

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

NEUTRALIZACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS CON

ESCORIAS DE COBRE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO

P R E S E N T A

IVONNE LIZBETH MORA ALVARADO

ASESORA: DRA. ROSA MARÍA RAMIREZ ZAMORA



México,D.F. SEPTIEMBRE 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: MARÍA DE LOURDES CHAVEZ GARCÍA

VOCAL: ANTONIO HUERTA CERDÁN

SECRETARIO: ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

1^{er} SUPLENTE: BALDOMERO GOMEZ REYES

2^{do} SUPLENTE: MARCOS FLORES ALAMO

SITIO DONDE SE REALIZÓ EL TEMA: INSTITUTO DE INGENIERIA,
UNAM, CIRCUITO INTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA

TUTORA DE TESIS

DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

SUSTENTANTE

IVONNE LIZBETH MORA ALVARADO



*Esta tesis está dedicada especialmente a la memoria de mi abuelito **Simeón Guadalupe Alvarado Mendieta** y mi tía **Juana Inés Mora Makay**, quienes fallecieron durante la redacción de este trabajo en situaciones muy difíciles y a quienes agradezco por haber sido un gran ejemplo de superación y de lucha, por enseñarme la importancia de la responsabilidad, el amor al trabajo y a ser feliz en todo momento, a no rendirme ante situaciones difíciles y quienes a lo largo de mi vida me impulsaron a seguir adelante y nunca rendirme, quienes estuvieron ahí para cuidarme, para aconsejarme, para compartir penas, alegrías y todo su apoyo, por todo esto y más les agradezco por haber formado parte de mi vida.*

Descansen en paz.

Dedicatorias

A mis padres Daniel Mora Núñez y Catalina Alvarado Vidal, por todo su apoyo, por sus enseñanzas, sacrificios y apoyo en todo momento

A mi hermana mayor Denis Arabely Mora Alvarado, por ser mi principal apoyo, por escucharme por darme consejos y estar a mi lado en los momentos más difíciles y tener la palabra correcta en el momento correcto y por compartir esa parte de su vida conmigo.

A mi abuelita Alicia Inés Vidal Martínez

A mi novio Jesús Jiménez Paoletti por darme su apoyo incondicional y por quererme tanto.

A mis tíos Libia Ruiz Vidal y Rodrigo Villegas Ripoll por darme todo su apoyo y alentarme a seguir adelante.

A mis primos Daniel Mora Mora, Julio Mora Makay, Godwin y Eymi Villegas Ruiz por darme siempre esas palabras de apoyo.

A la Dra. Cira Piña Pérez por todo su apoyo y enseñanzas, que fueron la base del éxito de esta tesis

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la forjadora de mis estudios y haberme brindado la oportunidad de estudiar en sus instalaciones.

A la Facultad de Química por ser parte fundamental de mi formación como profesional de la química.

A mis profesores de la licenciatura por todas sus enseñanzas y aprendizajes que me brindaron durante toda mi estancia en la facultad.

Al Instituto de Ingeniería por su apoyo económico y por brindarme el espacio y todo lo necesario para la realización exitosa de esta tesis.

A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por su paciencia, por sus enseñanzas, consejos, por su confianza y por todo su apoyo brindado para la realización de esta tesis.

A mis amigas : Neftys Artemisa Chavez Romo, Mariana Olmedo Valdéz, Thalia Huanosta , por su ayuda.

A la USAI por todo el apoyo realizado para los estudios analíticos empleados en esta tesis.

A Victor Hugo Lemus Neri y Nayeli López Balbiaux por su apoyo en la realización de la técnica de Fluorecencia de Rayos X.

A Cecilia Salcedo Luna por la ayuda en las pruebas de Difracción de Rayos X.

A Ivan Puente Lee por su apoyo en las pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido.

Al laboratorio de análisis físicos y químicos del ambiente, Instituto de Geografía por los análisis de ICP (Metales lixiviables).

Al M. en I Antonio Huerta Cerdán por todo su apoyo en el estudio de granulometría y por la molienda de las escorias utilizadas para esta tesis.

Contenido

Lista de tablas	5
Lista de Figuras	7
Lista de Gráficas	8
Lista de Fotografías	9
Resumen	
Hipótesis	
Objetivo General	
Objetivos Particulares	

Capitulo I Estudio bibliográfico

- I.1. Generalidades de Drenaje ácido de minas (DAM)
 - I.1.1 Definición de drenaje ácido de minas
 - I.1.2 Generación de drenaje ácido de minas
 - I.1.3 Contaminación ambiental por la generación de drenaje ácido de minas
 - I.1.3.1 Contaminación del agua
 - I.1.3.2 Contaminación del suelo
 - I.1.4 Control de la contaminación por el drenaje ácido de minas
 - I.1.4.1 Remediación de suelos ácidos y Neutralización de drenaje ácido
 - I.1.6.4 Agentes neutralizantes
- I.2 Generalidades de escorias de cobre
 - I.2.1 Definición de escoria
 - I.2.2 Escoria como subproducto
 - I.2.3 Características físicas y químicas de las escorias de cobre

I.2.4 Producción de escoria y Opciones de aprovechamiento

I.2.5 Legislación Ambiental

Capítulo II Metodología Experimental

II.1 Materiales y reactivos

II.2 Muestreo de escorias de cobre

II.3 Técnicas analíticas y experimentales

II.3.1 Pruebas de caracterización de escorias

II.3.2 Pruebas de neutralización del drenaje ácido de minas (DAM) con NaOH

II.3.3 Pruebas de neutralización de drenaje ácido de mina con escorias de cobre

II.3.4 Neutralización comparativa de drenaje ácido de minas con escorias de cobre, hierro y acero

III.1 Caracterización de escorias

III.1.1 Contenido de óxidos: Fluorescencia de Rayos X

III.1.2 Contenido superficial de elementos en partículas de escoria de cobre por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con electrones retro dispersados (EDS)

a) Resultados MEB de la escoria de cobre en piedra y polvo

b) Composición superficial de escorias de cobre en piedra y en polvo

Capítulo III Resultados

III.1.3 Difracción de Rayos X

III.1.4 Metales lixiviables de escorias de cobre: ICP

III.1.5 Dureza

III.1.6 Incremento de pH de agua destilada aplicando escorias de cobre

III.2 Pruebas de neutralización de drenaje ácido con NaOH

III.3 Pruebas de neutralización de drenaje ácido de minas con escorias de cobre

III.4 Comparación del poder neutralizante de la escoria de cobre respecto a escorias de acero y de hierro

Capítulo IV Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Bibliografía

Anexo I Generalidades del cobre

A1.1 Impacto del cobre en la sociedad

A1.2 Datos generales del cobre

A1.3 El cobre en Estado Natural

A.1.3.1 Obtención

A1.4 Producción de cobre

A1.4.1 Cifras de producción de cobre

A1.5 Reutilización de Escoria Minera como opción viable

A1.5.1 Agregados

A1.5.2 Relleno

A1.5.3 Abrasivo

A1.5.4 Agentes neutralizantes

a) Derivados de amonio

b) Carbonatos

c) Óxidos básicos

d) Bases fuertes

Anexo II Fundamentos de las técnicas Analíticas

A 3.1 Fluorescencia de RX

A3.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

¡Error! Marcador no definido.

A 3.3 Difracción de Rayos X

A3.4 ICP - MS (Contenido de metales lixiviables)

Anexo III Resultados de Caracterización de escorias

A 4.1 Micrográficas de escoria de cobre por MEB

A4.1.1 Caracterización de Escorias Mittal, Nardo y Alto Horno (MEB)

A 4.2 Resultados de Difracción de Rayos X

A4.3 ICP (Lixiviables)

A4.2 Fluorescencia de Rayos X de escorias AH, Mitt y ND

Anexo IV Tablas de resultados de la neutralización de DAM

A4.1 Tablas de resultados de neutralización de drenaje ácido de mina con diferentes escorias

Lista de tablas

Tabla I. 1 Variación de pH en función de elementos presentes en la tierra [Rivero de

Trinca y Adams, 2007]

Tabla I.1. Características físicas y mecánicas típicas en escoria de cobre [Gorai *et al.*, 2003]

Tabla I.2. Composición química de diferentes escorias de cobre (Tixier *et al.*, 1997)

Tabla I.3 Principales opciones de aprovechamiento de escorias para diversos países

En la tabla 1.4 se presentan los límites permitidos por la norma mexicana NOM-052-ECOL-1993 para residuos peligrosos

Tabla I.4 Límites máximos permisibles de metales en el extracto PECT

Tabla II.1 Tipos de escoria y procesos de extracción.

Tabla II.2 Cantidades estequiométricas, dos veces, tres veces y cuatro veces las estequiométricas de escorias, calculadas teóricamente para neutralizar drenaje ácido de minas

Tabla III.1 Contenido de óxidos de carácter básico de 11 muestras de escorias de cobre colectadas en diferentes puntos en el sitio de disposición de este material

Tabla III.2 Fases mineralógicas presentes en cuatro muestras de escorias de cobre colectadas en el sitio de disposición.

Tabla III.3 Fases mineralógicas identificadas en las escorias de hierro y acero utilizadas en este estudio.

Tabla III.4 Contenidos de metales en los lixiviados de escorias de cobre y drenaje ácido de mina de una presa de jales.

Tabla III.4 Resultados del análisis granulométrico (tamaño de partícula) de escoria de cobre para el estudio de dureza.

Tabla1.5 Zonas predominantes de especies en función del pH

Tabla A3.1. Resultados de las pruebas de lixiviación para las escorias

Tabla A4.1 Resultados de las pruebas de neutralización de drenaje ácido con escorias de cobre

Tabla A4.2 Resultados Comparativos de la neutralización de DAM empleando escorias de cobre en polvo y en piedra.

Tabla A4.3 Resultados de las pruebas de neutralización empleando la dosis estequiométrica (1X) calculada de diversas escorias.

Tabla A4.4 Resultados de las pruebas de neutralización empleando dos veces la dosis estequiométrica (2X) calculada de diversas escorias

Tabla A4.5 Resultados de las pruebas de neutralización empleando tres veces la dosis estequiométrica (3X) calculada de diversas escorias

Tabla A4.6 Resultados de las pruebas de neutralización empleando cuatro veces la dosis estequiométrica (4X) calculada de diversas escorias

Lista de Figuras

Figura I.2 Diagrama de obtención de escoria de cobre de un complejo metalúrgico

Figura II.1 Cuadrantes de muestreo en el depósito de escorias de cobre.

Figura II. 3 Localización geográfica de puntos de muestreo de escorias de cobre en el sitio de disposición de escorias.

Figura III.1 Espectros EDS de un punto de la superficie de una partícula de cuatro muestras de escoria de cobre (en gruesos) colectadas en diferentes puntos de los cuatro cuadrantes del sitio de disposición.

Figura III.2 Espectros EDS de un punto de la superficie de una partícula de cuatro muestras de escoria de cobre (en polvo) colectadas en diferentes puntos de los cuatro cuadrantes del sitio de disposición.

Figura A1.Obtención de cobre industrial [Microsoft, Encarta 2008]

Figura A1.1 Proceso de fabricación del cemento [IECA, 2004]

Figura. A1.2 Relleno sanitario típico

Figura A3.1 MEB de escoria AH a 5.00KX, 20 KV

Figura A3.2 MEB de escoria MIT a 10.00KX, 20KV

Figura A3.3 MEB de escoria ND a 5.00KX, 20KV

Figura A3.4 Difractograma Escoria de Cobre Punto 1

Figura A 3.5Difractograma Escoria de Cobre Punto 5

Figura A 3.6 Difractograma Escoria de Cobre Punto 21

Figura A 3.7 Difractograma Escoria de Cobre Punto 24

Figura A 3.8 Difractograma Escoria de Cobre Punto 29

Figura A 3.9 Difractograma Escoria de Cobre Punto 31

Figura A 3.10 Difractograma Escoria AH

Figura A 3.12 Difractograma Escoria ND

Lista de Gráficas

Gráfica.III.1 Distribución del tamaño de partícula, producto de la trituración de la escoria.

Obteniendo un valor de dureza relativa a partir del método directo

Gráfica III.2 Incremento de pH en función del tiempo de contacto de agua estilada con escoria de cobre (malla 325) DOSIS 1x.

Gráfica III.3 Curva de neutralización del drenaje ácido de minas, colectado en una presa de jales, y utilizando una solución de NaOH 0.1 N

Gráfica III.8 Neutralización, en función del tiempo de contacto, de drenaje ácido empleando diferentes tipos de escoria en polvo (malla >325, 45 μ m) con una dosis de cuatro veces la estequiométrica (4X).

Lista de Fotografías

Fotografía II.1 Dispositivo utilizado para la neutralización de DAM con NaOH

Micrografías A3.1 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 200 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.2 de la superficie de escoria en polvo¹ con una magnitud equivalente de 50 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.3 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.4 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 200 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.5 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.6 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.7 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.8 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.9 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Micrografías A3.10 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10 μ m y en gruesos con una magnitud equivalente de 200 μ m

Fotografía A3.11 neutralización de drenaje ácido de mina empleando escoria AH de hierro

Fotografía A3.12 Neutralización de drenaje ácido de minas empleando escoria de cobre

Fotografía A3.13 Neutralización de drenaje ácido de minas empleando escoria Mitt (Acero)

Fotografía A3.14 Neutralización de drenaje ácido de mina empleando escoria ND de hierro

Resumen

A lo largo del tiempo la minería se ha desarrollado como una práctica común que data desde tiempos antiguos hasta nuestros días y que ha contribuido en la evolución del hombre. Sin embargo, la implementación de dicha actividad como potencial económico de un país ha desencadenado diversas desventajas en diferentes ámbitos, principalmente en el área ambiental, ya que la explotación de minerales tiene como consecuencias la producción de diferentes residuos y subproductos, que afectan el equilibrio ambiental y de ecosistemas. Por esta razón, se plantea minimizar el impacto ambiental implementando diversas acciones, como pueden ser el empleo de escorias de cobre, subproducto de la industria metalúrgica, para la neutralización drenaje ácido de un complejo minero, y así minimizar la contaminación provocada por la explotación minera.

Este estudio propone como objetivo evaluar las propiedades básicas de escorias de cobre para la neutralización de un drenaje ácido de minas (DAM).

Dicho trabajo se constituye principalmente de cuatro capítulos los cuales son los siguientes:

Capítulo 1: Estudio bibliográfico o marco teórico

Capítulo 2: Metodología experimental

Capítulo 3: Análisis de resultados y discusión

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

En el Capítulo 1, se plantea la problemática ambiental provocada por la generación de drenaje ácido de mina (DAM), también se presenta un resumen de la información relacionada con las aplicaciones y usos de las escorias para la neutralización de DAM, así como propiedades, características y normatividades aplicables a las mismas.

En el Capítulo 2, se describe la metodología experimental empleada durante el estudio realizado, para utilizar las escorias de cobre como agente neutralizante de drenaje ácido de mina. Se comparan eficiencias de

neutralización de las escorias de cobre respecto a la de productos comerciales como el carbonato de sodio y sosa, además respecto a escorias de otros tipos, como son las de procesos de aceración (horno de arco eléctrico), extracción primaria de hierro (alto horno) y recuperación de chatarra de hierro (horno eléctrico de inducción).

En el capítulo 3, se analizaron estadísticamente los resultados experimentales obtenidos, para determinar su validez. En particular, los resultados mediante estudios de caracterización de las escorias utilizadas, con el fin de determinar su comportamiento para diferentes muestras colectadas en 28 puntos de muestreo, determinando que a pesar de tener superficialmente una composición diferente al ser molidos estos materiales, su composición es más homogénea, por lo que es válido utilizar una escoria para realizar las pruebas de neutralización. Se analizaron los datos obtenidos durante la neutralización de escorias de cobre frente a otras escorias de procesos de aceración (horno de arco eléctrico), extracción primaria de Hierro (alto horno) y recuperación de chatarra de hierro (horno eléctrico de inducción), teniendo las escorias de cobre un comportamiento de base media, esto debido a que ocupó el tercer lugar de la cinética de neutralización, quedando en primer lugar la escoria de acero Mitt, en segundo la de hierro ND y en cuarto la de hierro AH.

Finalmente, en el Capítulo 4, se tiene como conclusiones que el contenido de contribuciones básicas totales de escoria de cobre (0.075 eq/100g de escoria) fueron relativamente bajas en comparación con escorias de acero (0.877 eq/100g de escoria) y piedra caliza (2.118 eq/100g de piedra). También que la cantidad óptima determinada en el laboratorio para la neutralización de DAM fue de 16g de escoria en 100ml de DAM y comparando el poder básico de la escoria de cobre se logró determinar que para dosis superiores a la estequiométrica esta, (Cu) tiene mejores propiedades básicas frente a la escoria de hierro (AH), muy similares con respecto a la escoria de hierro (ND) y ligeramente inferiores a la escoria de acero (Mitt).

Es por esto que en este trabajo las escorias de cobre evaluadas no permitieron neutralizar el drenaje ácido en este estudio, se recomienda utilizar este material en una primera etapa, combinado con otro agente básico, por ejemplo de CaCO_3 , en una segunda etapa. Además, se recomienda realizar un estudio en columna y una estimación de costos para determinar la factibilidad económica de este proceso.

Hipótesis

Las escorias de cobre presentan un contenido de óxidos de calcio, magnesio, potasio y sodio que permitirá neutralizar drenaje ácido de minas de una presa de jales.

Objetivo General

Evaluar las propiedades básicas de escorias de cobre para la neutralización de un drenaje ácido de minas (DAM).

Objetivos Particulares

- Determinar las características fisicoquímicas de una escoria de cobre, que influyen en la eficiencia del proceso de neutralización del drenaje ácido de minas.
- Determinar la cantidad de escoria de cobre a aplicar para la neutralización o en su caso máximo aumento de pH del drenaje ácido de minas de una presa de jales, con base en pruebas de laboratorio.
- Comparar el poder básico de la escoria de cobre en la neutralización de un drenaje ácido de minas (DAM), con respecto al que presentan tres escorias de hierro y de acero.

Capítulo I. Marco Teórico

1.1. Generalidades de Drenaje ácido de minas (DAM)

En la actualidad el hombre se enfrenta a diversas problemáticas ambientales, en este estudio se enfoca a uno en particular, que es, la generación de drenaje ácido de minas, problema que cada vez toma mayor fuerza y provoca mayores estragos, convirtiéndose en la actualidad, en un problema muy importante, es por esto que, se han buscado alternativas para la prevención, el tratamiento y la remediación de dicho drenaje ácido de mina.

1.1.1 Definición de drenaje ácido de minas

Se define como drenaje ácido de minas al conjunto de efluentes mineros que contienen compuestos oxidados que provocan el descenso gradual o abrupto del pH [Macías *et al.*, 1996] hasta valores muy bajos. Debido a lo anterior, es necesario realizar su estabilización o neutralización.

1.1.2 Generación de drenaje ácido de minas

Cuando las rocas con minerales sulfurosos, como pirita, calcopirita, pirrotita, marcasita, galena, arsenopirita, etc. son expuestas a la acción del aire y del agua, comienza en sus superficies un complejo proceso que engloba en su desarrollo fenómenos químicos, físicos y biológicos. De una forma muy simplificada, su evolución fenomenológica se puede resumir en los siguientes puntos:

- Procesos de oxidación, que transforman los sulfuros en sulfatos con producción de ácido; estos procesos pueden ser químicos o "catalizados" por bacterias como *Thiobacillus Ferroxidans*, *T. Thiooxidans*, *T. Thioparus*, etc.
- Reacciones secundarias entre los productos de las reacciones anteriores y los restantes minerales presentes en la roca; así, el ácido generado disuelve metales pesados tales como plomo, cinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, etc.

- Disolución y arrastre de estos productos por el agua de lluvia o de escorrentía, produciéndose un caudal líquido contaminante que se caracterizara por su acidez y por las altas concentraciones en sulfatos y metales pesados.

1.1.3 Contaminación ambiental por la generación de drenaje ácido de minas

1.1.3.1 Contaminación del agua

Las actividades mineras llevan consigo una modificación de los cauces. Producen importantes cambios en el balance de agua entre infiltración y escorrentía, esto debido a la modificación del suelo y vegetación, que lleva consigo una mayor capacidad erosiva y que son responsables de los paisajes descarnados y con una morfogénesis específica.

Es así como las escombreras de escoria o montículos de escoria, se convierten en peligrosos focos de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas, produciéndose pérdida de su calidad por procesos de salinización, alcalinización, incremento de la turbidez, concentraciones anómalas de metales pesados, Al, As, S, Fe, etc., debido a que modifican las condiciones de pH y conductividad de las aguas, con su consiguiente influencia sobre la solubilidad de muchos elementos y, especialmente, de los de carácter metálico y por ende potencialmente generadoras de aguas ácidas o Drenaje Acido de Mina (DAM) [Macías *et al.*, 1996].

1.1.3.2 Contaminación del suelo

Este tipo de impactos son de lo más notorios. Se producen como consecuencia de la remoción o modificación profunda del suelo por la explotación. Es decir, los suelos que quedan tras una explotación minera son todo tipo de materiales deteriorados, productos residuales de las extracciones, escombreras de estériles, etc., por lo que presentan graves problemas para el desarrollo de una cubierta vegetal, siendo sus características más notables las siguientes: *Ausencia o baja presencia de estructura edáfica*. Se debe a la escasez de componentes coloidales, especialmente de los orgánicos. Dada la carencia de materiales coloidales y la ausencia de actividad biológica, las partículas quedan sueltas o forman paquetes masivos o estratificados.

Propiedades químicas muy anómalas. Los suelos de mina son medios que pueden presentar situaciones extremas en los principales parámetros químicos. En general se trata de sistemas que han sufrido una oxidación intensa y acelerada, lo que lleva consigo una abundante liberación de iones H^+ (casi todas las reacciones de oxidación son acidificantes), que hacen descender intensamente el pH del suelo (<3) convirtiéndolo en suelos sulfato ácidos. Estos suelos, al encontrarse dañados, quedan inservibles para el crecimiento de vegetación, alterando así ciclos biológicos y la biodiversidad propia de la región.

Resumiendo, las actividades mineras causan intensas modificaciones en los suelos que conllevan frecuentemente a su total destrucción, dejando los materiales con unas limitaciones tan severas que generalmente se han de tomar medidas correctoras y altamente costosas para recuperar, por lo menos en parte, la capacidad productiva [Macías *et al.*, 1996].

1.1.4 Control de la contaminación por el drenaje ácido de minas

Las operaciones mineras tienen un gran impacto ambiental debido a la formación de aguas ácidas en el interior de la mina, en las canchas de desmontes y las de relave. En general los tratamientos comunes para la minimización de esta problemática se caracterizan por tener un elevado costo monetario, lo cual disminuye la manipulación prolongada de esta tecnología, el problema representa un impacto ambiental muy severo debido a que según estudios realizados se estima que la generación se puede prolongar hasta cientos de años empeorando durante el transcurso de éstos y provocando no sólo contaminación, si no verdaderos problemas al provocar accidentes y afectar severamente hasta poblaciones enteras [Younger, 1997]. Es por esto que actualmente se han realizado diversos estudios con el fin de disminuir, controlar y remediar la generación de drenajes ácidos de minas, tratando de dar un buen rendimiento en la neutralización del pH y la eliminación de metales pesados para evitar intoxicaciones por dichas sustancias.

Trabajos anteriores En el Centro Nacional de Recuperación de Tierras de Minas (España) se ha centrado en otras fuentes de bajo costo, alternativos a los productos comerciales, como el polvo del horno de combustión en lecho fluidizado (FBC) de

cenizas y escorias provenientes de un proceso de aceración. Este proceso es eficaz para el control de DAM, y ambos son muy utilizados por la industria actualmente por su bajo costo y alta disponibilidad. En un esfuerzo por proporcionar la industria del carbón con la más amplia selección de materiales alcalinos, se busca constantemente otros materiales que sean de bajo costo, que sean productos alcalinos, que puedan estar disponibles en gran cantidad y a su vez estén situados a corta distancia del recorrido minero. Es por esto que grupos de investigación estén trabajando con las escorias producidas principalmente por industrias acereras, debido a las propiedades químicas y a su alto valor de pH, de tal forma que se han encontrado beneficios, para mostrar resultados positivos en el control de DAM [Macías *et al.*, 1996]..

1.4.1.1 Remediación de suelos ácidos y Neutralización de drenaje ácido

En Venezuela se realizaron estudios sobre la remediación de un suelo ácido empleando escorias básicas, producto de la industria del acero en la siderúrgica del Orinoco [Rivero de Trinca y Adams, 2007]. Con el objetivo de estudiar el efecto de diversas fuentes de materiales calcáreos sobre la reacción de neutralización del suelo y la respuesta de un cultivo índice, se seleccionaron cuatro calizas calcínicas, una caliza dolomítica y una escoria básica, subproducto de la industria del acero. Después de realizar la caracterización fisicoquímica de dichos materiales, se efectuaron ensayos de incubación y con un cultivo de sorgo, híbrido PIONEER B815. Los ensayos se realizaron aplicando dos dosis de cada material al suelo de Guanipa. Se tomó en cuenta que el pH del suelo es importante porque los vegetales sólo pueden absorber a los minerales disueltos, como se sabe la variación del pH modifica el grado de solubilidad de los minerales. Por ejemplo, el aluminio y el manganeso son más solubles en el agua edáfica a un pH bajo y al ser absorbidos por las raíces son tóxicos a ciertas concentraciones. Algunas sales minerales, esenciales para el crecimiento vegetal como el fosfato de calcio, son menos solubles a un pH alto, lo que hace que estén menos disponibles para las plantas.

Tanto el Fe como el Al forman compuestos de baja solubilidad con los fosfatos. En los suelos de pH = 5 o inferior, los fosfatos de Fe y Al se pueden formar con gran facilidad, pero no proporcionan fósforo a las plantas, debido a la baja solubilidad del

fósforo en suelos alcalinos, resultante de la hidrólisis del $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ en presencia de CaCO_3 , y esta reacción tiene un lugar de valores de pH de 8.0 a 8.5.

El pH de las soluciones entre 4 y 9 no presentó una influencia marcada sobre la absorción de iones. Sólo a pH menores de 4 se presentan trastornos en el desarrollo de la raíz, a pH mayores de 9 se produce una absorción deficiente de fosfatos.

El pH tiene influencia directa e indirecta en la disponibilidad de los elementos nutritivos. La acidez o alcalinidad de los suelos indican la clase de plantas que pueden desarrollarse mejor en ese medio y da idea sobre los tratamientos que deben aplicarse como práctica adecuada en el manejo del suelo; es por esto que se estima que aplicando cantidades de escoria en tierras con características sulfato ácidas, éstas, tenderán a la alcalinidad, recuperando parte de sus nutrientes, que serán transferidos a dicha tierra, por las escorias. En la Tabla I.1 se puede observar la forma en que el pH facilita o limita la absorción de nutrientes a través de las raíces (las zonas más gruesas de las bandas indican mayor absorción) y por lo tanto mayor absorción de cada elemento.

Tabla I. 1 Variación de pH en función de elementos presentes en la tierra [Rivero de Trinca y Adams, 2007].



Debido a estos resultados, se realizaron estudios aplicando las escorias para aportar mayoritariamente los nutrientes requeridos para la fertilización de los suelos con deficiencias y a su vez elevar el valor de pH del suelo. Lo anterior hasta lograr un

valor óptimo que refleje sus resultados directamente en el desarrollo de plantas y regeneración de los ecosistemas involucrados.

En el Centro Nacional de Recuperación de Tierras de Minas (España) se han centrado en otras fuentes de bajo costo, para ser empleados como fuente de alcalinidad, destacando, el polvo del horno de combustión aplicado para lecho fluidizado (FBC) de cenizas. Ambos, eficaces para el control y prevención de Drenaje Acido de Minas (DAM), y ambos son muy utilizados por la industria minera [Ziemkiewicz, 2000].

Todas las fracciones resultantes de la escoria con características no metálicas, tienen aplicaciones en la construcción. La fracción fina (- 1 / 8 pulg) es el de un particular interés para el tratamiento de drenaje ácido de minas (DAM). A este producto se conoce como escoria multas, dicho proceso consta de más de molienda y un proceso de separación hidráulica. La molienda fina es utilizada para eliminar por flotación más metales, que están incorporados en la matriz vítrea, separarlos y finalmente ser incorporados a otro proceso.

Sin embargo, no hay reportes identificados para el aprovechamiento particular de escorias de cobre como agentes básicos en la neutralización de drenaje ácido de minas. Lo anterior representaría una aplicación ambientalmente amigable, obteniendo ventajas simultáneas como lo son, la reducción del volumen de escorias para disposición al neutralizar el DAM y disminución del riesgo ambiental que representa este drenaje ácido [Ziemkiewicz, 2000].

Algunos estudios realizados por diversas instituciones señalan que existen diversos agentes químicos capaces de neutralizar el drenaje ácido de mina, de entre los cuales destacan la cal apagada (CaO), la cal viva (Ca(OH)_2), escorias del proceso de aceración, piedra caliza (CaCO_3), y dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$), siendo éstas las más empleadas como agentes neutralizantes debido a su bajo costo y a sus propiedades básicas [Ziemkiewicz, 2000].

1.6.4 Agentes neutralizantes

En la actualidad existen diversas alternativas para la neutralización de sustancias de carácter ácido y con alta pureza, pero como en todo, tienen ventajas y desventajas, dentro de las cuales predominan el alto costo, o la baja pureza, a continuación se describen algunas otras opciones para neutralización de agentes ácidos

➤ **Agentes neutralizantes Convencionales o comerciales**

De entre los cuales destacan el uso de:

- a) Derivados de amonio**
- b) Carbonatos**
- c) Óxidos básicos**
- d) Bases fuertes**

Donde las ventajas y desventajas de cada uno se describen en Anexo I

➤ **Agentes neutralizantes no convencionales.**

Estos materiales se denominan así, debido a que su implementación no es comúnmente utilizada para reacciones de neutralización. Dentro de estos agentes, se han reportado [Loera et. Al, 2004] en estudios de neutralización de DAM a los siguientes:

- a) Cenizas Volantes**
- b) Escorias de Acero**
- c) Lechos filtrantes**

En el caso de las escorias de cobre, no se identificaron estudios, sin embargo, debido a que presentan un contenido de metales alcalinos que podría ayudar a la neutralización de DAM se seleccionaron para ser evaluadas. A continuación se presenta la información más importante relacionada con escorias.

1.2 Generalidades de escorias de cobre

1.2.1 Definición de escoria

La **escoria** es un subproducto de la fundición de la mena o concentrado, para purificar los metales. Se puede considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, puede contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento. También la escoria es un agregado rugoso de origen mineral, formado principalmente por silicatos de calcio y ferrita, combinados con óxidos múltiples de hierro, aluminio, manganeso, calcio y magnesio. [ASTM, 2006]. En el proceso de fundición, la escoria puede estar definida como una fase que contiene sustancias no útiles de un mineral y que inevitablemente estará en cualquier operación piro metalúrgica que involucre sistemas fundidos [Loera Dávila *et al.*, 2004].

En la figura 1.2 se detalla el proceso de generación de escoria de cobre.

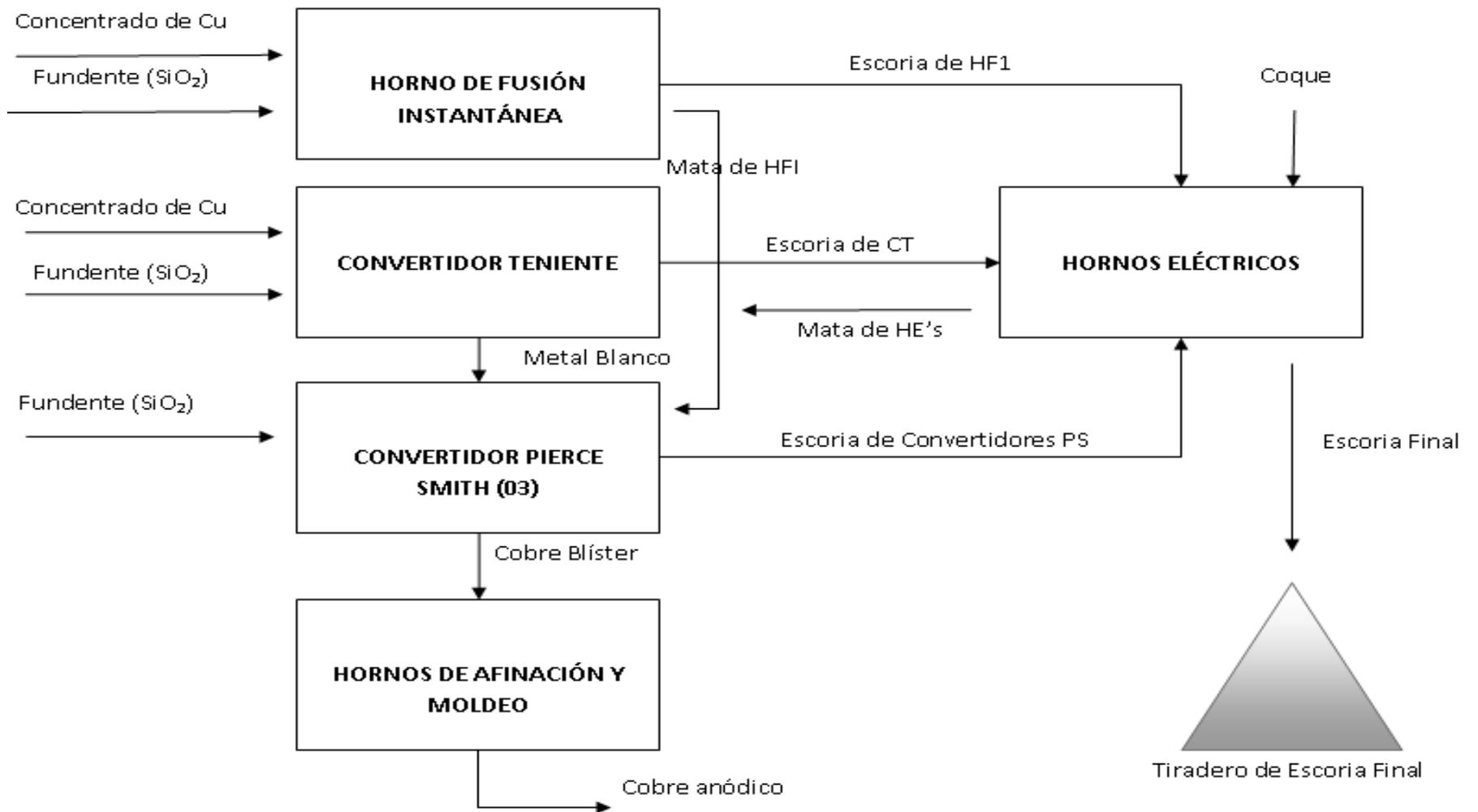


Figura I.2 Diagrama de obtención de escoria de cobre de un complejo metalúrgico.

1.2.2 Escoria como subproducto

Una fundición no ferrosa, como es el caso del cobre y el plomo; donde este proceso, está diseñado para eliminar el hierro y la sílice presente en estos minerales por lo que se separan principalmente en forma de escoria. Es por esto que la escoria de estos procesos tiene un alto contenido de hierro y silicatos.

Generalmente, los residuos masivos, son descartados y son reciclados con el fin de recuperar los restos del metal purificado. Sin embargo, estos materiales tienen otros componentes que pudieran ser recuperados posteriormente, y a su vez incorporados a diferentes líneas de extracción de metales como hierro, aluminio, mejorando de esta manera el balance económico de la operación. Además, si su utilización es directa, el costo de transporte y disposición podrían ser más bajo de lo estimado tradicionalmente, evitando problemas de estabilidad mecánica y contaminación por metales pesados, entre otros [Lovera Dávila *et al.*,2004].

1.2.3 Características físicas y químicas de las escorias de cobre

Los procesos pirometalúrgicos de producción de cobre están diseñados para eliminar el hierro y la sílice presente en estos minerales, que se separan en forma de escoria. Es por esto que la escoria de estos procesos tiene un alto contenido de hierro y silicatos.

La escoria de cobre producida en los diversos procesos pirometalúrgicos presenta diferentes características. Según Lovera Dávila *et al.*, (2004) durante el reciclaje de las escorias de reverberos ocurre una reducción de los óxidos de hierro y cobre mediante sulfuros contenidos en el mate del horno. Además en este horno, las pérdidas mecánicas de las escorias oscilan desde un 65 a

un 80% del total, el resto corresponde al cobre oxidado y sulfurizado soluble.

En lo que se refiere a las escorias procedentes del horno flash y de los procesos de fusión-conversión continuos, cuando el cobre se produce directamente a partir del concentrado en una sola etapa, las escorias contienen desde 9 a 12% de cobre; del cual cerca de la mitad está disuelto como óxido y el resto atrapado como mata o cobre metálico. Finalmente, tal como en el caso de la fusión, las escorias de conversión tienen cobre disuelto como sulfuros y óxidos, mata y cobre atrapados mecánicamente. En algunas fundiciones, se emplean métodos de limpieza de escoria como flotación y hornos eléctricos. Un factor importante en la operación de convertidores con la finalidad de obtener una buena escoria para la adición apropiada de fundentes relativas al flujo de aire utilizado [Lovera Dávila *et al.*, 2004].

En la Tabla I.1 se presentan las propiedades físicas y mecánicas típicas de las escorias de cobre y en la Tabla 1.2, se muestra la composición química de diferentes escorias de cobre.

Tabla I.1. Características físicas y mecánicas típicas en escoria de cobre [Gorai *et al.*, 2003].

Apariencia	Negra, vidriosa, más vesicular cuando es granulada
Peso unitario	2800-3800 kg/m ³
Absorción, %	0.13
Densidad aparente	144-162 lb/ft ³
Conductividad	500 μs/cm
Gravedad específica	2.8-3.8
Dureza	6-7 Moh
Humedad	< 5%
Cloro soluble en agua	< 50 ppm

Pérdida por abrasión, %	24.1
Pérdida de solidez con Na ₂ SO ₄ , %	0.90
Ángulo de fricción interna	40-53

Tabla I.2. Composición química de diferentes escorias de cobre (Tixier *et al.*, 1997).

Origen	Cu%	CuO%	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO%	CaO%	MgO%	Al ₂ O ₃ %	S%	SO ₃ %
Copper Queen	1.35	0	15.9	64.2	0.3	7.0	1.1	10.0	0.2	0
Detroit	0	0	24.9	51.9	5.8	7.3	1.7	8.4	0	0
Prince	1.15	0	19.1	54.1	0.3	12.3	2.5	10.3	0.2	0
Old Dominion	0	2.36	17.1	71.5	1.0	3.2	1.6	3.3	0	0
United Verde	0.12	1.79	24.7	58.2	0	9.0	0.5	5.7	0	0
Bisbee	0.25	0	21.7	50.0	0	7.0	0	21.0	0	0
Quebec	0.4	0	34.5	49.5	0.1	2.2	1.5	6.6	1.2	0
Quebec	0.4	0	36.8	50.0	0.09	1.9	1.5	7.2	1.1	0
Ontario	1.1	0	26.5	60.1	0.1	2.1	1.6	3.7	1.3	0
España	0	0.93	18.4	76.9	0.02	0.32	0.01	3.0	0	0.50
Polonia	0	0	43.1	13.4	0	19.3	5.6	15.8	0	0.65
Taiwán	0	0	34.3	53.7	0	7.9	0.94	3.8	0	3.78
Arizona	0	0.65	35.2	52.8	0	3.3	0.57	5.0	0	2.46

1.2.4 Producción de escoria y Opciones de aprovechamiento

De igual manera, la gran cantidad producida de escoria representa un grave problema, debido a que por los altos volúmenes producidos, en el país no se cuenta con lugar suficiente para su disposición; así

mismo sucede dentro de las plantas metalúrgicas, en las que el transporte para disposición externa a las instalaciones resulta incosteable. Además, cabe mencionar que de cada carga de horno, en el caso de la extracción de cobre, el 60% está constituido por escoria, mientras que el 40% restante representa al cobre destinado a electro refinación, es así, que por mencionar algunas cifras de producción de escorias de cobre a nivel mundial, se tienen registros de que se alcanzó una producción para el año 2000 en la Unión Europea de 25 MDT, en el caso de Alemania de 13.3 MDT, para los Estados Unidos se estima que la producción anual superó los 21 MDT, al igual que Japón que rebasó las 24 MDT. Debido a lo anterior, y a que las escorias presentan una gran variedad de materiales que pueden aprovecharse, algunos investigadores de diversos países se han dado a la tarea de buscar algunas opciones de aplicación para escorias. En la Tabla I.2 se resume el porcentaje destinado de la producción total de escorias de hierro y de acero por ámbitos de aprovechamiento en diversos países.

Tabla I.3 Principales opciones de aprovechamiento de escorias para diversos países.

Usos	Alemania (2000)	E.U.A. (2004)	Europa (2003)	Japón (2005)
Cementos y agregados	68%	78%	37%	41%
Fertilizantes	1%	1%	-----	-----
Obra Civil	30%	4%	-----	-----
Otros	1%	-----	12%	19%
Pavimentación	-----	16%	42%	34%
Reciclaje	-----	-----	4%	-----
Relleno	-----	1%	-----	6%
Prod. Anual Total		21MDT	25MDT	24MDT
	13.3MDT			

MDT: Millones de toneladas

Nota: No se tienen registrados los porcentajes de aprovechamiento en México.

Como se observa en la tabla anterior, las opciones de aprovechamiento más utilizadas son: en primer lugar, elaboración de clinker del cemento y fabricación de agregados para la construcción, en segundo lugar, para la pavimentación en solamente tres de los cuatro países mencionados, y solo Europa destinó las escorias en el año 2003 para reciclaje [Euroslag 2000].

1.2.5 Legislación Ambiental

En la actualidad existen normas que competen a este rubro industrial, que regulan el almacenamiento transporte y manipulación. Las escorias están catalogadas como residuos sólidos, es por esto que para su disposición, existe la normatividad para los Estados Unidos Mexicanos.

Donde se hace referencia al artículo 17 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos, el cual establece que las escorias minero metalúrgicas, son de regulación y competencia federal y que puede disponerse finalmente en el sitio de su generación; sobre su peligrosidad y manejo, lo competente, se determina conforme a las Normas Oficiales Mexicanas aplicables y estas están sujetas a los planes de manejo previstos por la ley.

Es así como la Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005), establece, explícitamente que un residuo es clasificado como peligroso si presenta características nocivas tales como ser corrosivo, explosivo, inflamable reactivo o biológico-infeccioso. Esta norma no incluye a las escorias mineras como residuos peligrosos, sin embargo, se menciona a dicho material en el listado número 5 como residuo altamente peligroso y

considerado tóxico, a diferencia, de normas extranjeras donde las escorias, en general están catalogadas como subproductos de la industria minera con propiedades reutilizables, destinando este tipo de materiales para diversas aplicaciones que no incluyen el confinamiento como primordial opción.

En la tabla 1.4 se presentan los límites permitidos por la norma mexicana NOM-052-ECOL-1993 para residuos peligrosos.

Tabla I.4 Límites máximos permisibles de metales en el extracto PECT

No. CAS	Contaminante	LMP (mg/L)
7440-38-2	Arsénico	5.0
7440-39-3	Bario	100.0
7440-43-9	Cadmio	1.0
7440-47-3	Cromo	5.0
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5.0
7439-92-1	Plomo	5.0
7482-49-2	Selenio	1.0

En la tabla I.4 Se muestran los límites de detección permitidos por la Norma Oficial Mexicana que se encarga de la regulación de residuos peligrosos, la que servirá para determinar si las escorias a trabajar son o no catalogados como residuos peligrosos

Capítulo II. Metodología Experimental

En este capítulo se describirán, los materiales y reactivos que fueron requeridos durante la etapa de experimentación, así mismo, el método de muestreo utilizado para la obtención representativa de escorias, de la zona de disposición de estas, Las pruebas que fueron requeridas para la caracterización de las escorias(que se detallan en anexos), los métodos utilizados para la neutralización del drenaje ácido de mina y finalmente la comparación del poder neutralizante de las escorias de cobre frente a otras escorias.

II.1 Materiales y reactivos

Las pruebas de neutralización se realizaron utilizando una escoria de cobre colectada en el sitio de disposición de una planta metalúrgica localizada en el estado de Sonora. La escoria se aplicó en forma de polvo (malla 325, 45 μm) y de grano (malla 3.5, 5.6 mm), para determinar la influencia de la granulometría sobre la eficiencia del proceso de neutralización. Se utilizaron también otros tipos de escorias: de acero (de horno de arco eléctrico) y de hierro (de horno eléctrico de inducción y de alto horno) que fueron colectados y utilizados por Valdés Curiel (2008). Los datos de las escorias utilizadas se detallan en la Tabla II.1.

Se utilizó una muestra de agua ácida (drenaje ácido de minas) colectada en la presa de jales de un complejo minero localizado en el norte del país. La solución de NaOH, empleada para obtener la curva de neutralización del drenaje ácido de minas, se preparó en agua destilada a una concentración inicial de 0.1 M, a partir de un reactivo sólido grado analítico de marca Baker, con pureza de 98.2%.

Tabla II.1 Tipos de escoria y procesos de extracción.

Fotografía	Proceso	Estado de procedencia
	Proceso de reciclado de chatarra de hierro en horno eléctrico de inducción	D.F
	Proceso de extracción primaria de hierro de alto horno	Coahuila
	Proceso de aceración en horno de arco eléctrico	Michoacán
	Proceso de extracción de cobre en Horno Eléctrico	Sonora

II.2 Muestreo de escorias de cobre

Se realizó una visita a un complejo metalúrgico de cobre en el norte del país y se tomaron diferentes muestras representativas del horno de escorias, con el fin de caracterizar estos materiales. El método empleado para el muestreo fue el denominado “sistemático por cuadrículas” (Figura II.1), ya que por este método se puede evaluar la variabilidad de las características de las escorias en función de la zona de disposición.

Para determinar la cuadrícula o cuadrante se empleó la relación área/perímetro que permitió establecer el número de puntos a muestrear (Figura II.2). Con los datos del perímetro del depósito de escorias (P) = 1,892 m y un área (A) = 181,664 m². La relación calculada de estos dos parámetros fue de 96 m, así se determinó un mínimo de 28 puntos a muestrear.

La selección de los puntos de muestreo se basó tomando en cuenta la ubicación de la zona de disposición de las escorias, y tomando en cuenta áreas similares, para garantizar una misma concentración y haciendo subdivisiones, dividiendo la zona de disposición de escoria en cuatro cuadrantes y siguiéndola hacia el norte en sentido contrario a las manecillas del reloj. El total fue de 28 puntos de muestreo como se observa en la Figura II.2.

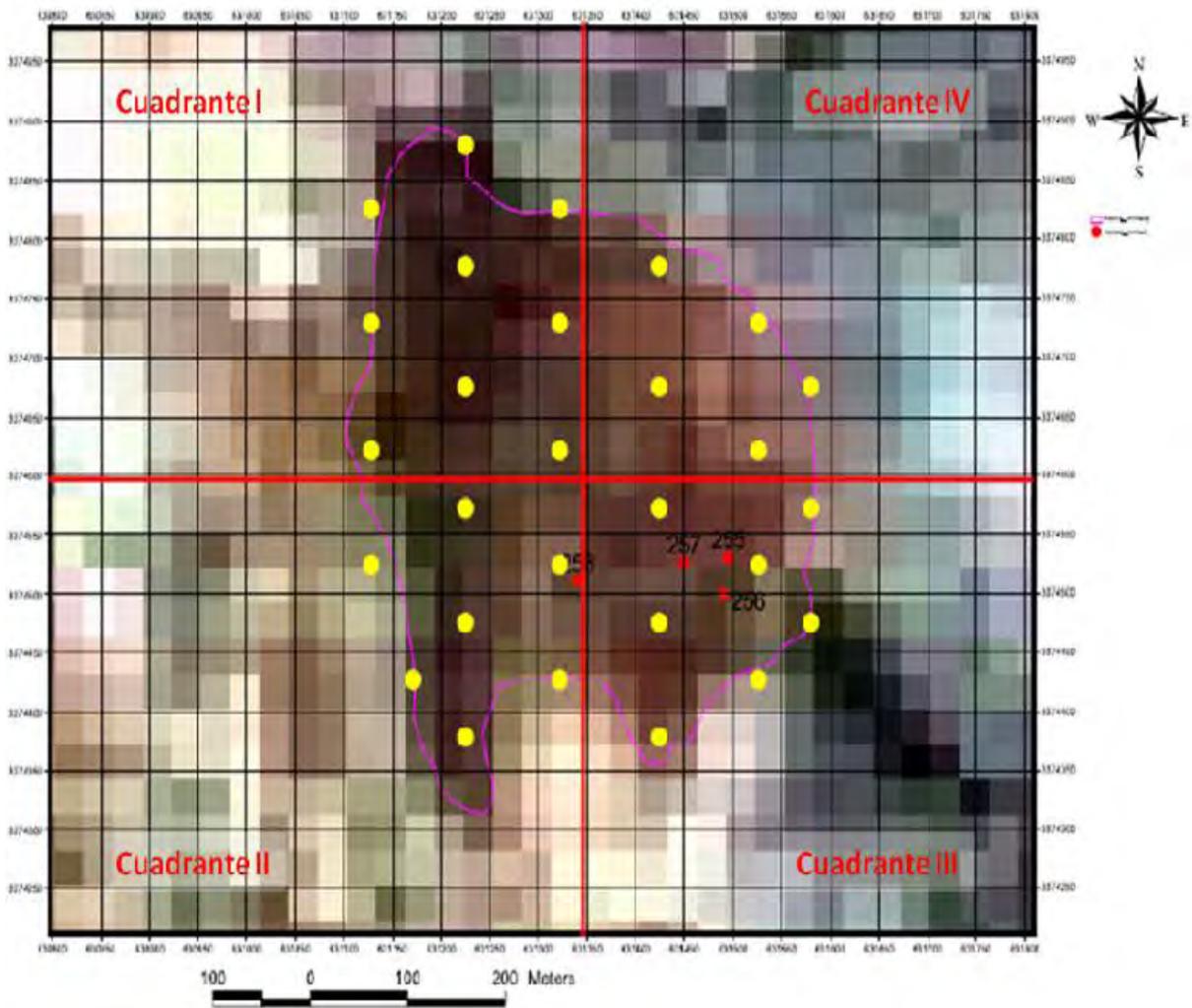


Figura II.1 Cuadrantes de muestreo en el depósito de escorias de cobre.

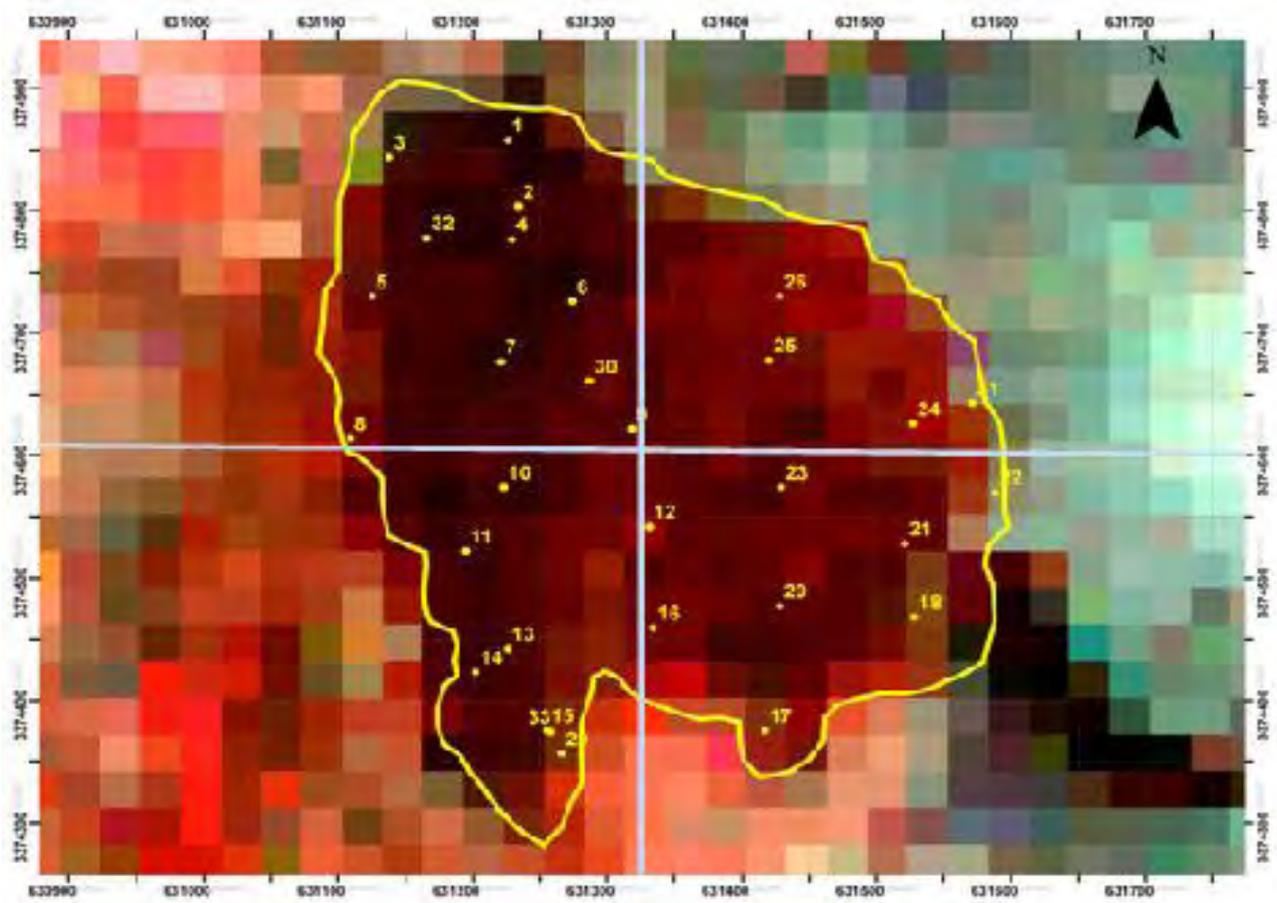


Figura II. 3 Localización geográfica de puntos de muestreo de escorias de cobre en el sitio de disposición de escorias.

II.3 Técnicas analíticas y experimentales

En el estudio experimental se realizaron tres tipos de pruebas: a) caracterización de escoria, b) neutralización del agua ácida con NaOH (curva de neutralización), c) neutralización del agua ácida con escorias, comparación del poder neutralizante de las escorias de cobre con respecto a otras escorias siderúrgicas.

II.3.1 Pruebas de caracterización de escorias

Las características determinadas de las escorias de cobre fueron: 1) la porosidad y el contenido superficial de elementos de las partículas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con un equipo JEOL JSM-59002V (en soporte de carbón), 2) fases mineralógicas presentes por Difracción de RX con un equipo Siemens D500 con tubo de cobre, 3)

contenido de óxidos por Fluorescencia de RX con un Espectrómetro de fluorescencia de rayos X SRS 3000 (La técnica se aplicó empleando perlas preparadas con una mezcla 50:50 de tetra borato de litio/meta borato de litio, con tipo de análisis cuantitativo) y 4) análisis de metales lixiviables (ICP-AES), con un equipo espectrométrico de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente, marca Thermo Electron Corporation, modelo: IRIS INTREPID II XSP Duo, para determinar si el material es peligroso o no, según la norma establecida (NOM-052-ECOL-1993), y finalmente 5) un estudio de dureza utilizando el método directo. Este último método consiste en moler 1000g del material que se pasaron por un pulverizador marca McCool Pulverizar 6 1/2 F y medir el voltaje así como el tiempo que el material permanece en el molino, posteriormente se tamiza y se realizan los cálculos (mostrados en Anexo IV).

II.3.2 Pruebas de neutralización del drenaje ácido de minas (DAM) con NaOH

En estas pruebas se obtuvo una curva de neutralización utilizando 50 mL de drenaje ácido. Esta mezcla se tituló empleando como agente neutralizante NaOH 0.1N y un potenciómetro Orión (modelo 210A). Los cálculos se realizaron tomando en cuenta la dilución correspondiente y se re escalaron para obtener el valor necesario de NaOH para neutralizar 1L de drenaje ácido de mina.



Fotografía II.1 Dispositivo utilizado para la neutralización de DAM con NaOH.

II.3.3 Pruebas de neutralización de drenaje ácido de mina con escorias de cobre

Por una parte, a partir de la curva de neutralización del drenaje ácido de minas con NaOH, se calcularon los equivalentes de este agente básico necesarios para obtener un pH de 7. Por otra parte, con este dato y a partir del contenido de óxidos que presentan un carácter básico (MgO, CaO, Na₂O, K₂O), en las escorias, se calculó la cantidad de escoria a aplicar para neutralizar 50 mL de drenaje ácido de minas.

En la práctica, en estas pruebas se midieron 50 mL de drenaje ácido de minas en una probeta y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.

Por otra parte, se pesaron 4.0 g de escoria (en polvo y en gruesos) por duplicado y se añadieron a la muestra de drenaje ácido de minas.

Se colocaron los matraces en agitación oscilatoria y se monitoreó el pH a lo largo del experimento (72 h), realizando lecturas de pH cada dos horas. Se aplicó el mismo procedimiento anteriormente descrito, empleando dosis de 8.0 g, 12.0 g y 16.0 g en 100mL de drenaje ácido de mina, correspondientes a dosis de escoria de uno, dos, tres y cuatro veces de la cantidad estequiométrica de equivalentes calculados para la neutralización del drenaje ácido empleando NaOH.

II.3.4 Neutralización comparativa de drenaje ácido de minas con escorias de cobre, hierro y acero

A partir de la curva de neutralización de drenaje ácido de minas con NaOH, se calcularon los equivalentes de hidróxidos necesarios para

obtener un pH de 7. Con este dato y a partir del contenido reportado por Ziemkiewicz en el 2000, y Huanosta en el 2008 del contenido de óxidos en la escoria, que presentan un carácter básico tales como MgO, CaO, Na₂O, K₂O. Se calculó la cantidad de escorias de hierro y acero a aplicar para neutralizar 50 mL de drenaje ácido de minas.

En la práctica, en estas pruebas se midieron 50 mL de agua ácida en una probeta y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Por otra parte, se pesaron las cantidades calculadas de las diferentes escorias en polvo por duplicado (las cantidades se detallan en la Tabla II.2) y se añadieron al drenaje ácido de minas. Se colocaron los matraces en agitación oscilatoria y se monitoreó el pH a lo largo del experimento (72 h), realizando lecturas de este parámetro cada dos horas. Se aplicó el mismo procedimiento, empleando dosis correspondientes de escoria de uno, dos, tres y cuatro veces de la cantidad estequiométrica de equivalentes calculados para la neutralización del agua ácida empleando NaOH.

Tabla II.2 Cantidades estequiométricas, dos veces, tres veces y cuatro veces las estequiométricas de escorias, calculadas teóricamente para neutralizar drenaje ácido de minas.

Cantidades calculadas teóricamente (g)				
Escoria	1X	2X	3X	4X
AH	0.3076	0.6152	0.9228	1.2304
Cu	4.0000	8.0000	12.0000	16.0000
Mitt	0.3910	0.7820	1.1730	1.5640
ND	0.8442	1.6884	2.5326	3.3768

Capítulo III. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las escorias de cobre, los resultados de pruebas realizadas para neutralizar drenaje ácido de mina con escorias de cobre empleando diferentes dosis, calculadas teóricamente a partir de los estudios de caracterización. Posteriormente, se presentaran los resultados de las neutralizaciones comparativas de escoria de cobre frente a otras escorias procedentes de procesos para la obtención de hierro y acero, las cuales están reportadas [Huanosta 2007] en otros estudios como agentes neutralizantes de drenaje ácido de mina, de bajo costo, finalmente se hará una discusión global de los resultados obtenidos.

III.1 Caracterización de escorias

La caracterización de las escorias comprende una serie de estudios, fluorescencia de RX para determinar el contenido de óxidos de interés, microscopía electrónica de barrido, para determinar la porosidad y la composición superficial, propiedades que determinan la cinética de la reacción, difracción de rayos X para determinar las fases mineralógicas que interaccionarían durante el proceso de neutralización del drenaje ácido de mina (DAM), metales lixiviables (ICP) para determinar si el material es o no clasificado como peligroso, con base en la norma mexicana correspondiente, la dureza para conocer la resistencia que tiene el material a la fractura, finalmente la capacidad neutralizante de las escorias respecto al DAM.

III.1.1 Contenido de óxidos: Fluorescencia de Rayos X

Aplicando la técnica de Fluorescencia de RX se determinó el contenido de óxidos de metales con propiedades básicas como: MgO (0.274%), CaO (0.646%), Na₂O (0.826%), K₂O (0.826%). Como se observa en la Tabla III.1, las contribuciones básicas, de entre dos a tres muestras analizadas de los cuatro cuadrantes muestreados, se sitúan entre 4.76 y 5.41 eq./100 gramos de escoria y el valor promedio fue de 5.43 equivalentes/100 gramos de escoria. Considerando esos datos, no se obtuvo una diferencia significativa de estos contenidos de óxidos en las muestras analizadas, por lo que se eligió el punto 31 para realizar las pruebas de neutralización, debido a que se tenía mayor cantidad de muestra de escoria.

Tabla III.1 Contenido de óxidos de carácter básico de 11 muestras de escorias de cobre colectadas en diferentes puntos en el sitio de disposición de este material.

Cuadrante	Punto de muestreo/ Muestra	Fe₂O₃	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	Contribuciones básicas
1	P1	58.65	0.220	1.056	0.518	1.304	5,196
	P5	59.21	0.166	0.908	0.784	1.192	5,190
	P7	59.87	0.138	0.910	0.432	1.206	5,454
2	P11	62.13	0.116	0.562	0.314	1.238	4,760
	P29	42.31	0.154	0.382	0.302	1.217	4,810
3	P16	63.58	0.200	0.556	0.574	1.152	4,988
	P21	64.01	0.190	0.530	0.596	1.088	4,808
	P23	63.45	0.368	0.548	0.584	0.985	4,976
4	P24	61.06	0.176	0.728	0.778	1.116	5,412
	P26	64.05	0.342	0.674	0.602	1.002	5,560
	P31	62.59	0.274	0.646	0.808	0.826	5,428
Promedio		60.08	0.214	0.682	0.576	1.12	5.430 +/- 0.260

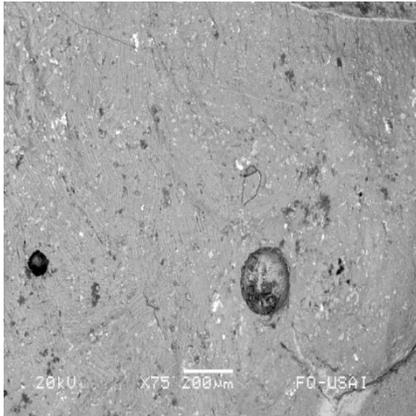
III.1.2 Contenido superficial de elementos en partículas de escoria de cobre por microscopía electrónica de barrido (MEB) con electrones retro dispersados (EDS)

Las imágenes observadas por medio de la señal de los electrones retrodispersados muestran diferentes tonalidades que van de tonos claros y grises, hasta tonos fuertes. Dichas tonalidades están directamente relacionadas con el número atómico de los elementos contenidos en la muestra analizada. Las zonas con tonalidades oscuras representan una alta concentración de elementos pesados como calcio, hierro, zinc y trazas de cobre y en las partes oscuras se observan elementos ligeros o semi ligeros como son carbono, oxígeno, magnesio, aluminio, silicio y potasio. Se analizaron dos tipos de muestras, una en polvo y otra en piedra, obteniendo resultados muy similares para cada tamaño de partícula, de un total de 31 muestras colectadas. En el Anexo III se muestran todos los resultados obtenidos.

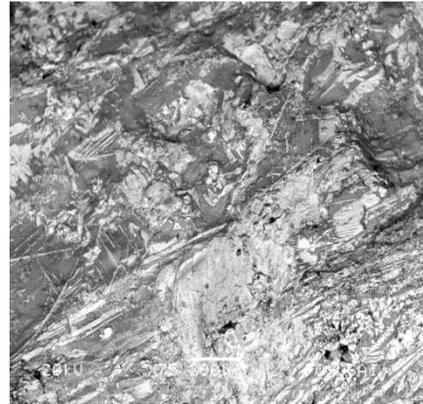
A continuación se muestran y discuten los resultados obtenidos, comparando una muestra de cada uno de los cuatro cuadrantes colectados.

a) Resultados MEB de la escoria de cobre en piedra y polvo

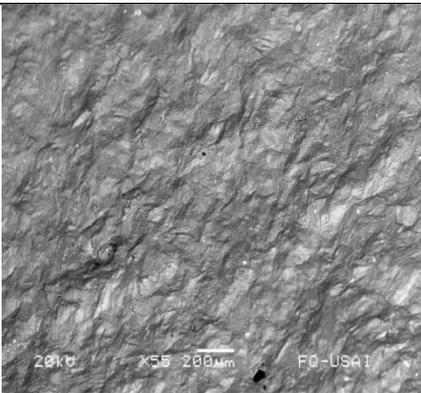
En las micrografías III.1 a III.8 se observa que, la muestra de partícula en gruesos del segundo cuadrante presenta una superficie más lisa y poco porosa, a diferencia de las muestras del primer y tercer cuadrante, que presentan una superficie más porosa. Finalmente, la muestra de escoria del cuarto cuadrante, tiene una superficie semi porosa. En las micrografías de escoria en polvo, puede observarse que en los cuatro cuadrantes las partículas de escorias presentan una superficie más porosa, a diferencia de las micrografías anteriores, que presentan una superficie menos porosa, por lo que la superficie de contacto aumenta significativamente, favoreciendo la velocidad de reacción y haciendo la reacción más eficiente.



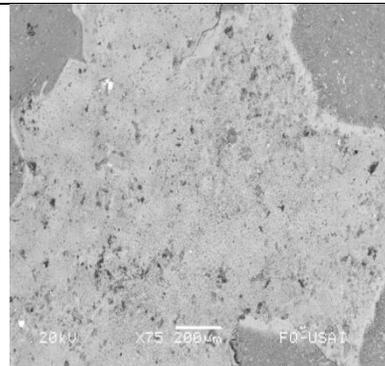
Micrografía III.1 Partícula de escoria en piedra del primer cuadrante (P1).



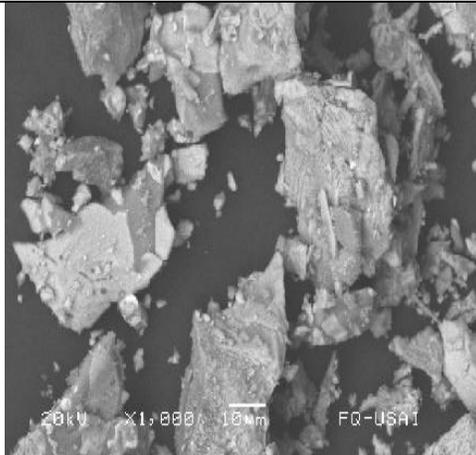
Micrografía III.3 Partícula de escoria en gruesos del cuarto cuadrante (P31).



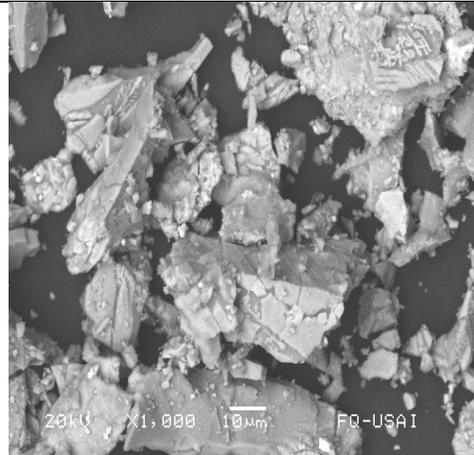
Micrografía III.2 Partícula de escoria en piedra del segundo cuadrante (P13).



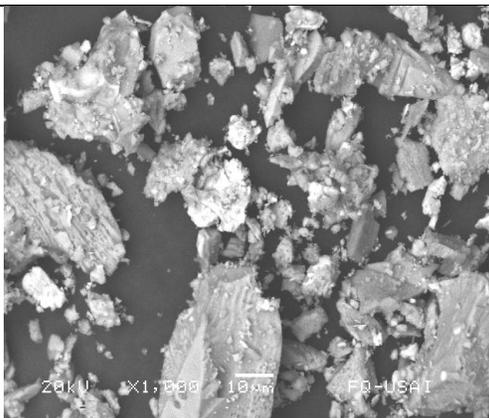
Micrografía III.4 Partícula de escoria en gruesos del tercer cuadrante (P20).



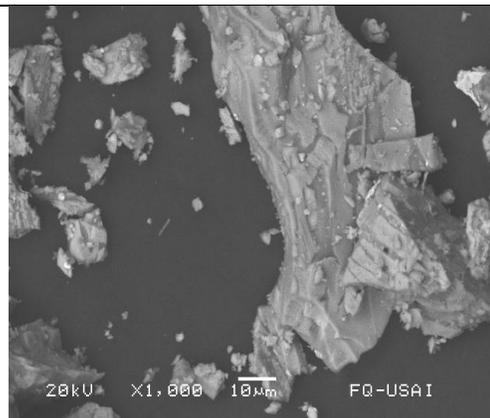
Micrografía III.5 Partícula de escoria en polvo del primer cuadrante (P1).



Micrografía III.3 Partícula de escoria en polvo del cuarto cuadrante (P 31).



Micrografía III.6 Partícula de escoria en polvo del segundo cuadrante (P13).



Micrografía III.8 Partícula de escoria en polvo del tercer cuadrante (P20).

b) Composición superficial de escorias de cobre en piedra y en polvo

En cuanto a su composición superficial podemos ver en los espectros EDS, tienen una composición un tanto diferente entre los cuadrantes, predominando elementos como Fe, Si, Al, en cambio, en los espectros de escoria en polvo se puede observar

claramente que su composición es más homogénea, pues tienen una composición similar entre los cuatro cuadrantes, predominando elementos como Fe, Si, Al, Ca, Mg.

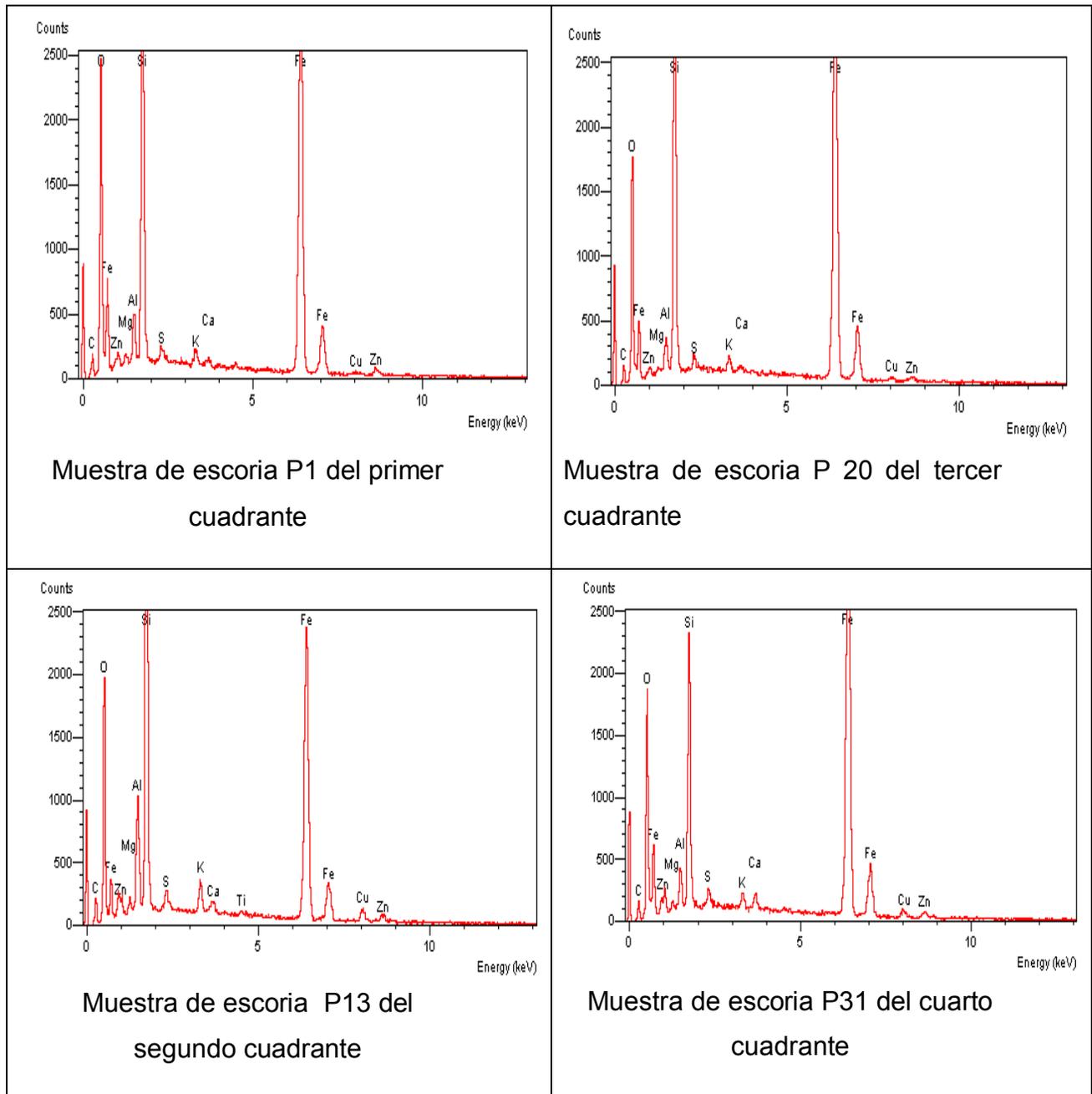


Figura III.1 Espectros EDS de un punto de la superficie de una partícula de cuatro muestras de escoria de cobre (**en gruesos**) colectadas en diferentes puntos de los cuatro cuadrantes del sitio de disposición.

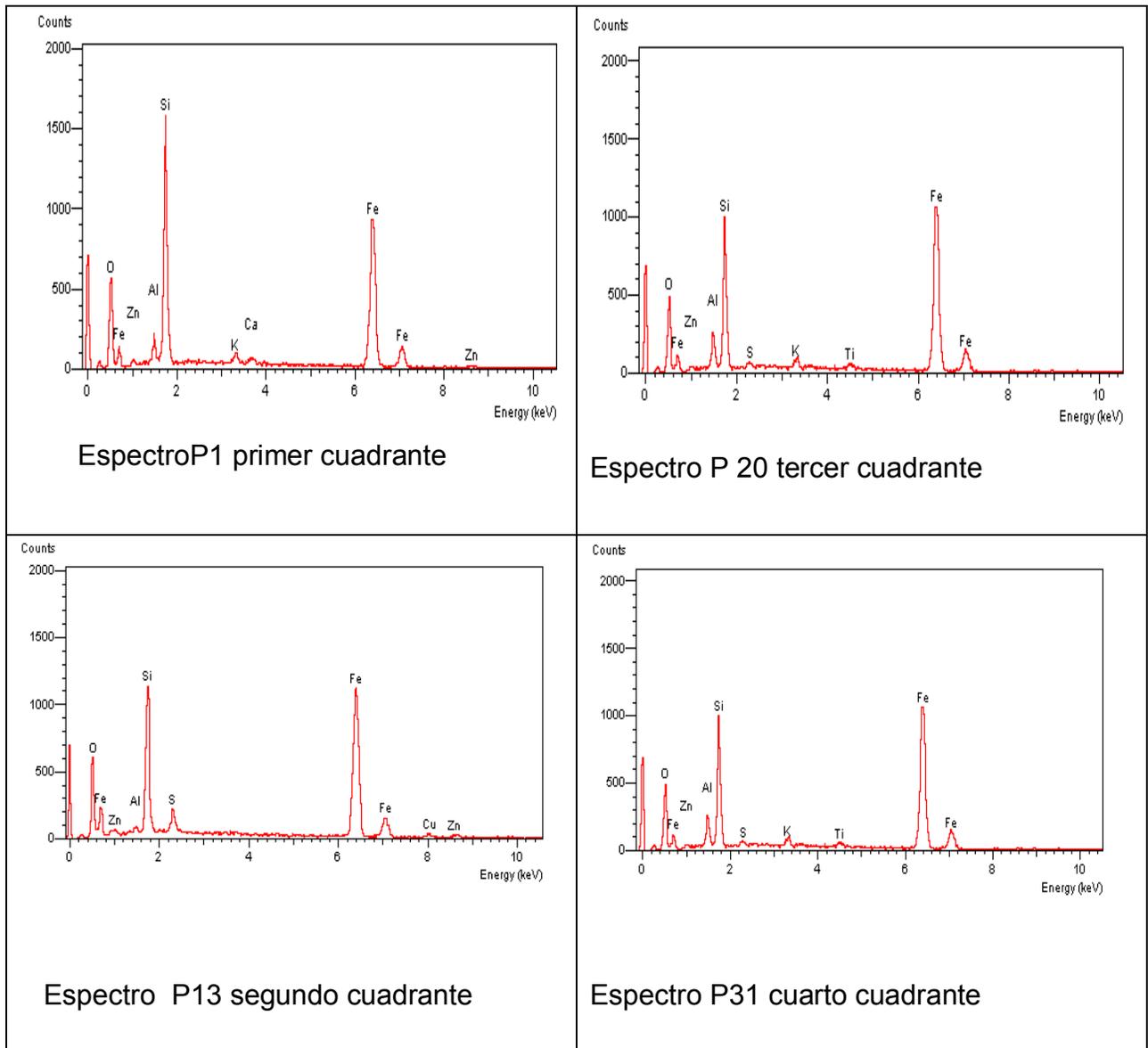


Figura III.2 Espectros EDS de un punto de la superficie de una partícula de cuatro muestras de escoria de cobre (**en polvo**) colectadas en diferentes puntos de los cuatro cuadrantes del sitio de disposición.

III.1.3 Difracción de Rayos X

Para determinar las fases mineralógicas presentes en las muestras colectadas, se eligieron al azar una muestra procedente de cada cuadrante con el fin de observar la diferencia existente entre cada cuadrante. En los análisis de **DRX** se determinó que las fases contenidas en general, en las escorias son: Fe_2O_3 (Maghemita), $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ (Djurleita), $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ (Brocantita) $\text{Mg}_{0.136}\text{Fe}_{1.741}\text{Mn}_{0.123}\text{SiO}_4$ (Hortonolita), $(\text{Fe}_{0.769}\text{Si}_{0.231})(\text{Fe}_{0.975}\text{Si}_{0.025})_2\text{O}_4$ (óxido de hierro y silicio), Fe_2SiO_4 (Fayalita), SiO_2 (Cuarzo), $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Montmorilonita), MgFe_2O_4 (Magnesioferrita). De estas fases identificadas, solamente las cuatro últimas fases tienen aplicaciones, en este caso en específico, la brocantita podría participar como neutralizante [Rivero de Trinca y Adams, 2007], se muestran resultados completos en Anexo III.

Los resultados de los cuadrantes se presentan a continuación en la Tabla III.2 y los resultados de las fases contenidas en las escorias de hierro y acero se muestran en la Tabla III.3.

Como se observa en la tabla 3.2, sólo en dos cuadrantes se identificó la fase reportada como posible neutralizante, $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ (brocantita), aun cuando comparando con otros estudios [Huanosta,2007] donde se analizaron diferentes escorias, de hierro y acero, estudio en el cual, dichas escorias no presentan esta fase (brocantita). Sin embargo, ese estudio nos dice que las escorias de acero, alcanzan hasta un pH de 12 en agua destilada, las escorias de extracción primaria de hierro, un pH de 7.6 y las escorias de reciclaje de chatarra de hierro un pH de 10.5, mientras que los estudios realizados a las escorias de cobre, reportan un pH en agua destilada de 8, a pesar de esto, presentan fases similares como Fe_2O_3 (Maghemita), Fe_2SiO_4 (Fayalita), SiO_2 (Cuarzo).

Tabla III.2 Fases mineralógicas presentes en cuatro muestras de escorias de cobre colectadas en el sitio de disposición.

Cuadrantes	Punto de muestreo	Fases mineralógicas
Uno	P1	Fe_2SiO_4 (Fayalita)
		Fe_2O_3 (Maghemita)
		SiO_2 (Cuarzo)
		$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Montmorilonita)
		MgFe_2O_4 (Magnesioferrita)
		Fe_2SiO_4 (Hortonolita)
		$\text{Mg}_{0.136}\text{Fe}_{1.741}\text{Mn}_{0.123}\text{SiO}_4$
		$(\text{Fe}_{0.769}\text{Si}_{0.231})(\text{Fe}_{0.975}\text{Si}_{0.025})_2\text{O}_4$
Dos	P13	Fe_2SiO_4 (Fayalita)
		Fe_2SiO_4 (Hortonolita)
		$\text{Mg}_{0.136}\text{Fe}_{1.741}\text{Mn}_{0.123}\text{SiO}_4$
		$(\text{Fe}_{0.769}\text{Si}_{0.231})(\text{Fe}_{0.975}\text{Si}_{0.025})_2\text{O}_4$
		$\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ (Djurleita)
		MgFe_2O_4 (Magnesioferrita)
		$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ (Brocantita)
Tres	P20	Fe_2SiO_4 (Fayalita)
		FeCr_2O_4 (Cromita)
		$\text{Mg}_{0.136}\text{Fe}_{1.741}\text{Mn}_{0.123}\text{SiO}_4$
		$(\text{Fe}_{0.769}\text{Si}_{0.231})(\text{Fe}_{0.975}\text{Si}_{0.025})_2\text{O}_4$
cuatro	P 31	Fe_2SiO_4 (Fayalita)
		Fe_2O_3 (Maghemita)
		$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ (Brocantita)
		$\text{Mg}_{0.136}\text{Fe}_{1.741}\text{Mn}_{0.123}\text{SiO}_4$
		$(\text{Fe}_{0.769}\text{Si}_{0.231})(\text{Fe}_{0.975}\text{Si}_{0.025})_2\text{O}_4$

Tabla III.3 Fases mineralógicas identificadas en las escorias de hierro y acero utilizadas en este estudio.

Escoria	Proceso	Fases
AH	Extracción primaria de hierro para aceración(alto horno)	Fe ₂ O Maghemita
		Al(OH) ₃ Nordstrandita
		Al(OH) ₃ Gibbsita
		Al ₂ O ₃ gamma Oxido de aluminio
		Cr ₂ O ₅ Oxido de cromo
Mitt	Aceración (horno de arco eléctrico)	Cu ₂ Al ₂ SiO ₇ Gehlenita
		CaMn ₁₄ SiO ₂₄ Braunita-2Q
		SiO ₂ Cuarzo
		MgO Periclasa
		FeO Westita
ND	Reciclaje de chatarra de Hierro (horno de inducción)	Ca ₃ Al ₂ O ₆ Oxido de calcio y aluminio
		Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ Akermanita
		CaSiO ₃ Wollastonita
		SiO ₂ Cuarzo
		CaMg(SiO ₃) ₂ Diopsida
		Mg _{0.64} Fe _{0.36} 2(SiO ₄) Fosterita
		Fe ₂ O ₃ Maghemita
		Fe ₂ O ₃ Hematita
		Fe Hierro
Fe ₃ O ₄ Oxido de hierro		

III.1.4 Metales lixiviables de escorias de cobre: ICP

En los resultados de **ICP** se obtuvo que los metales lixiviables fueron: arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc. El contenido obtenido de metales lixiviables de las muestras de escorias y de drenaje ácido (DAM) previamente digeridas, en la Tabla III.4, claramente las muestras tienen una lixiviación por debajo del límite de detección del equipo de análisis.

Tabla III.4 Contenidos de metales en los lixiviados de escorias de cobre y drenaje ácido de mina de una presa de jales.

Elemento	P1	P21	P24	DAM	P29	Blanco agua
Ag	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
As	<LD	<LD	<LD	0.79	<LD	<LD
Ba	<LD	<LD	<LD	0.90	<LD	<LD
Cd	<LD	<LD	<LD	0.07	<LD	<LD
Cr	<LD	<LD	<LD	0.04	<LD	<LD
Cu	<LD	<LD	<LD	2.62	<LD	<LD
Fe	<LD	<LD	<LD	10.58	<LD	<LD
Mn	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Ni	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Pb	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Se	<LD	<LD	<LD	0.11	<LD	<LD
Zn	<LD	<LD	<LD	0.95	<LD	<LD

< LD: Inferior al límite de detección, ND: No detectado. Todos los valores están expresados en mg/L.

Como se observa en la Tabla III.4, los valores de lixiviación de cada una de las muestras analizadas se encuentran por debajo del límite de detección (ver tabla I.4), esto indica que cada zona a pesar de que tienen diverso grado de intemperismo, en el área de disposición final de la empresa, la escoria, en cuanto a composición superficial se refiere, se puede considerar con una composición similar.

También se puede observar que algunas muestras de escorias de cobre excedieron el valor límite de metales tóxicos permitido por la NOM-052-SEMARNAT-2005 [ver tabla I.4] que establece explícitamente que un residuo es clasificado como peligroso si presenta características nocivas tales como ser corrosivo, explosivo, inflamable reactivo o biológico-infeccioso.), como en caso del arsénico y cadmio, todos los puntos colectados no excedieron el límite permitido (5.0 mg/L y 1.0 mg/L respectivamente), En el caso de cromo (5.0 mg/L) y plomo (5.0 mg/L) el único punto que no excedió el límite de lixiviación es el P1. Finalmente, mercurio, plata y selenio no excedieron los límites o están por debajo del límite de detección. Por lo que las escorias se podrían clasificar como residuos no peligrosos, comparándolas con las escorias de hierro y acero, (la tabla se muestra en anexo III), donde dichas escorias, no son residuos peligrosos debido a que los niveles de lixiviación están por debajo del límite de detección.

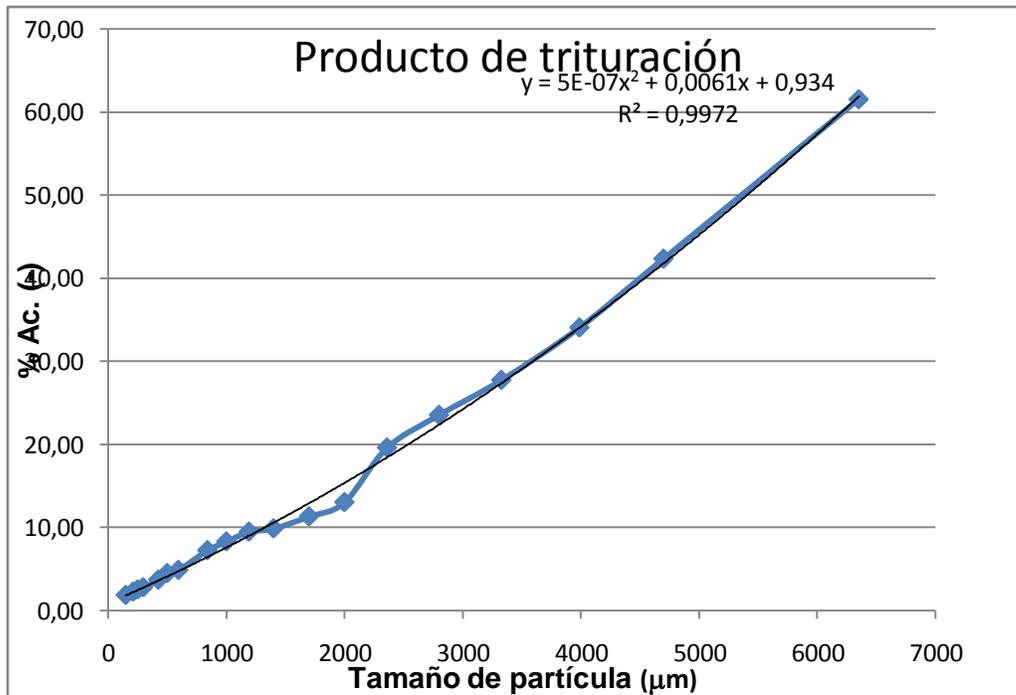
3.1.5 Dureza

La dureza es un parámetro físico, indicador de la facilidad de solubilizar los óxidos alcalinos. Por ejemplo, la caliza empleada por Jiménez (2008) para neutralizar un drenaje ácido presentó una dureza de 3 kw-h/ston. Este material fue fácilmente solubilizado para neutralizar el drenaje ácido en un tiempo de 3 horas.

A continuación se presentan los resultados del análisis granulométrico de la escoria colectada en el punto de muestreo número 31, (como ya se explicó con anterioridad, este punto representa la media del total de muestras analizadas). La granulometría (Tabla III.4) es necesaria para poder emplear la fórmula, que dará el valor relativo de dureza.

Tabla III.4 Resultados del análisis granulométrico (tamaño de partícula) de escoria de cobre para el estudio de dureza.

Malla	Tamaño final (µm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado (+)	% Acumulado (-)
1/4 in	6350	29.3	38.50	38.50	61.49
4	4699	14.6	19.18	57.68	42.31
5	3987,8	6.3	8.27	65.96	34.03
6	3327,4	4.8	6.30	72.27	27.72
7	2800	3.2	4.20	76.47	23.52
8	2360	3	3.94	80.42	19.57
10	2000	5	6.57	86.99	13.00
12	1700	1.3	1.70	88.69	11.30
14	1400	1.1	1.44	90.14	9.85
16	1191,26	0.3	0.39	90.53	9.46
18	1000,76	0.9	1.18	91.72	8.27
20	841	0.8	1.05	92.77	7.22
30	595	1.8	2.36	95.13	4.86
35	500	0.3	0.39	95.53	4.346
40	425	0.6	0.78	96.32	3.67
50	297	0.7	0.91	97.24	2.75
60	250	0.2	0.26	97.50	2.49
70	212	0.2	0.26	97.76	2.23
100	150	0.3	0.39	98.16	1.83
>		1.4	1.83	100.00	0.00
Total		76.1	100		



Gráfica.III.1 Distribución del tamaño de partícula, producto de la trituración de la escoria.

$$W = (10W_i/\sqrt{P80}) - (10W_i/\sqrt{F80})$$

$$W = Kw/h \text{ ston}$$

$$Kw = \frac{(I_c - I_v) V \sqrt{NF}}{1000}$$

$I_c = 4 \text{ A}$
 $I_v = 3.5 \text{ A}$
 $V = 125 \text{ volt}$
 $NF = 3$

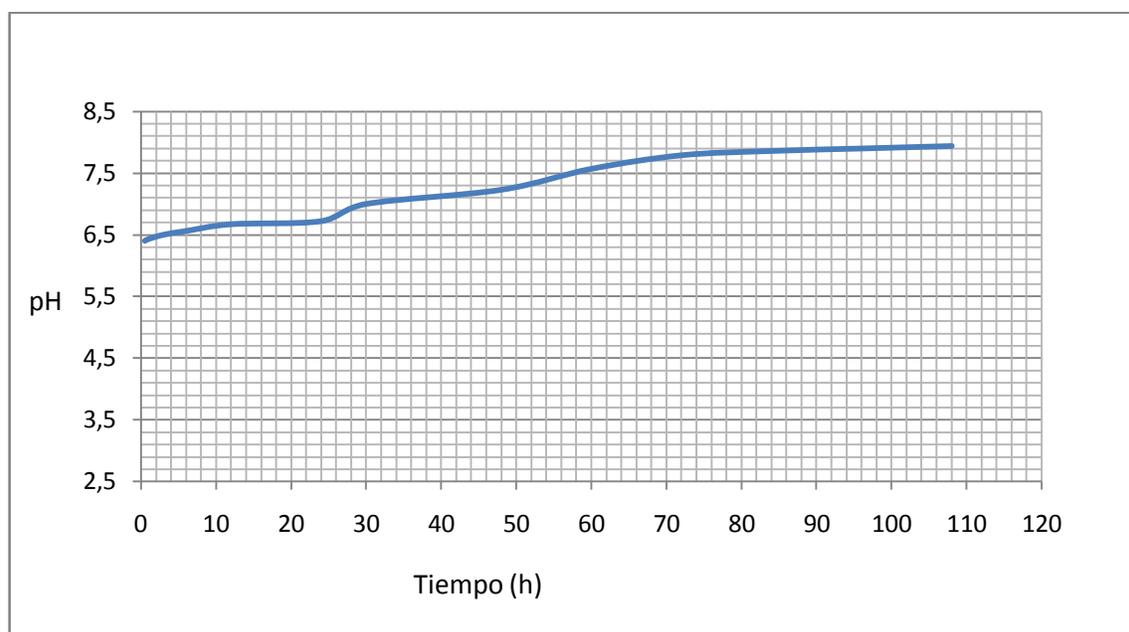
Obteniendo un valor de dureza relativa a partir del método directo de

$$W_i = 8.99kw\text{-ston/h} \quad \text{*Los cálculos se encuentran en el anexo IV}$$

Donde el valor de dureza del material es alto, indica que las contribuciones básicas son menores, pues al tener enlaces fuertes, lo que hará difícil la solubilización de las sustancias básicas, y por el contrario, entre menor sea el valor de dureza, mayor disposición de las sustancias con contribución básica y por consiguiente mejor neutralización.

III.1.6 Incremento de pH de agua destilada aplicando escorias de cobre

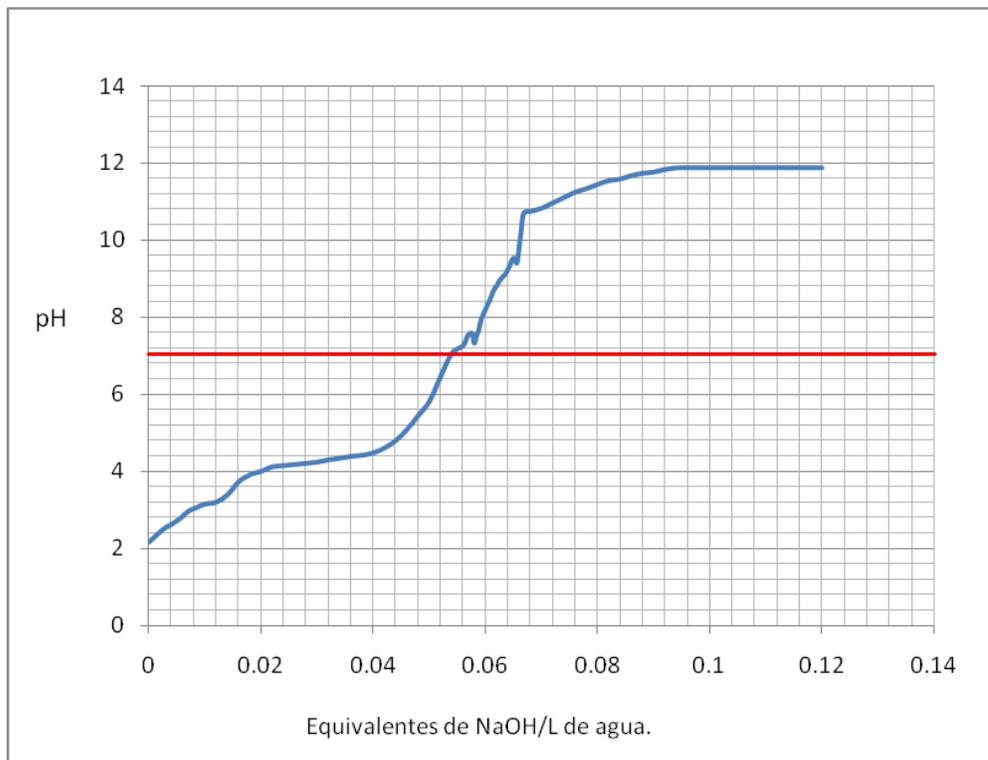
En la Gráfica III.2, se observa el comportamiento que presenta la escoria de cobre al ser colocada en agua destilada y mantenerse en agitación constante a 180 rpm. Claramente se observa que con un tiempo de contacto de 72 horas, el aumento de pH llega al equilibrio. El incremento alcanzado en ese tiempo fue de aproximadamente dos unidades de pH (el detalle de resultados se encuentra en Anexo II). Esta diferencia es significativa y se asocia a la solubilización de óxidos de metales alcalinos, sin embargo, el tiempo para alcanzar tal incremento fue muy largo, debido probablemente a que el contenido de estos compuestos no es muy elevado y también a que la dureza alta de este material no permite su solubilización en un menor tiempo.



Gráfica III.2 Incremento de pH en función del tiempo de contacto de agua destilada con escoria de cobre (malla 325) DOSIS 1x.

III.2 Pruebas de neutralización de drenaje ácido con NaOH

Con base en los datos obtenidos del contenido de óxidos de metales alcalinos (a partir del estudio de Fluorescencia RX), se determinó que la suma de las contribuciones básicas totales de la escoria de cobre fue de $(C_{bt})=0.075M /100g$ de escoria [cálculos mostrados en Anexo IV], a diferencia del NaOH que aporta, $2.5M /100g$. La contribución máxima de la escoria frente a la del NaOH es considerablemente menor; debido a que el hidróxido de sodio tiene una mayor pureza y es un reactivo analítico. Este reactivo fue empleado como patrón primario, por una mayor disposición de iones OH^- , resultado de su gran disociación en agua. La NaOH se clasifica como una base fuerte, a diferencia de la escoria que es un subproducto catalogado como base de fuerza media, de poca o nula pureza, pero de gran abundancia y muy bajo costo por tonelada. Sin embargo, para determinar el potencial real de neutralización de las escorias de cobre fue necesario realizar un estudio de la disponibilidad efectiva de las contribuciones básicas de la escoria, ya que éste dependerá de la facilidad de lixiviación de las sustancias básicas.



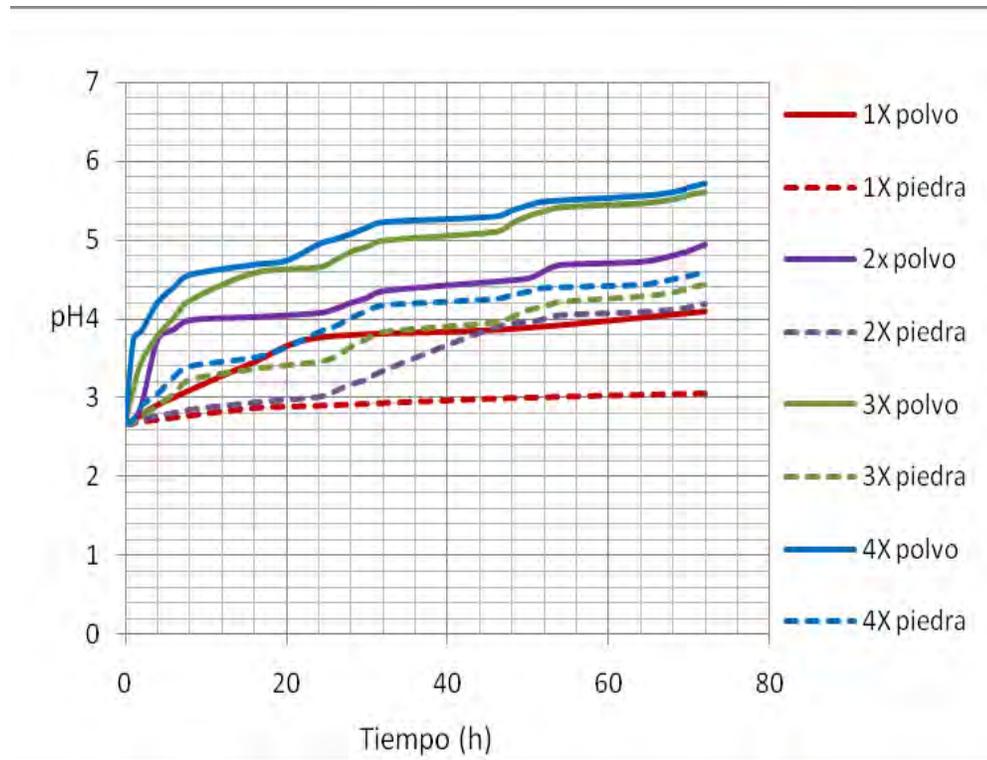
Gráfica III.3 Curva de neutralización del drenaje ácido de minas, colectado en una presa de jales, y utilizando una solución de NaOH 0.1 N.

Con los datos obtenidos de la Gráfica III.3 se determinó el número de equivalentes necesarios para aumentar el pH del drenaje ácido a pH=7, obteniendo que los equivalentes necesarios para obtener dicho valor fueron: 0.054 equivalentes de NaOH/L equivalentes a 18,360 mg de CaCO₃ /L.

III.3 Pruebas de neutralización de drenaje ácido de minas con escorias de cobre

Con base en los equivalentes de NaOH calculados para neutralizar drenaje ácido de minas, y aplicando el contenido teórico de óxidos metálicos alcalinos o “contribuciones básicas” de la escoria (Cbt=0.075M /100g de escoria), se determinó que la “cantidad total teórica” estequiométrica (1X) de escoria para neutralizar drenaje ácido fue de 8,000 mg de escoria/100mL de drenaje ácido, representando un valor alto en comparación con el empleo de NaOH (2,160 mg de NaOH / 100mL).

La Gráfica III.4 presenta los resultados obtenidos para las pruebas de neutralización de drenaje ácido con escoria en polvo y en gruesos. Por una parte, se observa que para la dosis estequiométrica calculada de escoria (1X), tanto en polvo malla>325(45µm) como en gruesos (malla 3.5, 5.60 mm), no se verificó la neutralización del drenaje ácido. Partiendo de un pH inicial muy bajo de 2.68 solamente se observó un incremento a un valor final de 4.5 empleando escoria en polvo y de 3.28 empleando escoria en piedra. Por otra parte, el incremento observado más notable fue empleando dosis de tres y cuatro veces (3X y 4X respectivamente) la estequiométrica calculada. En estos casos se obtuvo un incremento del pH para una dosis 3X hasta un valor de 5.63 empleando escoria en polvo y de 4.48 empleando escoria en gruesos. Para la dosis 4X se observó un incremento de pH a un valor de 5.72 para polvo y de 4.60 para gruesos. Las tablas de los datos se encuentran en Anexo IV.



Gráfica III.4 Neutralización de drenaje ácido (pH inicial = 2.68) empleando diferentes dosis de escoria en gruesos (malla 3.5, 5.60mm) y en polvo (malla >325, 45µm).

En la Gráfica III.4 también se observa, por una parte, que es necesario emplear dosis superiores a las calculadas debido a que no todos los óxidos metálicos con propiedades básicas están disponibles, por lo que su cinética de lixiviación es más lenta que la de aquellos que están más fácilmente disponibles (CaO y MgO libres y débilmente enlazados y ferrita dicálcica). Sin embargo, debido a que la cinética de lixiviación de otros óxidos de calcio y magnesio más fuertemente unidos, así como la wuestita, son más lentas no se logró alcanzar un pH neutro, por lo que la aplicación de escorias podría combinarse con otro compuesto básico como CaCO_3 para alcanzar la neutralización, lo que disminuiría significativamente los costos del proceso.

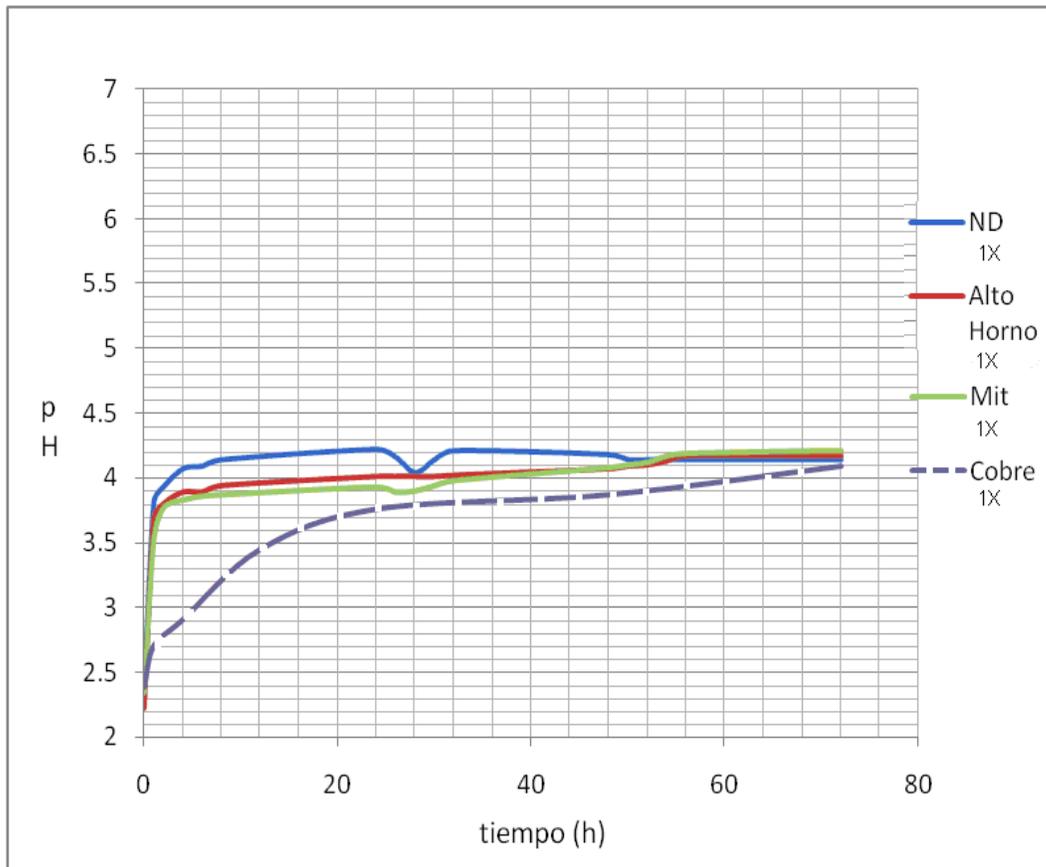
Por otra parte, se puede observar claramente la influencia del tamaño de partícula, es decir, al emplear escoria en piedra con granulometría 5.60 mm y escoria en polvo con granulometría 45 μm . Por ejemplo, para aumentar casi al doble el pH inicial (2.68) la curva de 1X en polvo fue similar a la de 3X en gruesos, es decir, con disminuir aproximadamente 10 veces el tamaño de partícula se logró disminuir también tres veces la dosis. Lo anterior, se debe a que al tener un tamaño menor la escoria en polvo, tiene mayor superficie de contacto y, por lo tanto, un mayor poder neutralizante, ya que tiene más disponibles las sustancias con características básicas.

Por lo tanto, se recomienda emplear la escoria en polvo, debido a que es necesario que los componentes de carácter básico de ésta tengan la mayor interacción posible con la solución a neutralizar, es decir, aumentar la superficie de contacto y lograr solubilizar el total o la mayor parte de sustancias básicas o alcalinas y poder observar un cambio notable en el valor del pH y por lo tanto disminuyendo su carácter ácido de la disolución neutralizada.

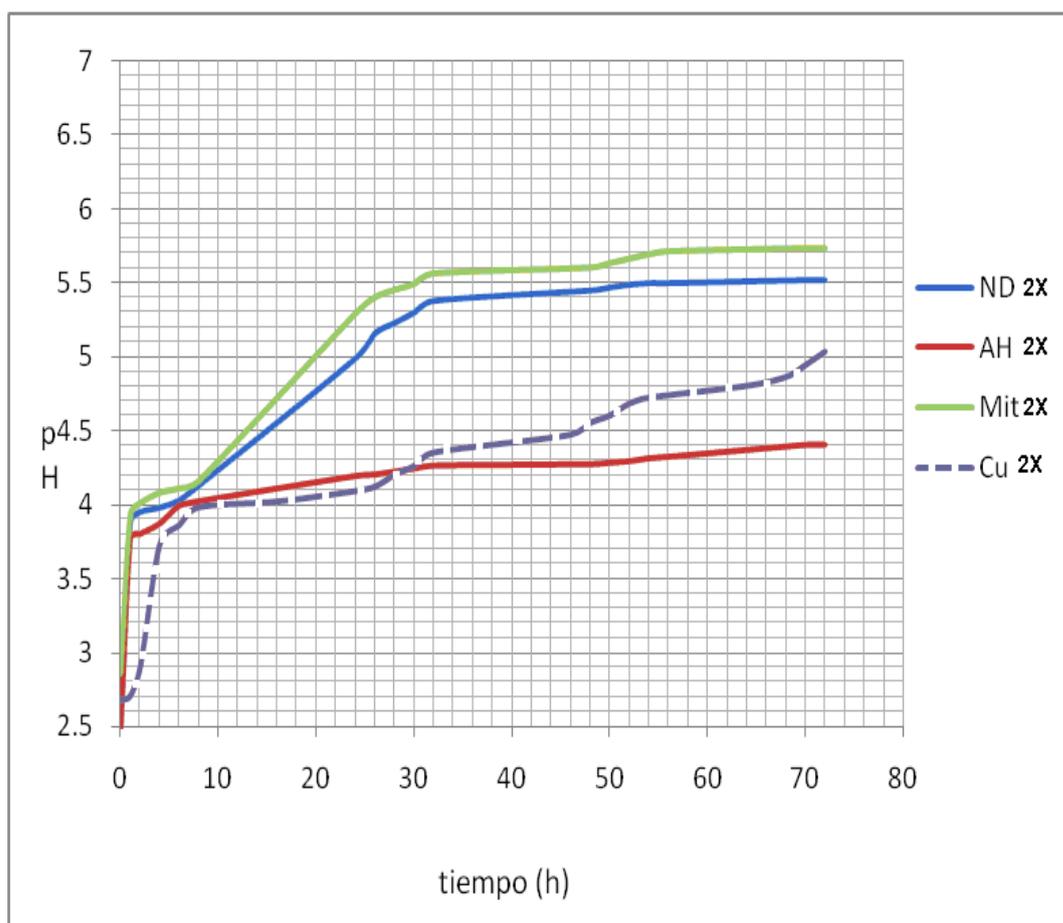
III.4 Comparación del poder neutralizante de la escoria de cobre respecto a escorias de acero y de hierro

Después de determinar que la escoria presentó un mejor desempeño cuando ésta tiene menor tamaño se decidió comparar su poder básico frente a tres escorias diferentes. Procedentes de otros procesos metalúrgicos y nombrándolas de la siguiente forma: Extracción primaria de hierro (AH), Reciclado de chatarra de hierro (ND), Proceso de aceración (Mitt). Como se mencionó en capítulos anteriores estas últimas escorias tienen “teóricamente” un mayor potencial de neutralización, el fin de esta comparación fue determinar las dosis y tiempos para la neutralización del drenaje ácido de mina.

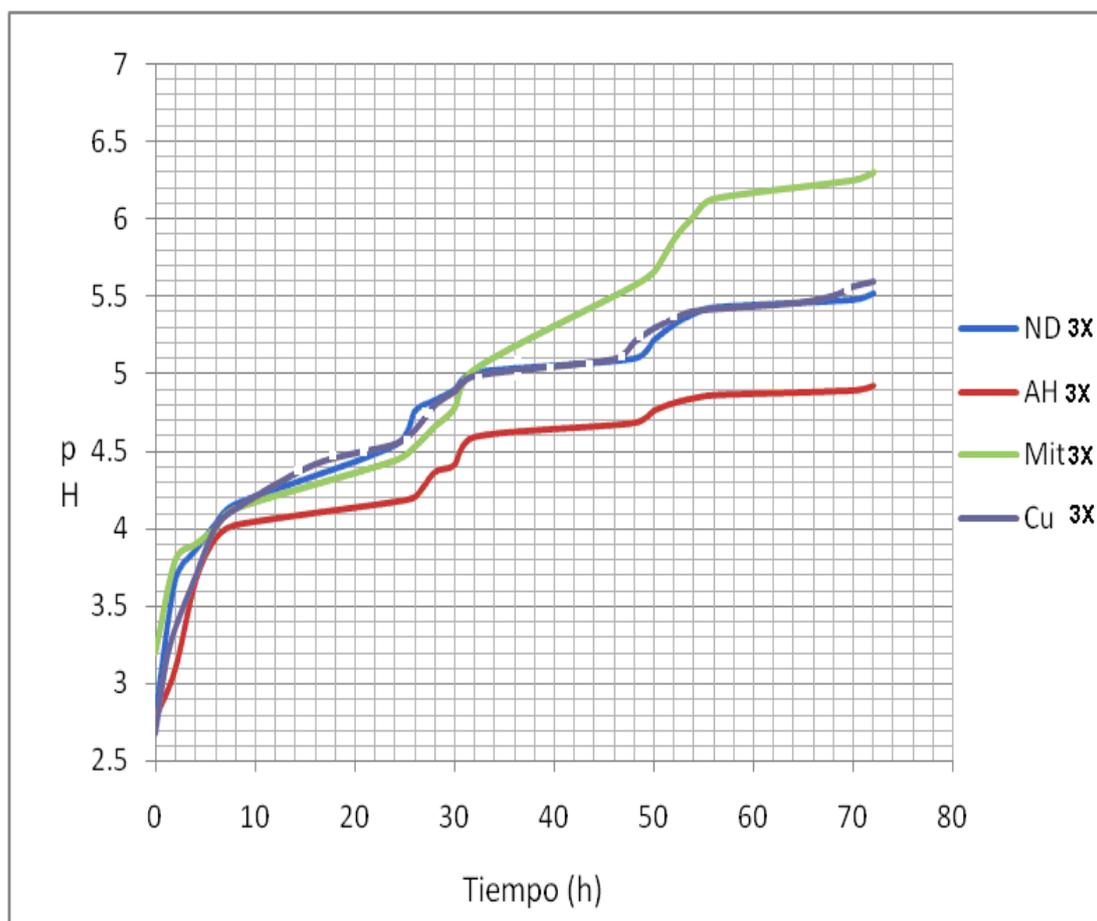
Se presentan los resultados comparativos para las cuatro escorias empleadas para la neutralización de drenaje ácido, partiendo de un pH inicial = 2.26.



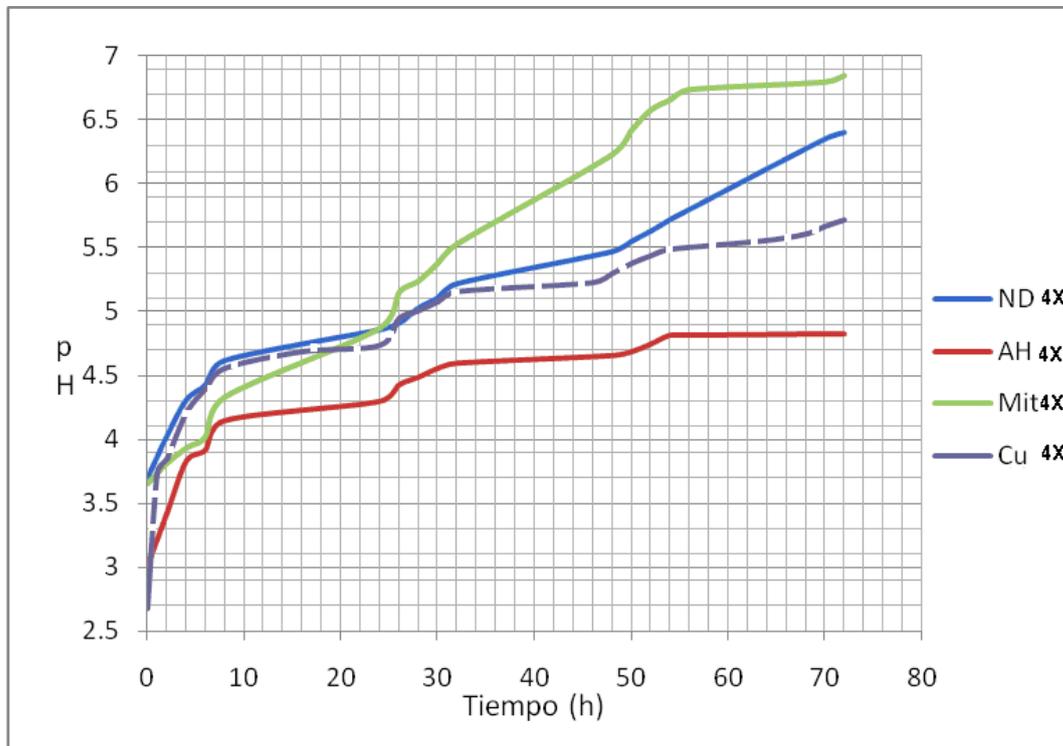
Gráfica III.5 Neutralización, en función del tiempo de contacto, de drenaje ácido empleando diferentes tipos de escoria en polvo (malla >325, 45µm) con una dosis estequiométrica (1X).



Gráfica III.6 Neutralización, en función del tiempo de contacto, de drenaje ácido empleando diferentes tipos de escoria en polvo (malla >325, 45 μ m) con una dosis de dos veces la estequiométrica (2X).



Gráfica III.7 Neutralización, en función del tiempo de contacto, de drenaje ácido empleando diferentes tipos de escoria en polvo (malla >325, 45 μ m) con una dosis de tres veces la estequiométrica (3X).



Gráfica III.8 Neutralización, en función del tiempo de contacto, de drenaje ácido empleando diferentes tipos de escoria en polvo (malla >325, 45 μ m) con una dosis de cuatro veces la estequiométrica (4X).

En las gráficas anteriores (de III.5 a III.8) se observa, la escoria de cobre presentó, para las dosis 1X a 3X, cinéticas de neutralización muy similares a las obtenidas para la escoria de reciclado de chatarra de hierro (ND), es decir, ambas produjeron valores de pH similares para tiempos similares. Además, se observa que es necesario emplear dosis superiores a la estequiométrica para alcanzar el valor más alto de pH, debido a que el pH inicial del drenaje ácido de minas, tuvo un valor muy bajo, y además no todos los compuestos básicos de estos materiales

Para dosificaciones superiores a la estequiométrica calculada (entre 2X y 3X), la escoria de cobre presentó mejores propiedades neutralizantes que la de hierro AH de un proceso de aceración, muy similares respecto a las

de hierro ND de reciclaje de chatarra y ligeramente inferiores respecto a las de acero Mit. .Para poder realizar un análisis de resultados bajo condiciones de equilibrio se recopilaron, para las cuatro dosis adicionadas de los cuatro tipos evaluados de escoria, el pH y tiempo para alcanzar el equilibrio (Tabla III.5).

Tabla III.5 Valores de pH y tiempo para alcanzar el equilibrio aplicando cuatro dosis de cuatro escorias a drenaje ácido de minas (pH inicial de 2.23).

Escoria	Dosis	pH en el equilibrio	Tiempo para alcanzar el pH de equilibrio (h)
Cobre (Cu)	1X (8 g/100 mL)	4.0	70
	2X (16 g/100 mL)	5.2	70
	3X (24 g/100 mL)	5.5	70
	4X (32 g/100 mL)	5.4	72
Hierro (AH)	1x (0.31g/100mL)	4.1	70
	2x (0.62g/100mL)	4.4	70
	3x (0.93g/100mL)	4.8	72
	4x (1.24g/100mL)	4.8	72
Hierro (ND)	1x (0.84g/100mL)	4.1	56
	2x (1.68g/100mL)	5.5	70
	3x (2.53g/100mL)	5.6	70
	4x (3.38g/100mL)	6.1	70
Acero (Mitt)	1x (0.39 g/100mL)	4.2	56
	2x (0.78g/100mL)	5.7	56
	3x (1.17g/100mL)	6.3	70
	4x (1.56g/100mL)	6.8	70

El tiempo para alcanzar el equilibrio del pH más elevado fue muy grande (70-72h) para todas las escorias y dosis aplicadas. La escoria más eficiente para neutralización de DAM fue la de acero Mit, pero con una dosis cuatro veces mayor a la estequiométrica.

Capítulo IV. Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se determinó que la escoria de cobre evaluada presentó propiedades básicas de fuerza media para la neutralización de drenaje ácido de minas (DAM).

La anterior conclusión se determinó con base en las siguientes conclusiones parciales:

- La determinación de las características fisicoquímicas de la escoria de cobre mostraron que estos materiales presentaron un contenido total relativamente bajo de óxidos de metales alcalinos (0.075 eq /100 gramos de escoria), comparado al de una escoria de acero (0.877 eq / 100 gramos de escoria), que es un material no convencional que es normalmente utilizado en la neutralización de drenaje ácido. Las escorias de cobre presentaron una dureza de 8 (escala directa) relativamente alta, respecto a otros agentes sólidos neutralizantes como la caliza (2.118 eq. / 100 gramos de piedra caliza), que podría dificultar la solubilización de los óxidos de metales alcalinos, disminuyendo su disponibilidad. Las partículas de estas escorias son muy lisas, lo que disminuye el área de contacto para su solubilización.
- La cantidad de escoria de cobre a aplicar para lograr los mejores resultados de neutralización del drenaje ácido de minas de una presa de jales, con base en pruebas de laboratorio, fue de 16 g/100 que equivale a tres veces la dosis teórica estequiométrica, calculada con base en el contenido total de óxidos de metales alcalinos. El aumento en la dosis teórica estequiométrica se podría atribuir a una baja disponibilidad de los óxidos alcalinos debido a su dureza, la cual es consecuencia de su composición.
- La comparación del poder básico de la escoria de cobre (CU) evaluada en la neutralización de un drenaje ácido de mina (DAM), con respecto al que presentan dos escorias de hierro y de acero permitió determinar que: para dosificaciones superiores a la estequiométrica calculada, la escoria de cobre presentó mejores propiedades neutralizantes que la de hierro AH, muy similares respecto a las de hierro ND de reciclaje de chatarra y ligeramente inferiores respecto a las de acero Mit.

Recomendaciones

Debido a que las escorias de cobre evaluadas no permitieron neutralizar el drenaje ácido en este estudio, se recomienda utilizar este material en una primera etapa, combinado con otro agente básico, por ejemplo de CaCO_3 , en una segunda etapa. Además, se recomienda realizar un estudio en columna y una estimación de costos para determinar la factibilidad económica de este proceso.

Con el sub producto resultante de la neutralización se recomendaría la aplicación de la escoria para otros procesos que ayuden a la reutilización y disminución de la gran cantidad de escoria.

Por mencionar algunas opciones viables de reutilización se encuentran:

- Fabricación de Hormigón
- Como agregado (pavimentación, cementos y / o balastro de ferrocarril)
- En rellenos sanitarios
- Como abrasivo de superficies
- Recuperación de metales secundarios

Entre otras opciones de aprovechamiento de, las cuales se detallan algunas en Anexo I.

Bibliografía

Bernardo, G., Marroccoli, M., Nobili, M., Telesca, A. y Valenti, G.L. (2007). The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production. Resources, conservation and recycling. V 52. (95-102).

Cano M., Rodríguez Maribona, I., Alfaro, I. (1999). PAVAL: The aluminium oxide recycling. Characteristics and applications. R'99 Congress (Recovery, recycling, re-integration), Bilbao España. Febrero.

Construaprende.(2008). Consulta en redes internacionales. Dirección electrónica: <http://www.construaprende.com/t/02>

Cribber Blast. (2008). Consulta en redes internacionales. Dirección electrónica: <http://criberblast.com/aplicaciones.html>

Durán Moreno A.,Luna Martínez J.,Ramírez Zamora R.M., Durán de Bazúa C. (2001) Propuesta de valoración de polvos y lodos de desecho de un proceso de producción de mezcla asfáltica, *Memoria del XLI Convención Nacional del IMIQ: Estrategias ante el nuevo milenio, la aportación de la ingeniería química*, Puebla, Puebla 3 al 5 de octubre de 2001 (Memorias en CD).

Euroslag. (2000). Consulta a redes internacionales. Consultada el 12/03/2007. Dirección electrónica: <http://www.euroslag.org/pages/use.html>

Huanosta Gutiérrez T., Ramírez Zamora R.M. (2007) Tesis: Reacciones de foto fenton soportadas sobre alúmina empleando escorias ,Facultad de Química, (23-38)

IECA. Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones. (2004). Consulta en redes internacionales. Dirección electrónica: <http://www.ieca.es>

Jímenez Hernandez J., Rámirez Zamora R.M. , (2008) Tesis: Tratamiento de agua y jales en un complejo minero de cobre mediante procesos físico químicos, Facultad de Química, (65-72).

Korkusuz E.A., Beklioglu M., Demirer G.N. (2004). Comparison of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey. *Ecological Engineering*. V 24. (187-200).

Lovera Dávila D., Arias V., Coronado Falcón R. (2004). La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. *Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG. Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, V 7, (26 –30).

Manso J.M., Polanco J.A., Losañez M. y González J.J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*. V 28. (528-534).

Nehrenheim E., Gustatson P. (2008), Kinetic sorption modeling of Cu,Ni,Zn,Pb and Cr ions to pine bark and blast furnace slag by using batch experiments. *Bioresource Technology* V. 99, (1571-1577).

Parada F., Sánchez M. y Valenzuela A. (1997). El manejo de residuos para aumentar el valor económico en las actividades mineras y metalúrgicas. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile

Sudbury Michael P. (Michael P. Sudbury Consulting Services Inc.); Kemp Denis J. The properties and uses of granulated non ferrous slags. *Source: TMS Annual Meeting, v 2006, EPD Congress 2006 - Proceedings of Sessions and Symposia sponsored by the Extraction and Processing Division of The Minerals, Metal and Materials Society held during the 2006 TMS Annual Meeting*, V 2006, (611-620).

Ramírez Zamora R.M., Domínguez Mora R., Durán Pilotzi A., Durán Moreno A. (2004). Detergents removal by adsorption and bio-adsorption processes with activated petroleum coke in wastewater treated for reuse. *Water Science & Technology*. V 50, 2 (91-98).

Ramírez Zamora R.M., Durán Moreno A., Luna Martínez J., Negrete Martínez F. 2000a. Factibilidad para utilizar los polvos y lodos generados en el proceso de producción de mezcla asfáltica. Informe elaborado para la Planta de Asfalto del Distrito Federal por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 0392. Diciembre de 2000.

Ramírez Zamora R.M., Espejel Ayala F., Chávez García L., Schouwenaars R. Optimization of the valorization conditions of sludges issued from drinking water treatment plants to elaborate ceramic products. *Journal of Environmental Health: Part A* (aceptado para publicarse en 2009).

Ramírez Zamora, R.M., Schouwenaars, R., Durán Moreno, A., Buitrón Méndez, G. 2000b. Production of activated carbón from petroleum coke and its application in water treatment for the removal of metals and phenol. *Water Science & Technology*. V 42, No. 05-06 2000, (119-126). ISSN 0273-1223.

Riveros G., Utigard T.A. (2000). Disposal of arsenic in copper discharge slags. *Journal of hazardous materials*. V 77, (241-252).

Runic E., Burzynska L. y Gumowska W. (2008). Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag. *Minerals Engineering*. V 7 (98-101)

Sakadevan K. y Bavor H.J. (1998). Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research*. V 32, No.2. (393-398).

Samet B. y Chaabouni M. (2004). Characterization of the Tunisian blast furnace slag and its application in the formulation of a cement. *Cement and Concrete Research*. V 34.(1153-1159).

Shi C. 2004. Steel slag- Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. V 16, 3. (230-235).

Shi C., Meyer C., Behnood A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. V52. (1115-1120).

Tixier R., Devaguptapu R., Mobasher B. (1997). The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*. V 27.(1569 –1580).

Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsvilis S. y Koroneos C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of hazardous materials*. V152. (805-811).

Valenzuela A., Balladares E., Sánchez M. y Cordero D. (2006). Arsenic management in the metallurgical industry: The Chilean experience. *Sohn International Symposium, advanced processing of metals and materials. Legal, management and environmental issues*, F. Kongoli and R.G. Reddy (Editors). TMS (The minerals, metals & materials society) V 9.(407-422).

Wang S. (2007). A comparative study of Fenton and Fenton – like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. *Dyes and pigments*, V 135 (1–7).

Wu S., Xue Y., Ye Q. y Chen Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and environment*. V 42. (2580-2585).

Xian W. y Qing-Sheng C.(2006). Steel slag as an iron fertilizer for corn grown and soil improvement in a pot experiment. *Pedosphere*. V16, No. 4. (519-524).

Zain M.F.M., Islam M.N., Radin S.S. y Yap S.G. (2004). Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. *Cement and concrete composites*. V 26. (845-851).

A1.1 Impacto del cobre en la sociedad

Desde tiempos históricos el hombre ha dependido de los metales, donde los ancestros empleaban junto con los instrumentos de piedra otros compuestos como cobre puro, existiendo la primera interacción del hombre con los metales desde 2500 a 1800 a.C., incorporándolos a la vida cotidiana, como parte de su desarrollo. Este periodo en el que junto con la piedra pulimentada se usa el cobre puro, se llama Eneolítico (lat. *aenēus*=cobre; gr. *λίθος*, líthos=piedra), o Calcolítico, **Calcolítico** (gr. *Χαλκος*, jalkos=cobre; gr. *λίθος*, líthos=piedra) que es una etapa intermedia entre la *Edad Moderna de la Piedra* y la Edad del Bronce. La Edad de los Metales comienza propiamente cuando se aprende a mezclar el **cobre** con el estaño, obteniéndose así el bronce y dando pie a toda un área de estudio que se ha perfeccionado y ha innovado hasta nuestros tiempos, tomando parte vital en el desarrollo del hombre mismo.

Sin embargo cabe destacar que el Impulsor fundamental del nacimiento y desarrollo de las primeras civilizaciones, fue el descubrimiento del **cobre** que representó un hito clave para la historia de la humanidad y que marcó definitivamente, el comienzo de una nueva era en la vida del hombre.

A1.2 Datos generales del cobre

La producción de **cobre** se ha multiplicado y expandido en forma global, ampliando permanentemente sus usos, aleaciones y aplicaciones. Hoy, el cobre es un elemento fundamental en la industria, las artes, la alimentación, la arquitectura, la vivienda y prácticamente en todas las ramas de las actividades humanas, que tienen en este metal un aliado fundamental para su subsistencia y su desarrollo a favor de una mejor calidad de vida.

El **cobre**, se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, caracterizada por ser

los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes de tipo eléctricos y electrónicos.

El **cobre** forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas

En la mayoría de sus compuestos, el cobre presenta estados de oxidación bajos, siendo el más común el +2, aunque también hay algunos con estado de oxidación +1.

Expuesto al aire, el color rojo salmón inicial se torna rojo violeta por la formación de óxido cuproso (Cu_2O) para ennegrecerse posteriormente por la formación de óxido cúprico (CuO). La coloración azul del Cu^{+2} se debe a la formación del ión $[\text{Cu}(\text{OH}_2)_6]^{+2}$.

En general la química del cobre es muy amplia pues su versatilidad química radica en la posibilidad de formar diversas aleaciones como: Bronce (Cu-Sn), Alpaca (Cu-Ni-Zn), Cobre-cromo (Cu-Cr), Cobre-cromo-circonio (Cu-Cr-Zr), Cobre-aluminio (Cu-Al), Cobre-hierro-fósforo (Cu-Fe-P), Manganina ($\text{Cu}_{86}\text{Mn}_{12}\text{Ni}_2$), entre otras.

A1.3 El cobre en Estado Natural

Se encuentra nativo principalmente en EE. UU., Bolivia, Chile, México y Japón. Combinado se halla el Azurita ($\text{CO}_3\text{Cu} \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), también la Cuprita (Cu_2O) y la Calcopirita (S_2FeCu) que es el principal mineral utilizado en la obtención del cobre. En la República hay yacimiento de Calcopirita y Cuprita en la cordillera norte.

A.1.3.1 Obtención

El método seguido en la industria para extracción del cobre son principalmente dos tipos como lo son la vía seca y la vía húmeda. El más importante en algunos países es por la vía seca, que se basa en proceso de tostación y fusión del mineral.

El proceso comúnmente empleado para la extracción de cobre en México es el conocido como vía húmeda, que comprende diversas etapas, dentro de las cuales no todo es producto, es decir, existen diversos residuos y subproductos.

Extracción del cobre (Comercialmente)

El cobre nativo suele acompañar a sus minerales en bolsas que afloran a la superficie explotándose en minas a cielo abierto. El cobre se obtiene a partir de minerales sulfurados (80%) y de minerales oxidados (20%), los primeros se tratan por un proceso denominado piro metalurgia y los segundos por otro proceso denominado hidrometalurgia.

Generalmente en la capa superior se encuentran los minerales oxidados (cuprita, melaconita), junto a cobre nativo en pequeñas cantidades, lo que explica su elaboración milenaria ya que el metal podía extraerse fácilmente en hornos de fosa, por debajo del nivel freático, donde se encuentran las piritas primarias o sulfuros como la calcosina (CuS_2) y covellina (CuS) y finalmente las secundarias como la calcopirita (FeCuS_2) cuya explotación es más rentable que la de las anteriores. Acompañando a estos minerales se encuentran otros como la bornita (Cu_5FeS_4), en general, se sabe que los cobres grises y los carbonatos azurita y malaquita que suelen formar masas importantes en las minas de cobre por ser la forma en la que usualmente se alteran los sulfuros.

- **Trituración:** etapa en la cual grandes máquinas reducen las rocas a un tamaño uniforme de no más de 1,2 cm.

- **Molienda:** grandes molinos continúan reduciendo el material, hasta llegar a unos 0,18 mm, con el que se forma una pulpa con agua y reactivos que es llevada a flotación, en donde se obtiene concentrado de cobre. En esta parte, el proceso del cobre puede tomar dos caminos: el de la fundición y electro refinación, o el de la lixiviación y electro obtención

- **Fundición:** para separar del concentrado de cobre otros minerales (fierro, azufre y sílice) e impurezas, este es tratado a elevadas temperaturas en hornos especiales. Aquí se obtiene cobre RAF, el que es moldeado en placas llamadas ánodos, que van a electro refinación.

- **Lixiviación:** es un proceso hidrometalúrgico, que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una mezcla de ácido sulfúrico y agua.

- **Electro refinación:** los ánodos provenientes de la fundición se llevan a celdas electrolíticas para su refinación. De este proceso se obtienen cátodos de alta pureza o cátodos electrolíticos, de 99,99% de cobre.

- **Electro obtención:** consiste en una electrólisis mediante la cual se recupera el cobre de la solución proveniente de la lixiviación, obteniéndose cátodos de alta pureza.

- **Cátodos:** obtenidos del proceso de electro refinación y de electro obtención, son sometidos a procesos de revisión de calidad y luego seleccionados, pesados y apilados.

- **Despacho y transporte:** los cátodos son despachados en trenes o camiones hacia los puertos de embarque y desde ahí, a los principales mercados compradores.

La tecnología de obtención del cobre está muy bien desarrollada aunque es laboriosa debido a la pobreza de la ley de los minerales. Los yacimientos de cobre contienen generalmente concentraciones muy bajas del metal. Ésta es la causa de

que muchas de las distintas fases de producción tengan por objeto la eliminación de impurezas.

Aun cuando la producción minero-metalúrgica en general podría ser afectada a corto plazo debido a las crecientes restricciones ambientales incluidas en las normativas nacionales e internacionales, particularmente aquellas que tienen que ver con el manejo de residuos masivos como: minerales de baja ley, relave de plantas concentradoras y escorias piro metalúrgicas.

Proceso de extracción y purificación de cobre empleado industrialmente se ilustra en la figura A1

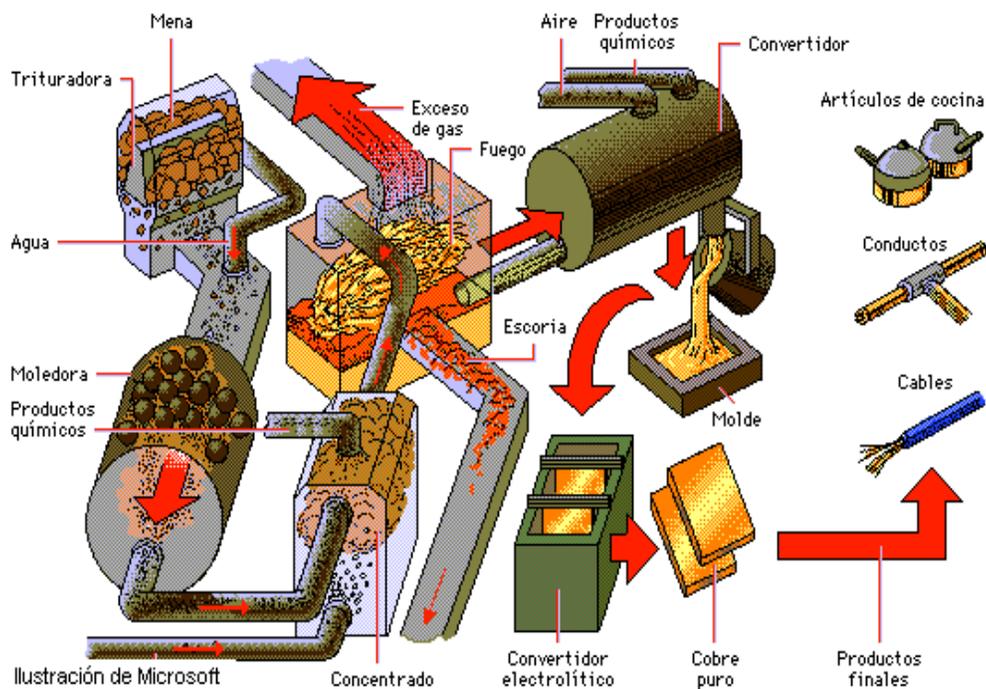


Figura A1. Obtención de cobre industrial [Microsoft, Encarta 2008]

A1.4 Producción de cobre

Según la revista *Área Minera*, el mercado mundial de cobre refinado registrará un superávit en el 2010 de alrededor de 176.000 toneladas más, frente a uno previsto

en el 20011 de alrededor de 239.000 toneladas más. Así lo informó el Grupo Internacional de Estudios sobre el Cobre (GIEC). La producción de cobre refinado está estimado que crezca a 18,059 millones de toneladas el próximo año, en Chile, mientras que el consumo fue pronosticado en 17,884 millones de toneladas, precisó el grupo, La producción de cobre en las minas fue prevista en 16,204 millones de toneladas frente a 15,166 millones de toneladas este año.

A1.4.1 Cifras de producción de cobre

Según el INEGI en nuestro país, se ha estimado una producción de 405 540 toneladas de cobre para el año 2005 a diferencia de los Estados Unidos de Norte América, donde su producción anual ascendió hasta 1 260 000 toneladas de producción primaria y 191 000 toneladas de producción secundaria de cobre [US Geological Survey.]

Mientras que la Comición Chilena de Cobre publico en el mismo año que en Australia se registro una producción de 5 321 000 toneladas, 569 000 toneladas en Canadá,745 000 toneladas para china y 5 321 000 de toneladas en Chile.

A1.5 Reutilización de Escoria Minera como opción viable

Dada la problemática que representa la cantidad significativa de escorias producidas y los riesgos ecológicos que éstas representan, se han buscado alternativas viables para la reutilización de dichos materiales. En la actualidad dicho material es empleado en diversos ámbitos industriales, con la finalidad de alargar su vida útil, algunas de dichas propuestas se enlistan a continuación.

- Fabricación de hormigón o cementos, agregados de concreto
-
- Como base para la pavimentación, para obras de saneamiento de caminos, autopistas, estacionamientos, relleno y nivelación de terrenos

- Auxiliar en la remediación y acondicionamiento de suelos sulfato-ácidos, como fertilizante y agente neutralizante de drenaje ácido
- Balasto de ferrocarril
- Abrasivo para limpieza de superficies y desgaste de telas como pana y mezclilla
- Auxiliar en el tratamiento de aguas residuales; como lecho filtrante y adsorbente.
- Recuperación de Metales

En general las grandes pilas de escoria (que contiene tanto la escoria metálica como conjunto de compuestos no metálicos coordinados) están siendo procesadas para su uso en la construcción de carreteras, como balasto para ferrocarriles (teniendo como tratamiento, la trituración y clasificación de la escoria).

Gran parte de la fracción metálica (los descartados productos siderúrgicos en la pila) se elimina generalmente utilizando grandes imanes y separando así la parte con propiedades magnéticas, posteriormente son vendidos como chatarra de acero. Todas las categorías resultantes no metálicos tienen aplicaciones en la construcción, separándose en fracciones, la fina (- 1 / 8 pulg) es el de un particular interés para el drenaje ácido de minas (AMD), tratamiento sustentado por estudios realizados en el extranjero, comprobando que las escorias son una opción viable desde el punto de vista económico para la neutralización de drenaje ácido de minas, así como para la neutralización y recuperación de suelos sulfato ácidos debido a los contenidos de metales alcalinotérreos que éstas presentan [Rivero de Trinca y Adams, 2007].

A continuación se presenta un resumen de los principales estudios reportados

A1.5.1 Agregados

En el cemento tipo Portland se observan una serie de características muy peculiares con respecto a otros materiales en el ámbito de la construcción. El cemento es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto, y está compuesto principalmente de óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%.

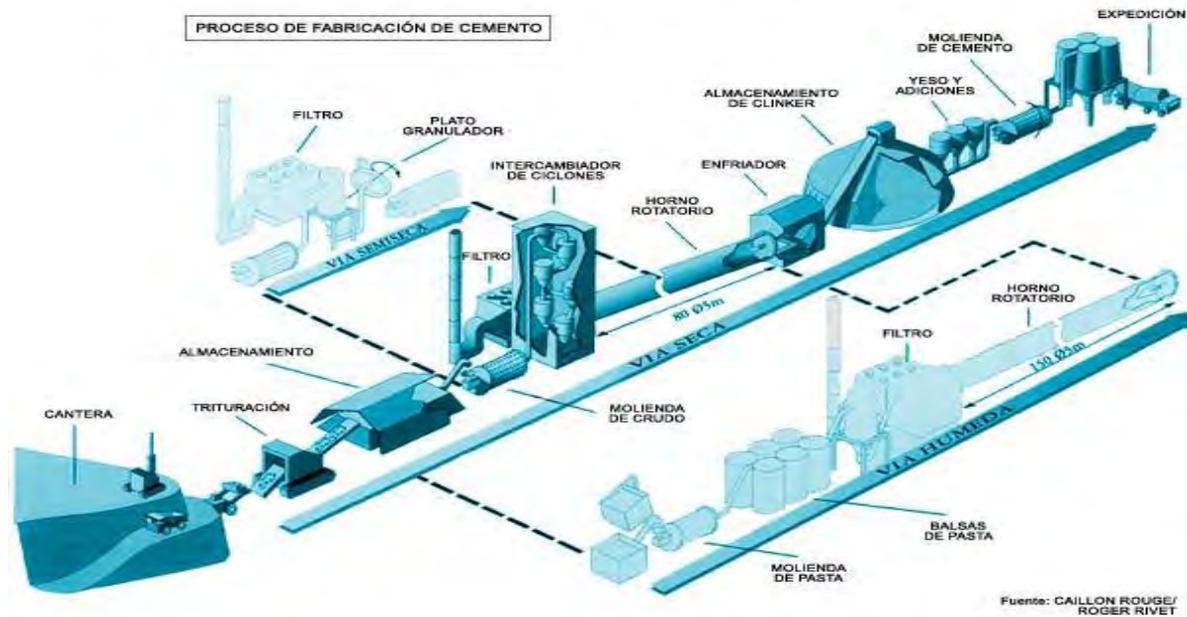


Figura A1.1 Proceso de fabricación del cemento [IECA, 2004]

Las fases presentes comprenden principalmente silicatos de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) y en menor proporción aluminato de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y ferro aluminato de Calcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Las propiedades del endurecimiento del cemento se logran mediante una mezcla de este con agua. Esto resulta en la formación de productos de hidratación, que poseen cualidades ligantes y un valor bajo de solubilidad en agua, en la industria a menudo se utiliza *escoria granular* de alto horno pulverizada en combinación con el mortero de cemento Portland como parte de una mezcla de cemento. Este tipo de escoria reacciona con el agua para producir propiedades cementosas.

Es decir, el mortero que contiene escoria granular de alto horno desarrolla una gran resistencia durante largo tiempo, ofreciendo una mayor resistencia a la permeabilidad y mayor durabilidad. Como también se reduce la unidad de volumen de cemento Portland, el mortero es menos vulnerable al álcali-sílice y al ataque de sulfato.

A1.5.2 Relleno

Como se sabe un relleno sanitario es un lugar destinado a la disposición final de desechos o basura, en el cual se toman múltiples medidas para reducir los problemas generados por el exceso de basura, es por esto que el método de tratamiento de la basura mas empleado son los tiraderos, dichas medidas son, resultado del estudio meticoloso del impacto ambiental, económico y social, que van desde la planeación y elección del lugar hasta la vigilancia y estudio del lugar en toda la vida del vertedero.

En un relleno sanitario, a medida que se va colocando la basura, ésta es compactada con maquinaria y cubierta con una capa de tierra y otros materiales como tierra, grava cenizas, *escorias* y diversos materiales para posteriormente cubrirla con una capa de tierra que ronda los 40cm de grosor y sobre esta depositar otra capa de basura y así sucesivamente hasta que el relleno sanitario se da por saturado.

Es un método de ingeniería para la disposición de residuos sólidos en el suelo, de manera, que se le dé protección al ambiente, mediante el esparcido de los residuos en pequeñas capas, compactándolos al menor volumen práctico y cubriéndolos con suelo al fin de día de trabajo, previniendo los efectos adversos en el medio ambiente.

Además, como forma de minimizar el impacto ambiental y como implementación del Protocolo de Kioto los rellenos sanitarios incluyen tratamiento de lixiviados, que son los líquidos producidos por la basura, quema de gases de descomposición, principalmente el metano, planes de reforestación en el área del relleno sanitario y control de olores. Porque los residuos confinados sin tratamiento contienen un alto potencial peligro para el medio ambiente (daños en la impermeabilización en el transcurso de tiempo), en Europa ya tienen normas que exigen un tratamiento de los residuos antes de confinar para eliminar su potencial peligro tanto para el ambiente como la salud humana. Pero la vida sigue siendo dañada por estos

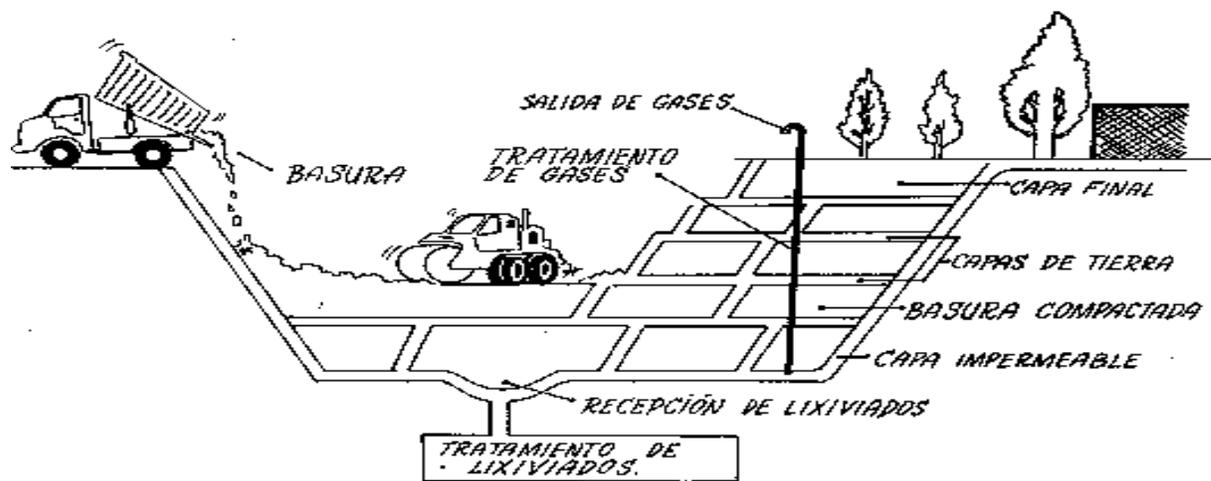


Figura. A1.2 Relleno sanitario típico

A1.5.3 Abrasivo

Abrasión se define como la operación de "arrancar" partículas de un material por efecto y acción de la fricción ejercida contra otro material, en el que es casi siempre más duro que el primero. La importancia de las operaciones de abrasión reside en su función de corregir los defectos que van de lo notable hasta lo casi imperceptible de las operaciones precedentes.

Algunos de los abrasivos industriales más conocidos usualmente son: la granalla de acero, granalla de acero inoxidable; ambas en su forma redonda y angular, proveniente del alambre cortado, la micro esfera de vidrio, óxido de aluminio, granalla de aluminio, escoria de cobre; son sólo algunos ejemplos de los distintos tipos de abrasivos más utilizados actualmente en la industria.

Desde finales del siglo XIX la compañía minera francesa "El Boleo", explotó minas de cobre en Santa Rosalía, Baja California Sur y en la obtención de metal se produjeron miles de toneladas de escoria y fue depositada en los alrededores de la mina. Esta es una escoria negra y roja, brillante, angular e inodora, con una dureza de 7-8 escala de Mohs.

A1.5.4 Agentes neutralizantes

En la actualidad existen diversas alternativas para la neutralización de sustancias de carácter ácido y con alta pureza, pero como en todo, tienen ventajas y desventajas, dentro de las cuales predominan el alto costo, o la baja pureza, a continuación se describen algunas otras opciones para neutralización de agentes ácidos.

a) Derivados de amonio

Estos compuestos, tienen alta facilidad para disociarse y dar paso a la generación de compuestos básicos esto es debido a que estos compuestos. En soluciones acuosas, el amoníaco desprotona una pequeña fracción del agua para dar iones de amonio e hidróxido según el siguiente equilibrio químico:



Con una constante de basicidad (K_b) de 1.8×10^{-5} , en un mol de solución de amoníaco, cerca de 0.42% del amoniaco ganará protones para convertirse en iones de amonio (equivalente a un pH de 11.63).

El amoníaco acuoso es usado en análisis cualitativos de inorgánicos. Como muchas aminas, este muestra una coloración azul en soluciones de cobre (Cu^{2+}).

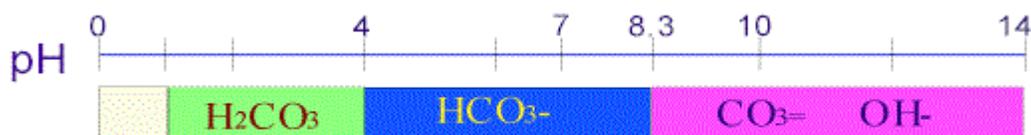
Las soluciones de amoníaco pueden disolver residuos de plata, tales como los formados por el Reactivo de Tollen. También pueden disolver metales reactivos tales como el aluminio y el zinc, con la liberación de gas de hidrógeno. Cuando el hidróxido de amonio es mezclado con peróxido de hidrógeno con la presencia de un ion metálico, como el Cu^{2+} , el peróxido experimenta una rápida descomposición.

La principal desventaja es que la pureza de este compuesto se encuentra entre el 19% - 50% de forma comercial, lo que haría que la eficiencia de la reacción disminuya, además de la posibilidad de formar sustancias no deseadas y lodos.

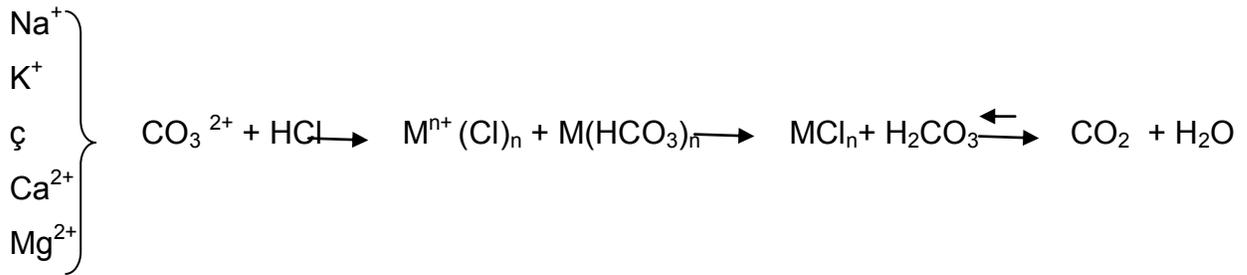
b) Carbonatos

Los compuestos como el Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) Carbonato de Calcio (CaCO_3), son sustancias comúnmente utilizadas por su facilidad de reacción, sobre todo en el tratamiento de agua con carácter ácido, esto es debido a sus características químicas. Es decir tiene la facilidad de neutralizar debido a su comportamiento como amortiguador ($\text{pH}=7$) y a la relación estequiométrica que guarda, por ser aceptor de hasta dos protones .

Tabla 1.5 Zonas predominantes de especies en función del pH.



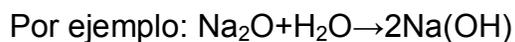
Zonas de predominio de las especies en función del pH



La ventaja de utilizar este tipo de sustancias, es que no existen reacciones secundarias, no deseadas o que impliquen algún riesgo a la salud o al medio ambiente, también, la facilidad de conseguir la sustancia, por ejemplo, la piedra caliza en su forma natural, presenta una pureza del 95% de CaCO_3 . Lo que representa un menor costo por la fácil disposición industrial y facilidad para el control o monitoreo de pH, frente a otros agentes neutralizantes.

c) Óxidos básicos

Los óxidos básicos son aquellos formados con un metal + oxígeno, los óxidos de elementos menos electropositivos tienden a ser básicos. Se les llaman también anhídridos básicos; ya que al agregar agua, pueden formar hidróxidos básicos.



La desventaja de estas sustancias es, que aún cuando se tenga una alta pureza, no existe economía molecular puesto que a diferencia de los carbonatos, la relación estequiométrica es 1:1, por lo tanto se requieren grandes cantidades del óxido

d) Bases fuertes

Una base fuerte es aquella que no se disocia cuantitativamente en disolución acuosa, en condiciones de presión y temperatura constantes. Además fundamentalmente son capaces de aceptar protones H^+ y son muy utilizadas para neutralización de ácidos de

fuerza alta, media o débil , esto es debido a su alta pureza, dan como resultado generalmente la sal correspondiente y agua .

Algunos ejemplos de bases, ordenadas de más a menos fuertes:

- KOH, hidróxido de potasio
- Ba(OH)₂, hidróxido de bario
- CsOH, hidróxido de cesio
- NaOH, hidróxido de sodio
 - Ca(OH)₂, hidróxido de calcio o cal apagada

La problemática de la implementación es el alto costo de estos compuestos y que en su mayoría son reacciones muy exotérmicas, lo que dificultaría su manejo en escala industrial

Anexo II Fundamentos de las técnicas Analíticas

A 2.1 Fluorescencia de RX

Fundamentos del método

Los electrones se encuentran en el átomo distribuidos en los distintos niveles y subniveles de energía. Los electrones se sitúan en estos niveles ocupando primero aquéllos de menor energía hasta colocarse todos; a este estado de mínima energía del átomo se le denomina estado fundamental. Donde, bombardeando estos átomos con un haz de electrones o con fotones de rayos X, una pequeña parte de la energía se invierte en la producción del espectro característico de rayos X de los elementos que componen la muestra bombardeada. El proceso de producción de este espectro característico puede esquematizarse del modo siguiente:

Excitación: el choque de un electrón o fotón incidente con un electrón de las capas internas del átomo, produce la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en estado de excitado.

Emisión: este átomo en estado excitado tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones de niveles más externos para cubrir el hueco producido. En este proceso hay un desprendimiento de energía, igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X. A la excitación producida por bombardeo de electrones se le denomina excitación primaria, y a la radiación así obtenida se le llama radiación primaria. Los tubos de rayos X son fuentes de la radiación primaria; la radiación primaria se produce también en la microscopía electrónica, al ser irradiada una muestra por un haz de electrones, donde se utiliza para el análisis químico de la muestra (SEM+WDS, micro sonda electrónica).

Al proceso de excitación con otra radiación X se le denomina excitación secundaria, y la radiación X producida por excitación de otra radiación X se denomina radiación X secundaria o radiación de fluorescencia.

Es la radiación X secundaria característica la que se utiliza para el análisis químico en los espectrómetros de Fluorescencia de rayos X. Al ser, las energías de los distintos niveles electrónicos características para cada tipo de átomos, la radiación X emitida será característica para cada elemento, y, en principio, no dependerá de la sustancia química en la que se encuentre, ya que, en general, estas radiaciones están originadas por transiciones entre los niveles electrónicos internos, cuyas energías no se ven afectadas por el tipo de enlace existente.

Cuando la energía de los electrones que inciden sobre un átomo es igual con mayor que la energía del nivel K, puede producirse la expulsión de un electrón de dicha capa K, las transiciones desde niveles superiores dan lugar a una serie de radiaciones características de longitudes de ondas similares que constituyen la serie K (se denominan $K\alpha$, $K\beta$). Es la serie de mayor energía (menor longitud de onda). Si la vacante se produce en alguno de los subniveles de la capa L, las transiciones desde niveles superiores dan lugar a las radiaciones características de la serie L ($L\alpha$, $L\beta$). Lo mismo puede decirse para la capa M. Aunque el número de radiaciones características posibles para cada elemento es grande, en la práctica la intensidad de muchas de ellas es muy pequeña (probabilidad muy pequeña de que se produzca la transición electrónica que las origina), y no se pueden registrar con los equipos de medida; además, el número de radiaciones que se registran se limita todavía más, debido a que la diferencia de energía entre algunas de ellas es tan pequeña que aparecen juntas.

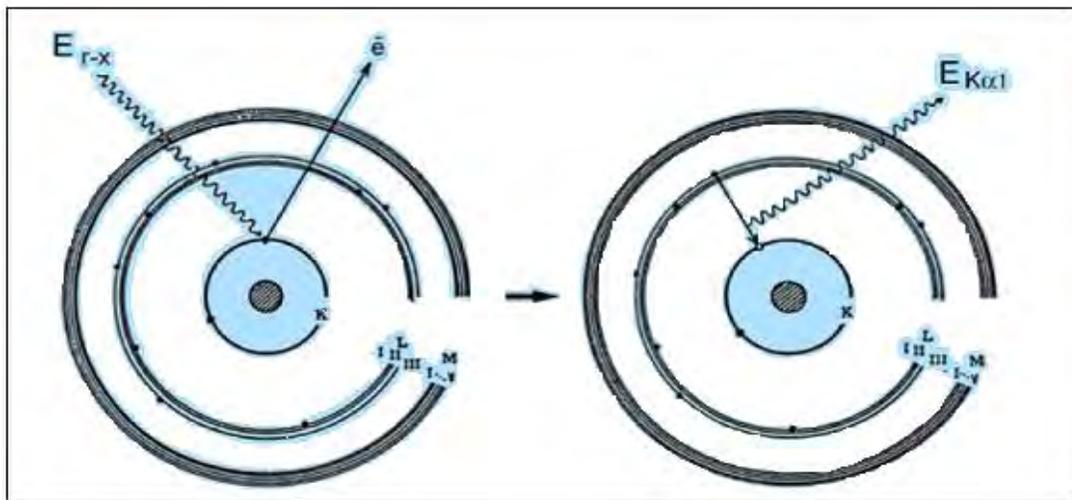
Esto hace que, en la práctica, el espectro característico de un elemento se deduzca a dos o tres a radiaciones de la serie K, y de cuatro a diez de la serie L. Las radiaciones de la serie M en la zona normal de trabajo únicamente suelen aparecer para los elementos más pesados.

La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) es una técnica de muestreo versátil, rápida y relativamente nueva, que reconoce un gran número de elementos químicos (no compuestos químicos) y presenta los resultados en tiempo real,

permitiendo decidir la necesidad de muestreo adicional ante resultados analíticos no concluyentes. Logra alcanzar unos límites de detección de hasta 0.002% (20 ppm).

La técnica EDXRF utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con una fuente emisora de rayos X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Entonces, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones: la llamada radiación X fluorescente o secundaria.

Esta radiación de fluorescencia es característica para cada elemento químico. Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis EDXRF es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía.



A2.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM,

sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden retrodispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200.000 veces o más y producir imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto.

La potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 ángstroms (1 ángstrom es 0,000000001 metros). La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 ángstroms. Todos los microscopios electrónicos cuentan con varios elementos básicos. Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra la muestra, creando una imagen aumentada.

Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones.

El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio electrónico. Los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características. Por último, todos los microscopios electrónicos cuentan con un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

A 2.3 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal:

$$n \lambda = 2 d \sin \theta$$

La difracción de rayos en muestra poli cristalina permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Los estudios de polimorfismo, transiciones de fase y soluciones sólidas, medida del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase, se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

A2.4 ICP - MS (Contenido de metales lixiviables)

La técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo, es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas. Las ventajas principales de esta técnica radican en la alta precisión, bajos límites de detección y bajo costo, analizando la mayoría de los elementos e isótopos presentes en la tabla periódica de manera simultánea en no más de un par de minutos. Es por lo tanto una técnica ideal en el análisis de aguas, lixiviados de rocas y minerales, entre otros. Además, desde los últimos años la utilización del láser acoplado al ICP-MS, permite el análisis de elementos trazas y tierras raras en minerales, fósiles, metales, semiconductores, etc., en un área de muestra de hasta 50 μm . La técnica de ICP-MS combina dos propiedades analíticas que la convierten en un potente instrumento en el campo del análisis de trazas multi elemental. Por una parte

obtiene una matriz libre de interferencias debido a la eficiencia de ionización del plasma de argón y por otra parte presenta una alta relación señal-ruido característica en las técnicas de espectrometría de masas (Fernández Ruiz, 2008). Para poder analizarlas estas muestras se sometieron a una digestión ácida en un microondas Microwave Sample Preparation System modelo MDS-2000. El análisis se realizó en un espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente marca Thermo Electron Corporation modelo IRIS INTREPID II XSP Duo. Las curvas de calibración y control de calidad se realizaron con un material de referencia High Purity QCS-26. Se utilizó un control de calidad de 5 mg/L.

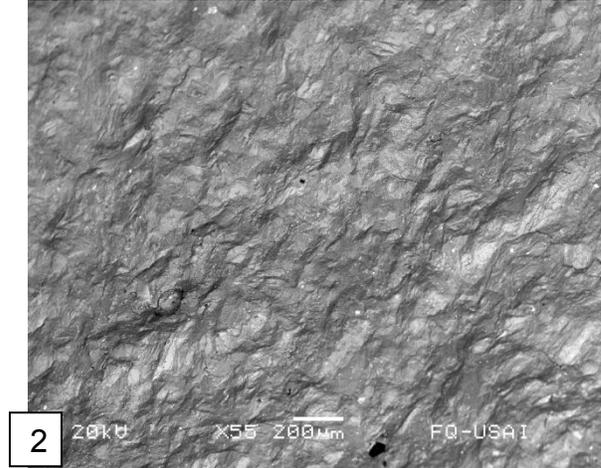
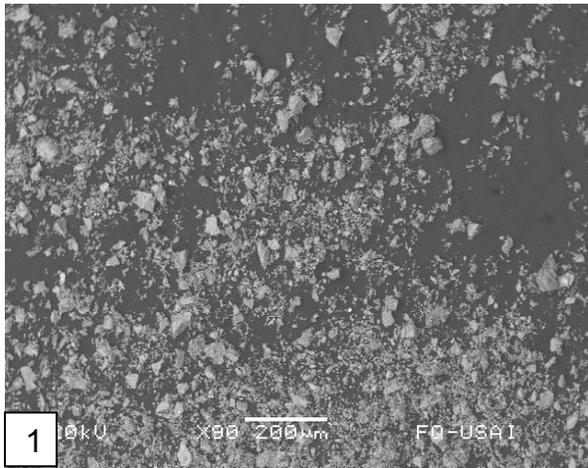
A 2.4 Dureza

La dureza como propiedad de un material, es la resistencia al rayado que presenta el mismo y nos sirve para conocer las características de nuestro material, y de esta forma poder estimar su comportamiento como agente neutralizante, es decir a mayor dureza menor disposición natural de los agentes neutralizantes (es decir, la escoria en su estado natural, como granalla), así mismo, estimar el costo para la molienda de escorias de cobre por tonelada (para aumentar el área de contacto disponible, para facilitar la reacción química, específicamente neutralización). En los procesos industriales de beneficio de los minerales, la propiedad que aporta un significado más cuantificable y aplicable es la dureza de un mineral en términos de energía, conocido como índice de trabajo W_i . A través de este parámetro es posible conocer: a) la dureza y cambios de esta propiedad del mineral previo a su procesamiento, con el objeto de programar acciones de control de los procesos de trituración, molienda y su clasificación, b) cálculo y selección del equipo adecuado de trituración y molienda y c) como elemento fundamental en el diseño de circuitos de reducción de tamaño de partícula.

Anexo III Resultados de Caracterización de escorias

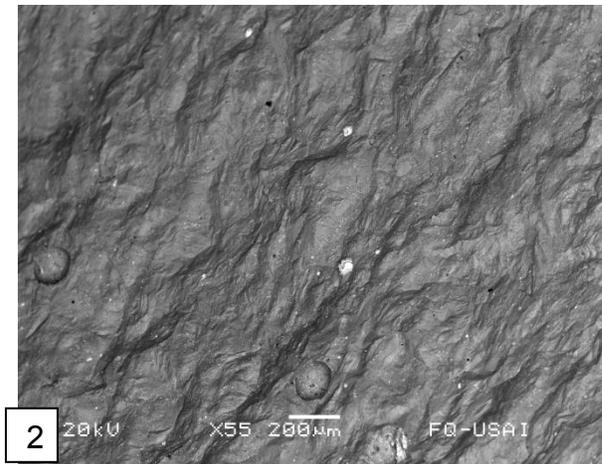
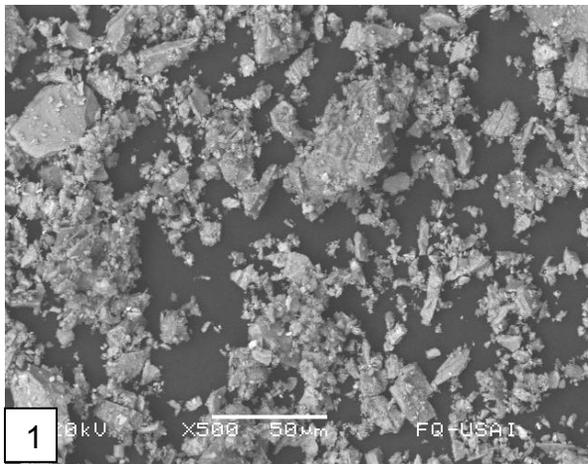
A 3.1 Micrografías de escoria de cobre por MEB

- Punto 1



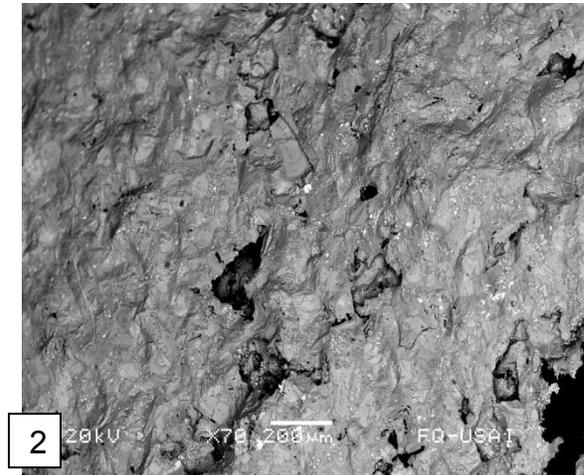
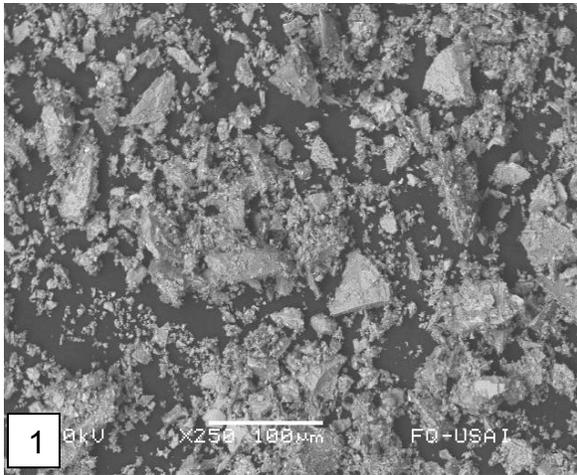
Micrografías A3.1 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 200µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 5



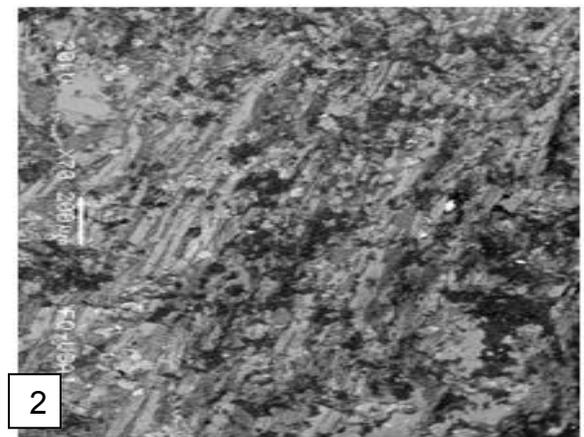
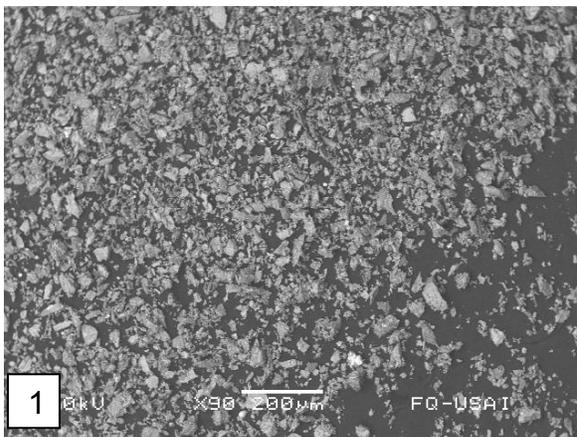
Micrografías A3.2 de la superficie de escoria en polvo¹ con una magnitud equivalente de 50µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 7



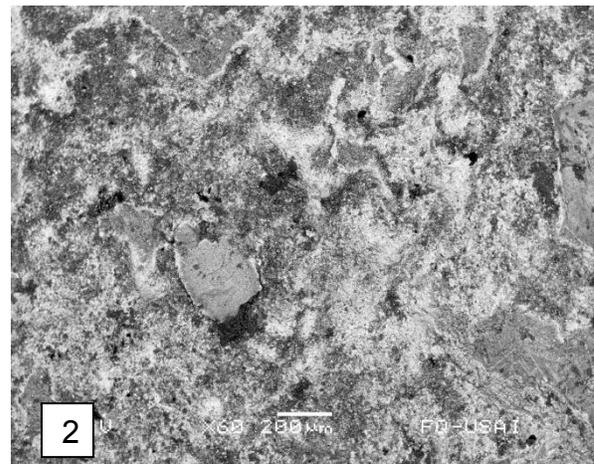
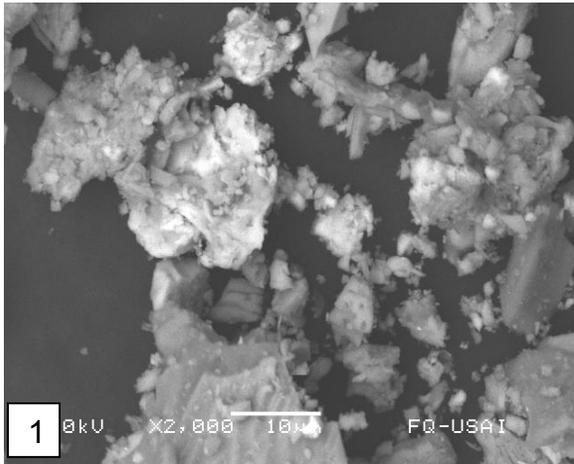
Micrografías A3.3 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 11



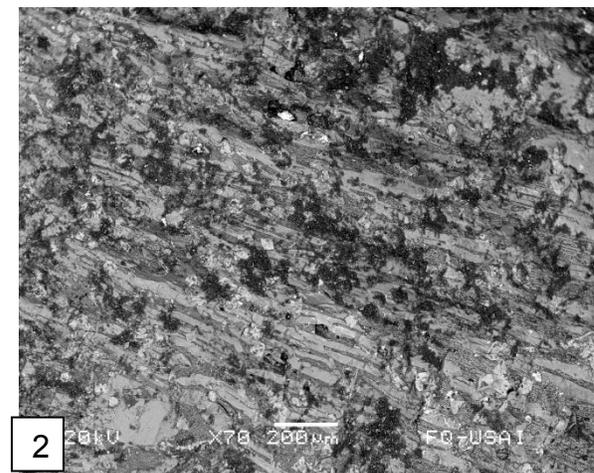
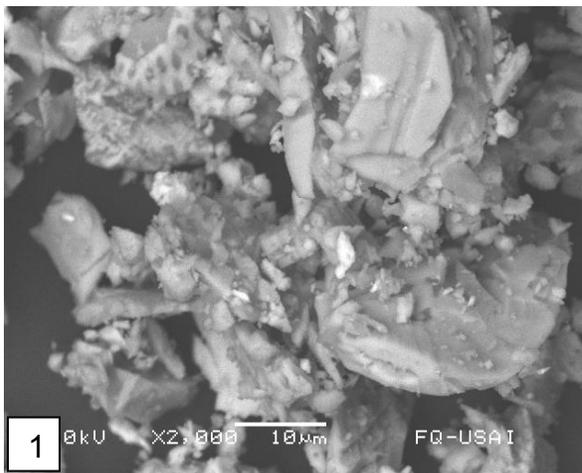
Micrografías A3.4 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 200µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 16



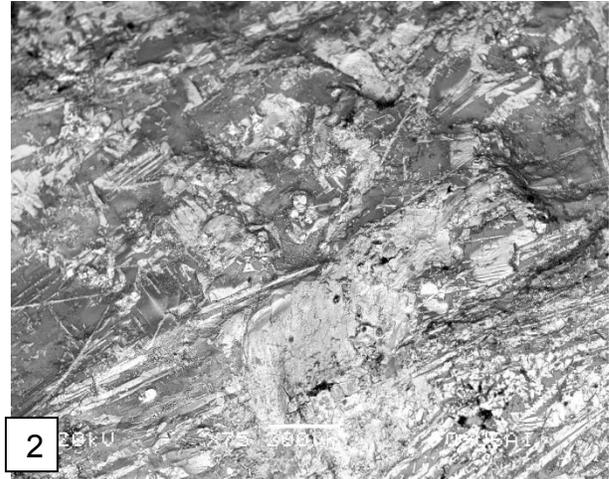
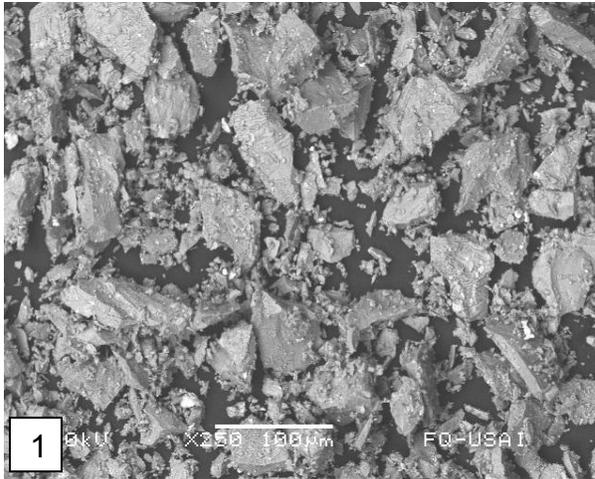
Micrografías A3.5 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 21



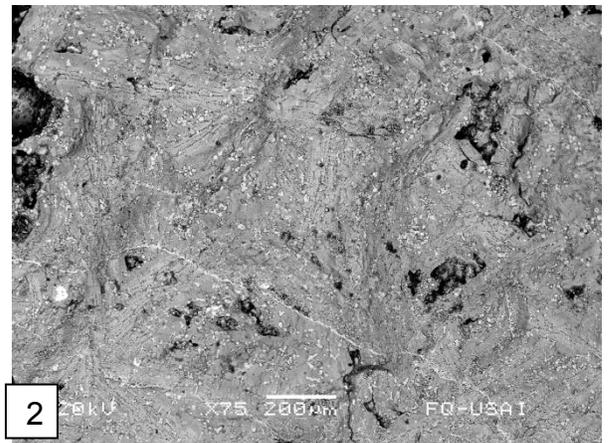
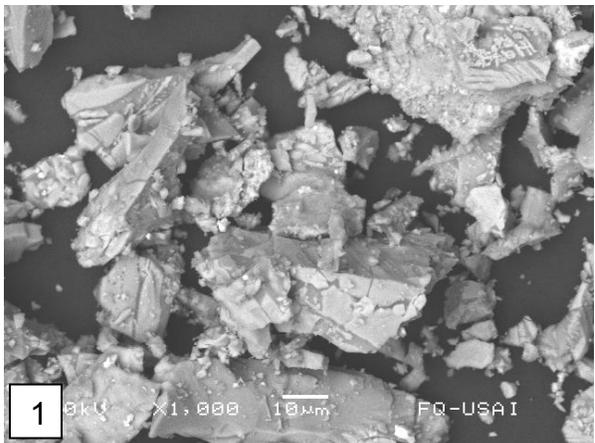
Micrografías A3.6 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm.

- Punto 22



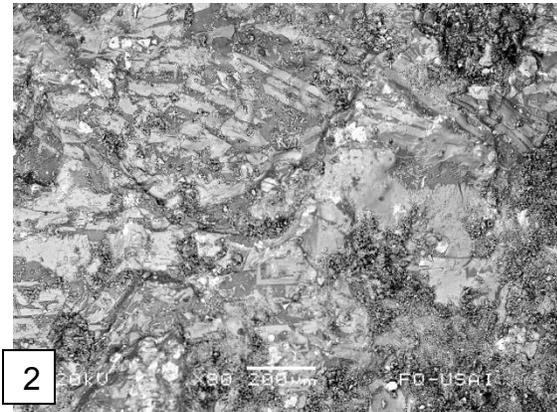
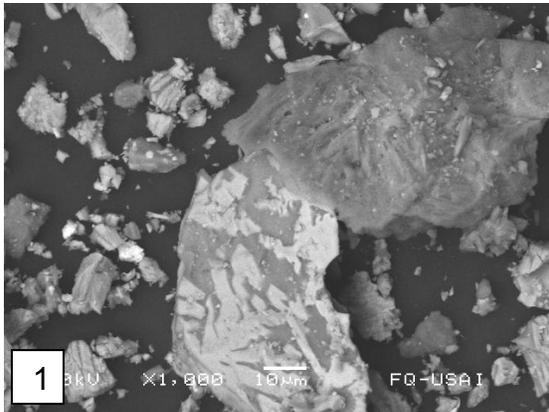
Micrografías A3.7 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 100µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 23



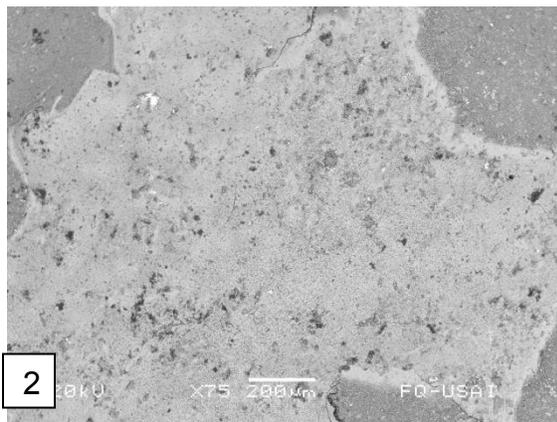
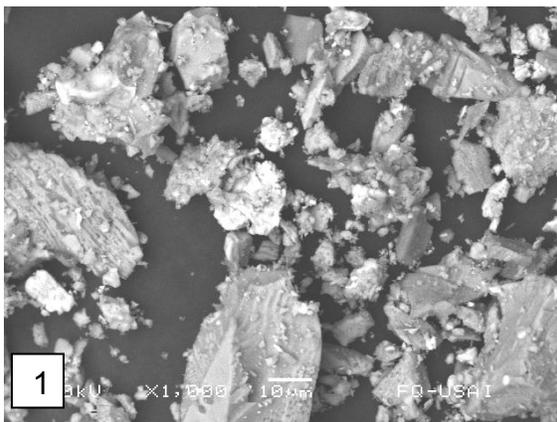
Micrografías A3.8 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 26



Micrografías A3.9 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

- Punto 29



Micrografías A3.10 de la superficie de escoria en polvo con una magnitud equivalente de 10µm y en gruesos con una magnitud equivalente de 200µm

A3.1.1 Caracterización de Escorias Mittal, Nardo y Alto Horno (MEB)

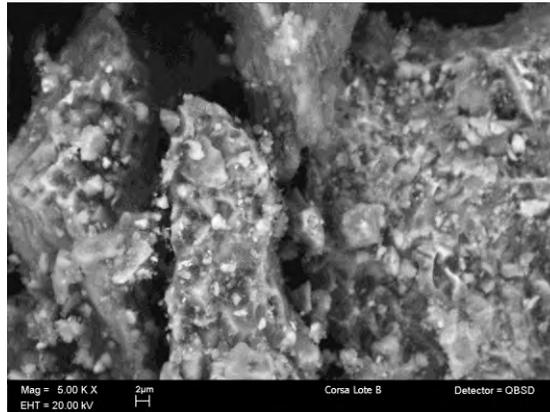


Figura A3.1 MEB de escoria AH a 5.00KX, 20 KV

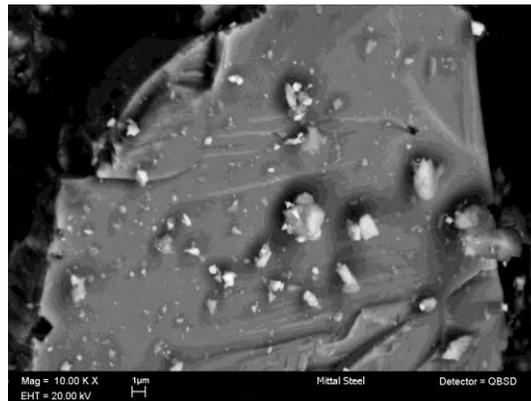


Figura A3.2 MEB de escoria MIT a 10.00KX, 20KV

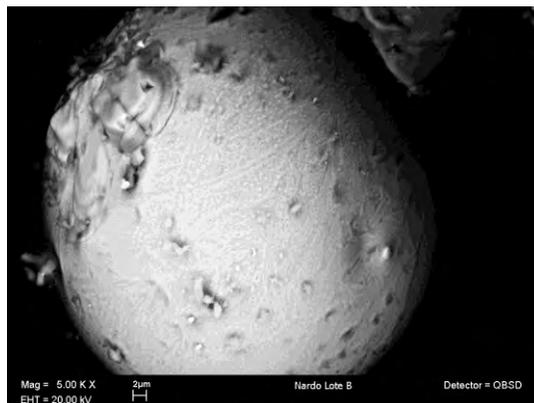


Figura A3.3 MEB de escoria ND a 5.00KX, 20KV

A 3.2 Resultados de Difracción de Rayos X

Figura A3.4 Difractograma Escoria de Cobre Punto 1

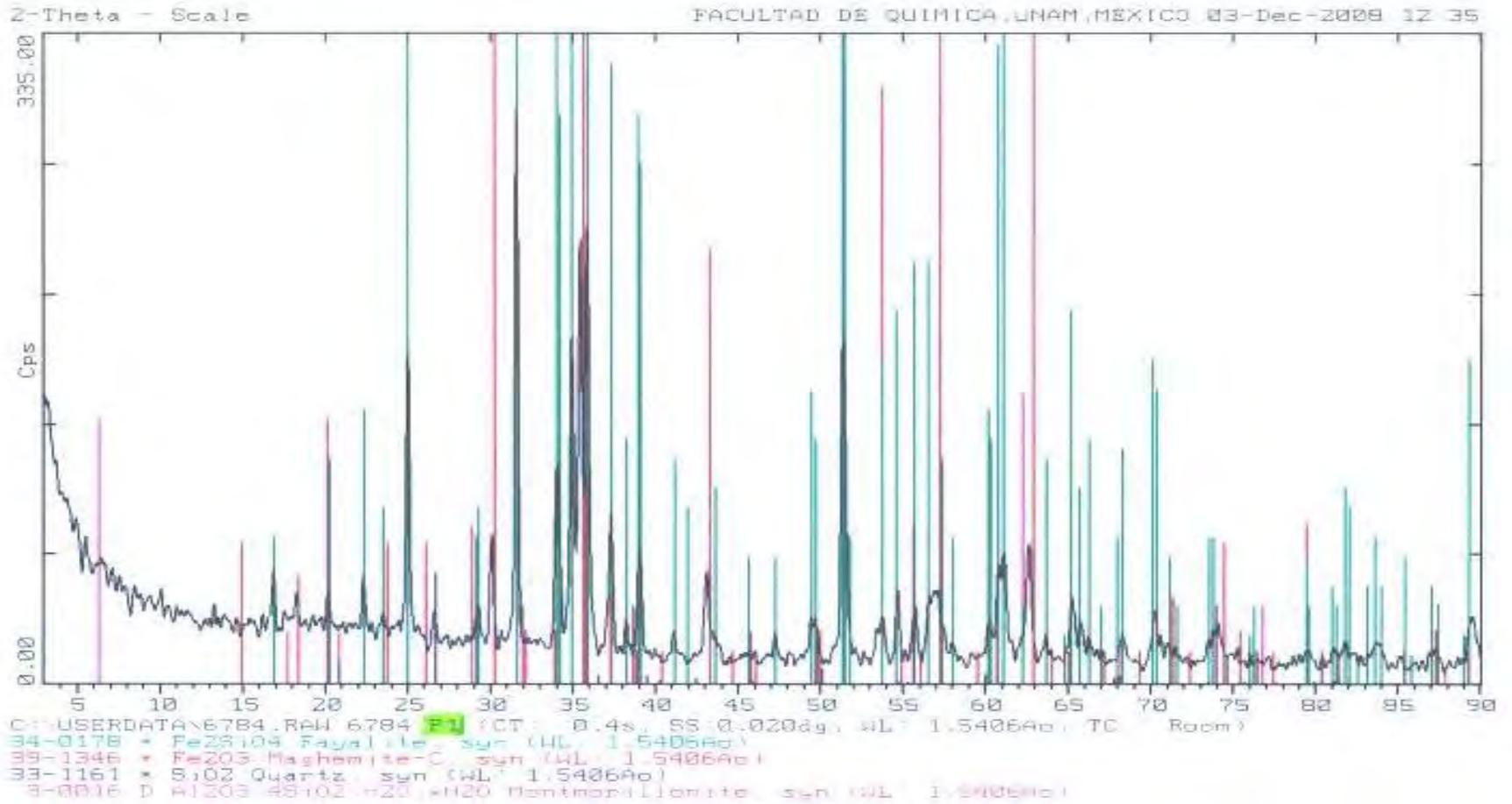


Figura A 3.5 Difractograma Escoria de Cobre Punto 5

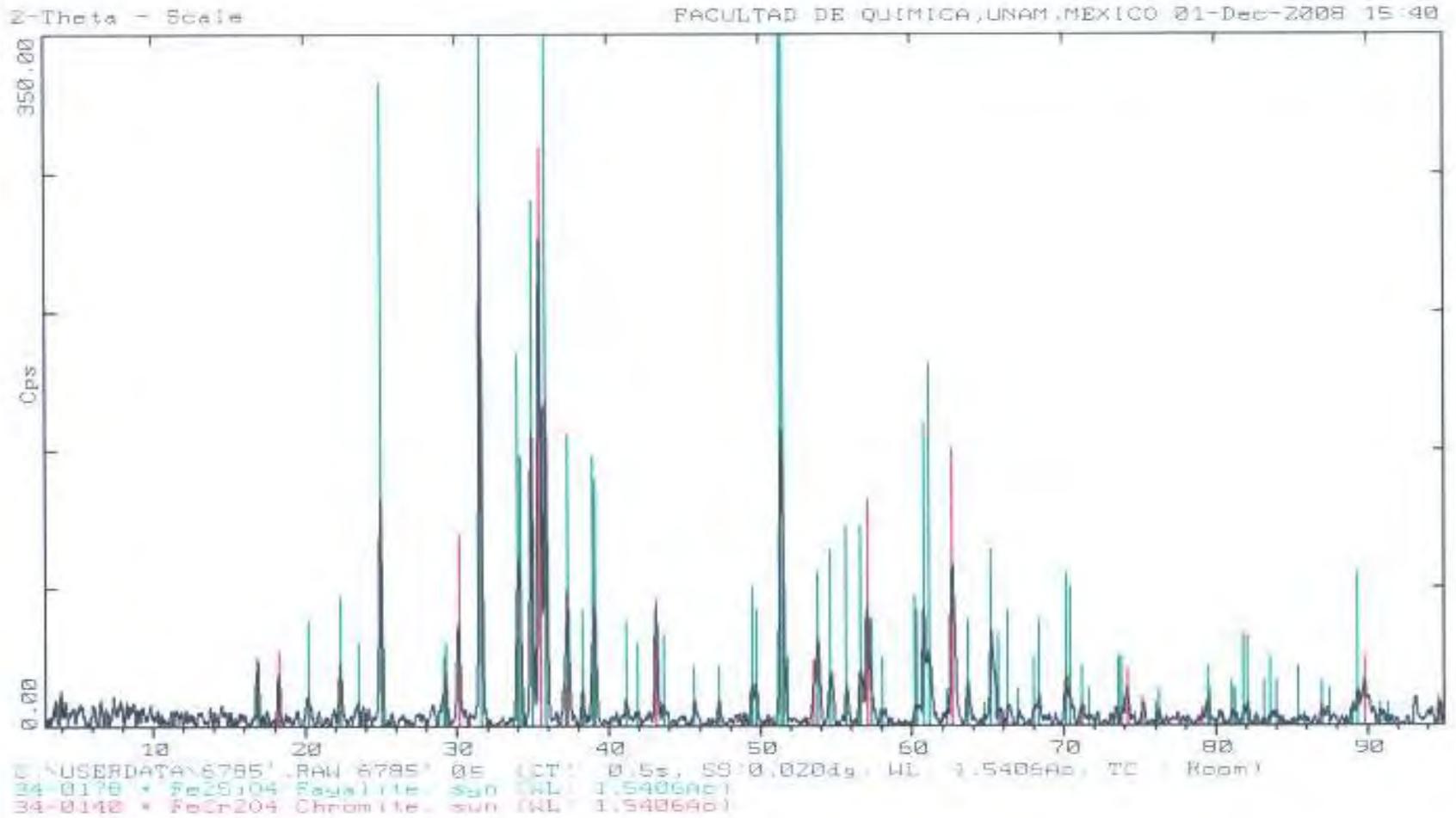


Figura A 3.6 Difractograma Escoria de Cobre Punto 21

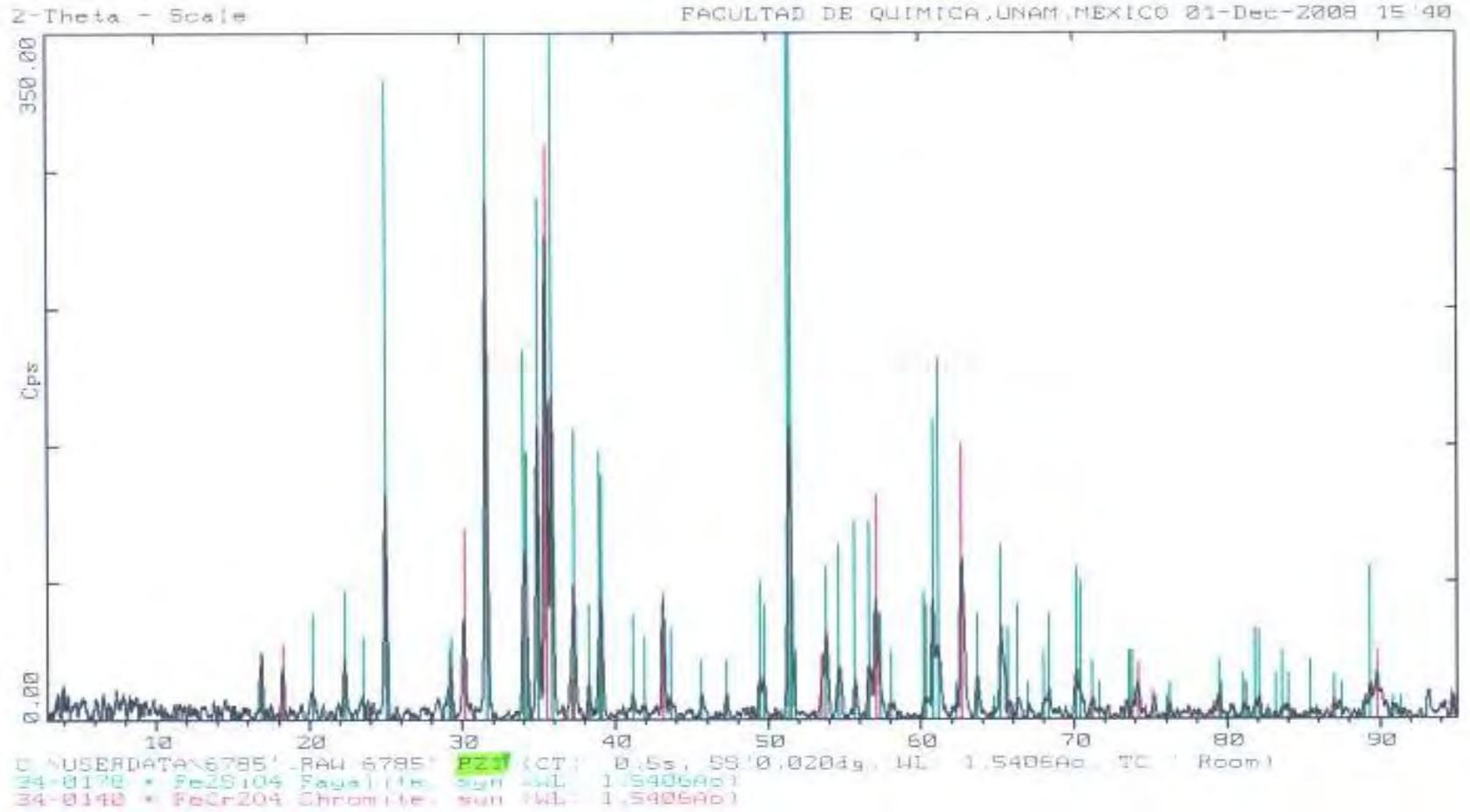


Figura A 3.7 Difractograma Escoria de Cobre Punto 24

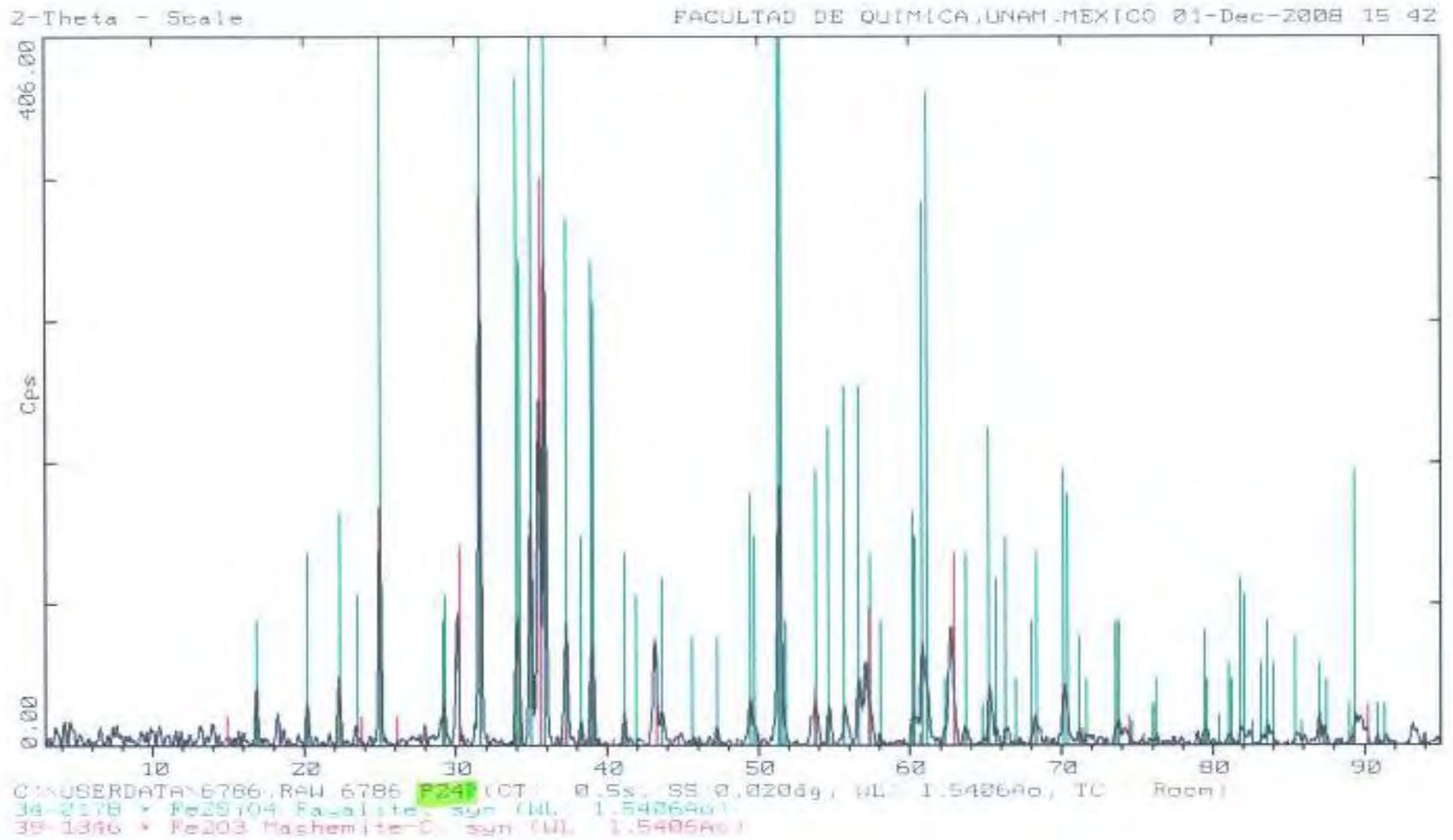


Figura A 3.8 Difractograma Escoria de Cobre Punto 29

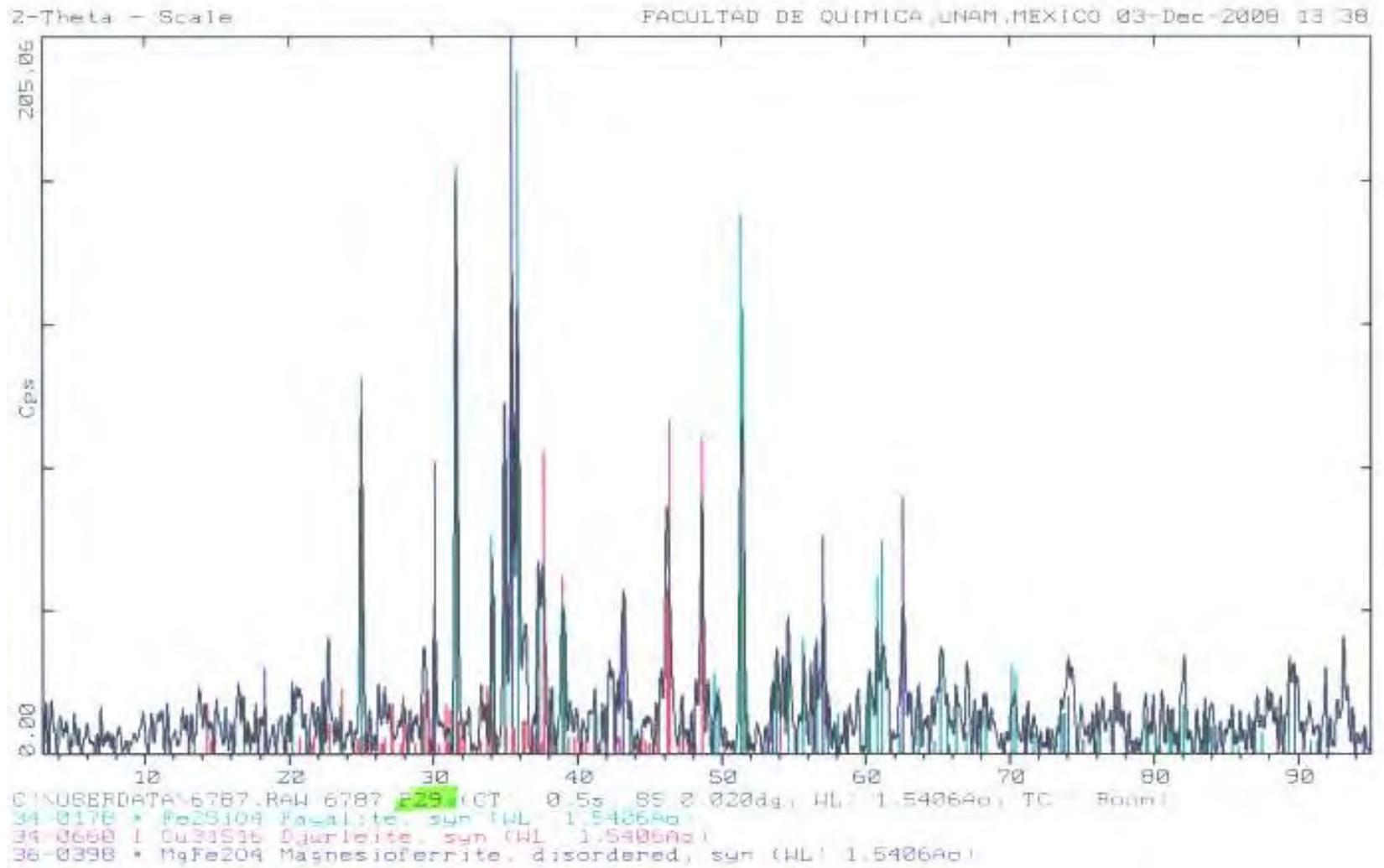


Figura A 3.9 Difractograma Escoria de Cobre Punto 31

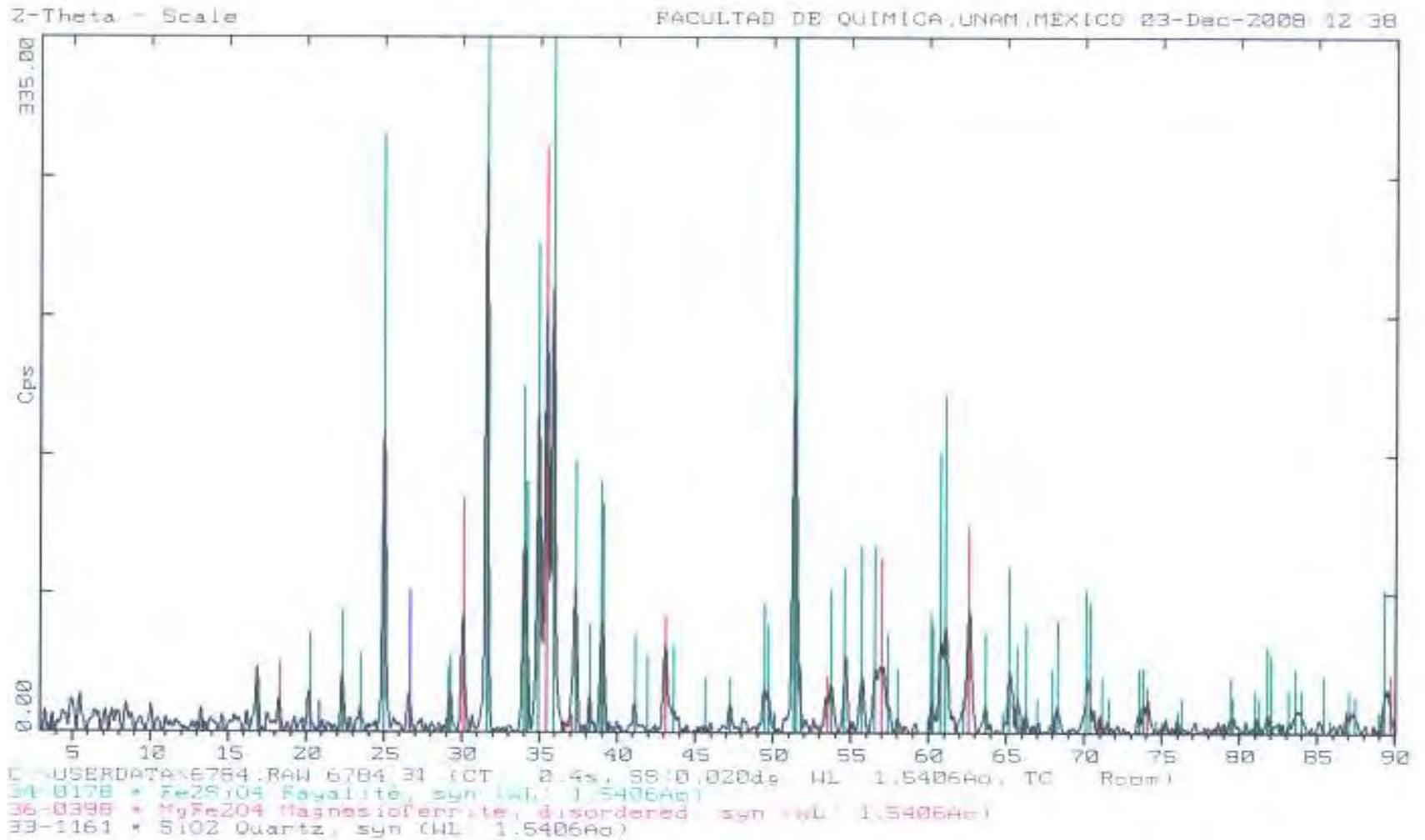


Figura A 3.10 Difractograma Escoria AH

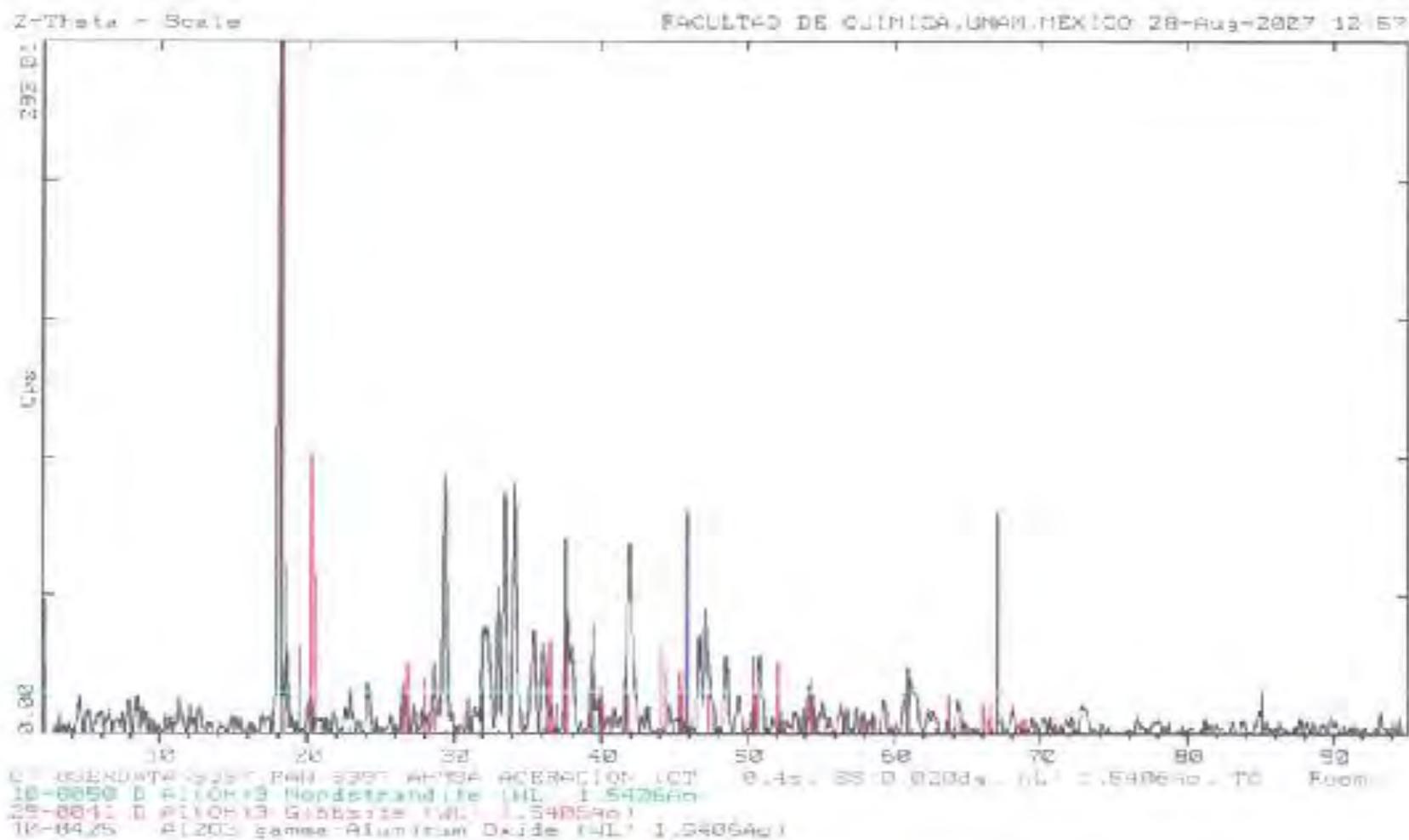


Figura A 3.11 Difractograma Escoria Mitt

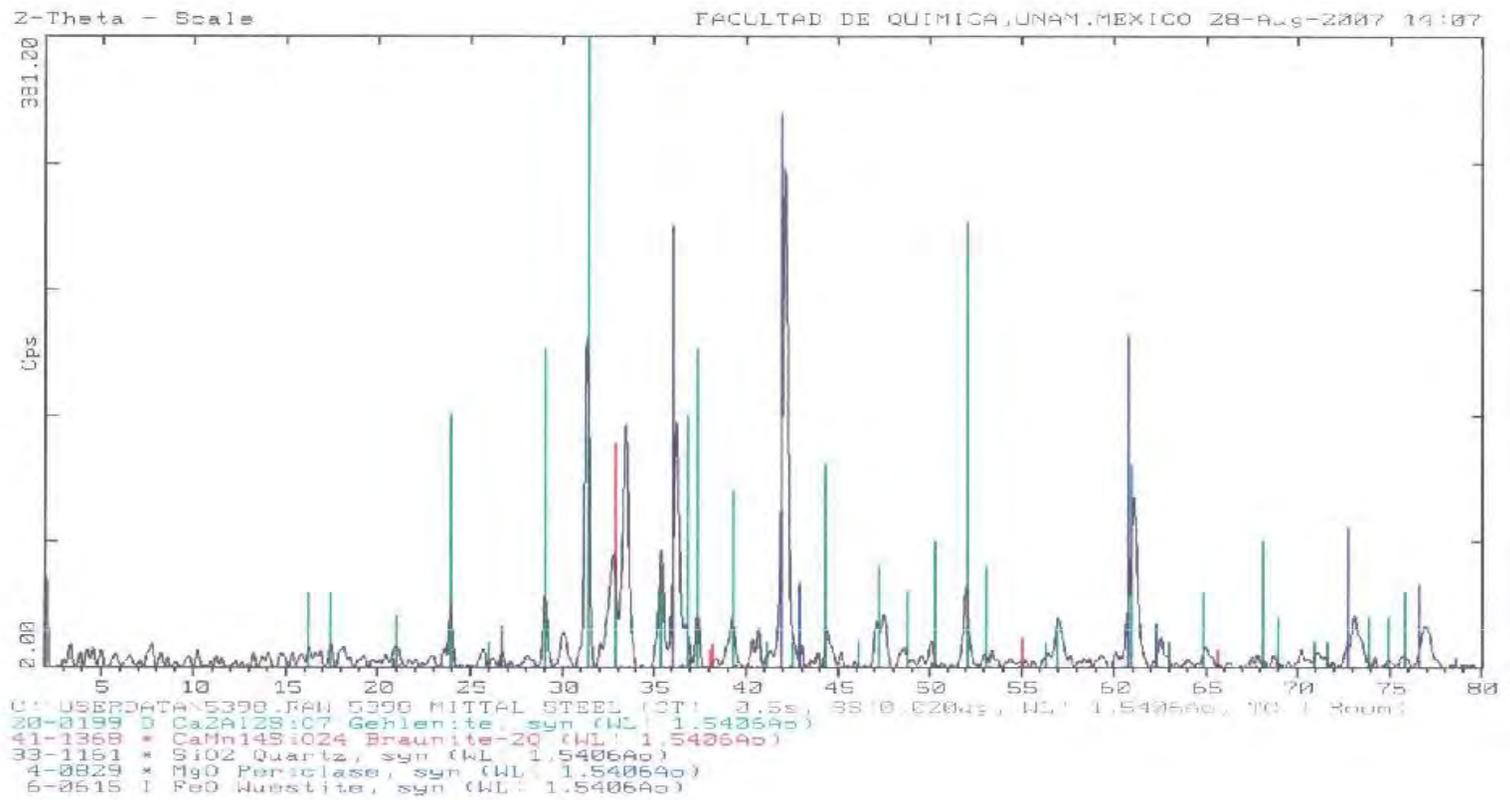
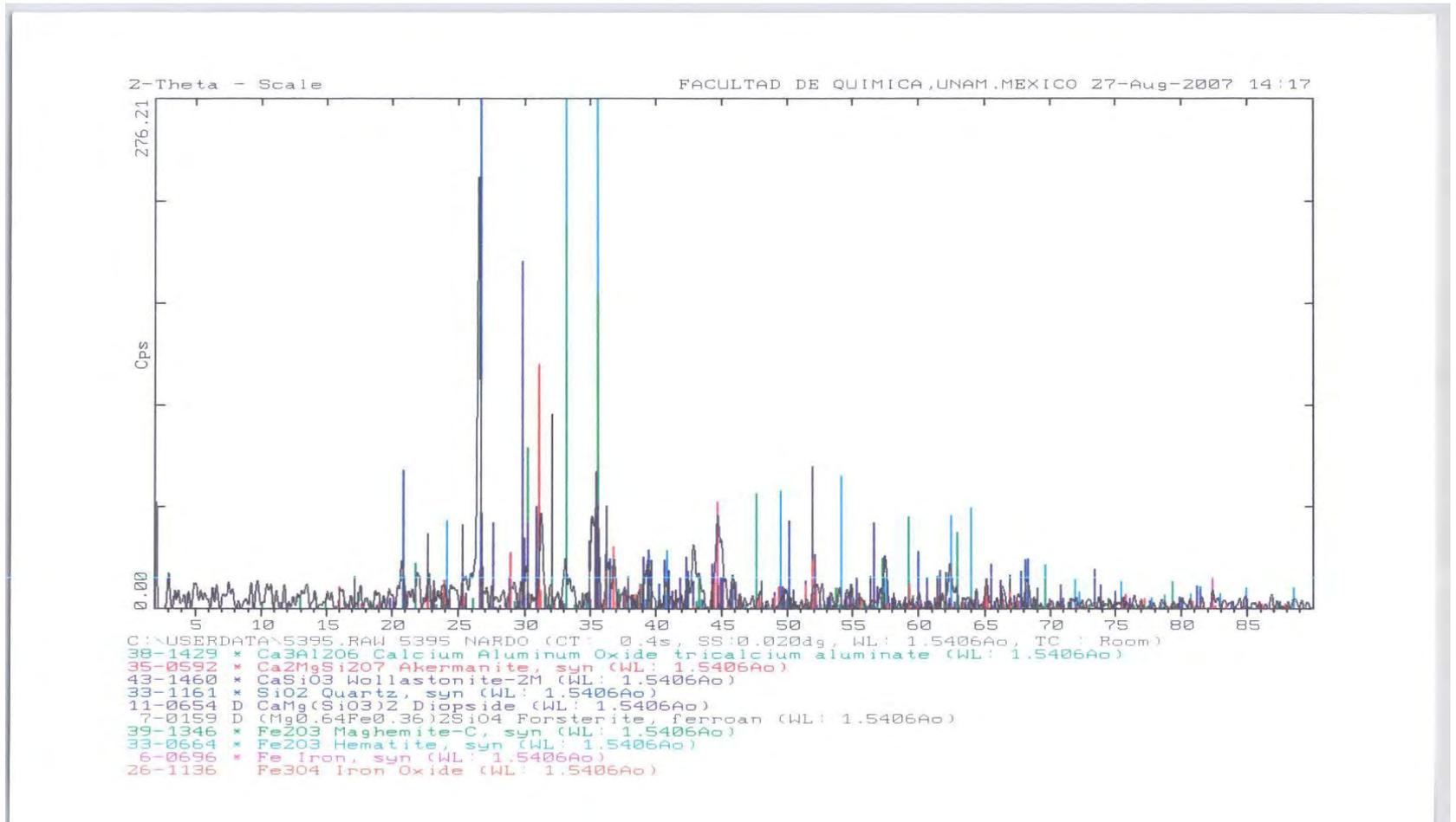


Figura A 3.12 Difractograma Escoria ND



A3.3 ICP (Lixiviabiles)

Tabla A3.1. Resultados de las pruebas de lixiviación para las escorias

LOTE A	Ag [mg/L]	As [mg/L]	Ba [mg/L]	Cd [mg/L]	Cr [mg/L]	Pb [mg/L]	Se [mg/L]
AH (AH)	< LD	< LD	<LD	< LD	< LD	< LD	< LD
MIT (HAE)	< LD	< LD	0,0335	< LD	< LD	< LD	< LD
CU (AH)	< LD	< LD	<LD	< LD	< LD	< LD	< LD
ND (HAE)	< LD	< LD	<LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Blanco	< LD	< LD	<LD	< LD	< LD	< LD	< LD
LOTE B	Ag [mg/L]	As [mg/L]	Ba [mg/L]	Cd [mg/L]	Cr [mg/L]	Pb [mg/L]	Se [mg/L]
AH (AH)	< LD						
MIT (HAE)	< LD	< LD	0,0145	< LD	< LD	< LD	< LD
CU (AH)	< LD						
ND (HAE)	< LD						
Blanco	< LD						

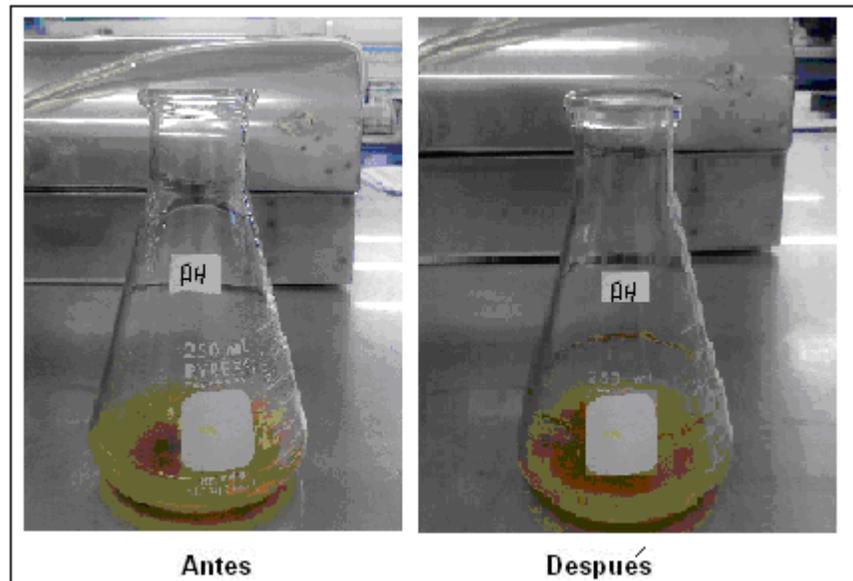
<LD = Inferior al límite de detección

A3.2 Fluorescencia de Rayos X de escorias AH, Mitt y ND

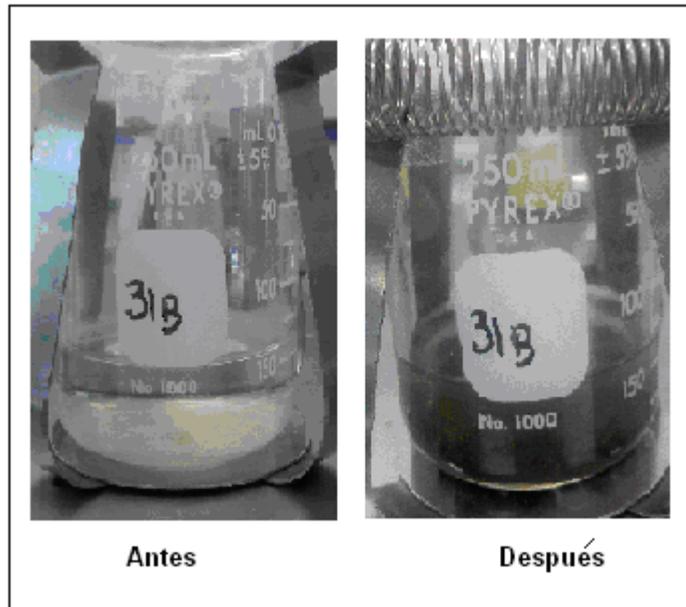
Muestra	%MnO	%CaO	%Na ₂ O	%K ₂ O	Total (*)
AH	1.376	32.990	0.172	0.562	68.160
Mitt	1.575	22.415	0	0.043	47.983
ND	6.772	2.646	1.458	2.137	22.431

(*) Expresado en equivalentes por 100gramos de escoria

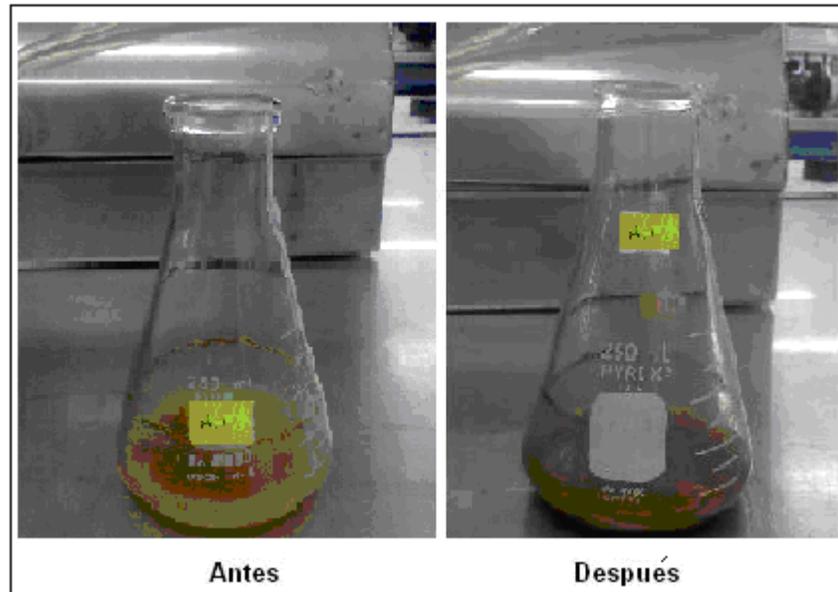
Neutralización de drenaje ácido



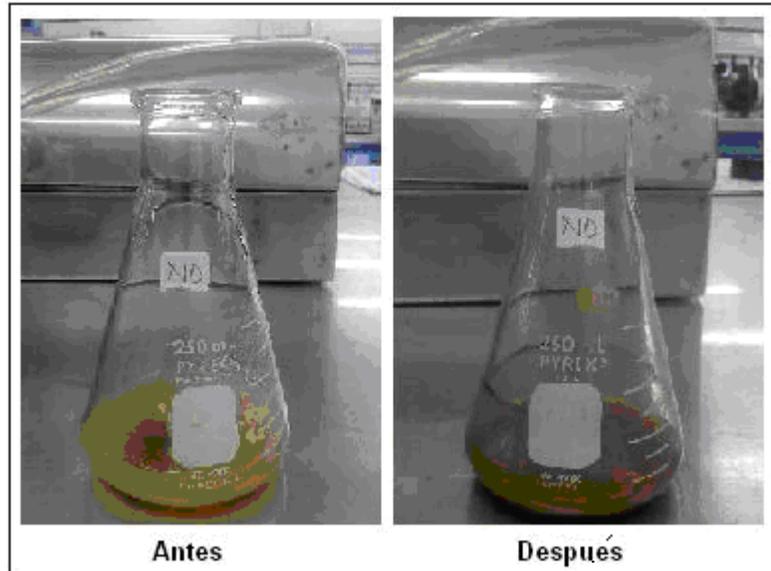
Fotografía A3.11 neutralización de drenaje ácido de mina empleando escoria AH de hierro.



Fotografía A3.12 Neutralización de drenaje ácido de minas empleando escoria de cobre.



Fotografía A3.13 Neutralización de drenaje ácido de minas empleando escoria Mitt (Acero)



Fotografía A3.14 Neutralización de drenaje ácido de mina empleando escoria ND de hierro.

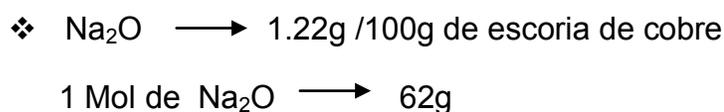
Anexo IV Tablas de cálculos y resultados de la
neutralización de DAM

A 4 Cálculos de las contribuciones básicas relativas

Composición básica obtenida del estudio de fluorescencia de rayos X

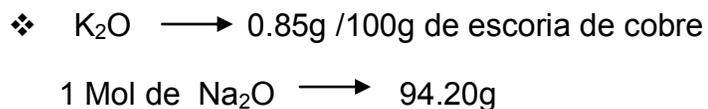
Contribuciones Básicas Relativas	Valores de gramos/100g de escoria
K₂O	0.85g
Na₂O	1.22g
CaO	0.65g
MgO	0.27g

Moles de contribución:



Moles contenidos de Na₂O en 100g de escoria de cobre= MC

$$MC = \left(\frac{1M}{62g} \right) (1.22g) = 0.020 \text{ Moles}$$



Moles contenidos de Na₂O en 100g de escoria de cobre= MC

$$MC = \left(\frac{1M}{94.2g} \right) (0.85g) = 0.0090 \text{ Moles}$$

❖ CaO → 0.65g /100g de escoria de cobre

1 Mol de Na₂O → 56g

Moles contenidos de Na₂O en 100g de escoria de cobre= MC

$$MC = \left(\frac{1M}{56g} \right) (0.65g) = 0.012 \text{ Moles}$$

❖ MgO → 0.27g /100g de escoria de cobre

1 Mol de Na₂O → 40.31g

Moles contenidos de Na₂O en 100g de escoria de cobre= MC

$$MC = \left(\frac{1M}{40.31g} \right) (0.27g) = 0.0066 \text{ Moles}$$

Teniendo así que la contribución básica total es:

$$CBT = \sum \text{de contribuciones}$$

CBT = [2(0.020M +0.0090M + 0.012M + 0.0066M)] = 0.76M por cada 100g de escoria de cobre.

Si para neutralizar 1 L de agua se requieren 0.060M de NaOH

1L = 0.076 / 0.060 M de OH , entonces para 50mL se necesitan 4 g

A4.1. Cálculos para la obtención del valor de dureza

Para realizar el cálculo de dureza se tomaron en cuenta diversos factores como son el amperaje de la trituradora con carga (I_c), el amperaje de la trituradora en vacío (I_v), el voltaje de línea (V) El número de fases del motor (NF)

$$Kw = \frac{(I_c - I_v) V \sqrt{NF}}{1000}$$

$I_c = 4 \text{ A}$
 $I_v = 3.5 \text{ A}$
 $V = 125 \text{ volt}$
 $NF = 3$

Una vez obtenidos estos valores experimentales, se sustituyen en la formula anterior para obtener el valor de Kilowats desarrollados en la trituradora

$$Kw = \frac{(4 \text{ A} - 3.5 \text{ A}) 125 \text{ volt} \sqrt{3}}{1000} = 0,1083$$

Posteriormente se calcula el consumo de energía del mineral triturado (W), tomando en cuenta el tiempo y la cantidad del mineral suministrada, obteniendo el valor de W.

$$W = \frac{Kw \cdot h}{\text{ston}} \quad h = 0.0018 \quad \text{ston} = 0.0004$$

$Kw = 0.1083$

Finalmente para conocer el valor real del índice de trabajo (W_i) se emplea la formula siguiente:

$$W = \frac{10W_i}{\sqrt{P80}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F80}}$$

Donde F80 representa el tamaño de partícula al 80% de acumulado negativo en la alimentación y P80 representa el tamaño de partícula al 80% del acumulado negativo en la descarga del mineral.

Obteniendo así un valor de $W_i = 8.99 \text{ kw-ston/h}$

Tabla A4.1 Resultados de las pruebas de neutralización de drenaje ácido con escorias de cobre.

Tiempo (h)	P- 31 A (pH)	P- 31 A' (pH)
0.5	6.40	6.40
1.0	6.43	6.43
3	6.50	6.50
6	6.56	6.56
12	6.67	6.67
24	6.72	6.72
30	7.00	7.00
48	7.23	7.23
60	7.57	7.58
72	7.79	7.79
84	7.86	7.86
96	7.90	7.91
108	7.94	7.94

Tabla A4.2 Resultados Comparativos de la neutralización de DAM empleando escorias de cobre en polvo y en piedra.

Tiempo (h)	1X	1X	2X	2X	3X	3X	4X	4X
	Piedra	Polvo	Piedra	Polvo	Piedra	Polvo	Piedra	Polvo
	P-31 A	P-31 B						
0	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
1	2.68	2.71	2.72	2.71	2.71	3.11	2.73	3.72
4	2.83	2.91	2.76	3.73	2.90	3.79	3.05	4.21
12	2.87	3.25	2.91	3.98	3.37	4.57	3.64	4.74
24	2.89	3.76	3.02	4.07	3.52	4.74	3.90	5.01
36	2.93	3.80	3.35	4.35	3.96	5.10	4.25	5.30
48	3.06	3.87	4.01	4.51	4.12	5.30	4.34	5.44
60	3.08	3.99	4.51	4.80	4.34	5.51	4.44	5.57
72	3.10	4.09	4.81	5.03	4.48	5.63	4.61	5.70

A4.1 Tablas de resultados de neutralización de drenaje ácido de mina con diferentes escorias e

Tabla A4.3 Resultados de las pruebas de neutralización empleando la dosis estequiométrica (1X) calculada de diversas escorias.

Tiempo	Mit (1X)	AH (1X)	ND (1X)	Cu (1X)
0	2,37	2,26	2,34	2,39
1	3,81	3,68	3,53	2,71
2	3,93	3,8	3,77	2,8
4	4,07	3,89	3,83	2,91
6	4,09	3,89	3,86	3
8	4,14	3,94	3,87	3,16
24	4,22	4,01	3,93	3,24
26	4,16	4,01	3,89	3,45
28	4,04	4,01	3,9	3,59
30	4,14	4,01	3,94	3,64
32	4,21	4,02	3,98	3,76
48	4,18	4,07	4,08	3,81
50	4,14	4,09	4,1	3,87
52	4,14	4,1	4,12	3,9
54	4,14	4,13	4,17	3,95
56	4,14	4,17	4,19	3,99
70	4,14	4,17	4,21	4,05
72	4,14	4,17	4,21	4,09

Tabla A4.4 Resultados de las pruebas de neutralización empleando dos veces la dosis estequiométrica (2X) calculada de diversas escorias,

Tiempo	ND (2X)	AH (2X)	Mit (2X)	Cu (2X)
0	2,5	2,47	2,86	2,68
1	3,88	3,77	3,93	2,71
2	3,95	3,8	4,01	2,9
4	3,98	3,87	4,08	3,73
6	4,03	3,99	4,11	3,86
8	4,13	4,02	4,16	3,98
24	4,99	4,19	5,29	4,09
26	5,16	4,2	5,4	4,12
28	5,23	4,22	5,45	4,2
30	5,3	4,24	5,49	4,26
32	5,38	4,26	5,56	4,35
48	5,45	4,27	5,6	4,55
50	5,47	4,28	5,63	4,6
52	5,49	4,29	5,66	4,68
54	5,5	4,31	5,69	4,72
56	5,5	4,32	5,71	4,8
70	5,52	4,4	5,73	4,94
72	5,52	4,4	5,73	5,03

Tabla A4.5 Resultados de las pruebas de neutralización empleando tres veces la dosis estequiométrica (3X) calculada de diversas escorias,

Tiempo	ND (3X)	AH (3X)	Mit (3X)	Cu (3X)
0	2,8	2,77	3,2	2,68
2	3,67	3,09	3,8	3,11
4	3,86	3,65	3,9	3,36
6	4,03	3,93	4	3,69
8	4,16	4,02	4,13	4,01
24	4,54	4,17	4,44	4,55
26	4,76	4,2	4,53	4,64
28	4,83	4,36	4,66	4,8
30	4,9	4,41	4,78	4,89
32	5,01	4,59	5,03	4,99
48	5,1	4,68	5,57	5,1
50	5,22	4,76	5,66	5,21
52	5,32	4,81	5,87	5,3
54	5,39	4,84	6,02	5,36
56	5,43	4,86	6,13	5,41
70	5,48	4,89	6,25	5,46
72	5,52	4,92	6,3	5,51

Tabla A4.6 Resultados de las pruebas de neutralización empleando cuatro veces la dosis estequiométrica (4X) calculada de diversas escorias,

Tiempo	ND (4X)	AH (4X)	Mit (4X)	Cu (4X)
0	3,7	3,01	3,65	2,68
2	4,03	3,42	3,81	3,74
4	4,31	3,83	3,93	3,85
6	4,43	3,92	4,02	4,21
8	4,62	4,15	4,33	4,4
24	4,86	4,3	4,87	4,56
26	4,91	4,43	5,15	4,69
28	5,03	4,49	5,24	4,74
30	5,11	4,56	5,38	4,95
32	5,22	4,6	5,53	5,01
48	5,47	4,66	6,23	5,08
50	5,55	4,69	6,42	5,16
52	5,63	4,75	6,58	5,23
54	5,72	4,82	6,66	5,3
56	5,8	4,82	6,74	5,38
70	6,35	4,83	6,8	5,44
72	6,4	4,83	6,85	5,49