12: (a, c, d, e) Imágenes observadas en la Microsonda Electrónica en modo de luz reflejada y transmitida (b) Probetas pulidas.....</i>	<i>57</i>

*Imagen 13: Microsonda electrónica marca JEOL, modelo JXA-8200 SuperProbe;
Universidad de Huelva – España.....58*

*Imagen 14: Micrografías observadas mediante la microsonda electrónica, en cada una de
las micrografías en el lado superior izquierdo se observa los espectros fluorescentes de cada
fase mineral.....72*

GRÁFICOS

<i>Gráfico 1: Ciclo de oxidación de la pirita</i>	31
<i>Gráfico 2: Esquema de Fluorescencia de Rayos X</i>	36
<i>Gráfico 3: Diagrama genérico de niveles de energía atómicos y transiciones energéticas permitidas</i>	37
<i>Gráfico 4: Espectros más representativos de XRF obtenidos mediante el software SPECTRAplus</i>	61
<i>Gráfico 5: Gráfico de barras de las muestras re residuos mineros de la provincia de Paucartambo</i>	66
<i>Gráfico 6: Gráfico de barras de las muestras re residuos mineros de la provincia de Quispicanchis</i>	67
<i>Gráfico 7: Difractogramas obtenidos de las muestras de los relaves mineros de las Provincias de Paucartambo y Quispicanchis de la Región Cusco, donde se observa las fases minerales de sulfuros metálicos</i>	68
<i>Gráfico 8: Sedimentación de los contenidos totales</i>	76
<i>Gráfico 9: Cargas de contenidos totales</i>	78
<i>Gráfico 10: Puntuaciones de contenidos totales</i>	80
<i>Gráfico 11: Total de contenidos totales</i>	81

ABREVIATURAS

AAS: Espectrometría de absorción atómica

AMD: Drenaje ácido de mina

AMSCSD: American Mineralogist Crystal Structure Database

EPMA: Análisis de microsonda electrónica

EPT: Elementos potencialmente tóxicos

ICDD: International Center for Diffraction Data

ICP – MS: Espectroscopia de masas con plasma de acoplamiento inductivo

LMP: Límites máximos permisibles

PAM: Pasivos ambientales mineros

SEM: Microscopio electrónico de barrido

XRD: Difracción de rayos X

XRF: Fluorescencia de rayos X

GLOSARIO

Difracción: Es un fenómeno característico de las ondas, éste se basa en el curvado y esparcido de las ondas cuando encuentran un obstáculo o al atravesar una rendija.

Difractograma: Es un gráfico que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente a la muestra analizada.

Espectrometría: es una técnica analítica utilizada para medir cuánta luz absorbe una sustancia química.

Fluorescencia: Es un proceso de emisión en el cual las moléculas son excitadas por la absorción de radiación electromagnética. Las especies excitadas se relajan al estado fundamental, liberando su exceso de energía en forma de fotones.

Impacto ambiental: es un cambio o una alteración en el medio ambiente, siendo una causa o un efecto debido a la actividad y a la intervención humana.

Metales tóxicos: son un grupo de elementos químicos en los que su peso atómico está comprendido entre 63,55 y 200,59. Dependiendo de la concentración en que se encuentren representan cierta toxicidad para el ser humano

Micrografía: Una micrografía es una imagen tomada con una cámara conectada a un microscopio u otra tecnología de aumento. Las micrografías pueden mostrar detalles distintos en la escala nanométrica.

INTRODUCCIÓN

La minería, a nivel mundial, es considerada como una de las principales actividades de la industria extractiva, que promueve el crecimiento económico para los países en vías de desarrollo. Esta actividad representa ventajas en cuanto a economía se refiere, sin embargo; suele causar daños irreparables en el ambiente. Es así que; la minería al atraer inversiones aumenta la cotización de los metales e incrementa las divisas, pero al mismo tiempo, es fuente de pasivos ambientales. (Lira & Aristondo, 2007)

Los pasivos ambientales mineros (PAM) es la denominación con la que se hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas, donde no se haya realizado un cierre de mina reglamentado y certificado por la autoridad correspondiente (Yupari, 2003). Los mayores peligros generados por los PAM son la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la erosión y degradación de la calidad del suelo, el arrastre de material particulado por la acción del viento, lo que puede afectar la salud humana ya sea por inhalación, ingestión o contacto dérmico debido a que en las áreas identificadas como PAM es inminente la presencia de sustancias tóxicas (Oblasser & Chaparro Avila, 2008).

En Perú, la legislación minera vigente está enfocada en incentivar la inversión en grandes yacimientos mineros, en este marco no se difiere entre los diversos estratos mineros, esto promueve el incremento de la actividad minera artesanal e informal que, aún con la intención de formalizarse, los requerimientos legales sobrepasan su capacidad técnica y económica (Kuramoto & para el Desarrollo, 2002). Razones que han llevado a que el desarrollo de la actividad minera informal no cuente con la legislación ambiental adecuada, atentando así con el orden ambiental de las zonas de extracción y privando de los ingresos tributarios provenientes de los derechos que los mineros deberían pagar por explotar los recursos

mineros (Kuramoto & para el Desarrollo, 2002). Es así que, en vista de la falta de capacidad técnica económica que se requiere para formalizarse, en la Región Cusco la actividad minera artesanal ha ido en incremento, principalmente en las provincias de Chumbivilcas, Paucartambo y Quispicanchis (Arcos Alarcón, 2019).

La minería artesanal está dedicada, principalmente, a la extracción de oro. Este tipo de actividad minera hace uso de insumos muy contaminantes como el mercurio y cianuro de sodio en disolución, utilizados para concentrar el oro, lo que resulta un peligro para las personas que realizan la extracción. Posterior a la recuperación de este metal, todos los residuos son vertidos directamente al ambiente ejerciendo un impacto negativo. (Kuramoto & para el Desarrollo, 2002).

Los residuos mineros contienen cantidades considerables de metales y minerales ricos en sulfuros (Ye et al., 2017) y al estar expuestos a la intemperie entran en contacto con las condiciones atmosféricas, iniciando un conjunto de reacciones de oxido reducción, lo que da lugar a la formación de drenajes ácidos de mina (AMD) (Ramos-Gómez et al., 2012). Los drenajes ácidos de mina se caracterizan por tener niveles bajos de pH, contenidos elevados de sulfatos y elementos tóxicos (Sgier, Macías, Nieto, & Rötting, 2015).

El presente estudio se ha planteado realizar el análisis químico y la caracterización mineralógica de residuos mineros provenientes de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis de la Región Cusco, con el fin de poder identificar y evaluar la presencia de metales tóxicos, así como; identificar las fases minerales en los que se encuentran. De modo que, se pueda predecir si estos residuos mineros podrían dar lugar a la formación de drenajes ácidos de mina.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Identificación y determinación del problema

La actividad minera implica la remoción de grandes cantidades de material geológico para la extracción de minerales que contengan elementos con alto valor económico. El material geológico restante, luego de la extracción del metal de interés, es conocido como residuo minero. Los residuos mineros contienen, principalmente, material estéril y ganga, los cuales debido a su naturaleza metálica están asociados a sulfuros metálicos como blenda o esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂), grenockita (CdS), galena (PbS), rejalgar (AsS), oropimente (As₂S₃) y cinabrio (HgS), estos sulfuros a su vez, tienen en su composición elementos potencialmente tóxicos (Dold, 2003).

Los residuos mineros, provenientes de la actividad minera informal, no son almacenados adecuadamente, aún peor; son expuestos en la intemperie sin ningún tipo de fiscalización. Los residuos mineros al entrar en contacto con las condiciones atmosféricas oxidantes, producen lixiviados con bajos valores de pH denominado drenaje ácido de mina. Los drenajes ácidos de mina, son una de las responsabilidades ambientales y económicas que afronta la industria minera a nivel mundial. Perú, al ser considerado históricamente como un país netamente minero, no es ajeno a esta problemática ambiental. La condición ácida de los drenajes ácidos, facilita que los elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el zinc, cadmio, mercurio, arsénico, plomo, hierro y otros entren en solución (Asta Andrés, Acero Salazar, Auqué Sanz, Gimeno Serrano, & Gómez Jiménez, 2011).

En la Región Cusco, la actividad minera se desarrolla entre los 3500 y 5000 m.s.n.m. y presenta dos estaciones climáticas bien definidas, la de periodos secos y la de periodos

lluviosos. En los periodos secos los residuos mineros están en contacto continuo con el oxígeno, con lo que se da inicio a las reacciones de oxidación y generación de drenajes ácidos de mina. En cuanto empieza el periodo lluvioso, las precipitaciones pluviales facilitan la dispersión de los drenajes y con ello la disolución de iones que van contaminando todo el medio (agua y suelo) que encuentran en su paso.

En el presente trabajo se ha optado por trabajar con muestras de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis pertenecientes a la Región Cusco, debido a que en estas provincias se extrae el oro de forma artesanal, en tanto que, los residuos que generan no son debidamente tratados y podrían representar un problema ambiental.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Problema General

Los residuos mineros que se generan luego de la extracción de oro de manera artesanal e informal en las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, son desechados sin control alguno a la intemperie. Estos residuos podrían dar inicio a un ciclo de oxidación continua; que a la vez genera drenajes ácidos de mina. Durante ese proceso de oxidación, se proporcionan las condiciones para la posible liberación y transportación de elementos potencialmente tóxicos presentes en las fases minerales. Por lo que, en dichas provincias, estos residuos representarían un problema ambiental, entonces el problema planteado es el siguiente:

¿Cuáles serán los minerales que tengan en su composición elementos potencialmente tóxicos, a los cuales se les atribuya la generación de drenajes ácidos de mina en las provincias de Paucartambo y Quispicanchis pertenecientes a la Región del Cusco?

Problemas específicos

- ¿Los residuos mineros provenientes de la minería informal de la Región del Cusco (Paucartambo y Quispicanchis), contendrán elementos tóxicos?
- ¿Será posible realizar la caracterización mineralógica de los residuos mineros provenientes de la minería informal de la Región del Cusco (Paucartambo y Quispicanchis), para poder identificar los minerales que contengan elementos potencialmente tóxicos?

Delimitación de la Investigación

Espacial

El desarrollo de este trabajo se ha realizado en muestras provenientes de dos provincias de la Región del Cusco: Paucartambo y Quispicanchis.

Temporal

El trabajo se ha realizado por un periodo de 14 meses comprendidos entre noviembre del 2018 y enero del 2020.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La formación de los drenajes ácidos de mina, en zonas de extracción de minerales, en funcionamiento o en abandono es inminente. Motivo por el cual se ha realizado el presente trabajo de tesis para poder analizar e identificar los minerales que contengan elementos potencialmente tóxicos, a los que se les atribuye la formación de los drenajes ácidos de mina, los cuales están presentes en los residuos mineros provenientes de la minería informal. Para que, a futuro con los resultados obtenidos, se pueda plantear alternativas que permitan frenar la contaminación del ambiente.

Justificación práctica: la caracterización mineralógica y el análisis químico de los residuos mineros, al término de este trabajo, ha de servir para el estudio de la cinética de oxidación de los residuos mineros y predecir la carga contaminante. Los resultados obtenidos a futuro contribuirán para plantear métodos de mitigación ambiental en zonas mineras contaminadas.

Justificación teórica: La contaminación generada por la oxidación de sulfuros metálicos y la posterior liberación de cationes tóxicos es inminente. Las condiciones de meteorización

constante que existen en la naturaleza, provocan la generación de los drenajes ácidos de mina (Oyarzun, Higuera, & Lillo, 2011). En el presente trabajo se ha realizado la caracterización mineralógica de estos residuos mineros y se ha corroborado la presencia de elementos potencialmente tóxicos.

Justificación ambiental: La actividad minera está ligada a la economía y al ambiente. Esta actividad implica la remoción de material geológico modificando el entorno natural del medio, a ello se suma que durante y al término de las labores mineras, en especial de la actividad minera informal, no existe una normativa ambiental que regule sus actividades. Por lo que la contaminación es inevitable. Los resultados obtenidos en este trabajo han de permitir conocer, cuáles son los elementos tóxicos presentes en los residuos mineros, para poder plantear adecuados métodos de mitigación ambiental.

Justificación económica: Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación mediante difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente y la toma de imágenes mediante microsonda electrónica, han de servir para poder elegir a futuro un adecuado método de mitigación ambiental que como se sabe son muy costosas.

Justificación legal: En Perú, el Organismo de Evaluación Y Fiscalización Ambiental (OEFA), es el ente adscrito al ministerio del ambiente (MINAM) encargado de realizar la evaluación y fiscalización de las actividades minero metalúrgicas mediante el decreto supremo D.S N° 010- 2010-MINAM donde se aprueba los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas.

FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

Objetivo General

- Identificar los elementos potencialmente tóxicos en residuos mineros provenientes de la minería informal de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis de la región del Cusco.

Objetivos Específicos

1. Realizar el análisis químico haciendo uso de la técnica de fluorescencia de rayos X (vía seca), en los residuos mineros provenientes de la minería informal de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, Región Cusco.
2. Realizar el análisis químico haciendo uso de la técnica de espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (vía húmeda), en los residuos mineros provenientes de la minería informal de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, Región Cusco.
3. Identificar las fases minerales, mediante difracción de rayos X y realizar el reconocimiento de la morfología de los minerales presentes en las muestras, mediante microsonda electrónica.

HIPÓTESIS

Los residuos mineros provenientes de la minería informal, de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, son desechados sin control alguno a la intemperie, en donde las condiciones atmosféricas oxidantes están presentes en épocas secas y lluviosas; lo que podría dar lugar a la formación de drenajes ácidos de mina. Por lo que los elementos potencialmente tóxicos, presentes en las fases minerales de estos residuos mineros, podrían ser identificados, y

caracterizados mediante técnicas instrumentales como fluorescencia de rayos X (XRF), espectroscopia de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), difracción de rayos X (XRD) y microsonda electrónica (EPMA).

LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones que se ha presentado en el desarrollo del presente trabajo de investigación son las siguientes:

- El acceso a las zonas de muestreo y la recolección de muestras. Esto debido al tipo de trabajo que realizan, al ser informal la explotación minera, los trabajadores son muy temerosos con personas ajenas. El acceso a estas zonas de explotación es limitado y se corre cierto peligro el permanecer en las cercanías de sus labores mineras.
- Las técnicas, con las que se realizaron los diferentes análisis, requieren de un equipamiento con el que no se contaba en laboratorio. Los equipos que se han utilizado para realizar los análisis, se encuentran fuera de la universidad e incluso algunos fuera del país.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de estudio

1.1.1 Antecedentes Internacionales

A diferencia de otras actividades manufactureras, la actividad minera al término de la extracción de los minerales de interés económico, produce cambios en el ambiente,

los cuales en ocasiones son irreversibles. Cuando un área minera es abandonada sin remediar los daños ambientales, estos a futuro se convierten en pasivos ambientales mineros (PAM) (Aramburo & Olaya, 2012). Los pasivos ambientales son un problema ambiental a nivel mundial motivo por el cual se ha realizado numerosos estudios como los que mencionaré a continuación:

El trabajo titulado “CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ESCOMBRERAS MINERAS DE RIOTINTO: UNA BASE PARA VALORAR EL POTENCIAL CONTAMINANTE”, ha realizado su trabajo de investigación en las minas de Riotinto – España, donde los residuos mineros se extienden en una superficie superior a los 18 Km², el objetivo era identificar los diferentes tipos de escombreras y su distribución en el área y realizar una caracterización químico-mineralógica para valorar el potencial contaminante y establecer medidas de recuperación. La metodología empleada para el análisis mineralógico fue por difracción de rayos X (XRD), método de polvo, y el análisis químico por fluorescencia de rayos X (XRF). El tratamiento estadístico incluyó correlaciones, análisis de componentes principales y un análisis clúster realizado con los siguientes elementos mayoritarios y trazas: Si, Fe, Al, K, As, Cd, Co, Cu, Pb, Zn, Sn, Sb, Mo, Ag y Ti. Los resultados mineralógicos para las escombreras muestran las fases minerales de cuarzo, moscovita, clorita, caolinita, feldespatos, jarosita y pirita, con contenidos minoritarios hematitas, goethita y otros. Por el contrario, para el caso de residuos mineros tiene altos contenidos de pirita y jarosita, siendo minoritarios el cuarzo, filosilicatos, goethita, barita y sulfato hidratados. Los resultados químicos, revelan concentraciones muy variadas de elementos traza se detallan concentraciones

de hasta 41544 mg/kg Pb, 11457 mg/kg As, 8013 mg/kg Zn, 155 mg/kg Co, 134 mg/kg Ag y una pequeña escombrera con cerca de un 35% en Cu (Baena, Diéz, Huertos, & Carlos, 2011).

El trabajo titulado “PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN EL NOROESTE DE ARGENTINA: ASPECTOS MINERALÓGICOS, GEOQUÍMICOS Y CONSECUENCIAS AMBIENTALES” ha realizado estudios en tres pasivos mineros del Noroeste argentino. En estos tres pasivos se realizaron análisis de agua y de los residuos mineros. En el análisis de agua identificaron elementos contaminantes como arsénico, plomo, cobre, cadmio, zinc y antimonio, dicha identificación se realizó mediante técnica instrumental de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP–MS). En cuanto a los residuos mineros, estos fueron analizados por fluorescencia de rayos X (XRF). Finalmente, la determinación de minerales secundarios y arcillas fueron analizadas haciendo uso de la técnica de difracción de rayos X (XRD). Los minerales secundarios encontrados fueron rozenita, jarosita, szomolnokita, anglesita, norstrandita, ferricopiapita entre otros, estos minerales son precipitados comunes de desechos mineros ricos en sulfuros. (Kirschbaum, Murray, Arnosio, Tonda, & Cacciabue, 2012)

En el trabajo titulado “MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE METALES PESADOS CONTAMINANTES PRESENTES EN SUELOS MINEROS DEL SUR DE CHILE”, el objetivo de este trabajo era investigar los componentes mineralógicos de las diferentes fracciones de los sedimentos auríferos, poniendo énfasis en aquellos elementos tóxicos que constituyen un riesgo para la salud del hombre. La metodología empleada para el análisis de la composición química, se ha llevado a cabo mediante

fluorescencia de rayos X en tanto que, la caracterización mineralógica se ha realizado haciendo uso de un microscopio petrográfico y microsonda electrónica de barrido con microsonda incorporada. De la experimentación realizada, encontraron como principales metales pesados: mercurio, plomo, cadmio, cromo, telurio, indio, zinc, iridio, paladio, circonio, rubidio, estaño, cobalto, cobre, platino, oro y algunas tierras raras como; cerio, praseodimio, gadolinio, neodimio, samario y lantano. Los minerales encontradas fueron ilmenita, hornblenda, hiperstena, hematita, granate, cromita, clorita, augita, anfibolita-epidótica, magnetita, galena, cinabrio, olivino, esfalerita, cinabrio, zircón, cromita, epidota, marcasita, galena, granate, hematita, olivino, hiperstena, hornblenda, ilmenita, magnetita, oro y pirita (Muñoz, Vidal, & Montolio, 2002).

1.1.2 Antecedentes Nacionales

En nuestro país los estudios de caracterización mineralógica y química en residuos mineros son estudios que dieron su inicio debido a que el problema ambiental causado por la actividad minera ha superado las expectativas iniciales de contaminación. A continuación, se mencionan algunos de estos. El trabajo titulado “CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE RESIDUOS MINEROS DE MINERÍA ALUVIAL EN LA REGIÓN MADRE DE DIOS – PERÚ”, el objetivo fue la caracterización preliminar de arenas negras colectadas de diferentes concesiones mineras provenientes de la minería aluvial de la Región Madre de Dios, donde la metodología empleada para determinar parámetros físicos fue la metodología internacional de residuos sólidos y la determinación para la cuantificación del metal mercurio se ha realizado mediante espectrofotometría de emisión atómica, finalmente

la identificación de las fases minerales se ha realizado haciendo uso de difracción de rayos X. Los resultados de parámetros físicos muestran que los valores de pH están 7 y 6,5 y las conductividades de hasta 0.01092 Siemens, en cuanto a el mercurio total fue de 275 mg/kg de residuo, mientras que en Inambari un valor de 13,1 mg/Kg. Y como ultimo resultado, las fases minerales identificadas en las arenas negras fueron cuarzo, moscovita, caolinita, ilmenita y Goethita principalmente (Huamán-Paredes, Palma-Figueroa, & Flores-del Pino, 2020).

El trabajo titulado “BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN TEJIDOS DE VEGETACIÓN ACUÁTICA Y TERRESTRE EVALUADOS EN ÁREAS DONDE EXISTEN PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN EL PERÚ”, se colectaron muestras de vegetación acuática en lo ancho del rio. La recolección se realizó en las zonas de los pasivos mineros del distrito de Hualgayoc - Cajamarca. En las muestras de origen acuático, mediante espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), se encontraron trazas de mercurio, cadmio y selenio. En los tejidos acuáticos la concentración de arsénico llega hasta 9.7 ppm. En cuanto a los resultados obtenidos del análisis en plantas terrestres se observa que, el mercurio está por debajo del límite de detección (0.05ppm) y en algunos casos el resultado fue de ND (no detectado)(Cahuana & Aduvire, 2019).

El trabajo titulado “DETERMINACIÓN DE Pb, Cd, As EN AGUAS DEL RÍO SANTA EN EL PASIVO MINERO AMBIENTAL DE RECUAY, TICAPAMPA; RECUAY – ANCASH”, este trabajo se centró en el análisis y cuantificación de plomo, arsénico y cadmio mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) en las aguas del Rio Santa, el lugar de muestreo que eligieron fue en un tramo cercano

al pasivo ambiental minero de Recuay. Los resultados obtenidos revelaron que los niveles de arsénico, cadmio y plomo se encuentran en concentraciones superiores a los Límites Máximos Permisibles para la calidad ambiental del agua establecidos por el Ministerio del Ambiente (Evaristo, Wilfredo, & Quispe Pozo, 2015).

El trabajo titulado “ESTUDIO DE LOS METALES PESADOS EN EL RELAVE ABANDONADO DE TICAPAMPA”, tuvo como objetivo realizar el estudio de metales pesados presentes en la relavera de Ticapampa, la cual alberga residuo sólido minero abandonado en la Región de Ancash – Perú, mediante difracción de rayos X, donde se encontraron minerales como la galena y pirita, a los cuales el autor atribuye la generación de drenajes ácidos de mina (Romero, Medina, & Flores, 2008).

En el trabajo “EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL DE LOS PASIVOS AMBIENTALES DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA EN EL DEPARTAMENTO DE ANCASH, PERÚ”, se realizó el muestreo, tanto en la parte superficial como en profundidad, con el objetivo de disponer de muestras inalteradas. El estudio en ambos tipos de muestra permitió evaluar el riesgo ambiental en torno a las diferentes condiciones. De la caracterización de estos pasivos ambientales se ha resuelto que, las tonalidades variadas en la superficie del material se deben a los diversos procesos de oxidación que sufren los minerales que lo componen. La variación de las capas de oxidación va desde algunos centímetros hasta medio metro. Tomando en consideración los resultados de los ensayos de lixiviación y los criterios de clasificación de los residuos, se determinó que los residuos acumulados en la cuenca del Río Santa son muy peligrosos (Rodríguez, Estupiñán, Iglesias, & Castillo, 2007).

1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Actividad minera en Perú

Históricamente, el Perú tiene una larga tradición en la explotación de sus recursos naturales, en especial de sus recursos mineros. Desde antes y durante la época Republicana el oro y la plata han sido los pilares de la minería peruana, posteriormente esta actividad se fue masificando y diversificando, por lo que hoy en día es un importante productor de metales, es así que en el ranking mundial, Perú ocupa el segundo lugar en producción de cobre (10.7%), , tercer lugar en plata (11.4%), zinc (10.8%), cuarto lugar en plomo (5.5%) , estaño (7.6%) y octavo lugar en oro (2.7%) (Sánchez sánchez et al., 2020).

En la década de los 90's, se dio inicio a la privatización de estos recursos mineros, así también comienza la exploración de nuevos yacimientos para su posterior explotación. Las nuevas empresas transnacionales empezaron a trabajar bajo el enfoque de la “Nueva Minería”; es decir con responsabilidad social y ambiental (Lira & Aristondo, 2007). En paralelo la economía nacional inicia un crecimiento acelerado, es así que cuando las exportaciones mineras crecen 1%, el PBI incrementa 1.35%; generando una mayor recaudación al fisco en el año (Vasquez Guevara, 2021). En este contexto de precios altos de los minerales, particularmente del oro, la pequeña minería y la minería artesanal e informal se ha incrementado (Tupayachi, 2020).

En Perú, los principales tipos de yacimientos, según las características geológicas que presenta estos yacimientos son: epitermales de oro, sulfuros masivos pórfidos de cobre y skarn. Dentro de los principales metales que produce el Perú tenemos cobre

que se obtiene de minerales en forma de sulfuros y minerales oxidados. Otros metales de importancia son el oro, plata, zinc, plomo y molibdeno (SAC, 2000).

En las últimas dos décadas se pudo observar la expansión minera en el territorio peruano. Dicha expansión se dio en los diferentes estratos de producción minera, es decir; gran, mediana y pequeña minería y minera artesanal. La producción de oro peruano, mayormente se realizaba de manera informal en modo de extracción aluvial y lavaderos (De Echave, 2016).

La Región Sur Andina del Perú goza de características geológicas que permiten albergar gran parte de los recursos minerales. La principal característica son las cadenas montañosas, que se extienden a lo largo del territorio peruano desde Tumbes (norte del Perú), pasando por el centro hasta llegar a Tacna (sur del Perú). Las montañas del norte se unen a las del centro mediante el Nudo de Pasco y las del centro a las del sur mediante el nudo de Vilcanota (Aybar Camacho, 2015). Es alrededor de estos accidentes geográficos, o nudos, que se desarrollan los denominados mega proyectos mineros (Imagen 1); por mencionar algunos tenemos: Yanacocha (Cajamarca), Toromocho (Junín), Pierina y Antamina (Ancash), Marcona (Ica), Las Bambas (Apuímac), Cerro Verde (Arequipa), Quellaveco (Tacna) y Toquepala (Tacna) (Quinde Obregón, 2021).

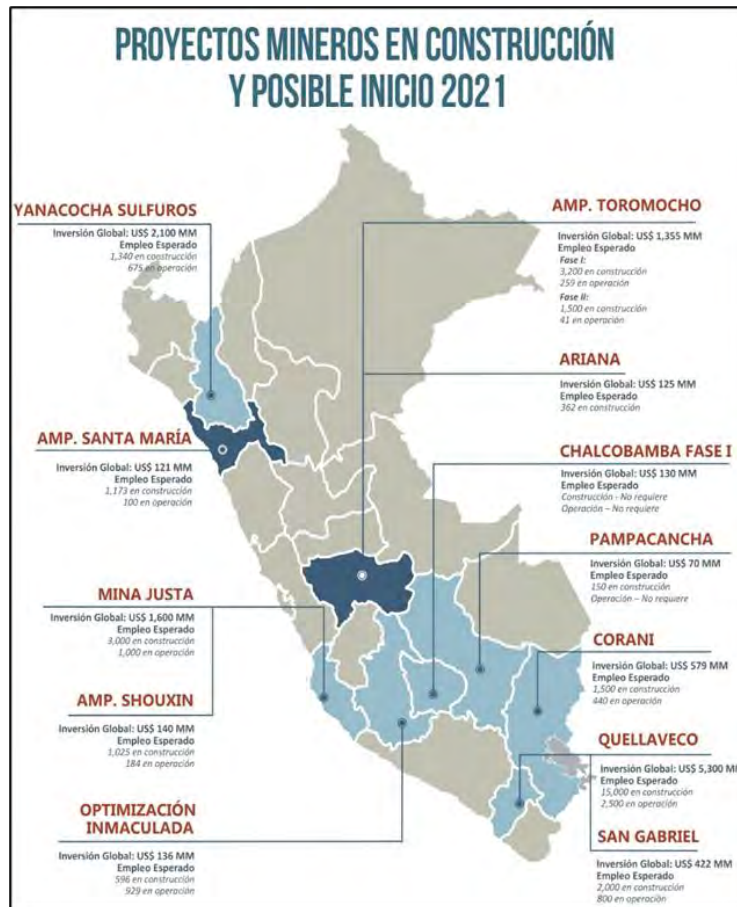


Imagen 1: Proyectos mineros en construcción y posible inicio 2021 en Perú.

Fuente: (Obregón, 2021)

El desarrollo de la actividad minera en la Región Cusco, está centrada en la extracción de cobre, oro y plata y según el mapa metalogénico del Perú (Imagen 2) , en esta Región se ubican cuatro franjas metalogénicas (Quispe et al., 2007):

Franja I: Depósitos de oro en rocas sedimentarias del Ordovícico y Silúrico – Devónico.

Franja II: Depósitos de Skarns – mesotermiales de Cu del pérmico.

Franja XIV: Pórfidos – Skarn de Cu-Mo (Au-Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusivos de Eoceno-Oligoceno.

Franja XV: Yacimientos de Sn del oligoceno – mioceno.

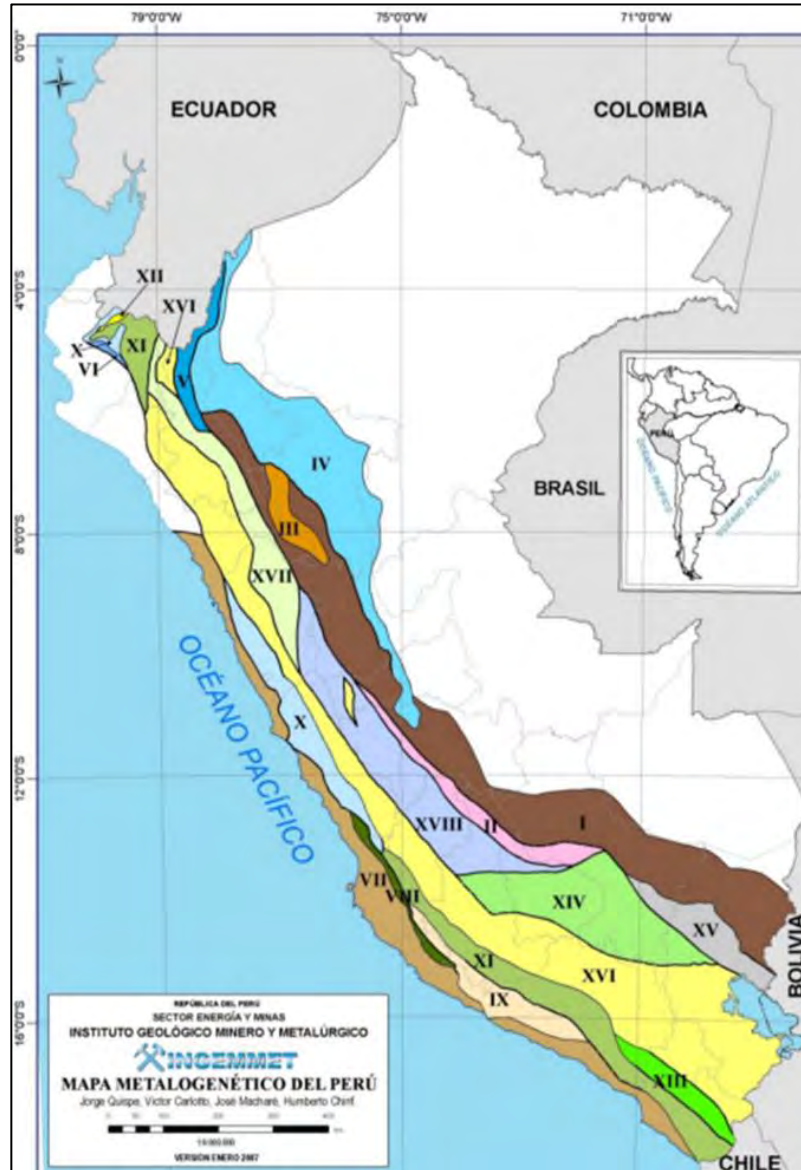


Imagen 2: Mapa metalogénico del Perú 2006, publicado en enero de 2007

Fuente:(INGEMMET, 2006)

1.2.2 Clasificación de la minería en el Perú

El contexto legal vigente conformado por la Ley General de Minería D.S. 014-92-EM, la Ley N° 27651 de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal y su respectivo Reglamento D.S. 013-2002-EM, ha determinado definiciones y parámetros de la actividad minera que se sustentan en dos aspectos: a)

Extensión de concesiones mineras y b) La capacidad productiva como se expresa en el siguiente cuadro:

Estrato	Extensión de la concesión	Capacidad productiva
Gran Minería	Mas de 2000 Has.	Mas de 5000 TM/día
Mediana Minería	Mas de 2000 Has.	Hasta 5000 TM/día
Pequeña Minería	Hasta 2000 Has.	Hasta 350 TM/día (1)
Minería artesanal	Hasta 2000 Has.	Hasta 25 TM/día (2)
Materiales de construcción, arenas, gravas auríferas de placer, metales pesados detriticos (1) hasta 3000 m ³ /día (2) hasta 200 m ³ /día		

Tabla 1.- Estratos de la minería en Perú.
Fuente:(MINEM, 2012).

La minería peruana también se puede clasificar considerando el Marco Normativo vigente y la clasificación de Guillermo Garcia Montufar, a continuación, en la tabla 2, se muestra los tipos de concesiones mineras según diversos criterios de clasificación (Lira & Aristondo, 2007):

Criterios	Tipos de concesión
1. Tipo de actividad	De exploración y explotación De beneficio De labor general Transporte minero
2. Naturaleza de las sustancias	1)Metálicas 2)No metálicas 3)Carboníferas 4)Geotérmicas 5)Petróleo 6)Piedras preciosas y semipreciosas
3. Forma de yacimientos	Algunos las clasifican en: 1) Capas o Mantos 2) Vetas o Filones

	3)Formaciones irregulares Otros lo clasifican en De aluvión De veta en rocas De sedimento en capas
4. Método de explotación	De superficie (a cielo o tajo abierto) Subterráneos o de socavón
5. Valor económico de las sustancias	Variable según oferta y demanda
6. Ubicación de los minerales	De suelo De subsuelo
7. Denunciabilidad	Pueden ser entregados en concesión No pueden ser entregados
8. Tamaño	Grande Mediana Pequeña Artesanal
9. Tipo de producción	Plata, Hierro, Cobre, Zinc, Plomo, Oro, Estaño, otros
10. Legalidad	Formal Informal Evasiva Elusiva

Tabla 2: Criterios de clasificación minera según el tipo de concesión minera.
Fuente: OSINERGMIN (Lira & Aristondo, 2007).

1.2.3 Minería informal en el Perú

En el Perú, el decreto legislativo D.L. N° 1105-2012 del Ministerio de Energía y Minas, establece disposiciones para el proceso de formalización de las actividades de pequeña minería y minería artesanal. Según el artículo 2°, define como minería informal a la actividad minera que es realizada usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal). También es considerado minería informal, aquella que no cumpla con las exigencias de las normas de carácter

administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades, en zonas prohibidas para la actividad minera y por persona, natural o jurídica, o grupo de personas organizadas para ejercer dicha actividad que hayan iniciado un proceso de formalización conforme a como se establece en el decreto legislativo (MINEM, 2012).

En el Perú, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), es el ente rector del sector, y para cumplir con todas las funciones encargadas, este ministerio está compuesto por:

	FUNCIONES
Consejo de minería	Uniformizar la jurisprudencia administrativa del sector; proponer disposiciones legales y administrativas para el perfeccionamiento y mejor aplicación de la legislación minera y resolver sobre daños y perjuicios reclamados por vía administrativa.
Dirección general de minería	Fiscaliza y promueve las actividades mineras cautelando el uso racional de los recursos mineros en armonía con el medio ambiente.
Dirección de asuntos ambientales	Propone la política, las normas técnicas y legales relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente en el sector, norma la evaluación de los impactos ambientales, promueve el uso racional de los recursos naturales y aprueba los EIA y PAMA
Dirección de fiscalización minera	Opina y dictamina sobre los contratos de estabilidad jurídica, sobre el incumplimiento de los titulares de derechos mineros, sobre los programas de vivienda, salud, bienestar y seguridad minera y califica a los titulares mineros en los estratos de producción pertinentes
Instituto nacional de concesiones y catastro minero	Otorga títulos de concesiones mineras. El catastro ha sido modernizado y computarizado facilitando así la identificación de concesiones e impidiendo superposiciones entre ellas.
El instituto geológico, minero y metalúrgico	Se encarga de compilar, elaborar y difundir la información geológica y minera nacional, provee servicios de laboratorio, rayos X y de imágenes

	satelitales, así como es depositario de una serie de publicaciones y bibliografía técnica.
--	--

Tabla 3: Marco Institucional del Ministerio de Energía y Minas

Fuente: (Glave, Kuramoto, & development, 2002).

Hasta antes de la década de los 90's, se carecía de un marco normativo legal que regule las actividades mineras, si bien existía normas ambientales, no se proponían acciones específicas para mitigar los impactos y/o adecuar los procesos tecnológicos, a consecuencia de ello, las empresas mineras de entonces contaminaron y causaron el deterioro de diversos ecosistemas, asimismo no existían entidades encargadas de la fiscalización. Pero a inicios del año 2000, incrementa la preocupación por la protección ambiental por lo que se modifica la legislación ambiental de la década anterior, la nueva legislación ambiental introduce cambios como la definición de montos mínimos de inversión en programas de adecuación determinando el 1 % de las ventas totales, asimismo introduce los tres instrumentos claves de gestión pública ambiental sectorial como son: El plan de manejo y adecuación ambiental (PAMA) para las operaciones en marcha, el estudio del impacto ambiental (EIA) para las nuevas inversiones, y las Auditorías Ambientales para fiscalizar el cumplimiento de los primeros (Glave, Kuramoto, & development, 2002) .

Los EIA son estudios que deben de evaluar el impacto resultante de la realización del proyecto en las condiciones físicas, biológicas, socio económicas y culturales del medio. También debe de incluir un plan de cierre de operaciones, para evitar posteriores efectos adversos en el medio ambiente. Mientras que el PAMA, sirve para mitigar los efectos de sus actividades sobre el ambiente y adecuar sus emisiones a lo permitido por la ley. La Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA), es la

encargada de aprobar estos estudios junto con las empresas involucradas, como complemento a estos instrumentos la DGAA, exige las declaraciones juradas de las operaciones de su empresa que afecte al medio ambiente, la cual debe de estar refrendada por un auditor ambiental certificado. De igual modo, la DGAA, realiza evaluaciones ambientales territoriales en cuencas con presencia de actividades mineras en el país. Finalmente, un paso importante, en la legislación ambiental fue el establecimiento de límites máximos permisibles de los principales indicadores de contaminación minera y la uniformización de los procedimientos mediante normas técnicas de control de calidad del aire y emisiones y calidad del agua (Glave et al., 2002).

Es importante señalar que existen grandes diferencias de manejo ambiental entre la grande, mediana, pequeña minería y la minería artesanal; la legislación exige el cumplimiento de las normas a la gran y mediana minería. Sin embargo, la pequeña minería y la artesanal, es un grupo muy heterogéneo, que desconoce el impacto ambiental de sus operaciones y el cumplimiento de reglamentos ambientales.

1.3 Definición de Términos Básicos

1.3.1 Minería

La minería es una actividad extractiva de minerales metálicos y no metálicos, ambos considerados como recursos no renovables. Los yacimientos mineros son los lugares en donde se encuentran concentrados estos minerales. Para ser considerado como yacimiento minero, la extracción de los minerales de estos lugares debe de ser económicamente rentable. Los minerales de donde se extraen los metales con valor económico es la mena, mientras que la ganga, es el término que se le da al conjunto

de minerales que carecen de valor económico y que son desechados, como residuos mineros, después de extraer la mena.(Herrmann & Zappettini, 2014)

1.3.2 Mineralogía

La mineralogía es el estudio de sustancias cristalinas que se encuentran en la naturaleza. Estudia especies inorgánicas, generalmente minerales, sus propiedades, origen y clasificación (Cornelius Klein & Hurlbut, 2003). El estudio de la mineralogía es amplio por lo que se divide en:

- **Mineralogía general:** Estudia la estructura, morfología, la química, el crecimiento, la disolución y la física del cristal.
- **Mineralogía sistemática:** Estudia el origen, ocurrencia, propiedades específicas y relaciones mutuas de los minerales.
- **Petrología:** Estudia la formación, propiedades y alteración de las rocas.
- **Geoquímica:** Estudia la abundancia de los elementos químicos (incluye isotopos) en la tierra, junto con su distribución y las leyes que rigen su distribución.
- **Mineralogía aplicada:** Es la relación de la mineralogía y su aplicación en otras ciencias como la geología, la metalurgia, la química, la física, la biología, la astronomía, entre otras.

1.3.3 Mineral

Un mineral es un sólido homogéneo formado mediante procesos naturales e inorgánicos, que tiene una composición química definida y presenta disposición atómica ordenada. La definición de sólido homogéneo, excluye a los líquidos y gases,

debido a que consta de una única sustancia sólida que no puede ser dividida en sus componentes individuales por métodos físicos (Cornelius Klein & Hurlbut, 2003).

El término “formado por procesos naturales e inorgánicos” hace referencia a que, una sustancia sintetizada en el laboratorio no puede ser considerada como mineral. El término “inorgánico” viene acompañado del adverbio “normalmente” porque la mineralogía también incluye a los minerales formados mediante procesos orgánicos a los que se les puede atribuir el concepto de mineral, como ejemplo tenemos a las conchas de las ostras que albergan en su interior una perla constituida en alto porcentaje por aragonito (CaCO_3).

El petróleo y el carbón son frecuentemente considerados como combustibles minerales. Sin embargo, están excluidos de esta definición a pesar de que se forman por procesos naturales, esto es debido a que no poseen una composición química definida ni distribución atómica ordenada.

Por último, el término “posee una disposición atómica ordenada” indica la existencia de un entramado de átomos ordenados según un modelo geométrico regular confiriéndoles una estructura cristalina definida (Cornelius Klein & Hurlbut, 2003).

1.3.4 Clasificación de los minerales

El mineralogista alemán Karl Hugo Strunz (1910 - 2006) ha realizado la clasificación de los minerales en nueve clases, esta división está en base a la composición química y la estructura del cristal. La división, según Strunz, se muestra en la tabla 4 (Torrego Martín, 2013).

GRUPO		REPRESENTACIÓN	EJEMPLOS
ELEMENTOS NATIVOS		Au Cu	Oro - Au Cobre - Cu
SULFUROS		S^{2-}	Pirita - FeS_2 Bornita - Cu_5FeS_4
HALUROS		Cl^-	Halita - NaCl Atacamita $Cu_2(OH)_3Cl$
ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS		O^{2-} OH^-	Cuarzo - SiO_2 Brucita - $Mg(OH)_2$
CARBONATOS Y NITRATOS		CO_3^{2-} NO_3^-	Calcita - $CaCO_3$ Azurita $Cu_3[(OH/CO_3)_2]$ Nitratina - caliche ($NaNO_3$)
BORATOS		B_x	Bórax - $Na_2[B_4O_5(OH)_4] \cdot 8H_2O$
SULFATOS, CROMATOS Y MOLIBDATOS		SO_4^{2-}	Yeso - $CaSO_4 \cdot xH_2O$ Baritina - $BaSO_4$
FOSFATOS, ARSENIATOS Y VANADATOS		PO_4^{3-}	Apatita $Ca_5[(F, Cl, OH)/PO_4]_3$ Fosfosiderita $FePO_4 \cdot xH_2O$
SILICATOS	Nesosilicatos	Si_xO_y	Olivino, Granate, Cianita
	Sorosilicatos		Epidota
	Ciclosilicatos		Turmalina
	Inosilicatos		Anfíbol: Antofilita Piroxenos

	Filosilicatos		Biotita, Muscovita Crisocola
	Tectosilicatos		Feldespatos de sodio; Albita, Plagioclasa Sodalita Zeolitas $\text{Na}_8(\text{Cl}, \text{OH}_2[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]$

Tabla 4: Clasificación de los minerales según STRUNZ.

Fuente: (Torrego Martín, 2013)

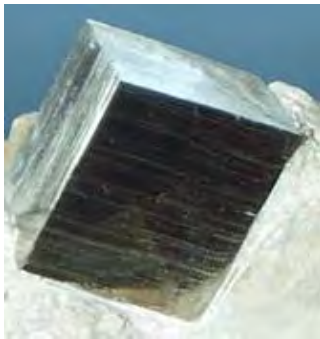
1.3.5 Sulfuros

Los minerales sulfurados o sulfuros son la combinación de azufre con número de oxidación -2 unido a otro elemento metálico como el cobre, hierro, plomo, zinc u otros. Los sulfuros son minerales considerados de importancia, ya que comprenden la mayoría de las menas de minerales que contienen elementos con alto valor económico. Muchos de los sulfuros tienen enlaces covalentes e iónicos pero la mayoría de ellos tienen propiedades de los metales y en ellos predomina parcialmente el enlace metálico (Cornelius Klein & Hurlbut, 2003).

Las propiedades físicas que los caracterizan son: su aspecto metálico, brillo metálico y grado de transparencia opaco. En tanto que, la dureza varía de acuerdo a su estructura. En cuanto a las características químicas, los sulfuros de la mayoría de los metales son insolubles, pero de los metales alcalinos o alcalino térreos son muy solubles e incluso higroscópicos. Los sulfuros más solubles necesitan para su formación un pH alto mientras los insolubles se pueden formar a casi cualquier valor de pH.

En la naturaleza este tipo de minerales sulfurados se encuentran frecuentemente en zonas hidrotermales (hipotermiales, mesotermiales y epitermales), constituyéndose como menas importantes para la obtención de minerales con alto valor económico.

En la imagen 3, podemos observar algunas imágenes de los minerales sulfurados más comunes son: Pirita (FeS_2), Bornita (Cu_5FeS_4), Tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), esfalerita (ZnS), Galena (PbS), Cinabrio (HgS), Molibdenita (MoS_2) y Rejalgar (AsS).



Pirita



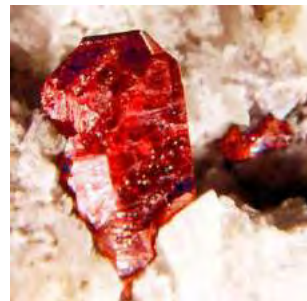
Bornita



Tetraedrita



Esfalerita



Cinabrio

Galena



Molibdenita

Rejalgar

*Imagen 3: minerales sulfurados más comunes
Fuente: (Mineralogy Database,2021)*

1.3.6 Residuos mineros

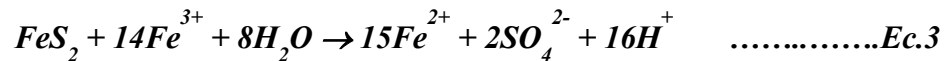
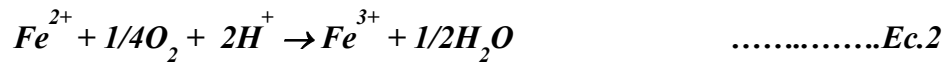
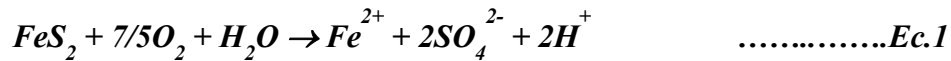
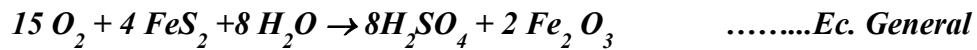
La actividad minera implica la remoción de grandes cantidades de material geológico, para recuperar sólo pequeños volúmenes del mineral que contenga los elementos con alto valor económico. La extracción de estos minerales de los yacimientos mineros se convierte en una reserva mineral, siempre y cuando el recurso mineral esté presente en una concentración elevada y cuya extracción permita una rentabilidad razonable de la inversión en la mina (Dammert & Molinelli, 2007). El material geológico restante luego de la extracción del metal de interés, es conocido como residuo minero. Los residuos mineros contienen cantidades considerables de metales y minerales ricos en sulfuros.

Los residuos mineros están constituidos fundamentalmente por todos los materiales de desecho generados en el proceso de extracción de los minerales con alto valor económico.

Estos residuos mineros, al ser expuestos a la intemperie, pueden sufrir una serie de transformaciones que conlleven la movilización de metales generando un problema de gran importancia ambiental como lo es la generación de drenajes ácidos de mina.

1.3.7 Generación de los Drenajes Ácidos de Mina (AMD)

Como se describió con anterioridad, los residuos mineros contienen cantidades importantes de sulfuros. Estos residuos al no ser almacenados adecuadamente y al entrar en contacto a condiciones atmosféricas del medio, a futuro cercano, se convierten en los denominados drenajes ácidos de mina, por diversas reacciones de oxidación (Moreno Perlín, 2014). Los drenajes ácidos de mina se caracterizan por presentar bajos valores de pH, esto a causa de la lixiviación de los sulfuros (Blowes, Ptacek, Jambor, & Weisener, 2003).



Las reacciones inician mayormente con la oxidación de la pirita (FeS₂) que tiene como productos, en la ecuación general, ácido sulfúrico (H₂SO₄) y óxido férrico (Fe₂O₃). Sin embargo, este es un proceso mucho más complejo. El sulfuro metálico al entrar en contacto con el aire y agua se oxida espontáneamente (Ec. 1), como producto de esta reacción se obtienen dos hidrogeniones que son los responsables de bajar el pH. Otro subproducto de la Ec. 1 es el ión del óxido de hierro II.

Seguidamente en la ecuación 2, el ion del óxido de hierro II continúa oxidándose llegando a formar el ion del óxido de hierro III y medio mol de agua. El ion del óxido de hierro II, actúa como catalizador en la Ec. 3 para que continúe la oxidación de la pirita para formar quince moles de ion del óxido de hierro II, dos moles de sulfato y dieciséis moles de hidrogeniones, contribuyendo así aún más con la acidez del medio y liberándose energía en cada una de las reacciones. A medida que baja el pH ($\text{pH} < 3$), debido a la oxidación de la pirita, se incrementa la importancia relativa de la actividad de las bacterias, entre las que destaca la *Thiobacillus ferrooxidans* (Miguel Sarmiento, 2014), estas bacterias también actúan como catalizadores para favorecer aún más el desarrollo de las reacciones. Sin embargo, en la ecuación 4 se muestra que una vez consumida toda la pirita, que contiene el ion del óxido de hierro II, precipita como ion férrico y al entrar en contacto con el agua produce el hidróxido férrico haciendo que teóricamente los valores de pH se incrementen ($\text{pH} > 3.5$).

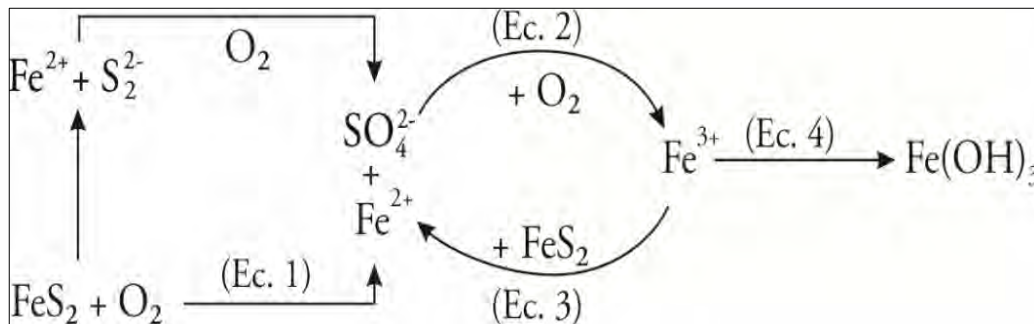


Gráfico 1: Ciclo de oxidación de la pirita.
Fuente: (Aduvire, 2006)

El gráfico 1 muestra el ciclo de oxidación continua de la pirita (Aduvire, 2006), donde se observa que este proceso continuará hasta que se consuma, teóricamente, toda la

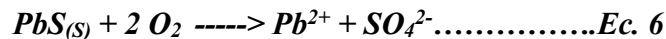
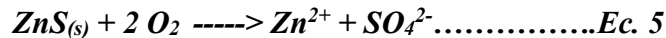
pirita presente o se agote el consumo de oxígeno y/o se incremente los valores de pH (mayores a 3.5), será entonces cuando se dé lugar a la ecuación 4. Sin embargo, el consumo total de la pirita podría tomar cientos de años y en algunos casos hasta miles, ahí la importancia con la que se debe manejar los residuos mineros.

Los drenajes ácidos de mina (AMD), además de la modificación en los valores del pH y la liberación de elementos potencialmente tóxicos. Otro de los problemas ambientales que genera es la degradación de la calidad de los suelos, las aguas superficiales y subterráneas. En consecuencia, la contaminación de las aguas y suelos a causa de los AMD imposibilita cualquier uso que se le quiera dar a estos recursos naturales, ya sea agrícola, doméstico o industrial. El carácter ácido de estas aguas da lugar a una mayor capacidad de disolución de elementos tóxicos como el hierro, arsénico, cobre, cinc, cadmio, lo que podría facilitar la acumulación en plantas y, por lo tanto; la posibilidad de que estos entren a la cadena trópica es más alta.

1.3.8 Oxidación de otros sulfuros

En los depósitos de residuos mineros, por su naturaleza metálica el sulfuro en abundancia es la pirita. Sin embargo, estos depósitos también pueden contener otros minerales sulfurados con valor económico como la esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcosina (Cu₂S), cobaltita (CoAsS) y pirrotita (Fe_{1-x}S).

Estos sulfuros, al igual que la pirita pasan por una serie de reacciones que, aunque no aportan acidez al medio, provocan la liberación de grandes cantidades de elementos tóxicos como el Zn, Pb, Cu, Cd y As. A continuación se muestran como ejemplo las reacciones de disociación de la esfalerita, galena y calcopirita (Olías Álvarez, Nieto Liñán, Miguel Sarmiento, & Ruiz Cánovas, 2010).



Los metales liberados a valores de pH neutros y alcalinos son poco móviles, pero a bajos valores de pH y a condiciones oxidantes se incrementa su movilidad y pueden permanecer en el agua en concentraciones muy elevadas (Miguel Sarmiento, 2014). Los metales, una vez en solución, son transportados por el cauce de riachuelos, ríos, aguas subterráneas.

1.3.9 Elementos tóxicos

La producción del drenaje ácido de mina, es el medio de liberación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el zinc, cadmio, mercurio, arsénico, plomo, hierro y otros entran en solución (Asta Andrés et al., 2011). La emisión de estos elementos sobre la tierra resultan de la explotación de depósitos minerales sulfurados.(Simate & Ndlovu, 2014). Estos elementos al filtrarse en el entorno producen la degradación de la calidad del agua y el suelo.

En el caso de los residuos de una mina, la peligrosidad de estos elementos está relacionada básicamente con la toxicidad potencial, la cual se debe a la presencia de elementos dañinos, que en su mayoría son metales o elementos no metálicos de frontera, como arsénico y selenio. Su efecto en los organismos se debe a que sustituyen al elemento central de una biomolécula, bloquean el sitio activo, descoordinan a los ligantes, o los precipitan, lo cual evita su funcionamiento normal (Gutiérrez Ruiz & Moreno Turrent, 1995).

La peligrosidad de los residuos puede deberse también a la presencia de compuestos, cuya toxicidad no está relacionada con la del elemento pesado que lo conforma, sino con las propiedades del compuesto. Por ejemplo, los cianuros que están formados por carbono y nitrógeno, componentes esenciales para la vida, forman un compuesto altamente tóxico, y al tener un par de electrones libres, puede sustituir a ligantes esenciales de una biomolécula. Tal es el caso del principal componente de la sangre, la hemoglobina, ya que el cianuro forma hexacianoferratos con el hierro, que es el elemento central de este compuesto, afectando el transporte de oxígeno a todo el cuerpo (muerte por asfixia) (Gutiérrez Ruiz & Moreno Turrent, 1995).

En Perú, el ministerio del ambiente mediante el decreto supremo N° 010-2010-MINAM (Anexo 3), aprobó nuevos Límites Máximos permisibles (LMP) para descarga de efluentes líquidos de actividades minero- metalúrgicas. Los nuevos LMP, establecen que se debe de medir los parámetros totales de metales como el Cu, Cr, Cd, Hg, Pb, Zn y As. Esto implica, la medición de no solo metales disueltos, sino también los metales en forma sólida, con lo que se determina la carga contaminante de los efluentes. Los parámetros analizados que llegan a superar los LMP, deben ser considerados como tóxicos, ya que dichos elementos en concentraciones elevadas son peligrosos para todos los seres vivos que se encuentran en el entorno. (MINAM, 2010)

1.4 Técnicas Instrumentales

1.4.1 Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X o XRF (X-ray fluorescence) es una técnica capaz de detectar la concentración de elementos con números atómicos entre el 11 (Na; $Z=11$)

y el 92 (U; Z=92) (Gómez López, 2021). La cantidad de muestra requerida para este análisis es mínima y, al ser un método analítico no destructivo tiene una amplia aplicación en arqueología, ciencias forenses, medicina, medio ambiente, geología y entre otras (De la Cruz Echaccaya, 2018).

La fluorescencia de rayos X, es una técnica espectroscópica que utiliza los rayos X secundarios o de fluorescencia emitidos por la muestra al ser excitados por una fuente de radiación X. Los rayos X secundarios tienen una intensidad proporcional a la concentración de cada elemento presente en la muestra; con la cual, es posible realizar un análisis cualitativo y cuantitativo (De la Cruz Echaccaya, 2018).

La radiación incidente o primaria expulsa electrones de las capas interiores del átomo (efecto fotoeléctrico) y genera la formación de un ion positivo, lo que hace que los electrones de las orbitas externas se desplacen a ocupar las orbitas internas, liberando un exceso de energía en forma de un fotón de rayos X secundario (Gráfico 2). Los detectores de rayos X analizan las energías de los fotones emitidos por la muestra.

La energía de los fotones secundarios emitidos por la muestra es única para los átomos que la componen y no dependen de la sustancia química en la que se encuentran, ya que estas radiaciones están originadas por transiciones entre los niveles energéticos internos cuyas energías no se ven afectadas por el tipo de enlace existente (Valentinuzzi, 2008).

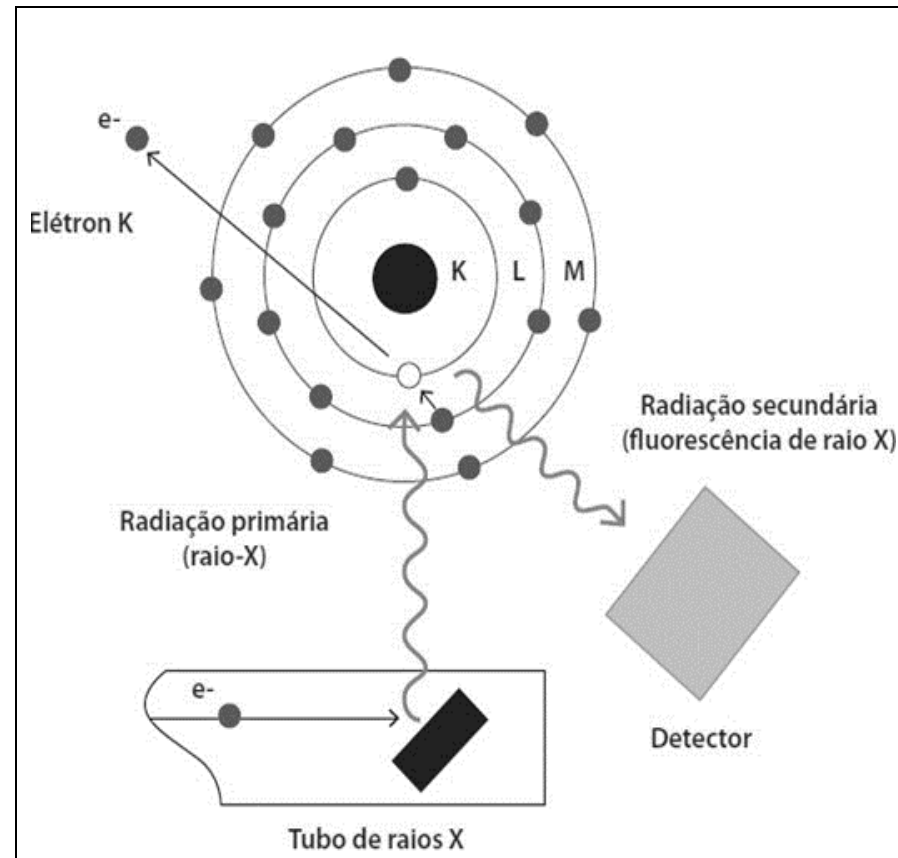


Gráfico 2: Esquema de Fluorescência de Rayos X.
Fuente: (Tomachuk, 2012)

Los rayos X fueron clasificados como radiación electromagnética de baja longitud de onda en consecuencia, poseen alta energía. La energía de los fotones de rayos X (E) y su frecuencia (ν) están relacionadas mediante la conocida expresión de Planck (Ecuación 8):

$$E=h\nu; E=\frac{hc}{\lambda}.....\text{Ec. 8}$$

Donde:

h: Es la constante de Planck

\nu: Es la frecuencia que es inversamente proporcional a la longitud de onda ($\nu = c/\lambda$; c es la velocidad de la luz)

\lambda: Longitud de onda

Las líneas características son una serie de líneas espectrales características del elemento emisor, se originan cuando los electrones de capas superiores llenan la vacancia producida en las capas inferiores, en cada una de estas transiciones hay una pérdida de energía que aparece como fotón de rayos X característico producida por excitación de rayos X y por otras fuentes de radiación externa como decaimientos alfa, beta y gamma (Romero Blanco, 2015). En el grafico 3, se muestra las posibles transiciones electrónicas permitidas.

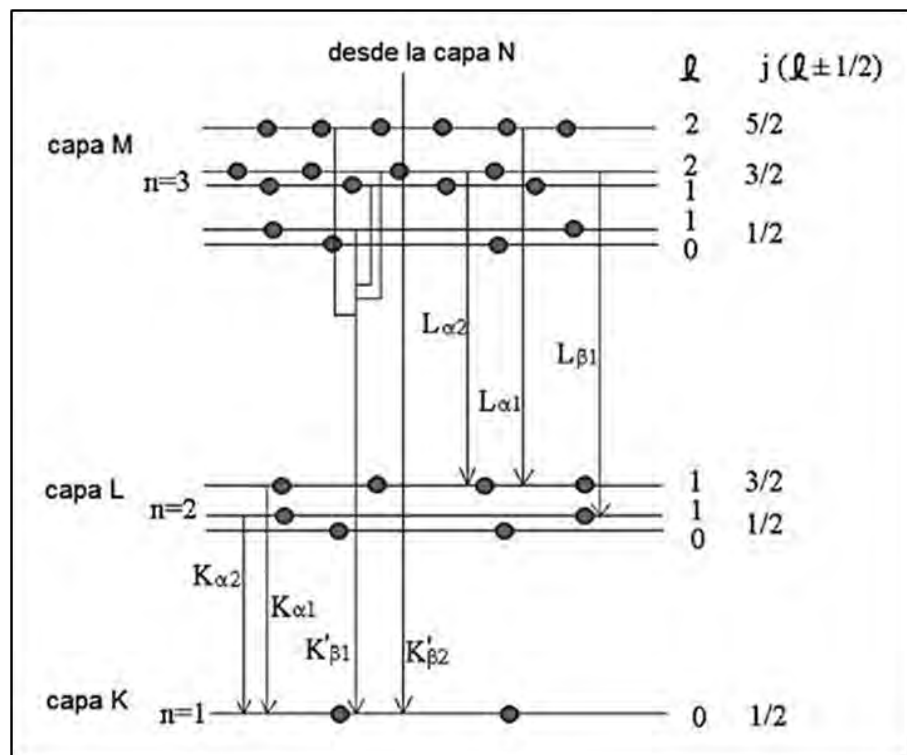


Gráfico 3: Diagrama genérico de niveles de energía atómicos y transiciones energéticas permitidas.

Fuente: (Abraham, 2009)

Para comprender el origen de las líneas características según el modelo de Bohr, los electrones se encuentran en capas designadas K, L, M, N, etc. siendo K la capa más cercana al núcleo. La distribución de electrones en cada capa se da de acuerdo al momento angular y dirección de spin, designándose un parámetro de números

cuánticos obedeciendo al principio de exclusión de Pauli. Es así que, dos electrones en un átomo no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos (Romero Blanco, 2015).

A cada capa le corresponde la denominada energía del borde de absorción (energía de ligadura), la cual es la mínima energía (o máxima longitud de onda) necesaria que debe tener un fotón para expulsar un electrón de un nivel dado en un átomo de un elemento en particular. Para cada elemento, la energía de borde de absorción de cada nivel es mayor cuando más cerca se encuentre al núcleo. Y para cada nivel la energía del borde de absorción se incrementa a medida que aumenta el número atómico (Valentinuzzi, 2008).

1.4.2 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X o XRD (X-ray diffraction) es una técnica no destructiva que brinda información sobre los parámetros de red, sistema cristalina, simetría, fracción cristalina amorfa y el tamaño de cristal (Romero Blanco, 2015). Toda estructura cristalina consta de unos planos reticulares y picos característicos, por lo que mediante los difractogramas obtenidos es posible su identificación prestando atención a los picos de mayor intensidad. (Aulet et al., 2016).

La difracción de rayos X depende de las características del material cristalino sobre el que incide los rayos X, del ángulo de incidencia y longitud de onda de dicha de la radiación. La difracción se produce al bombardear electrones de alta energía sobre una muestra, el haz de electrones al incidir sobre el cristal que tiene átomos periódicamente dispuestos en el espacio hace que los rayos se manifiesten en forma

de dispersión coherente cumpliendo la ley de Bragg (Ecuación 9), dichos rayos generan interferencias constructivas o destructivas.(Romero Blanco, 2015)

$$n\lambda=2d\text{sen}\theta\text{.....Ec. 9}$$

donde:

n: Es un numero entero.

λ : Es la longitud de onda.

d: Es la distancia de separación entre los planos paralelos sucesivos.

θ : Es el ángulo de incidencia del haz de rayos X respecto a la muestra.

En los difractogramas el área bajo la curva permite cuantificar la proporción de la fase presente y, el ancho medio del pico principal permite calcular el tamaño de la respectiva fase cristalina. La identificación de cada fase se hace mediante la comparación del difractograma del análisis con otros difractogramas característicos que se encuentran en bases de datos como la ICDD (International Center for Diffraction Data) o AMSCSD (American Mineralogist Crystal Structure Database), que se encuentran agrupados en compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales. (Romero Blanco, 2015)

1.4.3 Espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente

La espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente o ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), es una técnica analítica que de manera rápida, precisa y exacta determina y cuantifica la mayoría de los elementos de la tabla periódica a niveles traza, hasta un rango mínimo de cinco ordenes de

magnitud es decir desde ppt a cantidades mayores de ppm. Esta técnica proporciona información multielemental, isotópica y estructural de manera simultánea, todo ello debido a que esta técnica adopta dos propiedades analíticas como son la obtención de matriz libres de interferencias y la presencia de una alta relación entre señal y ruido (Díaz Zamora, 2017).

El equipo de ICP-MS puede analizar cualquier tipo de muestras líquidas, sin embargo las muestras sólidas pueden ser analizadas usando sistemas láser o celdas calentadas para vaporizar las muestras y, en forma gaseosa se introducen directamente en el instrumento; es por ello su aplicación en las ciencias forenses, farmacología, petroquímica, geología y entre otras (Díaz Zamora, 2017).

El ICP- MS, se basa en un método para la generación de iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas) (Skoog, Holler, & Nieman, 2008).

Los componentes de un ICP-MS son:

- **Sistema de introducción de muestras:** Consiste en una bomba peristáltica, nebulizador y cámara de rocío.
- **Sistema de antorcha ICP:** Es donde se genera el plasma de argón.
- **Interfase:** Acomoda la presión atmosférica a la que se encuentra la fuente de iones ICP al alto vacío en que se encuentra el espectrómetro de masa.
- **Sistema de vacío:** Proporciona el alto vacío para la óptica iónica, el cuadrupolo y el detector.
- **Lentes iónicos:** Enfocan a los iones dentro de un haz para su transmisión dentro del cuadrupolo.

- **Cuadrupolo:** Actúa como un filtro de masa para ordenar los iones por su relación masa a carga (m/Z).
- **Detector:** Cuenta a los iones individuales que pasan a través del cuadrupolo.
- **Sistema de control y manejo de datos:** Controla los parámetros del instrumento y el manejo de datos hasta la obtención de resultados.

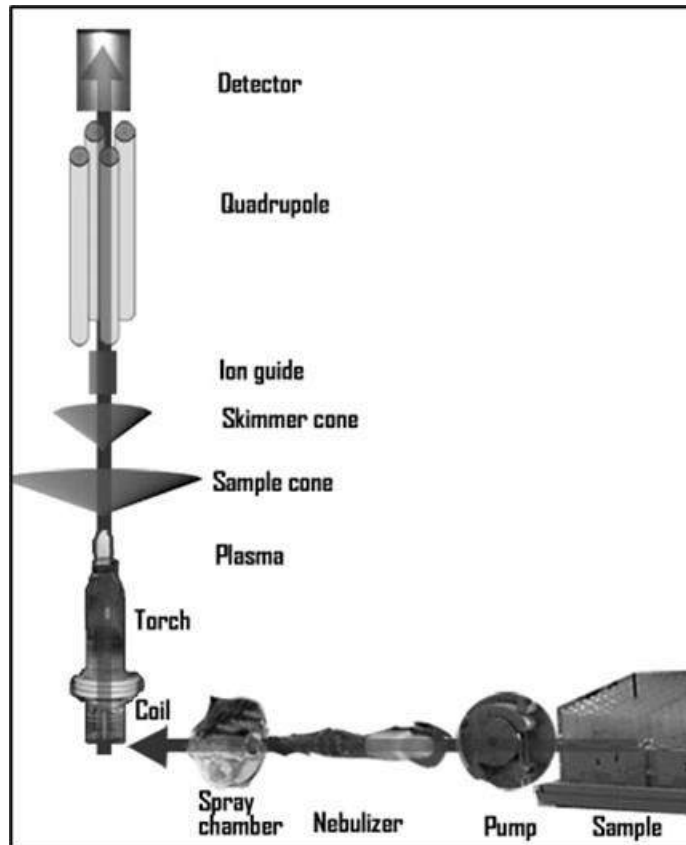


Imagen 4: Esquema general de un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.
Fuente: (RandboundUniversity, 2016)

El sistema de introducción de muestras transporta la muestra en forma de disolución a la cámara de nebulización. El nebulizador, genera un aerosol húmedo con tamaño de partículas uniformes, esto con el fin de facilitar el ingreso de la muestra al plasma.

En el plasma, se tiene temperaturas de hasta 8000 K°, por lo que se producen los fenómenos de desolvatación, vaporización, disociación, excitación y ionización de la muestra. El sistema de extracción recoge los iones generados y los conduce a alto vacío. El analizador de masas es un sistema cuadrupolar que separa los iones por su y relación masa/carga. El detector es un multiplicador de electrones que genera señales eléctricas (Skoog et al., 2008).

El ICP-MS, se emplea para análisis de plantas, suelos, rocas, minerales, alimentos, etc. Por lo que esta técnica permite la introducción de las muestras en forma líquida, solida (mediante ablación Láser y/o digestadas) o gaseosa (cromatografías) (Díaz Zamora, 2017).

1.4.4 Microsonda Electrónica

La microsonda electrónica o EPMA (Electron-Probe Micro Analyzer), en la actualidad es una técnica moderna de gran precisión y sensibilidad con la que se puede realizar análisis cualitativos y cuantitativos de muestras geológicas particularmente muestras mineralógicas y petrológicas. Esta técnica permite la determinación de todos los elementos de la tabla periódica a excepción de hidrogeno, helio y litio (Alarcón, 2005).

La microsonda electrónica puede ser considerada como un microscopio electrónico de barrido, que está diseñado especialmente para la obtención de imágenes en alta resolución de una muestra. Sin embargo, la microsonda electrónica incluye entre 1 a 5 espectrómetros dispersivos en longitud de onda (WDS), y espectrómetros de dispersión de energía, con el cual es posible realizar un análisis cuantitativo de las muestras. Los espectrómetros WDS, separan las longitudes de onda mediante

cristales analizadores que permiten la separación de los rayos X por medio de la ley de Bragg, también hacen uso de detectores de radiación para medir los rayos X dispersados por los cristales y finalmente se comparan las intensidades de rayos X emitidas por la muestra con las intensidades de patrones de composición conocida (Melgarejo, 2010).

Cada detector mide las cuentas de radiación X que recibe en cada tanda. La intensidad de una determinada radiación X depende de la cantidad del elemento correspondiente que haya en la muestra. Para determinar la cantidad de un elemento determinado, se compara la intensidad producida por el mineral con la que generan un patrón de composición conocida, de acuerdo con la siguiente ecuación (Ecuación 10):

$$I_m/I_p = C_m/C_p [ZAF(C_m)] \dots \dots \text{Ec. 10}$$

Donde:

I_m = Intensidad de la radiación X generada por la muestra.

I_p = Intensidad de la radiación X generada por el patrón de composición conocida.

C_m = Concentración del elemento problema en la muestra.

C_p = Concentración del mismo elemento en el patrón.

ZAF = Corrección por efecto de matriz.

La corrección por efecto matriz es necesario corregir con factores que tengan en cuenta las diferencias de número atómico (Z), absorción de rayos X (A) y fluorescencia (F) entre muestra y patrón.

Obtención de Imágenes mediante EPMA

La obtención de imágenes mediante el EPMA es variada ya que permite tener imágenes de electrones secundarios (SEI), electrones retrodispersados, rayos X y

catodoluminiscencia (Castellanos & Ríos, 2005). A continuación, se detalla cada uno de los modos de toma de imágenes.

- ***Imágenes de electrones secundarios (SEI)***: Son obtenidas por el detector de electrones secundarios y reflejan la topografía de la muestra. De esta manera el EPMA trabaja como un microscopio electrónico de barrido (SEM), con lo que es posible obtener imágenes con aumentos de hasta de 100,000x para especímenes cubiertos con oro, con una resolución de casi 10-20 nm (Castellanos & Ríos, 2005).
- ***Imágenes de electrones retrodispersados (BSE)***: Son obtenidas por el detector de electrones retrodispersados y reflejan la composición de la muestra. El efecto de los electrones retrodispersados es más fuerte en elementos con masa atómica mayor, es decir los minerales “pesados” (menas, granate, espinela, etc.) serán más brillantes que los minerales “livianos” (silicatos, etc.). La obtención de imágenes en este modo sirve de gran ayuda para distinguir las diferentes fases minerales y la no homogeneidad en el mineral (Castellanos & Ríos, 2005).
- ***Imágenes de rayos-X***: Son producidas por las señales de salida de los espectrómetros 1-5. Cuando los espectrómetros son calibrados para elementos particulares, la imagen reflejará la concentración de cada elemento en el área escaneada, facilitando así el mapeo de rayos-X del elemento de las fases minerales (Castellanos & Ríos, 2005).
- ***Imágenes de catodoluminiscencia (CL)***: Este método se usa para analizar la estructura cristalina de un espécimen, incluyendo trazas de impurezas, defectos reticulares y distorsión cristalina. Debido a que, algunos minerales cuando son

excitados por un haz de electrones emiten luz en el espectro visible, la microsonda electrónica utiliza un sistema de detección de catodoluminiscencia. La CL está completamente integrada al sistema operativo de la microsonda electrónica lo que permite la adquisición simultánea de datos con imágenes electrónicas y datos elementales (Castellanos & Ríos, 2005).

Técnicas analíticas mediante el EPMA

La EPMA permite realizar los siguientes tipos de análisis:

Análisis cualitativo/semicuantitativo: Este análisis permite identificar todas las fases elementales presentes en la muestra (Alarcón & Reyes, 2005).

- **Análisis cualitativo/cuantitativo:** Este análisis permite determinar el porcentaje atómico y en peso de las fases presentes, así como la fórmula estequiométrica de cada una de ellas (Alarcón & Reyes, 2005).
- **Perfil composicional/Mapeo elemental:** Este tipo de perfiles permiten observar cómo varía la composición elemental de un mineral del núcleo al borde, y pueden luego ser calibrados con análisis cuantitativos. Estos mapas composicionales o elementales consumen tiempo, especialmente con relación a las imágenes con electrones retrodispersados (Alarcón & Reyes, 2005).

Análisis y procesamiento de Imágenes del EPMA

El análisis de imágenes involucra la evaluación y el procesamiento post-adquisición de una amplia variedad de información de una imagen digital. El procesamiento de la imagen permite tanto medidas de campo específicas que pueden ser el número de objetos, porcentaje de área y también permite medidas de rasgos específicos como tamaño, forma, escala de grises de objetos individuales. El EPMA, proporciona

imágenes que debería considerarse como información cualitativa o como una cantidad relativa. Sin embargo, los píxeles y sus píxeles vecinos son informativos, y por lo tanto pueden ser clasificados, analizados, contados, produciendo información espacial cuantitativa accesible a manejos de tipo estadístico.(Alarcón & Reyes, 2005)

CAPÍTULO II

2 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

2.1 Tipo de Investigación

- **Descriptiva y experimental:** El tipo de investigación del presente trabajo de tesis es de tipo descriptivo y experimental donde se ha realizado la interpretación y caracterización mineralógica de los residuos mineros para predecir la formación de los drenajes ácidos de mina.

La interpretación se ha realizado a partir de los resultados obtenidos en los análisis mediante las técnicas espectroscópicas de fluorescencia de rayos X, espectroscopia de masas con acoplamiento inductivo, difracción de rayos X y microsonda electrónica.

Los resultados obtenidos son de tipo cualitativo debido a que el objetivo del trabajo es realizar la caracterización mineralógica de los residuos mineros e identificar los elementos potencialmente tóxicos.

- **Aplicada:** El tipo de investigación que se ha desarrollado es de tipo aplicada, porque se ha empleado métodos de análisis químico y caracterización mineralógica en residuos mineros provenientes de la minería informal.

2.2 Variables

2.2.1 Variables Dependientes

- Contaminación producida por la generación de residuos mineros provenientes de la minería informal.

2.2.2 Variables Independientes

- Presencia de condiciones atmosféricas oxidantes

- Presencia de minerales que contienen elementos potencialmente tóxicos en los residuos mineros

2.3 Zona y procedimiento de muestreo

Las muestras de estudio proceden de dos provincias de la Región Cusco (Paucartambo y Quispicanchis). Las zonas de muestreo se han seleccionado teniendo en consideración que en los últimos años en la Región del Cusco se ha incrementado la actividad minera informal de extracción de oro de manera artesanal y que, por el tipo de actividad minera, este tipo de actividad no tiene el manejo adecuado de residuos mineros.



Imagen 5: Localización de las zonas de muestreo.

La provincia de Paucartambo tiene como capital a la ciudad del mismo nombre y se ubica al Sur Este de la Cordillera de los Andes peruanos, en el Departamento del Cusco, se encuentra a una altura 3, 017 m.s.n.m. y a una distancia 110 Km. de la

ciudad del Cusco con una población de 47, 313 habitantes. La zona de muestreo está ubicada en los alrededores de la comunidad de K'allacancha, donde existe aproximadamente 15 asientos mineros, cada asiento minero tiene un promedio de entre 8 a 10 trabajadores y tiene las siguientes coordenadas UTM:

- Zona 18
- Hemisferio sur

Coordenadas

- UTMX (Este): 765041.3
- UTMY (Norte): 8513288.7



Imagen 6: Zona de muestreo de la provincia de Paucartambo

La provincia de Quispicanchis tiene como capital a la ciudad de Urcos y se ubica en la parte Central y Oriental del Cusco. Se encuentra a una altura 3, 150 m.s.n.m. y a una distancia 75,4 Km. de la ciudad del Cusco, con una población de 82.484 habitantes. La zona de muestreo está ubicada en los alrededores de la comunidad de

Ccarhuayo, provincia de Quispicanchi, donde existen aproximadamente entre 10 asentamientos mineros, cada asentamiento minero tiene un promedio de entre 5 a 7 trabajadores y tiene las siguientes coordenadas geográficas:

- Zona 19
- Hemisferio Sur

Coordenadas

- UTMX (Este): 244731.6
- UTM Y (Norte): 8501608.4



Imagen 7: Zona de muestreo de la provincia de Quispicanchis.

En la imagen 6 y 7 se muestran las zonas de donde se colectaron las muestras. Es importante mencionar que no se detalla por completo las zonas de muestreo debido a que; los propietarios y trabajadores que realizan sus labores mineras en estas zonas, se muestran a la defensiva con personas extrañas que logran acceder a sus labores. Motivo por el cual el acceso a estas zonas es difícil y también debido a que podría suponer cierto riesgo.

Las muestras se han colectado aleatoriamente, de los depósitos cercanos al lugar de extracción de las labores mineras, en cada una de las zonas arriba mencionadas. En cada punto de muestreo se ha recolectado muestras con un peso aproximado de 3 kg, las cuales fueron almacenadas en bolsas de polietileno debidamente rotuladas (zona de procedencia, fecha de recolección). Posteriormente las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Mineralogía de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, donde se ha realizado el secado de muestras a temperatura ambiente por un periodo de 15 días (Imagen 8).

a)



b)



Imagen 8: a) Muestras rotuladas de residuos mineros b) Secado de muestras de residuos mineros. Laboratorio de Mineralogía – UNSAAC

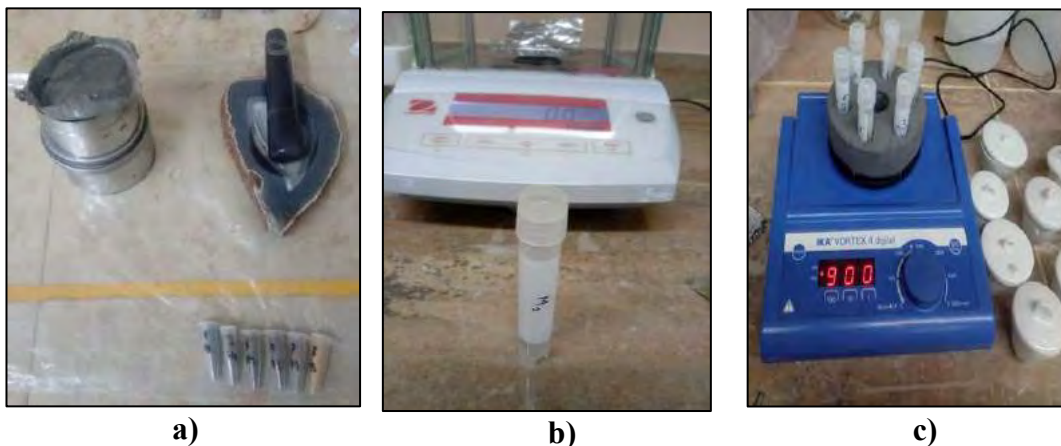
2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

2.4.1 Fluorescencia de Rayos X

Preparación de muestra y procedimiento

Para el análisis por fluorescencia de rayos X se tomó 30 gr. de muestra previamente secada, la cual se sometió a trituration mecánica, en un mortero con pilón de ágata para reducir el tamaño de la muestra, y con ayuda de un tamizador, alcanzar un tamaño de partícula de 425 μm (0.425 mm). La muestra colectada fue sometida a una segunda etapa de trituration mecánica, la cual tuvo por objetivo obtener granos de 74 μm (0.074 mm). De la muestra ya molida se tomaron 25mg en un tubo de polipropileno con tapa rosca de 5 ml, la cual fue pesada en una balanza marca OHAUS serie Pioneer TM como se muestra en la imagen 9a y 9b. A la muestra se le agregaron 2.5 ml de tritón comercial al 1% y 5 μL de galio de concentración 1g/L, se

procedió a homogenizar la mezcla en un agitador IKA VORTEX 4 digital (Imagen 9c) durante 90 segundos a 1500 rpm.



***Imagen 9: Preparación de muestra para el análisis mediante FRX
a) Muestras molidas y tamizadas b) Muestras pesadas c) Muestras centrifugadas***

Se tomaron 10 μL de la solución que fueron colocados en el porta muestra del equipo de fluorescencia, y se llevaron a sequedad a vacío en desecador de vidrio.

El procedimiento de preparación de muestra, arriba mencionado, se ha realizado para cada una de las muestras y por triplicado.

La determinación elemental de las muestras se ha realizado haciendo uso del equipo de Fluorescencia de rayos X, marca BRUKER modelo S2 PICOFOX del laboratorio de Difracción de rayos X de la Universidad Mayor de San Marcos (Lima – Perú). El S2 PICOFOX, es un equipo basado en el método de reflexión total de análisis de fluorescencia (FRTX), este equipo tiene radiación monocromática y óptica de reflexión total. Tiene un tubo de metal – cerámica de rayos X refrigerado por aire con molibdeno operado a 50 Kv y 600 μA . La calibración del equipo viene de fábrica, por lo que no se ha requerido calibración antes de la lectura. Cada lectura se realizó en

2000 segundos y se añadió galio como patrón interno, con el objeto de corregir posibles interferencias. Finalmente, los resultados numéricos obtenidos se procesaron mediante el software SPECTRAplus, para generar los espectros correspondientes.



Imagen 10: Fluorescencia de rayos X, marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

2.4.2 Difracción de Rayos X

Preparación de muestra y procedimiento

Se tomaron 5 g de cada una de las muestras que se llevaron a molienda en un molino con pilón de ágata marca RETCK2000, hasta alcanzar la apariencia física de polvo $74 \mu\text{m}$ (0.74 mm), debido a que el difractómetro está diseñado para análisis de muestras en polvo. Las muestras pulverizadas se depositaron en el portaobjetos, teniendo en consideración que la superficie de la muestra que va a ser expuesta a los rayos X, sea completamente uniforme. Esto garantiza que los rayos X tengan la misma oportunidad de incidir en cualquier plano cristalino de los minerales (Araújo, Machado, Fonseca, & Fernando, 2017).

El análisis de DRX, se ha realizado en un difractómetro de rayos X, marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, en los laboratorios de servicios centrales de investigación de la Universidad de Huelva (España), este equipo opera a temperatura ambiente con

un voltaje de 35 KV Y 30 mA, tiene un tubo de rayos X con ánodo de cobre y un monocromador de haz difractado.

Las lecturas se realizaron en un intervalo de barrido entre 2° y 65° con un tamaño de paso de 0.02° por un tiempo estimado de 20 minutos por muestra. Los datos de la experimentación fueron recopilados mediante el software DIFRACplus.

Los datos obtenidos (de cada muestra) estaban en formato RAW y UDX, estos datos fueron tratados con el software XPOWDER utilizando como base de datos de minerales PDF-2. Con este tratamiento se pudo identificar las fases cristalinas en las muestras estudiadas.



***Imagen 11: Difractómetro de rayos X, marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, de la Universidad de Huelva
Fuente: Servicios Centrales I + D de la Universidad de Huelva***

2.4.3 Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente

Preparación de muestra y procedimiento

El análisis de las muestras en el ICP- MS, se ha realizado en el laboratorio externo SGS PERÚ, se ha realizado el envío de las muestras debidamente empaquetadas y rotuladas.

Una vez en el laboratorio se siguió el esquema ICM40B, (método SGS- MN-138 del laboratorio SGS), en cuyo reporte detalla lo siguiente: secado a 100 °C, chancado a 10 mesh (equivalente a 2 mm), posteriormente se ha realizado un cuarteado, y se ha pulverizado 250 gr. a 140 mesh (equivalente a 0.105 mm), de esta fracción se ha pesado 0.20 gr de muestra. Finalmente se ha llevado a digestión debido a que este análisis sólo se realiza en muestras líquidas,

El proceso de digestión realizó en vasos de teflón, y se inició adicionando ácido nítrico y perclórico a la muestra, digestandando hasta sequedad. Seguidamente, se dejó enfriar y se adicionó ácido fluorhídrico, una vez más se digesta hasta sequedad, para que finalmente se adicione ácido clorhídrico y se someta a temperatura con el fin de disolver las sales. La solución obtenida se dejó enfriar y se trasvasó a un tubo de 12 ml, en el cual se enrasó con agua ultra pura (tipo 1) que presenta resistividad de 18.2 MΩ.cm, se procedió a homogenizar la muestra para finalmente leer en el espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente.

2.4.4 Microsonda Electrónica

Preparación de muestra y procedimiento

Para realizar los análisis en la microsonda electrónica, se ha preparado probetas pulidas; para lo cual, se ha elegido muestras representativas que tenían ciertas

características físicas de nuestro interés de estudio. Las muestras seleccionadas (3 y 5 gr aproximadamente) se amolda con resina epóxica, se desbasta y se pule hasta obtener las probetas como se muestra en la imagen 12. Finalmente, para darle un carácter eléctricamente conductor, las muestras se recubren con carbón (Lavrent'ev, Korolyuk, Usova, Nigmatulina, & Geophysics, 2015).

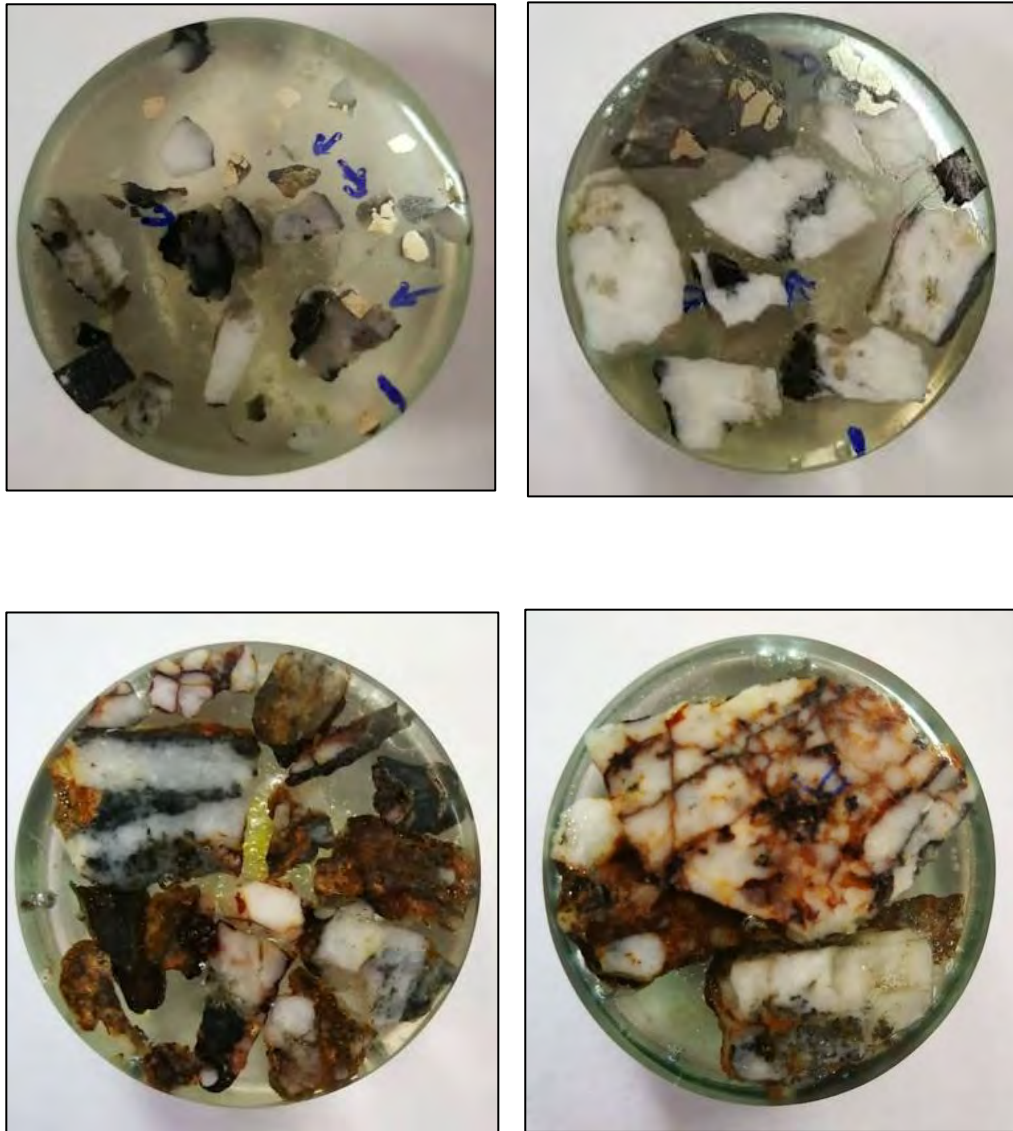


Imagen 12: Probetas pulidas

El análisis químico y obtención de imágenes mediante la microsonda electrónica, se ha realizado en una microsonda electrónica marca JEOL, modelo JXA-8200 SuperProbe en el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Experimentales de la universidad de Huelva (España) (Imagen 13). El equipo consta de cuatro espectrómetros de dispersión de longitud de onda de rayos X (WDS) y un espectrómetro de dispersión de energía (EDS), las condiciones de trabajo que se aplicaron fueron: 15 Kv, 5 nA de corriente de sonda y 5 micras de diámetro de haz. Los resultados son imágenes se obtuvieron en modo retrodispersado, puesto que son más apropiadas para identificar los elementos de carácter metálico en las fases cristalinas de la muestra.



Imagen 13: Microsonda electrónica marca JEOL, modelo JXA-8200 SuperProbe; Universidad de Huelva – España.

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de Fluorescencia de Rayos X

Los resultados de la fluorescencia de Rayos X, se muestra en la tabla 5. Donde se puede observar que el elemento mayoritario, para todas las muestras, es el hierro. Otros elementos encontrados son plomo, manganeso, zinc, cromo, cobre, mercurio y níquel; de los elementos mencionados los de mayor interés son el cromo, zinc, plomo y mercurio, debido a que estos elementos son considerados como elementos potencialmente tóxicos (Covarrubias & Cabriales, 2017).

Elementos	Paucartambo			Quispicanchis		
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Fe (mg/Kg)	30710.67	29087.33	33484.67	45737.67	69263.33	71556.67
As (mg/Kg)	1658.60	2094.73	79.47	558.37	3053.00	3251.87
Pb (mg/Kg)	21.38	17.48	110.08	212.94	101.86	170.73
Mn (mg/Kg)	71.74	489.37	780.00	190.72	618.07	550.33
Zn (mg/Kg)	22.15	20.08	78.86	105.87	208.59	78.86
Cr (mg/Kg)	57.93	54.76	64.17	86.61	169.07	167.60
Cu (mg/Kg)	15.82	39.33	48.90	43.23	34.82	69.25
Hg (mg/Kg)	105.54	17.48	0.00	29.38	505.23	530.97
Ni (mg/Kg)	7.35	15.00	22.75	18.71	29.11	24.43

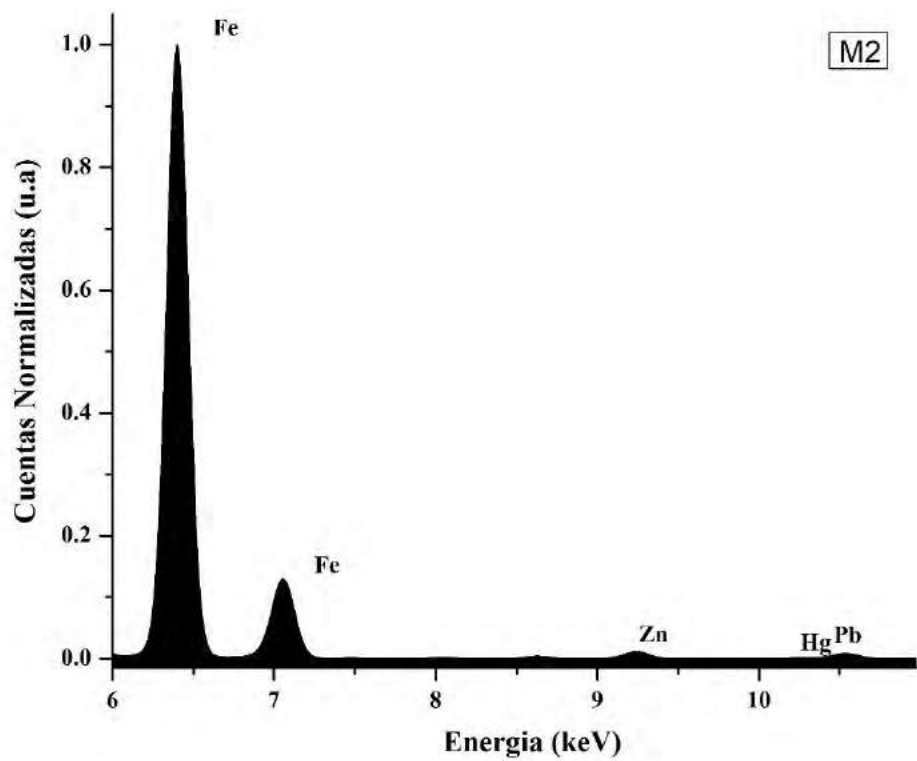
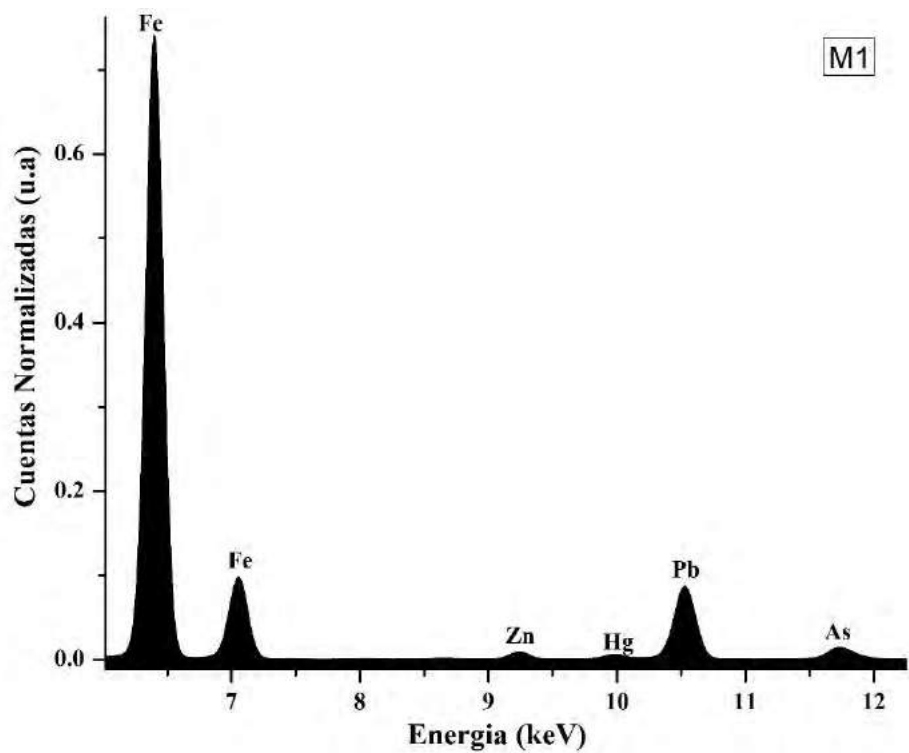
Tabla 5. Resultados de Fluorescencia de rayos X de las muestras de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis

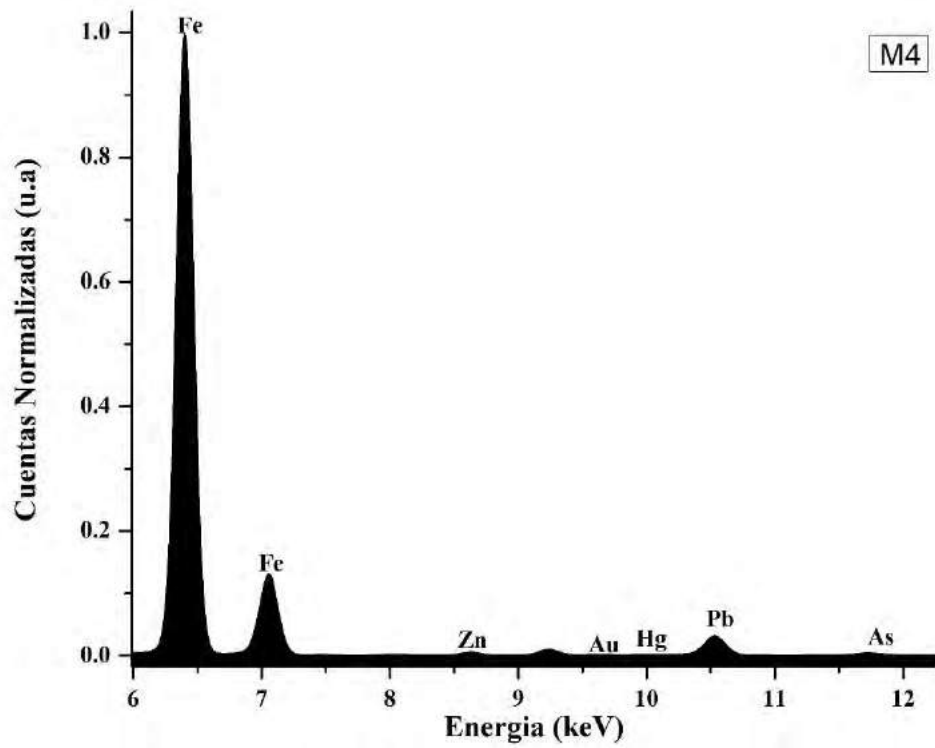
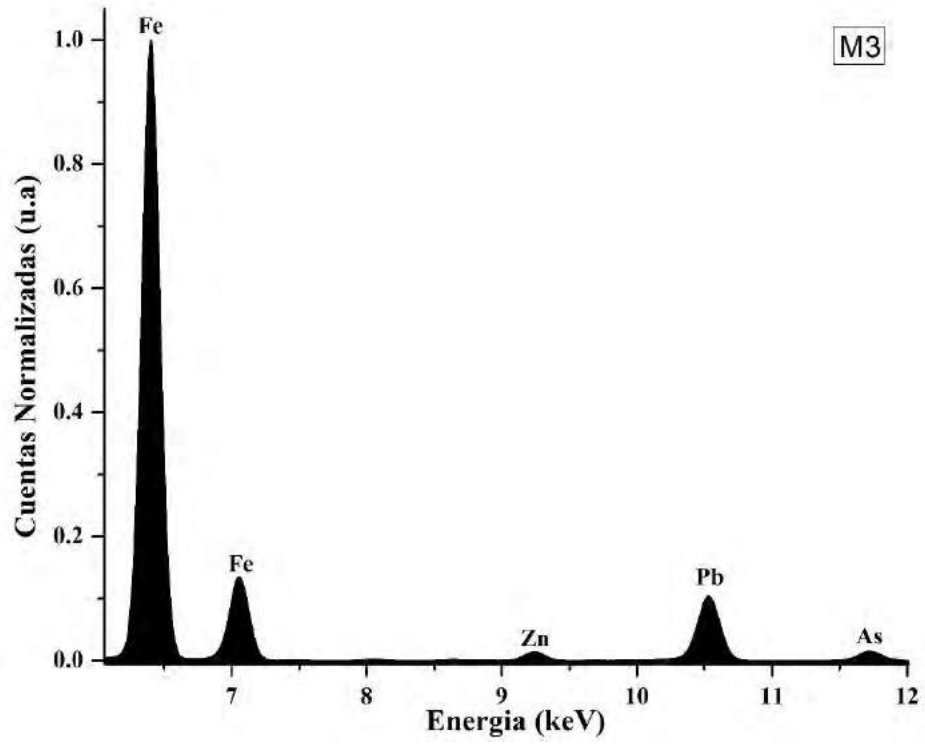
En las muestras M1, M2 y M3 pertenecientes a la provincia de Paucartambo, el hierro en las tres muestras se presenta en cantidades similares 30710.67 (mg/Kg), 29087.33 (mg/Kg), 33484.67 (mg/Kg) respectivamente. En el caso del plomo en la muestra M3 es de 110.08 (mg/Kg) siendo la de mayor contenido seguido de la muestra M1 con 21.38 (mg/Kg) y la M2 con 17.48 (mg/Kg). Para el Zinc, en la muestra M3 se observa el mayor contenido con 78.86 (mg/Kg), las muestras M1 y M2 con contenidos similares 22.15 (mg/Kg) y 20.08 (mg/Kg) respectivamente. Finalmente, el otro

elemento de interés es el mercurio siendo en este caso la muestra M1 la de mayor contenido con 105.54 (mg/Kg), seguidamente la muestra M2 tiene 17.48 (mg/Kg) y en la muestra M3 no se ha encontrado este elemento.

En las muestras M4, M5 y M6, pertenecientes a la provincia de Quispicanchis, el contenido de hierro es aún más. Teniendo así; para la muestra M4 un 45737.67 (mg/Kg), muestra M5 69263.33 (mg/Kg) y M6 71556.67 (mg/Kg), con lo que podemos indicar que las dos últimas muestras duplican los valores de hierro encontrados en la provincia de Paucartambo. Observamos también que los contenidos de plomo, en las muestras de esta provincia también son elevados, teniendo así para la muestra M4 un valor de 212.94 (mg/Kg), M5 101.86 (mg/Kg) y para la M6 170.73 (mg/Kg). Seguidamente, el contenido de zinc para la muestra M4 es de 105.87, M5 es de 208.59 y M6 de 78.86 (mg/Kg), siendo la M5 la de mayor contenido. En el caso del mercurio los contenidos son similares en dos de las muestras teniendo así para la muestra M4 29.38 (mg/Kg), M5 505.23 (mg/Kg) y M6 530.97 (mg/Kg). Es importante mencionar que mediante XRF, también se identificaron los siguientes elementos: Al, Si, S, Ar, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Ba, Hg y Pb, los cuales se muestran en el anexo 4.

A continuación, se muestra los espectros de fluorescencia de rayos X de todas las muestras (gráfica 4), las cuales se han graficado haciendo uso del programa ORIGIN PRO 8.5. Estos espectros corroboran los resultados numéricos obtenidos. Una vez más se puede observar la alta concentración de hierro y la presencia de los elementos contaminantes (zinc, plomo, mercurio, arsénico y cromo) en cada una las muestras.





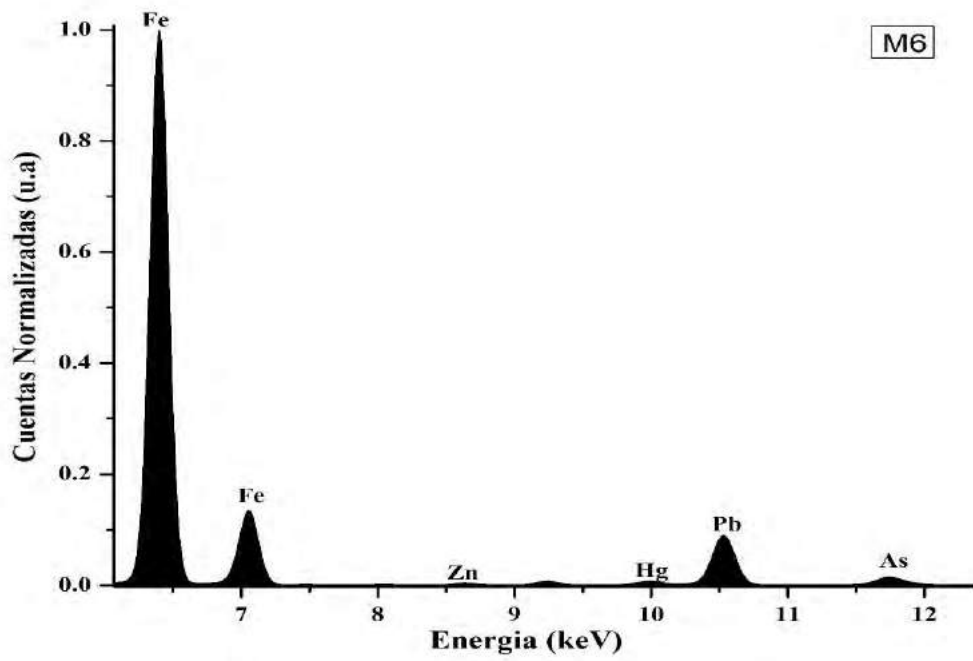
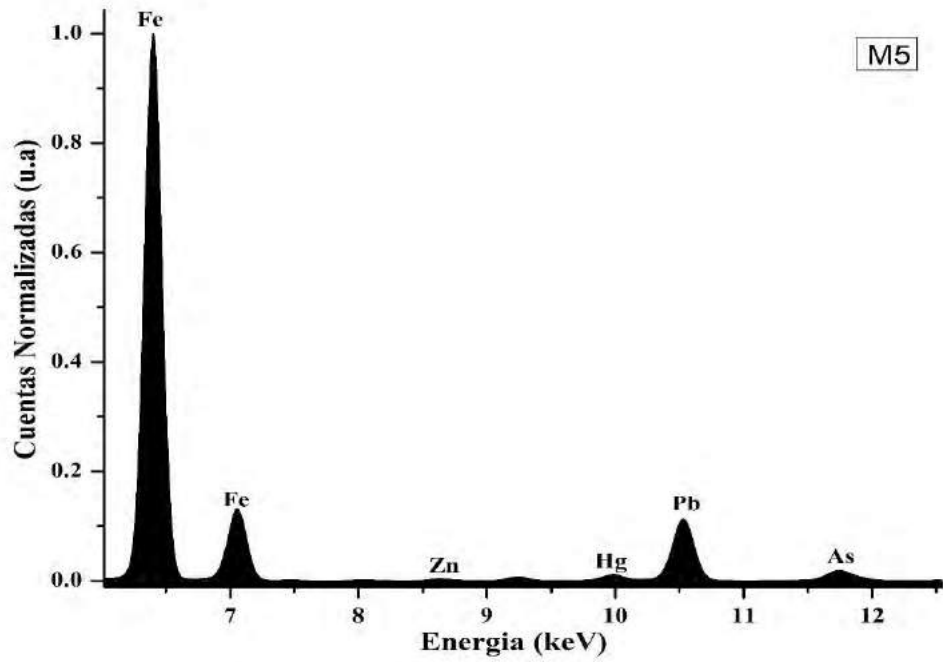


Gráfico 4 : Espectros más representativos de FRX obtenidos mediante el software SPECTRAplus.

3.1.1 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos mediante XRF, muestran el alto contenido de hierro en las muestras de residuos mineros de ambas provincias, hace suponer la presencia de importantes volúmenes de pirita, y este a su vez predice que estos residuos son capaces de formar drenajes ácidos de mina, puesto que la oxidación de la pirita es la que da inicio a la formación de estos drenajes. Y por lo tanto se puede suponer que, en este proceso, se daría lugar a la liberación de otros elementos contaminantes como As, Pb, Hg y Zn.

Los resultados obtenidos de la tabla 5, en cuanto al contenido de elementos tóxicos, muestra que los residuos más contaminantes, son los que se generan en la provincia de Quispicanchis, observando la tabla podemos afirmar ello, debido a que en promedio, los valores obtenidos son aproximadamente el doble que de los residuos generados en la provincia de Paucartambo.

En la tabla 6, se muestra la comparación de los resultados de elementos potencialmente tóxicos obtenidos para las muestras de Paucartambo y Quispicanchis con los valores de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el catálogo de medidas ambientales, de aplicación para el pequeño productor minero y productor minero artesanal que forma parte del proceso de formalización minera integral del Ministerio de Energía Y Minas (Anexo 3) (MINEM, 2017). La comparación de estos resultados, con los valores establecidos por el MINEM, indican que los resultados obtenidos para ambas provincias están fuera de los límites establecidos.

Elementos	LMP	Paucartambo			Quispicanchis		
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
As (mg/Kg)	0.1	1658.60	2094.73	79.47	558.37	3053.00	3251.87
Pb (mg/Kg)	0.2	21.38	17.48	110.08	212.94	101.86	170.73
Fe (mg/Kg)	2.0	30710.67	29087.33	33484.67	45737.67	69263.33	71556.67
Hg (mg/Kg)	0.002	105.54	17.48	0.00	29.38	505.23	530.97
Ni (mg/Kg)	1.5	7.35	15.00	22.75	18.71	29.11	24.43

Tabla 6: Comparación de los valores de LMP entre los establecidos en el catálogo de medidas ambientales para el pequeño productor y productor minero artesanal y los encontrados en los residuos mineros de la provincia de Paucartambo y Quispicanchis.

Fuente:(MINEM, 2017)

3.2 Resultados de Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente

Mediante esta técnica se ha analizado 53 elementos (anexo 5) como son: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr (En el anexo 5, se encuentran resaltadas las muestras consideradas para este estudio).

Los resultados de los elementos más importantes del análisis Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) se muestra en la tabla 7. Con estos resultados se confirma la presencia y alta concentración de los elementos potencialmente tóxicos presentes en las muestras de residuos mineros de ambas provincias.

Elemento	Paucartambo			Quispicanchis		
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Fe (mg/Kg)	35100.00	46700.00	33600.00	26800.00	131800.00	133800.00
As (mg/Kg)	1278.00	139.00	1828.00	182.00	4748.00	4538.00
Pb (mg/Kg)	18.00	97.70	14.00	67.20	154.70	149.50
Mn (mg/Kg)	137.00	623.00	520.00	153.00	493.00	453.00
Zn (mg/Kg)	14.00	103.00	27.00	49.00	198.00	202.00
Cr (mg/Kg)	811.00	637.00	680.00	690.00	566.00	545.00
Cu (mg/Kg)	23.80	52.00	67.20	19.20	75.00	74.20
Hg (mg/Kg)	35.91	30.53	3.99	13.44	258.28	291.80
Ni (mg/Kg)	76.60	72.60	67.60	64.10	91.60	83.80

Tabla 7: Resultados de la Espectroscopia de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis

A continuación, en los gráficos 5 y 6, se pueden observar que los elementos potencialmente tóxicos como el plomo, zinc y mercurio para la provincia de Paucartambo no logran alcanzar los 100 mg/Kg; en comparación con los valores de la provincia de Quispicanchis que en la mayoría de los elementos mencionados superan el valor de 100 mg/Kg.

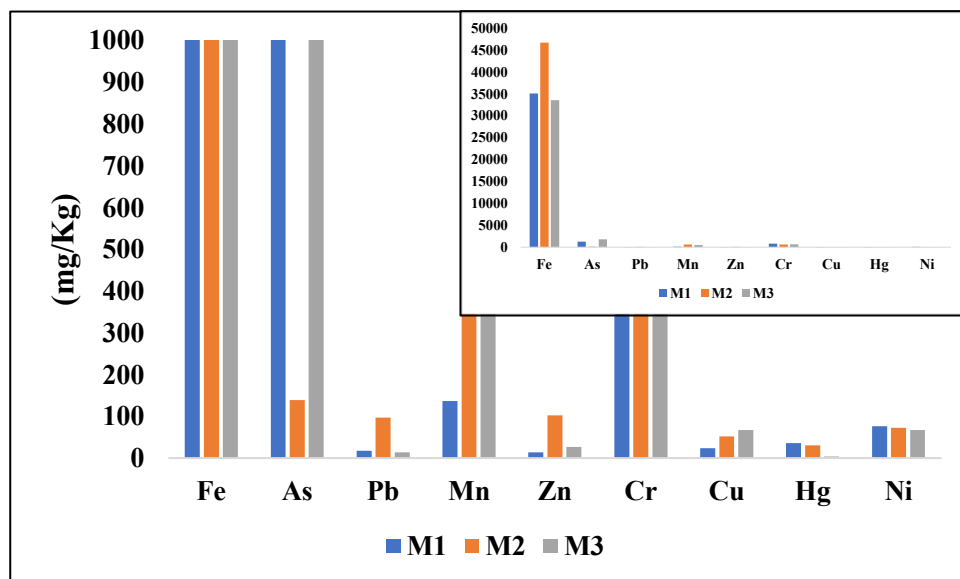


Gráfico 5: Gráfico de barras de las muestras re residuos mineros de la provincia de Paucartambo

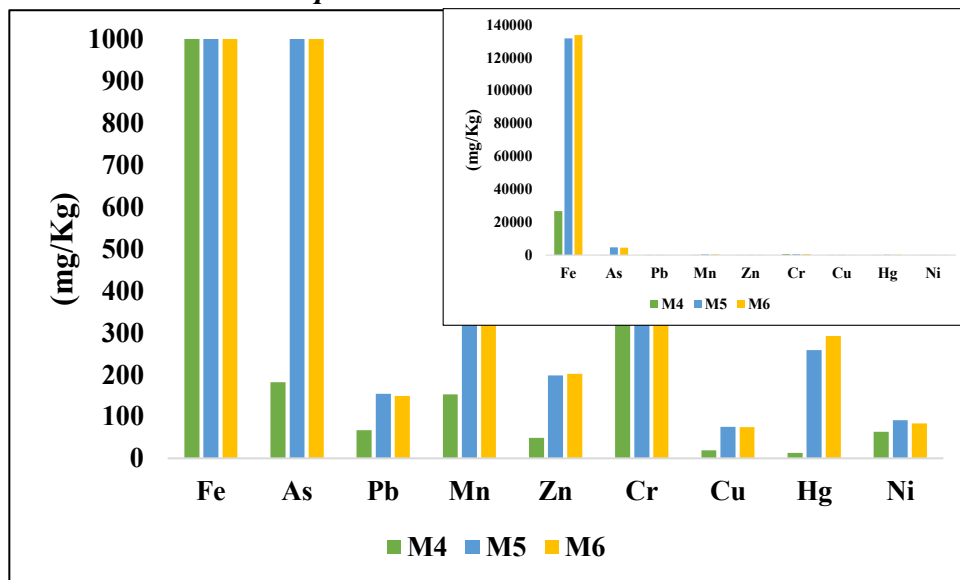


Gráfico 6: Gráfico de barras de las muestras re residuos mineros de la provincia de Quispicanchis.

3.2.1 Discusión de resultados

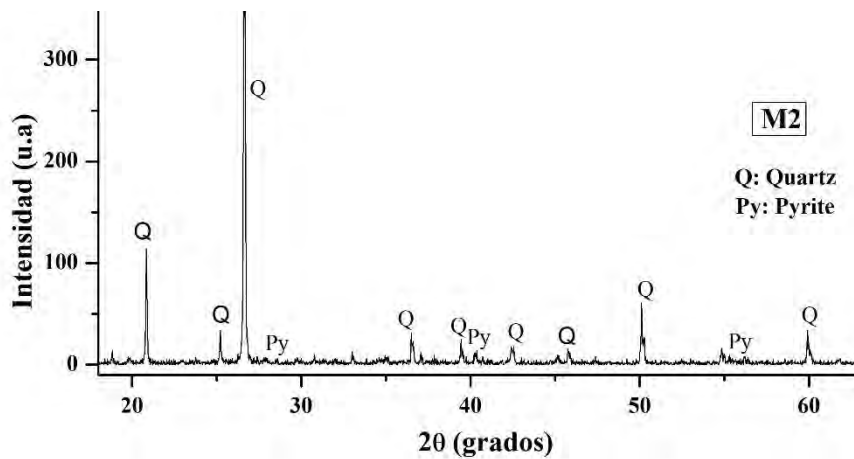
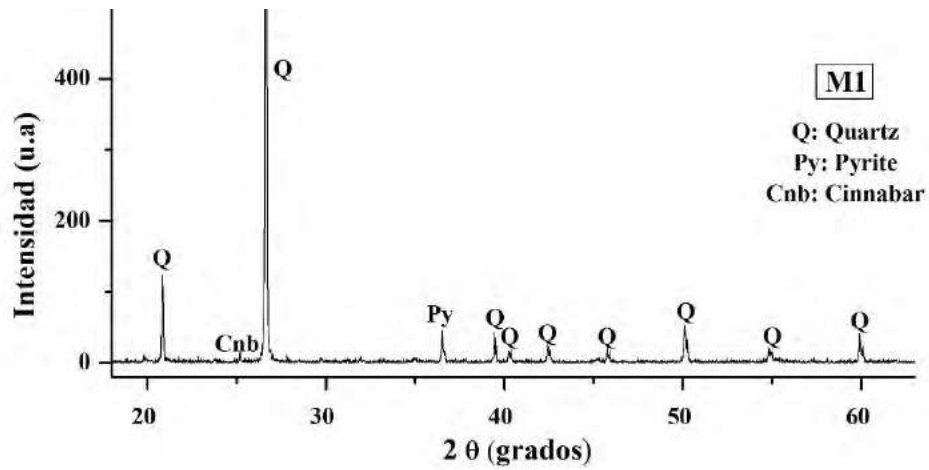
La técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente ha revelado un elevado contenido de elementos como zinc, mercurio, plomo, hierro y otros.

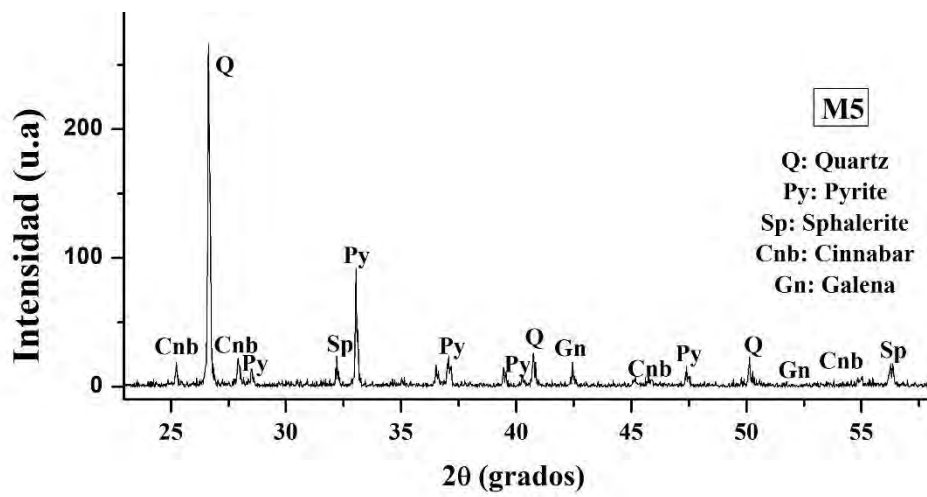
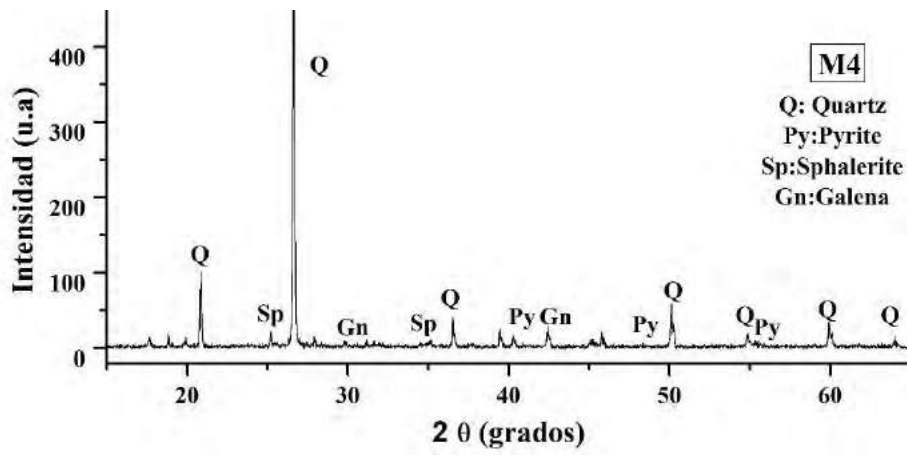
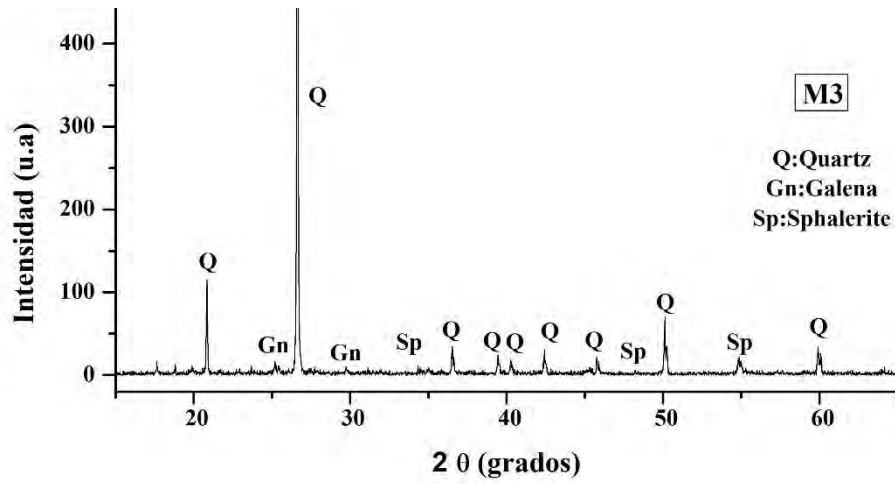
En la tabla 7 los valores de hierro, expresados en porcentaje, para la provincia de Paucartambo son menores a diferencia de la provincia de Quispicanchis. En el caso de plomo, zinc y mercurio, los valores están expresados en (mg/Kg), de igual manera el contenido de estos elementos, es mayoritario en la provincia de Quispicanchis.

3.3 Resultados de la difracción de rayos X

Los resultados de difracción de rayos X se ha obtenido haciendo uso del software XPOWDER a través de cálculos RIR (Relative Intensity Reference), con lo que se ha logrado realizar una semicuantificación de la distribución mineralógica de las muestras (Gráfico 7). El software XPOWDER realiza una comparación entre los

difractogramas obtenidos del análisis y los que ya tiene almacenados en el PDF-2, que es un fichero de almacenamiento de difractogramas de la ICDD (International Center for Diffraction Data) (Aquilano, Rull, Aznar, Medina, & Martínez-Frías, 2020).





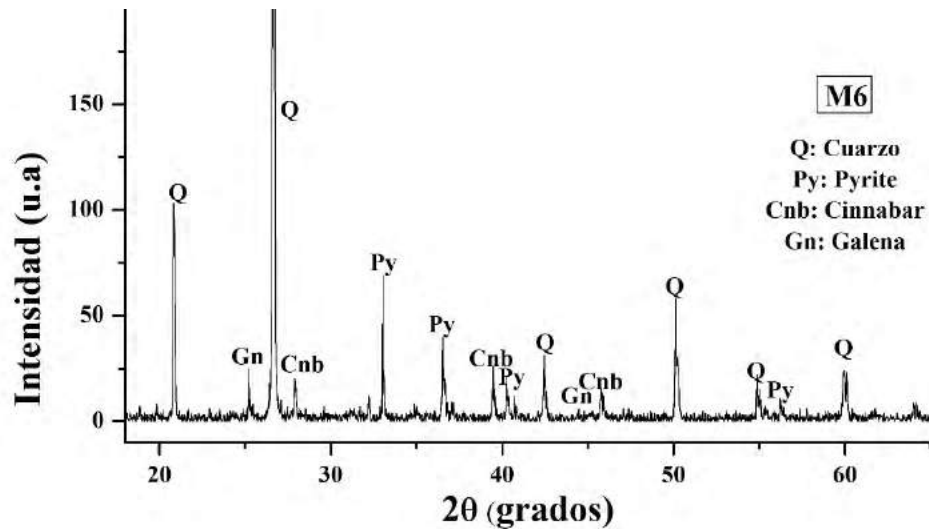


Grafico 7: Difractogramas obtenidos de las muestras de los relaves mineros de las Provincias de Paucartambo y Quispicanchis de la Region Cusco, donde se observa las fases minerales de sulfuros metálicos.

Los difractogramas estan graficados considerando las distancias interplanares 2θ grados (ley de Bragg) versus las intensidades relativas (areas bajo el pico) que toma como escala unidades arbitrarias (u.a).

3.3.1 Discusión de resultados

Las fases mineralógicas obtenidas muestran la abundante presencia de Cuarzo (SiO_2) en todas las muestras, debido a su alta cristalinidad este mineral dificulta la identificación de las demás fases cristalinas. Sin embargo, se ha logrado identificar fases minerales para la Pirita (FeS_2), Esfalerita (ZnS) y Cinabrio como se observa en los difractogramas (Gráfico 7).

En los difractogramas obtenidos para la provincia de Paucartambo se tiene que en el difractogramas de la muestra M1, se muestra la presencia de fases minerales de

Cuarzo, pirita y cinabrio. La fase mineral de cinabrio en esta muestra está presente debido al alto contenido de mercurio, en el difractogramas de la muestra M2 solo se ha logrado identificar a la pirita debido a que el contenido de los demás elementos en esta muestra es escaso. En el difractograma de la muestra M3, se ha encontrado la fase mineral de galena y esfalerita, esto debido a que en esta muestra el contenido de plomo y zinc más elevado.

Para el caso de la provincia de Quispicanchis, en el difractograma de la muestra M4 y M5, se ha encontrado pirita, esfalerita y galena, para la muestra M5, además se ha encontrado la fase mineral de cinabrio, esto debido a que a diferencia de la anterior en esta muestra el contenido de mercurio es elevado. En el difractograma de la muestra M6, se ha encontrado pirita, cinabrio y galena mas no esfalerita, esto debido a que el contenido de zinc en esta muestra es escaso en comparación a las muestras M4 y M5 de acuerdo con los resultados de XRF.

Las fases minerales encontradas en los residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis, en su composición tienen zinc, mercurio, plomo y hierro, estos elementos son considerados potencialmente tóxicos de acuerdo con la teoría. Según lo indican varios autores como Moreno, Blowes, Aduvire, Olias, Miguel Sarmiento, Asta y entre otros, la presencia de estos sulfuros metálicos, en especial de la pirita, advierten la formación de drenajes ácidos de mina.

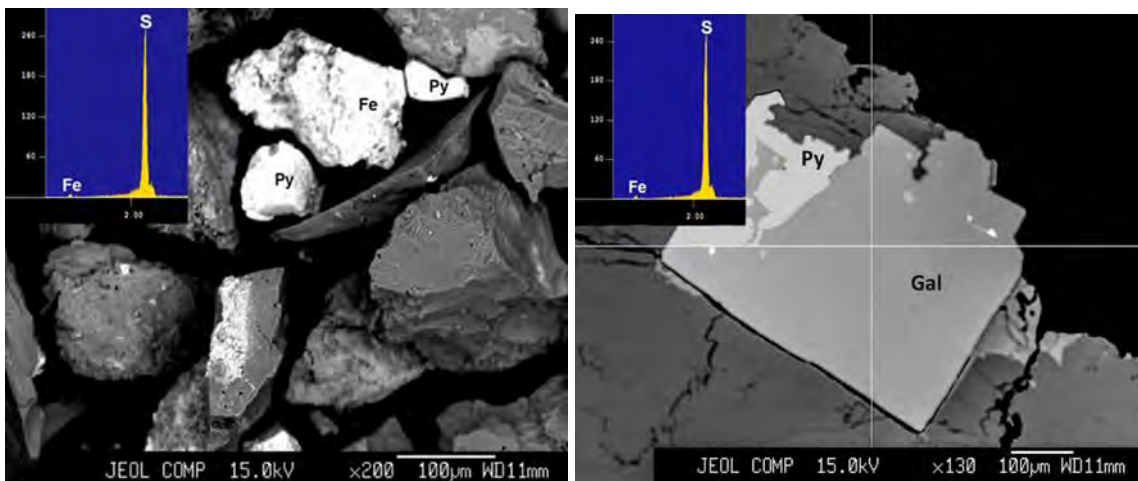
3.4 Resultados de la toma de imágenes mediante la Microsonda Electrónica

La toma de imágenes se ha realizado a las probetas pulidas que contienen las muestras de residuos mineros. Atendiendo a la luminosidad y el carácter metálico de las muestras, con el detector de electrones secundarios se ha logrado obtener las

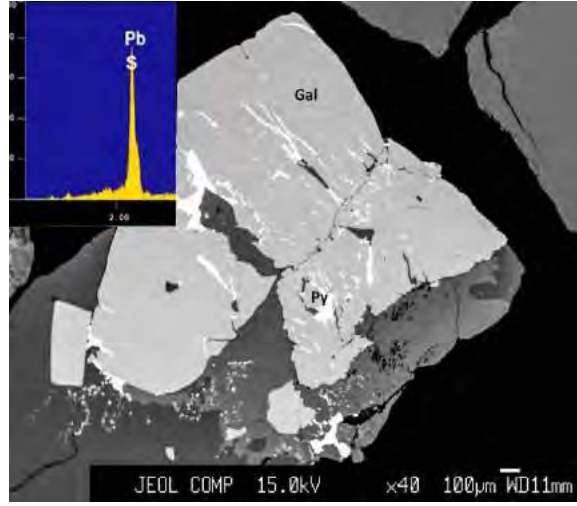
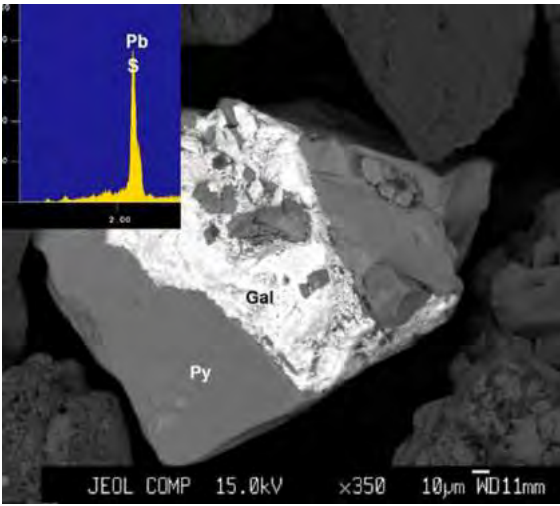
siguientes micrografías, logrando observar diferentes fases debido a la diferencia de densidades electrónicas.

En conjunto de imágenes (Imagen 14), se presenta dos columnas de imágenes, al lado izquierdo se muestra de micrografías de los residuos mineros en polvo y al lado izquierdo se observa las micrografías de las muestras (sin molienda) embutidos en las probetas pulidas. En ambas columnas se observa que a cada imagen (ver parte superior izquierda de cada imagen) obtenida se ha realizado un análisis microelemental en modo retrodisperso, donde se ha encontrado estructuras morfológicas de minerales metálicos como la esfalerita, que tiene en su composición elemental al zinc, se ha encontrado galena que tiene en su composición elemental plomo, también se encontró pirita que tiene en su composición elemental hierro y por último, se ha encontrado al cinabrio que tiene en su composición elemental el mercurio.

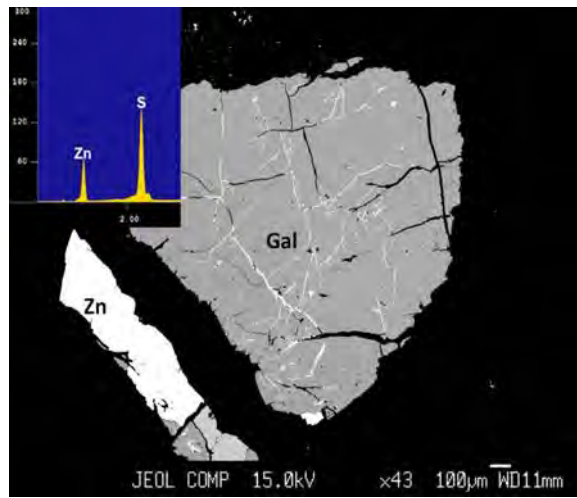
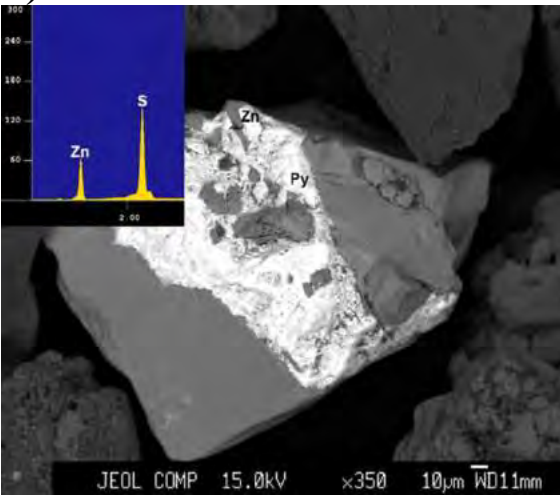
a)



b)



c)



d)

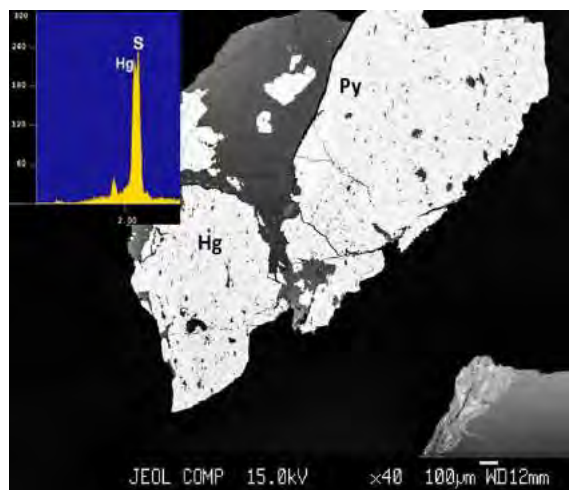
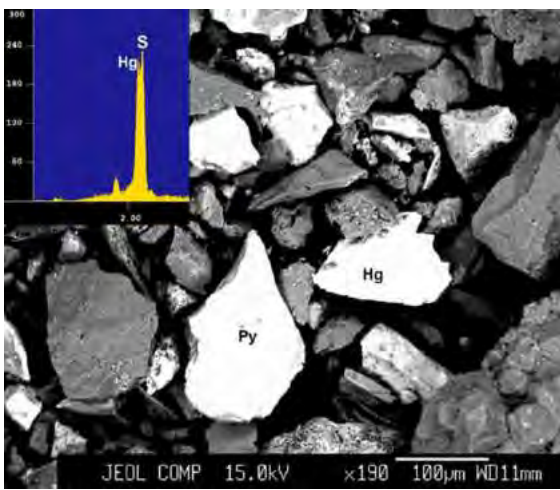


Imagen 14: Micrografías observadas mediante la microsonda electrónica, en cada una de las micrografías en el lado superior izquierdo se observa los espectros fluorescentes de cada fase mineral.

3.4.1 Discusión de resultados mediante microsonda electronica

En la imagen 14, en la micrografía 14a) se observa la fase mineral de la pirita, isométrica, su forma más habitual es el cubo (Imagen 14a) octaedro y piritodro, frecuentemente en maclas (Cornelis Klein & Cornelius Jr, 2018)

En la micrografía 14b) se observa la fase mineral de la galena, isométrica $4/m\bar{3}2/m$, la forma más común de este mineral es el cubo (Imagen 14b), por el fenómeno de truncamiento a veces aparece en octaedros. Son raros los dodecaedros y los triaquisoctaedros (Cornelis Klein & Cornelius Jr, 2018).

En la micrografía 13c) se observa la fase mineral de blenda o esfalerita, isométrico $\bar{4} 3m$, forma más común es el tetraedro, dodecaedro y cubo, estas formas cristalinas para este mineral son muy complejas y generalmente mal formados o en agregados redondeados (Imagen 14c), se encuentran generalmente en masas exfoliables o granulares. Compacta, botroidal, criptocristalina (Cornelis Klein & Cornelius Jr, 2018).

En la micrografía 14d) se observa la fase mineral del cinabrio, perteneciente a la clase cristalina hexagonal, la forma más común de este mineral es la romboédrica aparece en maclas y las caras trapezoidales son muy raras. Normalmente se encuentra en masa granular fina, también terrosa en forma de incrustaciones y diseminados en rocas (Cornelis Klein & Cornelius Jr, 2018).

El análisis por microsonda electrónica (EPMA) confirma las asociaciones mineralógicas de sulfuros metálicos, debido a que esta técnica nos ha permitido observar la morfología de todas las fases minerales identificadas mediante la técnica de difracción de rayos X.

Los residuos mineros estudiados, revelaron la presencia abundante pirita, este mineral en su composición tiene hierro y al ser expuestos al agua y oxígeno liberan lixiviados, la oxidación de la pirita es el mineral que aporta mayor acidez (Dold, 2003). A bajos valores de pH es posible la generación de drenajes ácidos de mina y la liberación de elementos potencialmente tóxico (Salas Urviola et al., 2020).

Es importante tener en cuenta las dos anteriores situaciones, debido a que representarían una posible amenaza para el ambiente y las áreas de estudio deberían de ser consideradas como pasivos ambientales ya que cuentan con todas las condiciones necesarias para la formación de DAM.

3.5 Resultados de las Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de componentes principales se ha realizado con el objetivo de poder identificar las direcciones (componentes principales) a través de los cuales la variación en los datos es máxima. El ACP reduce la dimensionalidad de los datos multivariados a dos o tres componentes principales, lo cual permite la observación gráfica con una mínima pérdida de información (Kassambara, 2017).

El ACP, se ha realizado mediante el software XLSTAT acoplado a EXCEL, este análisis se ha realizado con los datos numéricos obtenidos del análisis de ICP-MS, debido a que esta técnica nos brinda valores numéricos más exactos del contenido

elemental de las muestras de residuos mineros. El ACP, primeramente se realiza la matriz de correlación de los contenidos totales, seguidamente se obtiene la cantidad de varianza y varianza acumulada (Tabla 8).

FACTORES	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	6.944	1.230	0.574	0.235	0.017
Variabilidad (%)	77.157	13.665	6.381	2.610	0.187
Varianza acumulada (%)	77.157	90.822	97.203	99.813	100.000

Tabla 8: Valores propios y varianza explicada de los contenidos totales.

Para nuestros resultados, los dos primeros factores serian significativos ya que entre ambos contienen el 90.822 % de la información original de los contenidos totales.

Otra forma de elegir los componentes o factores significativos es el gráfico de Scree o sedimentación de los contenidos totales (Gráfico 8).

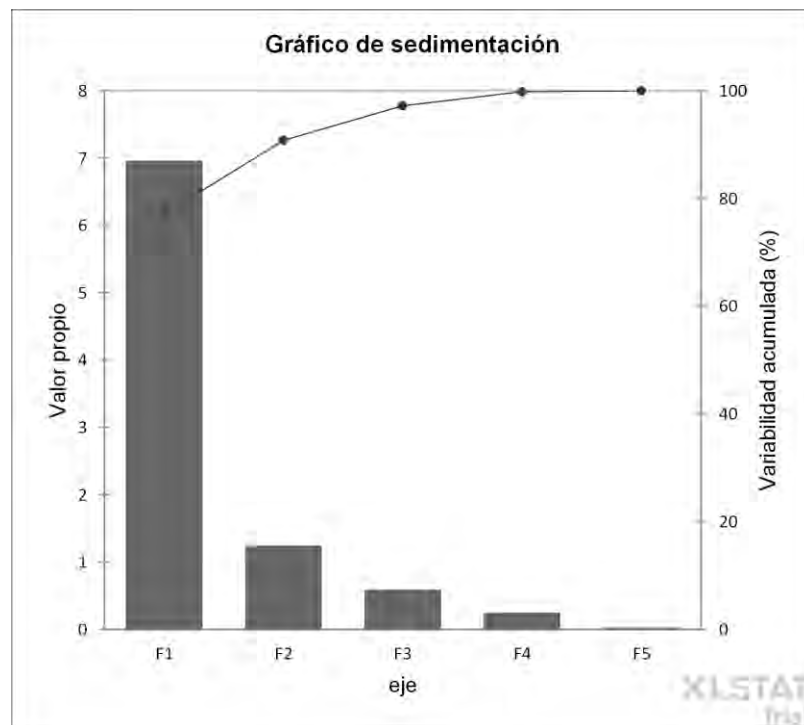


Gráfico 8: sedimentación de los contenidos totales.

El siguiente paso del ACP es la construcción de matriz de cargas (loadings) es decir de los coeficientes que permiten obtener los valores (puntuaciones de las nuevas variables).

En la tabla 9, aparecen en negrita los valores mínimos de los coeficientes para cada elemento analizado, donde se observa que la mayoría de los elementos estas concentrados en el primer factor a excepción del manganeso que aparece ya en segundo factor.

	F1	F2	F3	F4	F5
Fe	0.961	0.037	0.001	0.000	0.001
As	0.799	0.057	0.111	0.030	0.002
Pb	0.813	0.005	0.172	0.009	0.001
Mn	0.297	0.661	0.006	0.035	0.001
Zn	0.947	0.002	0.049	0.002	0.001
Cr	0.802	0.081	0.078	0.036	0.003
Cu	0.691	0.193	0.104	0.012	0.000
Hg	0.902	0.085	0.000	0.005	0.007
Ni	0.731	0.108	0.053	0.106	0.002

Tabla 9: Matriz de cargas (loadings) de los contenidos totales.

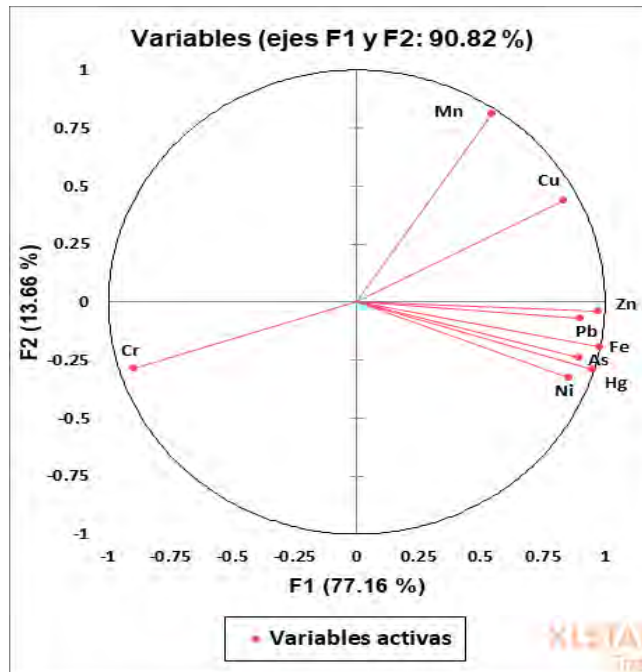


Gráfico 9: Cargas de contenidos totales

El gráfico 9, muestra 4 agrupaciones de elementos; la primera formada por zinc, plomo, hierro, arsenico, mercurio y niquel; la segunda por el manganeso, la tercera de cobre y finalmente la cuarta agrupación de cromo. La segunda tercera y cuarta agrupación forman diagonales individuales con lo que se afirma que en cada agrupación mientras más concentrados estén estos elementos en una zona del gráfico mucho más parecido será su comportamiento.

A continuación, se construye las nuevas variables para cada una de las muestras lo que da lugar a la llamada matriz de puntuaciones (scores) que se muestra en la tabla 10, esta tabla explica el 90.82 % de los contenidos totales y explica la relación entre las muestras analizadas.

	F1	F2	F3	F4	F5
M1	-2.693	-1.502	-0.737	0.432	0.080
M2	-0.442	1.512	0.701	0.684	0.067
M3	-1.441	1.446	-1.030	-0.496	-0.043
M4	-2.568	-0.638	1.128	-0.472	-0.097
M5	3.662	-0.450	-0.225	0.298	-0.203
M6	3.483	-0.368	0.162	-0.445	0.195

Tabla 10: Matriz de puntuaciones de los contenidos totales

En el gráfico 10, se observa una diferenciación de las muestras a lo largo del eje de ordenadas que está relacionado con diferencias entre las dos zonas de muestreo. Las muestras M2 y M3 están agrupadas en el mismo cuadrante y pertenecen a la misma zona de muestreo (Paucartambo), las muestras M5 y M6, están en el mismo cuadrante y pertenecen a la misma zona de muestreo (Quispicanchis). Mientras que a través de este gráfico podemos observar que, la muestra M1 y M4 están en el mismo cuadrante, sabiendo que pertenecen a diferentes zonas de muestreo, estas muestras están relacionadas debido a que tienen valores similares de contenido, con lo que también explica que estas muestras fueron tomadas de diferentes puntos de muestreo (M1, Paucartambo Y M4, Quispicanchis).

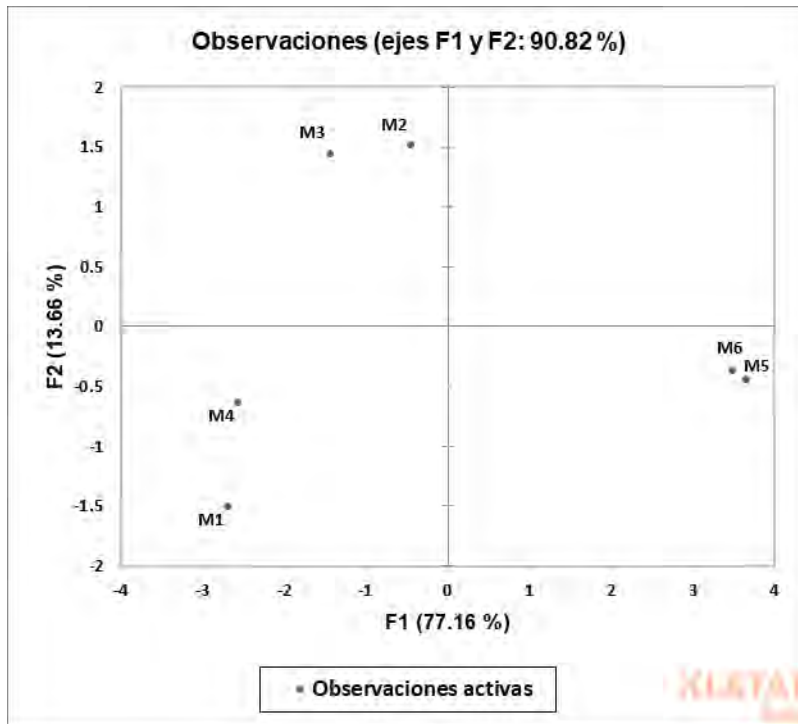


Gráfico 10: Puntuaciones de contenidos totales.

Una información más completa de las relaciones entre muestras y metales, la proporciona el denominado gráfico bivariado, en el que está representado de manera conjunta y en un mismo espacio abstracto, las cargas de las variables (metales analizados) y las puntuaciones de las muestras como se observa en la gráfica 11.

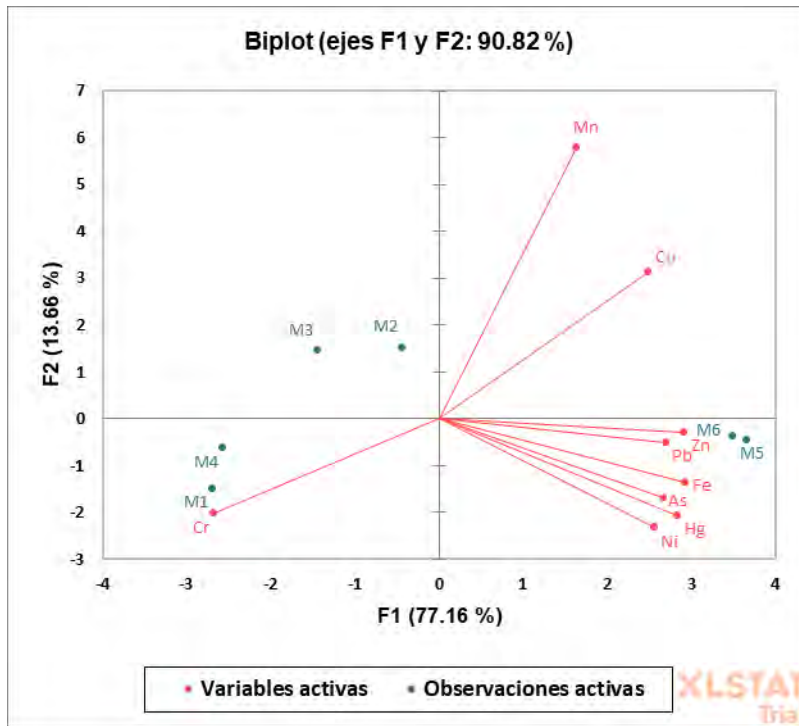


Gráfico 11: Total de contenidos totales.

La interpretación del gráfico bivariado, es intuitiva como en los dos casos anteriores, por lo que las muestras que aparecen en la misma zona del espacio abstracto que los elementos analizados, tienen valores elevados de esos elementos. Siendo así, que los elementos considerados de interés de estudio para este trabajo son los EPT, por lo que las muestras M5 y M6 son abundantes en zinc, plomo, hierro, arsénico, mercurio y níquel, perteneciente a la provincia de Quispicanchis. Sin embargo, como se ha observado en el inicio del capítulo de resultados, los EPT, están presentes en ambas provincias (Paucartambo y Quispicanchis), y esta gráfica solo nos permite observar en que muestras los EPT, están en mayor abundancia. Para este caso es la provincia de Quispicanchis por lo que se corrobora los resultados explicados y discutidos.

CONCLUSIONES

1. Las técnicas de fluorescencia de rayos X (vía seca), ha permitido realizar el análisis elemental de las muestras de los residuos mineros, provenientes de la minería informal de la Región del Cusco (Paucartambo y Quispicanchis), cuyos resultados han revelado la presencia de elementos potencialmente tóxicos como el zinc, plomo mercurio y hierro.
2. El análisis químico mediante la técnica de espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (vía húmeda), también revelo la presencia de los elementos encontrados mediante XRF.
3. La técnica de difracción de rayos X, ha permitido realizar la identificación de fases minerales en las muestras de los residuos mineros provenientes de la minería informal de la Región Cusco (Paucartambo y Quispicanchis), las fases mineralógicas encontradas mediante difracción de rayos X fueron: pirita (FeS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS) y cinabrio (HgS). La microsonda electrónica ha facilitado el reconocimiento de la morfología de los minerales, confirmando así la presencia de las fases minerales encontradas mediante XRD.
4. Las técnicas de XRF y ICP- MS se han empleado para determinar la composición elemental mientras que las técnicas XRD y EPMA han permitido la caracterización mineralógica de las muestras de residuos mineros de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis.
5. El procesamiento y análisis de datos mediante la técnica de ACP, ha sido útil para poder identificar la agrupación de elementos de las muestras de residuos mineros y poder apreciar las semejanzas del contenido elemental pertenecientes a una zona de

muestreo. El ACP, ha permitido la observación e interpretación de estas dos variables en un solo gráfico.

RECOMENDACIONES

El análisis químico y la caracterización química de residuos es de mucha importancia para poder identificar fases minerales que en su composición tengan elementos potencialmente tóxicos por lo que se recomienda realizar este tipo de estudios en todas las zonas donde se lleva a cabo la actividad minera en especial la minería informal.

La minería informal, es un estrato de la clasificación minera que desde décadas anteriores hasta la actualidad el estado no logra regular, controlar y supervisar las actividades durante el proceso de extracción. Por lo que se recomienda que se capacite a los mineros informales en métodos y técnicas de adecuado almacenamiento de todos los residuos mineros que se genera en esta actividad.

Se recomienda la identificación de elementos potencialmente tóxicos en los residuos mineros porque ello ha de permitir a futuro la elección de un adecuado método de remediación ambiental y de esto modo evitar la formación de nuevos pasivos ambientales a causa de minas abandonadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, J. A. (2009). Estudio de los mecanismos de cristalización y maduración de fosfatos de calcio en medio biológico usando radiación de sincrotrón.
- Aduvire, O. J. I. G. y. M. d. E. D. d. R. M. y. G. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento.
- Alarcón, G. M. O. M. C., & Reyes, G. M. C. A. R. (2005). EPMA: ELECTRONIC MICROSONDS; PRINCIPLES OF OPERATION EPMA: MICROSONDA ELECTRÓNICA; PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.
- Aquilano, R., Rull, F., Aznar, M., Medina, J., & Martínez-Frías, J. J. R. d. I. S. G. d. E. (2020). ESTUDIO MINERALÓGICO MEDIANTE TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS (RAMAN-FTIR-DRX-FRX) DE MUESTRAS VOLCÁNICAS DE LA ZONA DE CHAMORGA (TENERIFE, ESPAÑA). *33*, 1.
- Aramburo, M. A., & Olaya, Y. J. G. y. a. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *15*(3), 125-133.
- Araújo, A. C., Machado, A.-R., Fonseca, C. A.-R., & Fernando, D. (2017). Análisis mineralógico, químico y porosimétrico de los agregados pétreos de una cantera perteneciente a la formación geológica de la sabána en el municipio de Soacha-Cundinamarca.
- Arcos Alarcón, F. C. C., Cesar. (2019). Actividad Minera Artesanal en las Regiones de Ancash y Cusco. *INGEMMET*, 13.
- Asta Andrés, M., Acero Salazar, P., Auqué Sanz, L., Gimeno Serrano, M., & Gómez Jiménez, J. J. B. g. y. M. (2011). Procesos geoquímicos en aguas ácidas por meteorización de sulfuros. *122*(2), 259-272.
- Aulet, A., Cetrangolo, G., Domenech, L., Romay, C., Sabalsagaray, S., Dalchiele, E., & Morquio, A. (2016). *Estudios morfológicos y físico-mecánicos de morteros de cal del patrimonio arquitectónico*. Paper presented at the Proceedings of the VI Rehabend Congress, Burgos, España.
- Aybar Camacho, C. L. (2015). Sistema de seguimiento de escorrentía a nivel nacional.
- Baena, A. J. R., Díez, I. G., Huertos, E. G., & Carlos, J. J. R. (2011). Caracterización y Distribución Espacial de las Escombreras Mineras de Riotinto: una Base para Valorar el Potencial Contaminante. *80*(90), 100.
- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J., & Weisener, C. J. T. o. g. (2003). The geochemistry of acid mine drainage. *9*, 612.
- Cahuana, L., & Aduvire, O. J. R. d. M. A. y. M. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *4*(2), 19-36.
- Castellanos, O., & Ríos, C. J. R. C. d. T. d. A. (2005). EPMA: Microsonda Electrónica; Principios de Funcionamiento. *2*.
- Covarrubias, S. A., & Cabriales, J. J. P. J. R. I. d. C. A. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *33*, 7-21.
- Dammert, L., & Molinelli, A. (2007). Panorama de la Minería en el Perú-Osinergmin. In: Lima.
- De Echave, J. J. N. s. (2016). La minería ilegal en Perú: Entre la informalidad y el delito. (263), 131-144.
- De la Cruz Echaccaya, E. F. (2018). Fluorescencia de rayos X y su aplicación en la determinación de elementos químicos en determinadas muestras.
- Díaz Zamora, R. (2017). Ventajas y desventajas del análisis por ICP-MS de metales pesados en muestras biológicas.
- Dold, B. J. R. M. (2003). Aguas Ácidas: formación, predicción, control y prevención. *309*, 29-37.
- Evaristo, G., Wilfredo, F., & Quispe Pozo, R. (2015). Determinación de Pb, Cd, As en aguas del río Santa en El Pasivo Minero Ambiental de Recuay, Ticapampa; Recuay-Ancash.

- Glave, M., Kuramoto, J. J. I. f. E., & development, m., minerales y desarrollo sustentable en américa del sur. (2002). Minería, minerales y desarrollo sustentable en Perú.
- Gómez López, M. d. C. (2021). Instrumentación portátil en el estudio del Patrimonio Histórico-Artístico.
- Gutiérrez Ruiz, M., & Moreno Turrent, M. J. R. P. e. M. S.-I. (1995). Los residuos en la minería mexicana.
- Herrmann, C. J., & Zappettini, E. O. (2014). Recursos minerales, minería y medio ambiente.
- Huamán-Paredes, F. E., Palma-Figueroa, G. U., & Flores-del Pino, L. J. R. C. d. Q. (2020). Caracterización preliminar de residuos de minería aluvial en la región Madre de Dios-Perú. 32(2), 232-244.
- INGEMMET, I. G., Minero y Metalurgico. (2006). El Nuevo Mapa Metalogenético del Perú. Retrieved from https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/202784/034_2007_Presentacion_CIP_Mapa_MetalogeneticoQuispe.pdf/b9424071-89c0-4b75-8149-df4b958f5d
- Kassambara, A. (2017). *Practical guide to principal component methods in R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra* (Vol. 2): Sthda.
- Kirschbaum, A., Murray, J., Arnosio, M., Tonda, R., & Cacciabue, L. J. R. m. d. c. g. (2012). Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales. 29(1), 248-264.
- Klein, C., & Cornelius Jr, S. (2018). *Manual de mineralogía: Vol. 2* (Vol. 2): Reverté.
- Klein, C., & Hurlbut, C. J. E. R. S. (2003). Manual de mineralogía de dana. 4(2).
- Kuramoto, J. R., & para el Desarrollo, G. d. A. (2002). La Minería Artesanal e Informal en el Perú.
- Lavrent'ev, Y. G., Korolyuk, V., Usova, L., Nigmatulina, E. J. R. G., & Geophysics. (2015). Electron probe microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 electron probe microanalyzer. 56(10), 1428-1436.
- Lira, A. D., & Aristondo, F. M. (2007). *Panorama de la Minería en el Perú*: Osinergmin.
- Miguel Sarmiento, A. (2014). *Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España)*: Universidad de Huelva.
- MINAM, M. d. A. (2010). Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM .- Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. Retrieved from <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-descarga-efluentes-liquidos>
- MINEM, M. d. E. y. M. (2012). Disposiciones para el Proceso de Formalización de las Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal.
- [D.L. N° 1105-2012-EM]. *El Peruano*.
- MINEM, M. d. E. y. M. (2017). Catálogo de Medidas Ambientales en el marco del IGAFOM De aplicación para el Pequeño Productor Minero y Productor Minero Artesanal que forma parte del Proceso de Formalización Minera Integral.
- Mineralogy database(2021) <http://webmineral.com/>.
- Moreno Perlín, T. (2014). *Enriquecimiento de comunidades sulfato reductoras degradadoras de acetato en condiciones ácidas*.
- Muñoz, I. E. G., Vidal, M. M. J., & Montolio, T. F. S. J. R. E. e. G. (2002). MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE METALES PESADOS CONTAMINANTES PRESENTES EN SUELOS MINEROS DEL SUR DE CHILE. 5(1).
- Oblasser, A., & Chaparro Avila, E. (2008). *Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos*: CEPAL.

- Obregón, B. Q. (2021, 20221). Compendio de Proyectos Mineros y Ampliaciones 2021-2025. *Rumbo Minero*, 133.
- Oliás Álvarez, M., Nieto Liñán, J. M., Miguel Sarmiento, A., & Ruiz Cánovas, C. (2010). La contaminación minera de los ríos Tinto y Odiel.
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). *Minería ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación*: Ediciones GEMM-Aula2puntonet.
- Quinde Obregón, B. (2021, 20221). Compendio de Proyectos Mineros y Ampliaciones 2021-2025. *Rumbo Minero*, 133.
- Quispe, J., Carlotto, J., Macharé, J., Chirif, H., ROMERO, D., ACOSTA, J., . . . VELARDE, T. (2007). INGEMMET prepara nuevo mapa metalogenético. In: MINERÍA.
- Ramos-Gómez, M., Avelar, J., Medel-Reyes, A., Yanamoto, L., Godinez, L., Ramirez, M., . . . Rodriguez, F. J. R. i. d. c. a. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. 28(1), 49-59.
- RandboundUniversity. (2016). ICP-MS. Retrieved from <https://www.ru.nl/science/gi/facilities-activities/elemental-analysis/icp-ms/>
- Rodríguez, R., Estupiñán, M. D. R., Iglesias, M., & Castillo, E. (2007). *Evaluación del riesgo ambiental de los pasivos ambientales de la cuenca alta del río Santa en el departamento de Ancash, Perú*. Paper presented at the V congreso internacional de medio ambiente en minería y metalurgia, At Lima, Perú.
- Romero, A., Medina, R., & Flores, S. J. R. d. I. d. I. d. I. F. d. I. G., Minera, Metalúrgica y Geográfica. (2008). Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. 11(22), 13-16.
- Romero Blanco, F. (2015). Caracterización elemental y estructural de cemento tipo I.
- SAC, E. M. D. P. J. R. d. h. w. e. c. M. M. M. p. (2000). Manual de minería.
- Salas Urviola, F. B., Guadarrama Guzmán, P., Gutiérrez Bazán, J. J., García Luna, N., Fernández Villagómez, G., & Alarcón Herrera, M. T. J. R. i. d. c. a. (2020). DETERMINACIÓN DE POSIBLE DRENAJE ÁCIDO DE MINA Y CARACTERIZACIÓN DE JALES MINEROS PROVENIENTES DE LA MINA CERRO DE MERCADO, DURANGO, MÉXICO. 36(3), 729-744.
- Sánchez sánchez, W., Hoyos Huanca, D., Aguinaga Fonseca, V., Carranza Avellaneda, V., Ramirez Ramirez, D., & Abanto León, C. (2020). Anuario minero 2020. *Ministerio de Energía y Minas*.
- Sgier, H., Macías, F., Nieto, J. M., & Rötting, T. T. J. T. (2015). Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina. 70-75.
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. J. J. o. E. C. E. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. 2(3), 1785-1803.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2008). Principios de análisis instrumental.
- Tomachuk, C. R.-M. Q., Fernanda https://www.abts.org.br/boletim/newsletter/2012/espanol/mar/boletin_as_6_mat1.html . (2012). Metodos no Destructivos Utilizados para medir el Espesor de Capa Revestimientos.
- Torrego Martín, C. (2013). La evolución de la clasificación de los minerales.
- Tupayachi, E. (2020). *Estudio sobre marco normativo minero en Perú*. Paper presented at the Recuperado de: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/43e90a2f7463578405257e2a0077f9ae/\\$file/estudiosobremarconormativomineroenelper%20C3%BA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/43e90a2f7463578405257e2a0077f9ae/$file/estudiosobremarconormativomineroenelper%20C3%BA.pdf).
- Valentinuzzi, M. C. J. U. N. D. C. (2008). Análisis por fluorescencia de rayos X: implementación de guías de haces en reflexión total.
- Vasquez Guevara, R. E. (2021). *Impacto de la minería en el crecimiento de la economía peruana, periodo 2001–2018*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza-UNTRM,

Ye, M., Li, G., Yan, P., Ren, J., Zheng, L., Han, D., . . . Zhong, Y. J. C. (2017). Removal of metals from lead-zinc mine tailings using bioleaching and followed by sulfide precipitation. *185*, 1189-1196.

Yupari, A., J CEPAL: Santiago, Chile. (2003). Pasivos ambientales mineros en Sudamérica.

ANEXOS



Anexo 1: Zona de muestreo de la provincia de Paucartambo.



a)



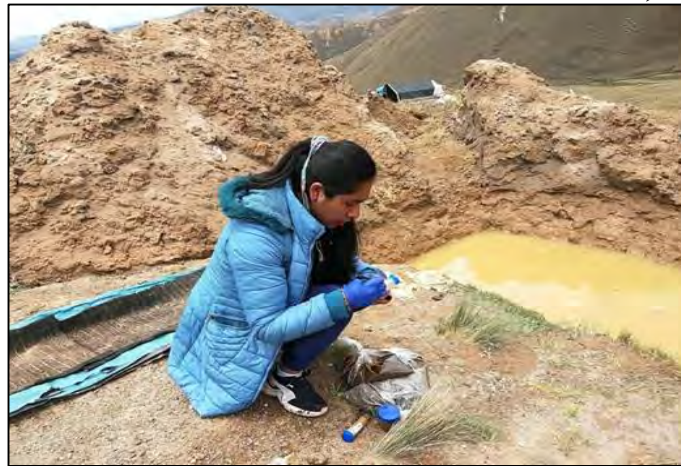
b)



c)



d)



e)

Anexo 2: a y b) Zona de muestreo de la provincia de Quispicanchi. C y d) Maquinarias para la extracción de oro. e) Muestreo de residuos mineros en la provincia de Quispicanchis.



LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO – METALÚRGICAS - DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM Y RESOLUCION MINISTERIAL N° 011-96-EM-VMM

Volumen Total de Efluente	Frecuencia de Muestreo	Frecuencia de Presentación de Reporte
Mayor que 300 m ³ /día	Semanal	Trimestral (1)
50 a 300 m ³ /día	Trimestral	Semestral (2)
Menor que 50 m ³ /día	Semestral	Anual (3)

Nota : (1) Último día hábil de los meses de marzo, junio, setiembre y diciembre
 (2) Último día hábil de los meses de junio y diciembre
 (3) Último día hábil del mes de junio
 Los reportes del mes de junio estarán contenidos en el Anexo 1 del Decreto Supremo N° 016-93-EM.

Tabla N°1. Frecuencia de muestreo de calidad del agua y presentación de reporte
 Fuente: RESOLUCION MINISTERIAL N° 011-96-EM-VMM

PARAMETRO	Efluente Mayor que 300 m ³ /día	Efluente De 50 a 300 m ³ /día	Efluente Menor que 50 m ³ /día
pH	Semanal	Trimestral	Semestral
Sólidos suspendidos	Semanal	Trimestral	Semestral
Pb, Cu, Zn, Fe, As	Mensual	Trimestral	Semestral
CN total		Quincenal	Trimestral
Semestral			




Tabla N°2. Frecuencia de análisis químico
 Fuente: RESOLUCION MINISTERIAL N° 011-96-EM-VMM

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales Suspensión	en mg/l	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Piombo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

Anexo 01. Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas
 Fuente: D.S. N° 010-2010-MINAM

Anexo 3: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas- Catálogo de Medidas Ambientales - MINEM

Anexo 4: Resultados del analisis elemental DE RESIDUOS mineros mediante FRX.

 S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS										 S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS										 S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS												
Listed at 10/07/2019 12:52:35 p.m.										Listed at 10/07/2019 12:19:21 p.m.										Listed at 10/07/2019 12:20:30 p.m.												
User: Administrator					Serial number: 42 256 1115					User: Administrator					Serial number: 42 256 1115					User: Administrator					Serial number: 42 256 1115							
Sample: M1-T1					ID-No.:					Project: 08-07-19.rtx					Sample: M1-T2					Project: 08-07-19.rtx					Sample: M1-T3							
Disc:					Quant. type: Solid					ID-No.:					Disc:					ID-No.:					Disc:							
Spectrum: M1-Cuan-T1					Meas.date: 08/07/2019 08:05:37 p.m.					Quant. type: Solid					Spectrum: M1-Cuan-T2					Spectrum: M1-Cuan-T3												
Live time: 2000 s					Count rate: 71542 cps					Meas.date: 08/07/2019 08:50:06 p.m.					Live time: 2000 s					Meas.date: 08/07/2019 09:34:24 p.m.					Live time: 2000 s							
Dead time: 19.2 %					Voltage: 50 kV					Count rate: 71952 cps					Dead time: 18.7 %					Count rate: 71303 cps					Dead time: 18.7 %							
Current: 600 µA					Excitation: Mo K radiation					Voltage: 50 kV					Current: 600 µA					Voltage: 50 kV					Current: 600 µA							
Method: Standard (Profile bayes normal fit)										Excitation: Mo K radiation										Excitation: Mo K radiation												
Comment:										Method: UNGAAG-CUAN (Profile bayes normal fit)										Method: UNGAAG-CUAN (Profile bayes normal fit)												
Comment:										Comment:										Comment:												
Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi		Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi		Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi				
Al	K12	41920	190	0.4	140	174480	35537	34.07		Al	K12	47420	180	0.4	90	240941	21143	54.64		Al	K12	44370	160	0.4	80	234405	22077	46.65				
Si	K12	91450	250	0.3	50	961272	32967	276.15		Si	K12	102300	240	0.2	30	1312665	21508	380.17		Si	K12	94230	220	0.2	30	1257245	22805	365.45				
S	K12	4907	20	0.4	11	193008	19152	50.57		S	K12	3767	15	0.4	7	180897	12131	64.34		S	K12	4077	16	0.4	7	203519	13938	50.65				
Ar	K12	190.1	2.3	1.2	2.9	17987	8569	5.89		Ar	K12	194.7	1.9	1.0	2.1	22486	6736	9.52		Ar	K12	161.7	1.8	1.1	2.1	19415	6845	8.20				
K	K12	18526	42	0.2	2	2827127	14617	721.24		K	K12	20447	41	0.2	2	3809114	16706	960.64		K	K12	19613	39	0.2	2	3798953	16825	982.21				
Ca	K12	1223.9	4.5	0.4	1.6	277873	14061	10.32		Ca	K12	1315.1	4.2	0.3	1.4	364506	17586	14.16		Ca	K12	1216.5	3.9	0.3	1.4	350573	18089	16.64				
Ti	K12	4018.5	9.9	0.2	1.0	1552302	17602	333.49		Ti	K12	4312.8	9.5	0.2	1.0	2033754	24875	443.12		Ti	K12	4027.5	8.8	0.2	1.0	1974716	25276	426.65				
Cr	K12	83.88	0.79	0.9	1.14	52390	55916	8.19		Cr	K12	88.88	0.75	0.8	1.10	67772	77873	7.44		Cr	K12	87.08	0.72	0.8	1.04	69040	74816	11.38				
Mn	K12	204.0	1.1	0.5	1.2	155137	86418	6.65		Mn	K12	190.53	0.98	0.5	1.12	176858	119070	7.62		Mn	K12	177.64	0.92	0.5	1.05	171447	113764	7.10				
Fe	K12	44378	80	0.2	1	42845951	112476	3908.79		Fe	K12	48245	79	0.2	1	56862523	154377	5165.09		Fe	K12	44590	71	0.2	1	54643018	147202	5217.08				
Ni	K12	17.62	0.22	1.2	0.32	24728	21944	8.87		Ni	K12	18.82	0.22	1.2	0.34	32226	37078	3.50		Ni	K12	19.70	0.21	1.1	0.31	35086	34403	5.20				
Cu	K12	40.01	0.24	0.6	0.17	63061	7948	7.69		Cu	K12	39.86	0.23	0.6	0.21	76680	18332	4.60		Cu	K12	49.81	0.25	0.5	0.20	99551	17400	6.06				
Zn	K12	110.43	0.45	0.4	0.22	202292	18802	10.45		Zn	K12	102.50	0.39	0.4	0.22	229220	26970	11.24		Zn	K12	104.68	0.39	0.4	0.22	243386	27800	12.81				
Ga (IG)	K12	196.85	0.65	0.3	0.23	413829	26526	21.56		Ga (IG)	K12	196.85	0.59	0.3	0.21	505183	32638	38.66		Ga (IG)	K12	196.85	0.58	0.3	0.21	525265	34400	41.18				
As	K12	522.2	1.3	0.3	0.2	1339979	17235	25.43		As	K12	616.1	1.4	0.2	0.2	1929993	26102	38.97		As	K12	536.8	1.2	0.2	0.2	1748295	26756	32.14				
Rb	K12	133.95	0.47	0.3	0.28	422831	88453	80.36		Rb	K12	160.54	0.47	0.3	0.24	618621	91515	35.97		Rb	K12	148.99	0.44	0.3	0.22	596952	89556	68.55				
Sr	K12	109.96	0.45	0.4	0.41	347913	183768	62.28		Sr	K12	129.07	0.43	0.3	0.31	498531	161515	77.56		Sr	K12	114.37	0.39	0.3	0.30	459310	157068	74.54				
Mo	L1	28260	150	0.5	120	100701	19326	31.17		Mo	L1	29850	130	0.5	80	129862	12322	41.43		Mo	L1	25700	120	0.5	80	116216	14127	33.58				
Ba	L1	737.1	3.5	0.5	2.1	129422	15199	336.82		Ba	L1	783.4	3.3	0.4	2.1	167928	21571	451.88		Ba	L1	779.0	3.2	0.4	2.0	173619	22106	433.84				
Au	L1	5.73	0.15	2.6	0.27	10092	25665	4.19		Hg	L1	33.51	0.22	0.6	0.23	74103	29829	26.12		Hg	L1	29.45	0.20	0.7	0.23	67713	31159	19.57				
Hg	L1	25.19	0.21	0.8	0.26	45636	23965	16.42		Pb	L1	216.09	0.65	0.3	0.21	482876	23545	41.64		Pb	L1	217.67	0.64	0.3	0.20	505744	24104	38.86				
Pb	L1	205.05	0.69	0.3	0.20	375353	15263	27.82																								



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:21:54 p.m.

User: Administrator
Project: 08-07-19.rtx
ID-No.:

Serial number: 42 256 1115
Sample: M2-T1
Disc:

Quant. type: Solid
Meas.date: 08/07/2019 10:18:40 p.m.
Count rate: 54358 cps
Voltage: 50 kV

Spectrum: M2-cuan-T1
Live time: 2000 s
Dead time: 14.5 %
Current: 600 µA

Excitation: Mo K radiation

Method: UNGAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	23960	120	0.5	100	116501	27378	10.81
Si	K12	77310	200	0.3	40	949222	24392	250.19
S	K12	1255.9	8.1	0.6	7.0	57702	11547	4.53
Ar	K12	225.3	1.9	0.8	1.2	24894	1948	4.59
K	K12	13213	28	0.2	1	2355228	3716	538.03
Ca	K12	214.2	1.2	0.6	0.5	56809	1940	38.76
Ti	K12	2184.1	5.5	0.3	0.8	985489	14739	205.88
Cr	K12	59.91	0.61	1.0	0.93	43712	51525	10.35
Mn	K12	83.15	0.66	0.8	0.94	73850	77270	3.30
Fe	K12	32479	54	0.2	1	36628513	96725	3048.00
Ni	K12	7.02	0.14	2.0	0.25	11508	17983	5.48
Cu	K12	16.53	0.14	0.9	0.14	30436	7760	3.25
Zn	K12	22.53	0.16	0.7	0.17	48216	14297	8.54
Ga (IG)	K12	198.41	0.59	0.3	0.18	487223	22370	58.68
As	K12	1787.5	3.5	0.2	0.2	5357601	26911	110.91
Rb	K12	116.68	0.38	0.3	0.21	430207	65182	2.90
Sr	K12	34.37	0.22	0.6	0.30	127030	136852	20.07
Mo	L1	578	40	6.8	78	2406	11787	2.83
Ba	L1	512.7	2.5	0.5	1.6	105168	12593	203.41
Hg	L1	46.32	0.25	0.5	0.23	98027	26607	17.90
Pb	L1	21.35	0.18	0.8	0.22	45650	24459	126.54



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:22:32 p.m.

User: Administrator
Project: 08-07-19.rtx
ID-No.:

Serial number: 42 256 1115
Sample: M2-T2
Disc:

Quant. type: Solid
Meas.date: 08/07/2019 11:01:01 p.m.
Count rate: 50222 cps
Voltage: 50 kV

Spectrum: M2-cuan-T2
Live time: 2000 s
Dead time: 13.6 %
Current: 600 µA

Excitation: Mo K radiation

Method: UNGAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	24510	140	0.6	150	98778	38763	6.55
Si	K12	67430	190	0.3	50	686343	34512	177.00
S	K12	1671	11	0.7	11	63648	20098	4.75
Ar	K12	248.5	2.7	1.1	3.3	22767	10424	3.54
K	K12	12733	30	0.2	2	1881630	10411	429.94
Ca	K12	332.7	1.9	0.6	1.1	73144	6541	9.74
Ti	K12	2206.8	6.0	0.3	0.8	825494	10435	162.77
Cr	K12	51.35	0.59	1.1	0.87	31061	31088	3.67
Mn	K12	65.39	0.62	0.9	0.89	48146	47437	2.55
Fe	K12	26292	48	0.2	1	24581655	60788	1816.22
Ni	K12	6.04	0.12	2.0	0.19	8207	7783	6.89
Cu	K12	15.21	0.13	0.9	0.07	23207	1388	3.12
Zn	K12	22.80	0.16	0.7	0.13	40445	5527	7.29
Ga (IG)	K12	198.41	0.64	0.3	0.15	403924	10969	38.86
As	K12	1431.7	3.1	0.2	0.1	3557506	13585	131.54
Rb	K12	94.00	0.36	0.4	0.24	287347	59796	35.61
Sr	K12	32.53	0.25	0.8	0.37	99658	138976	19.03
Mo	L1	2426	68	2.8	123	8371	20170	4.44
Ba	L1	438.3	2.5	0.6	1.7	74536	9120	164.62
Hg	L1	49.39	0.27	0.6	0.20	86658	13999	19.11
Pb	L1	21.53	0.18	0.8	0.19	38158	12291	121.37



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:53:18 p.m.

User: Administrator
Sample: M2-T3
Disc:

Serial number: 42 256 1115
ID-No.:

Quant. type: Solid
Spectrum: M2-cuan-T3
Live time: 2000 s
Dead time: 14.2 %
Current: 600 µA

Meas.date: 08/07/2019 11:43:03 p.m.
Count rate: 52964 cps
Voltage: 50 kV
Excitation: Mo K radiation

Method: UNGAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	22850	160	0.7	180	72631	38074	3.28
Si	K12	80960	250	0.3	70	649934	33906	152.86
S	K12	2192	15	0.7	14	65863	19954	5.71
Ar	K12	309.0	3.3	1.1	3.8	22323	8416	3.65
K	K12	13445	36	0.3	2	1567059	8899	348.43
Ca	K12	549.3	2.9	0.5	1.4	95252	6187	8.71
Ti	K12	2300.3	7.1	0.3	1.2	678663	13398	132.95
Cr	K12	62.53	0.81	1.3	1.25	29830	39386	13.85
Mn	K12	66.67	0.79	1.2	1.22	38716	55974	2.70
Fe	K12	33361	68	0.2	1	24600369	67567	1748.17
Ni	K12	8.99	0.19	2.1	0.31	9630	12169	7.89
Cu	K12	15.71	0.16	1.0	0.15	18914	3798	3.15
Zn	K12	21.13	0.19	0.9	0.19	29565	8070	8.26
Ga (IG)	K12	198.41	0.73	0.4	0.21	318574	12424	25.92
As	K12	1756.6	4.2	0.2	0.2	3442573	15755	122.40
Rb	K12	112.62	0.47	0.4	0.33	271518	70219	7.44
Sr	K12	34.85	0.33	0.9	0.49	84206	156701	20.14
Mo	L1	6131	99	1.6	156	16685	20048	3.89
Ba	L1	630.3	3.6	0.6	2.4	84528	11765	129.48
Hg	L1	220.90	0.83	0.4	0.27	305649	15594	7.57
Pb	L1	21.27	0.21	1.0	0.26	29734	14298	118.68



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:27:14 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M3-T1
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M3-cuan-T1
 Meas.date: 09/07/2019 12:25:26 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 55763 cps Dead time: 14.8 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	13120	100	0.8	90	42159	8475	6.08
Si	K12	43030	160	0.4	30	349258	5217	83.66
S	K12	17683	59	0.3	4	537120	1528	88.38
Ar	K12	245.1	2.3	0.9	0.0	17908		18.50
K	K12	7684	23	0.3	1	905483	389	167.39
Ca	K12	1554.4	6.0	0.4	0.3	272533	368	20.94
Ti	K12	1589.3	5.4	0.3	1.0	474082	9051	116.43
Cr	K12	130.3	1.1	0.9	1.5	62860	56665	11.01
Mn	K12	587.8	2.4	0.4	1.6	345167	102127	25.88
Fe	K12	70670	150	0.2	0	52690366	133316	3874.72
Ni	K12	25.39	0.31	1.2	0.44	27605	24812	4.70
Cu	K12	24.84	0.23	0.9	0.24	30226	9436	5.73
Zn	K12	63.25	0.37	0.6	0.28	89472	17824	11.60
Ga (IG)	K12	195.31	0.75	0.4	0.32	317074	30887	18.92
As	K12	2910.8	6.9	0.2	0.3	5767864	40716	228.88
Rb	K12	68.11	0.34	0.5	0.28	166023	51334	30.91
Sr	K12	61.21	0.37	0.6	0.41	149553	113400	18.64
Mo	L1	36080	190	0.5	40	99291	1543	75.68
Ba	L1	365.9	2.6	0.7	1.9	49615	7108	112.62
Hg	L1	539.7	1.7	0.3	0.4	754996	40115	13.88
Pb	L1	86.89	0.48	0.6	0.41	122829	36987	226.54



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:27:46 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M3-T2
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M3-cuan-T2
 Meas.date: 09/07/2019 01:08:09 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 80485 cps Dead time: 20.9 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	16760	110	0.7	100	59447	13731	2.74
Si	K12	61620	200	0.3	30	551919	8814	120.93
S	K12	24090	73	0.3	4	807412	2157	401.26
Ar	K12	68.7	1.1	1.5	0.0	5541		186.39
K	K12	9805	27	0.3	0	1274988	251	247.90
Ca	K12	1637.5	6.0	0.4	0.2	316796	253	53.62
Ti	K12	2177.3	6.7	0.3	0.9	716686	9701	122.20
Cr	K12	160.5	1.2	0.7	1.4	85445	63464	19.53
Mn	K12	641.7	2.5	0.4	1.6	415766	121236	26.29
Fe	K12	80380	160	0.2	0	66126592	165714	5808.56
Ni	K12	29.87	0.33	1.1	0.46	38709	34319	6.13
Cu	K12	38.28	0.28	0.7	0.27	51413	14268	5.42
Zn	K12	483.1	1.5	0.3	0.3	754112	25680	29.61
Ga (IG)	K12	195.31	0.74	0.4	0.36	349871	45161	18.02
As	K12	3416.8	7.7	0.2	0.3	7470791	58369	201.83
Rb	K12	84.66	0.39	0.5	0.31	227712	78066	48.98
Sr	K12	107.38	0.50	0.5	0.46	289487	170073	45.85
Mo	L1	Not det.			46.48	1	2213	404.69
Ba	L1	446.4	2.8	0.6	1.7	66791	7550	119.81
Hg	L1	453.3	1.4	0.3	0.5	699755	60095	9.65
Pb	L1	102.27	0.52	0.5	0.44	159518	52879	210.46



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:28:39 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M3-T3
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M3-cuan-T3
 Meas.date: 09/07/2019 01:53:55 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 69044 cps Dead time: 18.1 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	17010	110	0.7	110	66007	21220	4.44
Si	K12	58930	180	0.3	40	577450	15166	132.19
S	K12	10090	35	0.3	6	370019	5202	72.12
Ar	K12	131.4	1.5	1.1	0.0	11591		34.62
K	K12	9171	24	0.3	0	1304785	392	216.19
Ca	K12	1155.1	4.4	0.4	0.3	244503	365	44.32
Ti	K12	1955.8	5.8	0.3	0.7	704356	6582	108.82
Cr	K12	216.4	1.2	0.5	1.1	126005	42018	14.77
Mn	K12	624.7	2.2	0.4	1.2	442831	86838	28.76
Fe	K12	56740	110	0.2	0	51068764	124239	3504.83
Ni	K12	32.05	0.30	0.9	0.41	41935	31364	9.35
Cu	K12	41.35	0.27	0.7	0.22	60756	11656	8.22
Zn	K12	79.42	0.39	0.5	0.26	135630	22506	32.01
Ga (IG)	K12	195.31	0.69	0.4	0.30	382800	38129	23.53
As	K12	2831.4	6.1	0.2	0.3	6773467	45964	145.31
Rb	K12	75.00	0.34	0.5	0.28	220711	74544	7.55
Sr	K12	74.23	0.37	0.5	0.39	218972	145937	46.40
Mo	L1	21090	120	0.6	70	70073	5315	60.85
Ba	L1	290.4	2.0	0.7	1.3	47547	5187	111.14
Hg	L1	522.7	1.5	0.3	0.4	882846	46231	18.38
Pb	L1	116.42	0.52	0.4	0.36	198683	41721	146.81



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:29:11 p.m.

User: Administrator
Project: 08-07-19.rtx
ID-No.:

Serial number: 42 256 1115
Sample: M4-T1
Disc:

Quant. type: Solid
Meas.date: 09/07/2019 02:38:18 a.m.
Count rate: 78604 cps
Voltage: 50 kV

Spectrum: M4-cuan-T1
Live time: 2000 s
Dead time: 20.7 %
Current: 600 µA

Excitation: Mo K radiation

Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	13790	130	0.9	170	43150	31025	6.76
Si	K12	64700	220	0.3	60	511396	22166	114.16
S	K12	16599	56	0.3	9	490941	7827	74.73
Ar	K12	175.1	1.9	1.1	0.0	12455		19.55
K	K12	8590	25	0.3	0	985690	338	161.24
Ca	K12	1188.2	4.9	0.4	0.3	202847	317	37.84
Ti	K12	1774.7	5.9	0.3	0.8	515481	6524	85.56
Cr	K12	157.6	1.2	0.7	1.3	74028	43522	12.96
Mn	K12	564.8	2.3	0.4	1.6	322925	87903	16.22
Fe	K12	71400	150	0.2	0	51837889	123498	3733.73
Ni	K12	22.22	0.28	1.3	0.41	23442	20596	5.52
Cu	K12	78.32	0.42	0.5	0.14	92814	3134	4.17
Zn	K12	70.65	0.39	0.6	0.24	97314	12021	23.27
Ga (IG)	K12	196.08	0.76	0.4	0.31	309951	26218	20.19
As	K12	2770.2	6.6	0.2	0.3	5344835	34489	96.42
Rb	K12	69.89	0.38	0.5	0.37	165985	87818	58.91
Sr	K12	80.25	0.47	0.6	0.54	190931	185387	42.51
Mo	L1	62050	280	0.5	100	166249	7984	52.21
Ba	L1	319.5	2.4	0.7	1.6	42183	5054	81.19
Hg	L1	497.5	1.6	0.3	0.4	677706	34179	18.25
Pb	L1	229.66	0.89	0.4	0.39	316105	31310	102.60



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:30:33 p.m.

User: Administrator
Project: 08-07-19.rtx
ID-No.:

Serial number: 42 256 1115
Sample: M4-T2
Disc:

Quant. type: Solid
Meas.date: 09/07/2019 03:24:04 a.m.
Count rate: 85005 cps
Voltage: 50 kV

Spectrum: M4-cuan-T2
Live time: 2000 s
Dead time: 21.9 %
Current: 600 µA

Excitation: Mo K radiation

Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	18170	130	0.7	120	58873	18089	6.50
Si	K12	68330	230	0.3	40	559213	10011	106.81
S	K12	25480	79	0.3	4	780283	1441	394.23
Ar	K12	28.37	0.68	2.4	0.00	2090		233.59
K	K12	10533	30	0.3	0	1251443	148	176.94
Ca	K12	1177.9	4.9	0.4	0.2	208215	140	122.56
Ti	K12	2331.0	7.4	0.3	1.1	701043	11655	97.84
Cr	K12	224.6	1.5	0.6	1.6	109204	68252	35.64
Mn	K12	595.7	2.5	0.4	1.8	352680	122002	14.41
Fe	K12	88810	180	0.2	0	66758711	165940	5390.98
Ni	K12	27.84	0.34	1.2	0.49	30413	32019	7.12
Cu	K12	24.94	0.23	0.9	0.24	30606	9773	2.90
Zn	K12	77.54	0.42	0.5	0.30	110588	19877	23.01
Ga (IG)	K12	196.08	0.77	0.4	0.35	320932	36890	26.89
As	K12	4858	11	0.2	0	9705860	60666	199.03
Rb	K12	99.23	0.46	0.5	0.36	241408	89385	32.76
Sr	K12	117.17	0.55	0.5	0.51	288635	173985	56.54
Mo	L1	Not det.			41.33	1	1461	399.68
Ba	L1	567.2	3.3	0.6	2.1	76175	8977	90.32
Hg	L1	759.3	2.3	0.3	0.5	1070994	54293	18.07
Pb	L1	113.95	0.59	0.5	0.50	162398	55427	220.93



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:54:51 p.m.

User: Administrator
Sample: M4-T3
Disc:

Serial number: 42 256 1115
ID-No.:

Quant. type: Solid
Meas.date: 09/07/2019 04:10:37 a.m.
Live time: 2000 s
Dead time: 18.4 %
Current: 600 µA

Quant. type: Solid
Meas.date: 09/07/2019 04:10:37 a.m.
Count rate: 69103 cps
Voltage: 50 kV
Excitation: Mo K radiation

Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)

Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	11200	110	1.0	160	36863	29381	4.84
Si	K12	52110	180	0.3	50	433234	23005	96.93
S	K12	12124	43	0.4	10	377167	10013	54.99
Ar	K12	212.9	2.1	1.0	0.0	15928		14.11
K	K12	6719	20	0.3	1	811030	1244	122.26
Ca	K12	1797.5	6.5	0.4	0.7	322787	1794	13.98
Ti	K12	1538.3	5.1	0.3	0.7	469994	4814	73.12
Cr	K12	120.61	0.95	0.8	1.12	59586	33719	8.83
Mn	K12	490.5	2.0	0.4	1.3	294971	69673	15.11
Fe	K12	54460	110	0.2	0	41584346	97227	2977.35
Ni	K12	23.24	0.26	1.1	0.33	25791	15071	5.80
Cu	K12	34.48	0.24	0.7	0.09	42980	1365	7.82
Zn	K12	88.40	0.43	0.5	0.19	128089	8614	20.46
Ga (IG)	K12	196.08	0.73	0.4	0.26	326031	20910	18.54
As	K12	2127.4	5.0	0.2	0.2	4317677	25320	75.18
Rb	K12	52.06	0.31	0.6	0.34	129968	77757	62.43
Sr	K12	72.77	0.43	0.6	0.50	182100	174526	35.59
Mo	L1	59470	260	0.4	110	167618	10184	31.62
Ba	L1	248.4	1.9	0.8	1.3	34505	3763	69.37
Hg	L1	336.1	1.1	0.3	0.3	481662	26363	24.50
Pb	L1	168.57	0.69	0.4	0.31	244056	22928	79.69



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:55:36 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Sample: MS-T1 ID-No.:
 Disc: Quant. type: Solid
 Spectrum: MS-cuan-T1 Meas.date: 09/07/2019 04:55:18 a.m.
 Live time: 2000 s Count rate: 73819 cps
 Dead time: 19.2 % Voltage: 50 kV
 Current: 600 µA Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	39070	130	0.3	70	253053	21568	39.51
Si	K12	74890	170	0.2	30	1224882	20672	246.22
S	K12	1021.5	6.0	0.6	4.9	62514	10091	47.66
Ar	K12	122.6	1.4	1.1	1.6	18050	6553	8.98
K	K12	16158	29	0.2	2	3836648	19846	601.39
Ca	K12	3494.5	7.7	0.2	1.3	1234503	23431	27.02
Ti	K12	3758.0	7.4	0.2	0.8	2258762	25350	321.58
Cr	K12	66.90	0.58	0.8	0.85	65014	75305	7.52
Mn	K12	745.9	1.9	0.2	0.9	882462	113594	64.97
Fe	K12	34950	50	0.1	1	52902749	144297	3377.40
Ni	K12	24.46	0.20	0.8	0.26	53397	37111	5.93
Cu	K12	72.81	0.28	0.4	0.16	178555	16812	8.12
Zn	K12	75.50	0.28	0.4	0.15	215203	21244	10.72
Ga (IG)	K12	195.31	0.50	0.3	0.13	638869	20642	43.89
As	K12	84.92	0.28	0.3	0.07	378972	9813	4.83
Rb	K12	116.32	0.32	0.3	0.17	571330	79278	65.97
Sr	K12	91.33	0.30	0.3	0.24	449629	156252	74.11
Mo	L1	13015	72	0.6	55	72158	10309	33.59
Ba	L1	534.4	2.3	0.4	1.6	146018	22236	321.58
Pb	L1	109.64	0.34	0.3	0.10	312291	8760	5.86



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:35:08 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: MS-T2
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: MS-cuan-T2
 Meas.date: 09/07/2019 05:40:29 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 54280 cps Dead time: 16.8 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	35540	120	0.3	60	236316	15117	32.28
Si	K12	65730	150	0.2	20	1103774	14617	222.24
S	K12	860.8	5.2	0.6	3.8	54090	6475	31.31
Ar	K12	138.4	1.4	1.0	1.6	20917	6838	11.49
K	K12	15384	28	0.2	2	3750557	21170	567.79
Ca	K12	3405.6	7.5	0.2	1.3	1235282	25368	27.46
Ti	K12	3594.2	7.0	0.2	0.8	2218106	29123	289.42
Cr	K12	62.48	0.55	0.9	0.85	62341	79122	6.58
Mn	K12	746.1	1.8	0.2	0.8	906396	114364	65.56
Fe	K12	31735	45	0.1	1	48949604	139809	2921.24
Ni	K12	22.21	0.18	0.8	0.25	49779	34453	5.05
Cu	K12	32.82	0.18	0.5	0.15	82635	15004	4.99
Zn	K12	85.13	0.29	0.3	0.14	249141	19715	12.48
Ga (IG)	K12	195.31	0.50	0.3	0.13	655963	20038	46.07
As	K12	67.88	0.22	0.3	0.07	278281	10347	3.64
Rb	K12	110.73	0.31	0.3	0.16	558403	73573	48.64
Sr	K12	86.45	0.28	0.3	0.22	436976	142015	58.70
Mo	L1	12006	65	0.5	43	68344	6598	25.64
Ba	L1	521.1	2.2	0.4	1.7	146197	26001	292.81
Pb	L1	104.39	0.33	0.3	0.10	305274	9241	4.24



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:35:56 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: MS-T3
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: MS-cuan-T3
 Meas.date: 09/07/2019 06:24:34 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 74430 cps Dead time: 19.3 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	38310	120	0.3	50	279849	14652	51.33
Si	K12	67740	140	0.2	20	1249658	15252	264.76
S	K12	1313.9	6.3	0.5	3.8	90702	7760	38.53
Ar	K12	104.4	1.2	1.1	1.5	17341	6508	14.99
K	K12	15966	27	0.2	2	4275961	22336	800.71
Ca	K12	3685.3	7.6	0.2	1.2	1468498	26974	43.81
Ti	K12	3719.9	6.9	0.2	0.7	2521902	27581	413.60
Cr	K12	63.12	0.52	0.8	0.78	69188	81383	4.15
Mn	K12	848.0	1.9	0.2	0.8	1131599	124904	116.33
Fe	K12	33769	46	0.1	1	57219244	160178	4211.55
Ni	K12	21.58	0.18	0.8	0.25	53128	43646	5.10
Cu	K12	41.08	0.19	0.5	0.15	113630	19387	4.57
Zn	K12	75.95	0.26	0.3	0.15	244191	24567	12.69
Ga (IG)	K12	195.31	0.48	0.2	0.13	720609	24706	54.44
As	K12	75.62	0.23	0.3	0.08	340553	12854	5.05
Rb	K12	119.52	0.31	0.3	0.15	662142	80214	23.82
Sr	K12	95.99	0.28	0.3	0.21	533019	152537	84.63
Mo	L1	9295	55	0.6	43	58129	7937	27.17
Ba	L1	494.0	2.1	0.4	1.5	152234	24299	417.83
Pb	L1	116.21	0.34	0.3	0.10	373328	11482	6.55



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:36:38 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M6-T1
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M6-cuan-T1
 Meas.date: 09/07/2019 07:09:57 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 67408 cps Dead time: 17.9 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	37640	170	0.5	130	165357	35804	14.76
Si	K12	74240	200	0.3	50	823733	30746	151.42
S	K12	387.3	5.3	1.4	7.7	16078	11332	24.97
Ar	K12	185.2	1.8	1.0	1.4	18495	2145	11.07
K	K12	17804	39	0.2	1	2867771	4746	511.19
Ca	K12	590.0	2.5	0.4	0.7	141401	2722	27.81
Ti	K12	3773.1	9.0	0.2	0.9	1538418	15020	249.87
Cr	K12	67.79	0.70	1.0	1.07	44695	54811	4.99
Mn	K12	473.6	1.7	0.4	1.1	380129	87620	24.52
Fe	K12	44654	77	0.2	1	4550689	115055	3167.74
Ni	K12	12.08	0.19	1.6	0.31	17884	23096	4.63
Cu	K12	24.15	0.18	0.7	0.16	40176	7849	5.55
Zn	K12	34.30	0.21	0.6	0.18	66320	13016	8.51
Ga (IG)	K12	196.85	0.62	0.3	0.18	436805	17317	48.30
As	K12	1586.9	3.3	0.2	0.2	4298059	19159	70.33
Rb	K12	132.16	0.44	0.3	0.23	440338	66625	40.61
Sr	K12	81.18	0.35	0.4	0.34	271118	139423	49.22
Mo	L1	7454	72	1.0	86	28034	11630	23.82
Ba	L1	572.1	2.9	0.5	1.8	106034	12710	253.41
Pb	L1	84.29	0.36	0.4	0.21	162861	17466	79.18



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:37:13 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M6-T2
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M6-cuan-T2
 Meas.date: 09/07/2019 07:54:39 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 81057 cps Dead time: 21.0 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	41230	150	0.4	100	228557	37509	20.97
Si	K12	76700	180	0.2	40	1073728	33098	194.17
S	K12	362.2	4.4	1.2	6.2	18972	11774	34.17
Ar	K12	151.8	1.4	0.9	1.1	19131	2085	10.19
K	K12	18159	35	0.2	1	3690906	4939	622.79
Ca	K12	549.8	2.1	0.4	0.5	166267	2838	33.72
Ti	K12	3702.9	7.9	0.2	0.8	1905133	18820	308.70
Cr	K12	71.88	0.64	0.9	0.95	59793	68956	5.54
Mn	K12	480.1	1.5	0.3	1.0	486189	113968	30.57
Fe	K12	46380	71	0.2	1	59640768	152917	4218.97
Ni	K12	14.48	0.19	1.3	0.30	27062	34687	5.22
Cu	K12	26.27	0.18	0.7	0.17	55137	14578	3.43
Zn	K12	36.79	0.20	0.5	0.18	89765	20377	7.82
Ga (IG)	K12	196.85	0.56	0.3	0.18	551179	26707	63.03
As	K12	1595.5	2.9	0.2	0.1	5452802	29017	80.60
Rb	K12	131.70	0.39	0.3	0.20	553687	78485	62.19
Sr	K12	74.66	0.29	0.4	0.28	314620	156953	54.27
Mo	L1	7118	51	0.9	70	33781	12214	43.15
Ba	L1	534.5	2.4	0.5	1.6	125008	15927	302.92
Pb	L1	90.53	0.34	0.4	0.20	220712	26439	95.07



S2 PICOFOX - TRACE ELEMENT ANALYSIS

Listed at 10/07/2019 12:38:04 p.m.

User: Administrator Serial number: 42 256 1115
 Project: 08-07-19.rtx Sample: M6-T3
 ID-No.: Disc:
 Quant. type: Solid Spectrum: M6-cuan-T3
 Meas.date: 09/07/2019 08:40:59 a.m. Live time: 2000 s
 Count rate: 75245 cps Dead time: 19.4 %
 Voltage: 50 kV Current: 600 µA
 Excitation: Mo K radiation
 Method: UNSAAC-CUAN (Profile bayes normal fit)
 Comment:

Element	Line	Cono./mg/kg	Sigma/mg/kg	RSD/%	LLD/mg/kg	Net area	Backgr.	Chi
Al	K12	42210	150	0.4	80	244881	25660	21.51
Si	K12	76300	180	0.2	30	1117838	23127	179.39
S	K12	1030.6	6.2	0.6	4.3	56503	6313	56.47
Ar	K12	116.8	1.2	1.0	0.9	15402	1423	67.85
K	K12	18218	34	0.2	1	3875175	3917	584.63
Ca	K12	490.7	1.9	0.4	0.5	155297	2286	60.30
Ti	K12	3709.9	7.8	0.2	0.7	1997590	17790	282.35
Cr	K12	70.20	0.61	0.9	0.90	61115	68624	4.89
Mn	K12	518.4	1.5	0.3	1.0	549499	115491	33.31
Fe	K12	46519	70	0.2	1	62604051	155626	3869.85
Ni	K12	10.88	0.17	1.5	0.28	21285	34210	2.31
Cu	K12	25.58	0.17	0.7	0.17	56190	15898	6.10
Zn	K12	35.06	0.19	0.5	0.18	89519	22871	5.40
Ga (IG)	K12	196.85	0.54	0.3	0.17	576831	28934	59.59
As	K12	1590.0	2.9	0.2	0.1	5687030	30589	77.87
Rb	K12	133.75	0.38	0.3	0.18	588520	71520	53.81
Sr	K12	78.52	0.29	0.4	0.25	346279	135842	57.82
Mo	L1	Not det.			49.14	1	6618	77.57
Ba	L1	491.1	2.3	0.5	1.5	120201	15003	285.23
Pb	L1	99.90	0.36	0.4	0.20	254902	27865	88.77



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 1 de 7

Anexo 5: Resultados del análisis multielemental de las muestras de residuos mineros mediante ICP – MS.

A solicitud de: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

AV. DE LA CULTURA NRO. 733 (LOCAL DIGA - ANTIGUO COMEDOR) CUSCO - CUSCO - CUSCO

Producto descrito como: ROCAS - Muestra Exploración Geoquímica y/o Menas
PREPARACIÓN Y ANÁLISIS QUÍMICO

Cantidad Muestras: Tipo de Análisis:

Fecha de Recepción:

12/12/2019

Descripción del Estado y
Condición de la Muestra: En bolsas de plástico con seguro a presión
Granulometría de 0.5 a 2.0 pulg.

Del 12/12/2019

Peso aprox. de 60 a 2220g húmedas.

Al 06/01/2020

Referencia Cliente: COTIZACIÓN N° GQ - 00102390/2019

Esquema	Método
PRP93	Pesado, secado 100°C, chancado - 10 mesh >90%, cuarteo, pulverizado de 250 g -140 mesh >95 %
ICM14B	SGS-MN-ME-179 /Octubre 2018 Rev. 04/MUESTRAS DE EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA: DIGESTIÓN AGUA REGIA. ICP-MS.
PMI_CHGR	Peso de Muestra Recibido
PMI_M10	

Elemento	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Bi	Ca
Esquema	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14B
Unidad	B	B	B	B	B	B	B	B
Límite de Detección	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%
	0.01	0.01	1	10	5	0.1	0.02	0.01
M-1	0.17	0.73	462	<10	30	0.4	0.35	0.29
M-2	0.22	1.20	139	<10	32	0.7	0.43	0.41
M-3	0.28	0.71	1278	<10	33	0.5	0.32	0.02
M-4	0.23	0.98	182	<10	36	0.6	0.75	0.06
M-5	0.06	1.44	39	<10	43	0.8	0.26	0.35
M-6	0.08	1.36	57	<10	36	0.7	0.26	0.46
M-8	0.10	0.65	1352	<10	27	0.4	0.27	0.07
M-9	0.54	0.77	4748	<10	27	0.5	0.75	0.11
M-10	0.48	0.75	4538	<10	24	0.5	0.74	0.10
M-24	0.24	0.29	1828	<10	25	0.3	0.28	0.70
M-28	0.10	0.60	326	<10	40	0.9	0.20	0.09

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 2 de 7

M-29	0.10	0.30	24	<10	31	2.0	0.06	0.01
M-30	0.09	0.23	37	<10	78	0.3	0.09	0.19
M-31	0.07	1.30	1543	<10	51	1.4	0.60	0.02
M-32	0.83	0.80	438	<10	57	4.1	0.96	0.90
M-33	0.10	0.53	915	<10	23	1.0	0.32	0.07
M-34	0.14	0.60	590	<10	46	1.7	0.23	0.04
M-35	0.10	0.16	28	<10	141	0.2	0.10	0.20
M-36	0.07	0.95	33	<10	58	3.6	0.11	0.02
M-37	0.04	0.63	263	<10	38	1.2	0.19	0.02

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 3 de 7

Elemento	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Bi	Ca
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%
Límite de Detección	0.01	0.01	1	10	5	0.1	0.02	0.01
M-13	2.32	0.36	543	<10	7	0.2	1.21	0.09
M-16	>10.00	0.16	1642	<10	242	0.1	77.83	0.12
M-17	>10.00	0.21	405	<10	172	0.8	14.32	0.48
M-18	5.11	0.42	33	<10	18	0.5	1.47	11.98
M-19	1.62	0.32	17	<10	45	0.2	2.44	0.43
M-20	0.07	2.11	5	<10	7	0.4	0.16	0.03
M-23	0.16	0.09	138	<10	5	0.1	0.28	0.04
M-25	0.07	0.39	301	<10	11	0.4	0.12	0.01
M-40	0.02	0.78	79	<10	49	2.9	0.16	0.02
M-43	0.05	0.03	11	<10	64	0.3	0.04	0.23
DUP M-5	0.06	1.38	37	<10	43	0.7	0.24	0.35
DUP M-17	>10.00	0.21	429	<10	166	0.8	14.61	0.49
STD_105	0.29	0.16	30	11	58	0.1	0.54	0.28
STD_OREAS_90 6	0.72	0.76	20	<10	236	0.9	10.97	0.31
BLANK	<0.01	<0.01	<1	<10	<5	<0.1	<0.02	<0.01
BLANK	<0.01	<0.01	<1	<10	<5	<0.1	<0.02	<0.01

Elemento	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm
Límite de Detección	0.01	0.05	0.1	1	0.05	0.5	0.01	0.1
M-1	0.09	25.45	9.9	987	1.11	27.0	3.16	2.6
M-2	0.07	23.68	15.0	637	1.83	52.0	4.67	3.3
M-3	0.04	29.02	6.0	811	1.53	23.8	3.51	2.5
M-4	0.04	12.62	5.5	690	2.04	19.2	2.68	3.0
M-5	0.07	33.27	13.1	618	2.73	37.0	3.68	4.4

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 4 de 7

M-6	0.06	34.35	13.6	594	1.91	40.9	3.85	4.0
M-8	0.10	8.21	13.8	777	1.45	24.9	6.27	2.0
M-9	0.14	11.82	30.2	566	1.52	75.0	13.18	2.5
M-10	0.16	11.32	27.6	545	1.40	74.2	13.38	2.4
M-24	0.06	14.03	16.2	680	1.66	67.2	3.36	1.1
M-28	0.03	0.81	26.5	518	1.59	38.3	11.66	2.2
M-29	0.07	0.75	32.0	608	0.71	16.7	7.02	1.0
M-30	0.09	7.88	17.9	901	1.48	97.3	2.99	1.1
M-31	0.02	1.37	4.9	174	2.55	48.1	10.42	10.3
M-32	0.15	1.44	43.4	258	1.79	107.7	>15.00	2.2
M-33	0.03	0.59	18.7	605	1.06	161.9	9.06	1.9
M-34	0.05	0.77	28.4	481	1.04	43.4	>15.00	2.3
M-35	0.08	12.64	11.4	886	1.54	59.3	2.58	1.0
M-36	0.13	1.85	129.4	490	1.52	40.0	10.36	2.4
M-37	0.04	1.15	33.6	524	1.58	35.7	8.40	2.8
M-13	0.27	2.23	2.9	229	0.12	479.1	14.34	8.7
M-16	5.15	3.59	4.8	145	0.38	3725.3	11.16	4.4
M-17	4.30	3.11	53.3	55	0.79	>10000. 0	>15.00	2.3
M-18	0.49	17.45	60.4	81	0.66	>10000. 0	>15.00	12.8
M-19	0.35	0.18	329.8	75	0.10	3360.5	>15.00	3.6
M-20	0.03	12.53	11.0	330	0.26	49.7	4.24	6.1
M-23	0.02	5.05	3.3	380	0.30	28.2	1.97	0.4

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 5 de 7

Elemento	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm
Límite de Detección	0.01	0.05	0.1	1	0.05	0.5	0.01	0.1
M-25	0.03	10.42	6.3	312	0.76	26.8	1.76	1.2
M-40	0.02	9.99	25.7	43	3.46	25.2	12.63	3.2
M-43	0.09	1.60	11.4	427	1.11	207.5	1.95	0.5
DUP M-5	0.06	32.30	12.2	595	2.45	39.0	3.61	4.4
DUP M-17	4.62	3.16	52.6	58	0.83	>10000.0	>15.00	2.2
STD_105	0.23	4.98	3.2	421	0.91	72.5	1.10	0.8
STD_OREAS_906	0.41	79.60	22.6	8	1.09	3155.1	4.98	8.7
BLANK	<0.01	<0.05	<0.1	<1	<0.05	<0.5	<0.01	<0.1
BLANK	<0.01	<0.05	<0.1	<1	<0.05	<0.5	<0.01	<0.1

Elemento	Ge	Hf	Hg	In	K	La	Li	Lu
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
Límite de Detección	0.1	0.05	0.01	0.02	0.01	0.1	1	0.01
M-1	0.1	<0.05	10.24	0.02	0.13	11.8	27	0.02
M-2	0.1	<0.05	30.53	0.03	0.17	12.8	54	0.03
M-3	0.1	<0.05	35.91	0.04	0.15	14.3	21	0.02
M-4	0.1	<0.05	13.44	<0.02	0.15	5.2	53	0.02
M-5	0.1	<0.05	2.10	0.02	0.21	16.8	55	0.03
M-6	0.1	<0.05	1.08	0.03	0.18	16.5	58	0.03
M-8	0.1	<0.05	155.03	<0.02	0.13	3.4	34	0.02
M-9	0.1	<0.05	258.28	0.04	0.13	5.7	43	0.02
M-10	0.1	<0.05	291.80	0.04	0.12	5.1	42	0.02
M-24	0.1	<0.05	3.99	0.04	0.12	6.4	4	0.03
M-28	0.1	<0.05	18.44	0.12	0.16	0.3	18	0.04
M-29	0.1	<0.05	20.93	0.03	0.03	0.2	22	0.04
M-30	0.2	<0.05	64.38	0.08	0.06	3.7	8	0.02

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 6 de 7

M-31	0.1	<0.05	18.75	0.09	0.23	0.6	54	0.03
M-32	0.2	0.05	94.94	0.15	0.12	0.7	30	0.08
M-33	0.1	<0.05	29.80	0.08	0.11	0.2	16	0.03
M-34	0.2	<0.05	55.55	0.12	0.13	0.4	20	0.05
M-35	0.1	<0.05	64.25	0.02	0.05	6.4	4	0.01
M-36	0.2	0.06	13.26	0.08	0.08	0.5	52	0.07
M-37	0.1	<0.05	38.12	0.11	0.12	0.5	20	0.02
M-13	0.2	0.06	0.33	0.41	0.03	1.3	3	0.14
M-16	0.1	<0.05	108.58	2.95	0.10	2.3	1	0.02
M-17	0.2	<0.05	30.66	2.25	0.06	2.0	2	0.04
M-18	1.6	0.14	0.20	1.15	0.01	7.2	5	0.06
M-19	0.7	<0.05	0.10	0.10	<0.01	0.1	3	0.01
M-20	0.2	<0.05	0.01	0.03	0.03	5.9	105	0.03
M-23	0.1	<0.05	0.03	<0.02	0.02	2.8	1	<0.01
M-25	0.2	<0.05	0.01	0.06	0.04	5.0	16	0.01
M-40	0.2	<0.05	0.16	0.15	0.16	3.3	62	0.07
M-43	0.1	<0.05	0.11	0.06	<0.01	0.8	3	0.02
DUP M-5	0.2	<0.05	2.05	0.02	0.20	16.4	56	0.03
DUP M-17	0.2	<0.05	30.63	2.30	0.06	2.0	3	0.04
STD_105	0.1	0.06	0.05	0.06	0.05	2.3	2	0.02
STD_OREAS_90	0.2	1.15	0.01	1.12	0.29	39.6	4	0.03

6

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 7 de 7

Elemento	Ge	Hf	Hg	In	K	La	Li	Lu
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
Límite de Detección	0.1	0.05	0.01	0.02	0.01	0.1	1	0.01
BLANK	<0.1	<0.05	<0.01	<0.02	<0.01	<0.1	<1	<0.01
BLANK	<0.1	<0.05	<0.01	<0.02	<0.01	<0.1	<1	<0.01
Elemento	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P	Pb
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B
Unidad	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite de Detección	0.01	5	0.05	0.01	0.05	0.5	50	0.2
M-1	0.28	350	52.19	0.01	0.22	104.3	343	71.3
M-2	0.55	623	20.65	0.02	0.09	72.6	555	97.7
M-3	0.17	137	39.12	0.02	0.16	76.6	414	18.0
M-4	0.37	153	23.05	0.03	0.11	64.1	206	67.2
M-5	0.61	675	32.17	0.02	0.08	76.2	535	33.1
M-6	0.64	696	21.20	0.01	0.08	70.7	642	39.3
M-8	0.26	286	40.55	0.04	0.15	90.4	242	46.9
M-9	0.37	493	20.88	0.04	0.17	91.6	347	154.7
M-10	0.38	453	19.34	0.03	0.14	83.8	355	149.5
M-24	0.31	520	23.43	0.02	0.30	67.6	320	14.0
M-28	0.02	1274	25.93	0.05	0.13	69.8	956	7.2
M-29	0.02	1041	21.33	0.02	0.13	70.9	1189	20.9
M-30	0.08	998	43.60	0.05	0.51	88.0	222	18.6
M-31	0.05	101	6.04	0.07	0.24	29.9	632	31.8
M-32	0.06	1135	13.88	0.05	0.18	117.3	2531	48.2
M-33	0.02	225	20.38	0.05	0.14	63.9	629	11.7
M-34	0.01	1877	25.57	0.05	0.12	83.1	1304	12.2
M-35	0.07	870	28.91	0.06	0.52	73.1	124	21.2
M-36	0.03	2745	24.85	0.03	0.11	111.4	1885	41.6
M-37	0.03	640	17.01	0.05	0.45	61.5	715	9.2
M-13	0.06	84	17.09	<0.01	0.08	27.3	234	44.1
M-16	0.02	43	64.62	<0.01	<0.05	15.6	1382	>10000.

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 8 de 7
0

M-17	0.11	71	8.13	<0.01	0.06	88.1	1341	3154.9
M-18	0.24	1429	9.87	<0.01	0.35	22.4	649	36.4
M-19	0.27	143	6.39	<0.01	0.29	188.4	1014	4.6
M-20	0.99	297	11.68	<0.01	0.05	39.3	225	18.6
M-23	0.02	134	13.31	<0.01	0.10	33.2	200	52.4
M-25	0.12	136	18.09	<0.01	0.07	41.2	227	12.9
M-40	0.06	1086	5.86	0.03	0.05	37.6	3085	4.5
M-43	0.09	1142	23.32	0.10	0.11	62.4	57	22.7
DUP M-5	0.60	635	30.84	0.02	0.06	72.9	519	32.6
DUP M-17	0.11	72	8.21	<0.01	0.06	89.5	1397	3142.7
STD_105	0.06	121	6.07	0.03	4.81	20.4	80	56.1
STD_OREAS_90	0.13	341	3.68	0.09	0.73	3.9	230	21.2
6								
BLANK	<0.01	<5	<0.05	<0.01	<0.05	<0.5	<50	<0.2
BLANK	<0.01	<5	<0.05	<0.01	<0.05	<0.5	<50	<0.2

Elemento	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr
Esquema	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14
	B	B	B	B	B	B	B	B
Unidad	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite de Detección	0.2	0.002	0.01	0.05	0.1	1	0.3	0.5
M-1	9.5	0.005	0.83	2.09	1.1	<1	0.6	25.9

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 9 de 7

Elemento	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr
Esquema	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14
Unidad	B	B	B	B	B	B	B	B
Límite de Detección	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	0.2	0.002	0.01	0.05	0.1	1	0.3	0.5
M-2	10.5	0.003	1.65	1.53	1.5	<1	0.5	52.2
M-3	11.7	0.004	0.43	4.64	1.1	<1	0.6	14.7
M-4	10.8	0.002	0.29	21.16	1.3	<1	0.5	21.4
M-5	13.5	0.003	0.49	1.21	1.8	<1	0.5	52.6
M-6	12.3	0.003	0.73	1.35	1.8	<1	0.5	59.8
M-8	8.3	0.004	4.10	19.13	0.9	1	0.5	20.6
M-9	9.3	0.003	>5.00	73.99	0.9	2	0.5	22.4
M-10	8.8	0.002	>5.00	71.24	1.0	3	0.5	21.9
M-24	8.6	0.003	1.92	5.73	1.2	<1	0.6	72.5
M-28	10.6	0.003	0.11	12.10	5.9	<1	0.6	12.8
M-29	2.6	0.003	<0.01	12.13	1.9	<1	0.3	17.6
M-30	4.3	0.003	0.20	8.16	1.4	<1	0.7	36.4
M-31	14.4	<0.002	0.03	21.27	5.7	2	1.2	11.5
M-32	8.3	0.002	0.45	48.74	7.3	<1	0.6	20.9
M-33	7.4	0.002	0.69	26.58	4.2	1	0.4	12.1
M-34	8.3	0.003	0.43	18.58	6.7	1	0.4	12.9
M-35	3.5	0.004	0.17	9.13	0.4	<1	0.5	38.3
M-36	6.5	0.002	0.01	19.16	5.1	<1	0.5	19.6
M-37	9.0	0.002	0.04	10.31	4.8	<1	0.6	11.4
M-13	0.8	0.003	0.08	13.43	1.5	<1	0.4	8.3
M-16	3.6	0.005	1.60	1817.64	0.4	6	0.3	20.2
M-17	2.9	0.003	1.57	18.02	2.3	3	0.4	22.4
M-18	1.1	0.004	1.07	0.53	2.7	5	7.5	20.9
M-19	0.2	0.003	>5.00	0.31	0.1	6	1.9	3.2
M-20	2.0	0.002	0.03	0.50	2.0	<1	<0.3	2.4
M-23	1.7	0.002	0.75	1.32	0.4	<1	<0.3	7.2
M-25	3.1	0.002	0.02	1.66	0.6	<1	<0.3	12.9
M-40	11.0	<0.002	0.15	7.02	7.3	<1	0.4	5.9
M-43	1.3	0.003	0.36	8.32	0.3	<1	0.3	33.3

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 10 de 7

DUP M-5	13.3	0.003	0.48	1.16	1.6	<1	0.4	49.8
DUP M-17	3.0	0.003	1.63	18.52	2.3	3	0.3	22.1
STD_105	3.6	0.005	0.30	1.26	0.6	<1	0.9	13.2
STD_OREAS_90	15.8	<0.002	0.04	1.53	1.6	5	1.5	11.1
6								
BLANK	<0.2	<0.002	<0.01	<0.05	<0.1	<1	<0.3	<0.5
BLANK	<0.2	<0.002	<0.01	<0.05	<0.1	<1	<0.3	<0.5

Elemento	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl	U	V
Esquema	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14	ICM14
Unidad	B	B	B	B	B	B	B	B
Límite de Detección	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
	0.05	0.02	0.05	0.1	0.01	0.02	0.05	1
M-1	0.05	0.17	<0.05	4.2	<0.01	0.06	0.36	6
M-2	<0.05	0.21	<0.05	6.1	<0.01	0.07	0.45	10
M-3	<0.05	0.16	<0.05	5.5	<0.01	0.06	0.36	7
M-4	<0.05	0.12	<0.05	3.0	<0.01	0.07	0.28	8
M-5	<0.05	0.24	<0.05	7.7	<0.01	0.08	0.58	11
M-6	0.05	0.27	<0.05	7.2	<0.01	0.07	0.50	11
M-8	<0.05	0.11	<0.05	2.9	<0.01	0.06	0.26	6
M-9	<0.05	0.16	0.12	4.3	<0.01	0.06	0.35	9

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 11 de 7

Elemento Esquema Unidad	Ta ICM14 B ppm	Tb ICM14 B ppm	Te ICM14 B ppm	Th ICM14 B ppm	Ti ICM14 B %	Tl ICM14B ppm	U ICM14 B ppm	V ICM14 B ppm
Límite de Detección	0.05	0.02	0.05	0.1	0.01	0.02	0.05	1
M-10	0.21	0.14	0.11	4.3	<0.01	0.06	0.34	9
M-24	0.06	0.14	<0.05	2.8	<0.01	0.07	0.20	4
M-28	<0.05	0.12	<0.05	2.5	<0.01	0.19	0.28	12
M-29	<0.05	0.17	<0.05	0.4	<0.01	0.32	0.08	7
M-30	<0.05	0.08	<0.05	1.2	<0.01	0.21	0.23	3
M-31	<0.05	0.16	<0.05	2.9	<0.01	0.10	0.29	28
M-32	<0.05	0.25	0.09	0.9	<0.01	0.23	0.45	21
M-33	0.09	0.11	<0.05	3.3	<0.01	0.11	0.34	9
M-34	0.15	0.17	<0.05	1.8	<0.01	0.28	0.33	14
M-35	<0.05	0.09	<0.05	1.1	<0.01	0.07	0.30	2
M-36	<0.05	0.29	<0.05	0.8	<0.01	0.48	0.22	12
M-37	<0.05	0.11	<0.05	1.9	<0.01	0.18	0.22	12
M-13	<0.05	0.08	2.20	1.1	<0.01	<0.02	1.74	258
M-16	0.30	0.04	58.00	2.3	<0.01	0.05	15.29	148
M-17	0.05	0.06	15.81	0.7	<0.01	0.44	26.23	45
M-18	0.06	0.15	0.63	0.6	0.01	0.19	4.34	46
M-19	0.06	<0.02	0.79	0.1	<0.01	0.05	0.75	29
M-20	<0.05	0.13	0.59	4.0	<0.01	<0.02	0.51	18
M-23	<0.05	0.04	<0.05	1.2	<0.01	<0.02	0.08	1
M-25	<0.05	0.11	<0.05	2.3	<0.01	<0.02	0.20	3
M-40	<0.05	0.57	<0.05	3.1	<0.01	0.10	0.33	34
M-43	<0.05	0.05	<0.05	0.4	<0.01	0.04	0.15	1
DUP M-5	<0.05	0.23	<0.05	7.4	<0.01	0.08	0.55	11
DUP M-17	0.07	0.06	15.72	0.8	<0.01	0.44	26.82	47
STD_105	<0.05	0.07	0.14	1.0	<0.01	0.22	0.22	6
STD_OREAS_90	0.07	0.44	0.11	8.3	0.02	0.10	2.29	4
6								
BLANK	<0.05	<0.02	<0.05	<0.1	<0.01	<0.02	<0.05	<1

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 12 de 7

BLANK	<0.05	<0.02	<0.05	<0.1	<0.01	<0.02	<0.05	<1
Elemento	W	Y	Yb	Zn	Zr	Peso Muestra	P_MEN 10	P_MEN1 40
Esquema	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	ICM14 B	PMI_CHG R	PMI_M 10	PMI_M1 40
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	g	%	%
Límite de Detección	0.1	0.05	0.1	1	0.5			
M-1	0.4	2.09	0.2	66	1.3	69.64	--	--
M-2	0.3	2.55	0.2	103	1.4	72.11	--	98
M-3	0.3	1.42	0.1	14	1.1	72.71	--	--
M-4	0.3	1.39	0.1	49	1.1	75.23	--	--
M-5	0.2	2.99	0.2	78	1.5	70.07	--	--
M-6	0.3	3.06	0.2	91	1.7	66.83	--	--
M-8	2.6	1.47	0.1	90	1.0	73.78	--	--
M-9	8.8	2.10	0.2	198	1.2	78.82	--	--
M-10	10.7	1.94	0.2	202	1.1	82.86	--	--
M-24	0.7	2.02	0.2	27	1.1	78.31	--	--
M-28	1.8	2.13	0.2	27	0.7	73.26	--	--
M-29	0.6	3.25	0.3	72	<0.5	77.91	--	--
M-30	4.6	1.13	0.1	66	<0.5	73.83	--	--
M-31	1.6	1.84	0.2	23	1.0	67.74	--	--
M-32	78.6	4.61	0.5	265	1.4	77.51	--	--

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 13 de 7

Elemento Esquema Unidad	W ICM14 B ppm	Y ICM14 B ppm	Yb ICM14 B ppm	Zn ICM14 B ppm	Zr ICM14 B ppm	Peso Muestra PMI_CHG R g	P_MEN 10 PMI_M 10 %	P_MEN1 40 PMI_M1 40 %
Límite de Detección	0.1	0.05	0.1	1	0.5			
M-33	3.5	1.68	0.2	22	0.5	76.53	--	--
M-34	3.5	3.45	0.3	45	0.6	73.27	--	--
M-35	0.6	1.01	0.1	70	<0.5	72.02	--	--
M-36	0.3	5.62	0.5	141	0.5	60.65	--	--
M-37	28.4	1.65	0.2	34	0.5	75.30	--	--
M-13	2.2	4.36	0.6	13	0.7	2220	--	--
M-16	10.9	1.01	0.1	628	<0.5	2190	--	--
M-17	4.3	1.83	0.3	1140	1.0	1620	92.83	97
M-18	82.2	3.93	0.4	146	5.3	2220	--	--
M-19	49.8	0.59	<0.1	34	0.6	435.3	--	--
M-20	0.8	1.58	0.2	83	<0.5	2220	--	--
M-23	0.5	0.52	<0.1	8	<0.5	992.7	--	--
M-25	0.2	1.38	0.1	20	<0.5	933.0	--	--
M-40	0.1	9.15	0.5	35	0.9	586.0	--	--
M-43	0.3	1.01	0.1	74	<0.5	966.3	--	--
DUP M-5	0.2	2.83	0.2	75	1.4	--	--	--
DUP M-17	4.5	1.92	0.3	1094	0.9	--	--	--
STD_105	0.2	1.44	0.1	43	1.1			
STD_OREAS_90	0.7	6.89	0.3	85	49.3			
6								
BLANK	<0.1	<0.05	<0.1	<1	<0.5			
BLANK	<0.1	<0.05	<0.1	<1	<0.5			

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.



INFORME DE ENSAYO
GQ1905224 Rev. 0

Página 14 de 7

Notas de Almacenaje:

Pasado el plazo de almacenamiento de 90 días para Remanentes o Pulpas y 30 días para Rechazos o Gruesas, se procederá a descartar las muestras. Favor no considerar esta información si se presentaran instrucciones al inicio del servicio.

Emitido en Callao-Perú el, 22/01/2020

Edgar Zárate Aguilar
Supervisor de Laboratorio
C.I.P. 22151

Este documento no podrá ser reproducido parcialmente sin autorización de SGS del Perú S.A.C.

El informe de ensayo sólo es válido para la muestra del prototipo o del lote sometido a análisis, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este documento es emitido por la Compañía bajo las Condiciones Generales de Servicio, y pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm Su aplicación se extiende al límite de la responsabilidad, indemnización y jurisdicción definidas en ella.

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la Compañía solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del Cliente, si hubiera alguna. La Compañía es únicamente responsable ante su Cliente y este documento no exime a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo del alcance de la ley.