

DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE
ORO DE LAS MINAS “EL SEIS” Y “CHEDE” DEL CORREGIMIENTO LAS
FONDAS, MUNICIPIO EL TAMBO, DEPARTAMENTO DEL CAUCA

ESTHER LUCIA IDROBO PACHECO
HERMES LEONARDO IDROBO PACHECO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS, NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2012

DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE
ORO DE LAS MINAS “EL SEIS” Y “CHEDE” DEL CORREGIMIENTO LAS
FONDAS, MUNICIPIO EL TAMBO, DEPARTAMENTO DEL CAUCA

ESTHER LUCIA IDROBO PACHECO
HERMES LEONARDO IDROBO PACHECO

Trabajo de investigación

Director

Dra. Sonia Gaona Jurado

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS, NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2012

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	i
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I - Revisión Teórica	4
<i>1.1 Formaciones Geológicas</i>	5
<i>1.2 Procesos de Extracción</i>	7
1.2.1 Prospección y exploración	7
1.2.2 Explotación	7
1.2.3 Planeamiento y montaje	8
1.2.4 Sistemas de explotación	8
1.2.5 Beneficio y transformación de minerales	10
1.2.6 Transporte y comercialización	11
1.2.7 Cierre de mina	11
<i>1.3 Gravimetría (Producción más limpia en la extracción de oro)</i>	12
1.4 Generalidades del departamento del Cauca	13
1.4.1 Generalidades del Municipio El Tambo	13
1.4.2 Corregimiento Las Fondas	14
1.4.3 Sector Minero (Mina El Seis y Mina Chede)	15
CAPITULO II - Proceso Experimental: Toma de muestra y tratamiento	17
<i>2.1 Mina El Seis</i>	17
2.1.1 Etapa 1: Muestra del filón	18
2.1.2 Etapa 2: Muestra del Molino de bolas	19
2.1.3 Etapa 3: Muestra del proceso de cianuración	20
2.1.4 Etapa 4: Muestra del Residuo Final	21
<i>2.2 Mina Chede</i>	22
2.2.1 Etapa 1: Muestra del filón	23
2.2.2 Etapa 2: Muestra de mesa vibradora	25
2.2.3 Etapa 3: Muestra del residuo de la mesa vibradora	26

2.2.4	Etapa 4: Muestra del molino de bolas	27
2.2.5	Etapa 5: Muestra de la etapa final de cianuración	28
CAPITULO III – Resultados y Análisis		30
3.1	<i>Mina El Seis</i>	31
3.1.1	Etapa 1: Muestra de filón	31
3.1.2	Etapa 2: Muestra del Molino de bolas	34
3.1.3	Etapa 3: Muestra de proceso de cianuración	37
3.1.4	Etapa 4: Muestra de residuo final	39
3.2	<i>Mina Chede</i>	42
3.2.1	Etapa 1: Muestra del filón	42
3.2.2	Etapa 2: Muestra de mesa vibradora	45
3.2.3	Etapa 3: Muestra del residuo de la mesa vibradora	48
3.2.4	Etapa 4: Muestra del molino de bolas	51
3.2.5	Etapa 5: Muestra de la etapa final de cianuración	53
CAPITULO IV – Análisis Final: Comparación de Resultados		57
4.1	<i>Mina El Seis</i>	57
4.2	<i>Mina Chede</i>	59
CONCLUSIONES		64
REFERENCIAS		66
ANEXOS		68

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1	4
Figura 1.1 Mapa de la zona de estudio	4
Figura 1.2. Mapa de la formación de mineralizaciones a partir del magma	5
Figura 1.3 Depósitos Auríferos en Colombia	6
Figura 1.4 Municipio El Tambo, resaltándose el Corregimiento Las Fondas	14
CAPITULO II	17
Figura 2.1 Mina El Seis. (a) Cámara (b) obtención de la muestra	18
Figura 2.2 (a) rocas de veta (b) después de trituración con mazo (c) después de tratamiento en laboratorio	19
Figura 2.3 Mina El Seis. (a) Molino de bolas (b) formación en pilas	20
Figura 2.4 Tratamiento de muestra del molino de bolas (a) muestra obtenida del molino de bolas (b) muestra después del tratamiento	20
Figura 2.5 Mina El Seis. (a) Tanques de cianuración (b) Toma de muestra	21
Figura 2.6 (a) Muestra obtenida del proceso de cianuración (b) muestra después de tratamiento en laboratorio	21
Figura 2.7 Mina El Seis. Pila de material sobrante de cianuración	22
Figura 2.8 (a) Muestra obtenida después del proceso de cianuración (b) muestra después del tratamiento en laboratorio	22
Figura 2.9 Mina Chede. Pila de material de mina	24
Figura 2.10 (a) rocas de veta (b) trituración con mazo (c) muestra después de tratamiento en el laboratorio	24
Figura 2.11. Mina Chede (a) Mesa vibradora (b) Recolección	25
Figura 2.12 (a) arenas de mesa vibradora (b) muestra después del tratamiento en el laboratorio	25
Figura 2.13 Mina Chede (a) Canal para el transporte de material	26

de residuo de la mesa vibradora (b) Pozo para secado de material (c) Pila de material de residuo de mesa vibradora	
Figura 2.14 (a) arenas residuo de mesa vibradora (b) muestra después del tratamiento en laboratorio	27
Figura 2.15 Mina Chede. Molino de bolas.	27
Figura 2.16 (a) muestra de molino de bola (b) muestra después del tratamiento en laboratorio	28
Figura 2.17 Mina Chede. (a) Barriles con viruta de zinc (b) Conducto de los tanques de cianuración hasta los barriles con viruta de zinc	28
Figura 2.18 (a) muestra obtenida del proceso de cianuración (b) muestra después del tratamiento en laboratorio	29
Capítulo III	30
Figura 3.1 Espectro FTI-R de muestra de filón	31
Figura 3.2 Deconvolución de la zona de interés	32
Figura 3.3 Difractograma de Muestra de filón	33
Figura 3.4 EDS muestra de filón	34
Figura 3.5 Espectro FT-IR de muestra de molina de bolas	35
Figura 3.6 Deconvolución de la zona de interés	35
Figura 3.7 Difractograma muestra del molino de bolas	36
Figura 3.8 EDS muestra del molino de bolas	36
Figura 3.9 Espectro FT-IR muestra de arenas en proceso de cianuración	37
Figura 3.10 Deconvolución zona de interés	38
Figura 3.11 Difractograma muestra de arenas en proceso de cianuración	38
Figura 3.12 EDS muestra de arenas en proceso de cianuración	39
Figura 3.13 Espectro FT-IR muestra de arena residuo de cianuración	40
Figura 3.14 Deconvolución zona de interés	40
Figura 3.15 Difractograma muestra de residuo final	41

Figura 3.16 EDS muestra de residuo final	41
Figura 3.17 Espectro FT-IR muestra de filón	42
Figura 3.18 Deconvolución zona de interés	42
Figura 3.19 Difractograma muestra de filón	44
Figura 3.20 EDS muestra de filón	45
Figura 3.21 Espectro FT-IR muestra de mesa vibradora	45
Figura 3.22 Deconvolución zona de interés	46
Figura 3.23 Difractograma muestra de mesa vibradora	46
Figura 3.24 EDS muestra de mesa vibradora	47
Figura 3.25 EDS muestra de mesa vibradora	47
Figura 3.26 Espectro FT-IR muestra residuo de mesa vibradora	49
Figura 3.27 Deconvolución zona de interés	49
Figura 3.28 Difractograma muestra residuo de mesa vibradora	50
Figura 3.29 EDS muestra de arenas residuo de mesa vibradora	50
Figura 3.30 Espectro FT-IR muestra de molino de bolas	51
Figura 3.31 Deconvolución zona de interés	52
Figura 3.32 Difractograma muestra del molino de bolas	52
Figura 3.33 EDS muestra de molino de bolas	53
Figura 3.34 Espectro FT-IR muestra de etapa final de cianuración	54
Figura 3.35 Deconvolución zona de interés	54
Figura 3.36 Difractograma muestra de etapa final de cianuración	55
Figura 3.37 EDS muestra de etapa final de cianuración	56
Figura 3.38 EDS muestra de etapa final de cianuración	56
<i>CAPITULO IV</i>	57
Figura 4.1 Espectros FT-IR Mina El Seis: (a) Filón (b) Molino de bolas (c) Arenas de cianuración (d) Residuo final	57
Figura 4.2 Difractogramas. Mina El Seis. Mina El Seis: (a) Filón (b) Molino de bolas (c) Arenas en cianuración (d) Residuo final	59
Figura 4.3 Espectros FT-IR Mina Chede: (a) Filón (b) Mesa vibradora (c) Residuo de mesa (d) Molino de bolas (e)	60

cianuración

Figura 4.4 Difractogramas. Mina Chede. (a) Filón (b) Mesa vibradora (c) Residuo de mesa vibradora (d) Molino de bolas (e) Cianuración

61

INTRODUCCIÓN

En este documento se reporta información que permite diagnosticar el estado actual del proceso de extracción de oro que realizan los mineros de dos minas del corregimiento Las Fondas, municipio de El Tambo, considerando aspectos tales como eficiencia y presencia de otros compuestos de interés.

El Cauca es uno de los departamentos con mayor diversidad, historia y riqueza en Colombia. En su capital Popayán nacieron o se educaron muchos de los presidentes y personajes de la historia de Colombia y durante muchos años fue epicentro económico y político del país. En la actualidad esta situación ha cambiado y el departamento se mantiene en una situación de rezago. Los problemas actuales del Cauca son diversos y muy complejos. Paradójicamente, muchas veces esos problemas se originan en una de sus principales riquezas, su diversidad, que ha sido desde siempre perseguida por numerosos actores legales e ilegales desde colonizadores, grandes empresas de explotación forestal y minera hasta grupos al margen de la ley que han generado enfrentamientos, desplazamiento forzado en la población y en consecuencia atraso en la región. La economía se basa en la agricultura y la minería que aún conserva en su mayoría procesos artesanales que la pone en desventaja con la producción minera del resto del país.

Sin descartar la presencia de otros minerales de interés económico, en la región afloran y son explotados filones mineralizados con oro que han sido fuente generadora de recursos económicos para los pobladores de la zona. En el sector se practican dos sistemas de explotación minera, Sistema a cielo abierto y Sistema subterráneo.

Recientemente fue creada la Cámara de Mineros de Colombia, empresa que promociona proyectos mineros de exploración, explotación y compra de insumos de minerales metálicos. Esta empresa fue creada para reglamentar las directrices del gremio en el país. Según palabras de su director ejecutivo “Colombia es un país por explorar y ya ha sido catalogado por los expertos mundiales como el territorio en donde se vivirá la última fiebre minera de todo el globo” ^[1] y anuncia la existencia de un poco más de 40 compañías que en los últimos dos años han manifestado su interés por entrar al mercado colombiano, enfocados en la exploración y explotación de oro.

De otro lado, en los últimos tiempos se ha denunciado que la política minera, considerada hoy una de las *locomotoras* del plan de desarrollo del Gobierno Nacional, va a entregar a las más poderosas empresas transnacionales, como la Anglo Gold Ashanti, Cerromatoso y Carboandes, más de 1200 títulos de exploración minera en el Departamento del Cauca, que podrían cubrir más de 1 millón 600 mil hectáreas que configuran el 56% de su territorio, la mayoría de estas zonas en reservas estratégicas ambientales, tales como el Parque Natural de Munchique, las partes más altas de la cordillera occidental y central, la cuenca del Río Patía, el municipio de Timbiquí y el propio Macizo Colombiano, áreas en las cuales ya se han otorgado la mayoría de los 252 títulos mineros concesionados en la actualidad, que además no cuentan con licencia ambiental ^[2].

En el pasado, situaciones similares han generado graves crisis ambientales, desplazamiento de comunidades y violación de derechos humanos en zonas de impacto de las transnacionales mineras. Por lo anterior, con esta investigación se planteó la conveniencia de que los gremios mineros de la región del Cauca contaran con la información técnica sobre sus prácticas y procesos, registrada en documentos que les sirvan de aliados frente a las regulaciones gubernamentales y en procesos de competencia con las multinacionales interesadas en la exploración y explotación del oro en sus territorios. Se espera que el documento posibilite en el futuro la optimización de la obtención del oro, así como otros compuestos minerales que presentan interés industrial.

La elaboración del documento se rigió por las mismas pautas que la investigación general. Así, se vio la necesidad de analizar las formaciones geológicas, los métodos de extracción de oro a nivel mundial, los parámetros socioeconómicos y ambientales de la región, todo ello buscando cualificar el impacto de los resultados, así como la viabilidad de las propuestas que surgen a partir de los mismos. Por lo anterior en el **capítulo I** se presenta una revisión general de estos ítems, incluyendo una revisión sobre las características de la zona de estudio y de las dos minas analizadas.

La obtención de las muestras y su respectiva preparación para análisis requirió de un proceso experimental que se detalla en el **capítulo II**. Los resultados obtenidos a partir de las

diferentes técnicas de caracterización utilizadas y el análisis respectivo se encuentran en el **capítulo III**.

Con lo reportado en el capítulo III se pasó a un análisis comparativo de los resultados, lo que permitió concluir sobre la eficiencia de cada etapa y del proceso general, información consignada en el **capítulo IV**.

Finalmente se reportan las **conclusiones** a las que se llegó tanto durante el transcurso de la investigación como durante la elaboración del documento.

Se presentan además dos anexos, el **Anexo I** contiene información sobre posibles trabajos futuros, tanto en el área de la Ingeniería Física como en áreas tales como química, biología, ciencias administrativas y contables, que den continuación al trabajo aquí presentado. El **Anexo II** contiene los resúmenes de los trabajos enviados y presentados en dos eventos académicos, donde fueron expuestos ante expertos tanto las ideas como los resultados de la investigación.

CAPÍTULO I - Revisión Teórica

La investigación que se reporta en este documento se focalizó en dos minas de oro ubicadas en el borde oriental de la cordillera occidental, corregimiento de Las Fondas que pertenece al municipio de El Tambo, Departamento del Cauca (ver Figura 1.1).

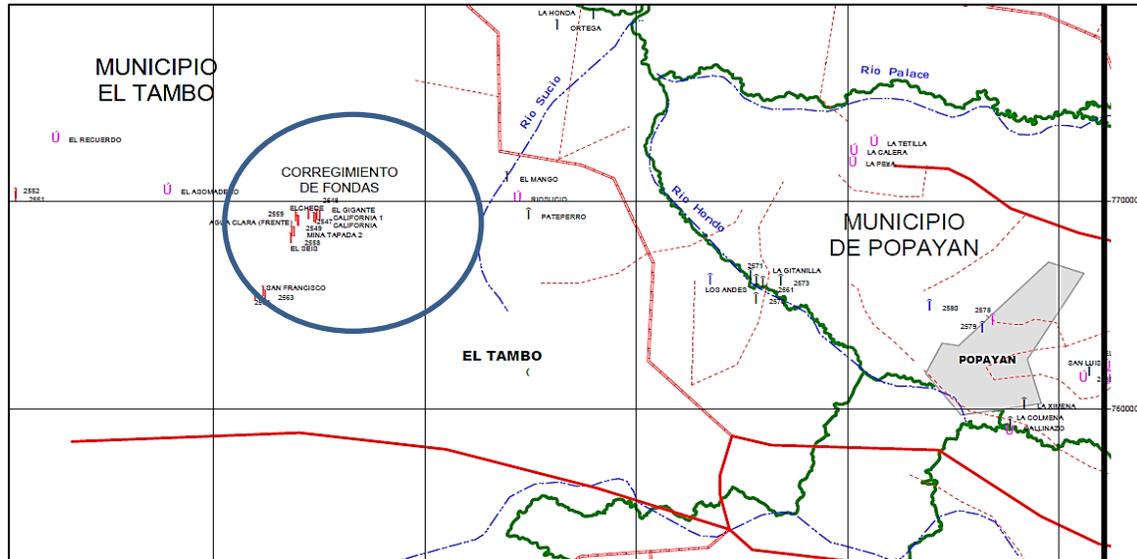


Figura 1.1 Mapa de la zona de estudio. (Tomado de Plan de Acción para la Sostenibilidad y Creación de Centros Ambientales Mineros - CAM, Cadenas Productivas y Plan Padrinos)

El oro se obtiene mundialmente de yacimientos explotados principalmente para este elemento, o como subproducto en la minería y procesamiento de menas¹ de níquel, cobre, zinc, plomo y plata, no obstante, si se compara con el impacto medio ambiental y desde el punto de vista de la economía ecológica, la mayoría de los métodos de extracción de oro no son viables comercialmente.

Analizar las formaciones geológicas, los métodos de extracción además de los parámetros socioeconómicos y ambientales de la región permite cualificar el impacto de los resultados, así como la viabilidad de las propuestas que surgen a partir de los mismos. Por lo anterior en este capítulo se presenta una revisión general de las formaciones geológicas, mencionando los yacimientos y procesos de extracción de oro a nivel mundial y generalidades del Departamento del Cauca, el Municipio El Tambo, el Corregimiento de Fondas y, finalmente, sobre las minas El Seis y Chede.

¹ Mena: mineral del que se puede extraer un metal

1.1 FORMACIONES GEOLÓGICAS

El oro se encuentra ampliamente distribuido por todo el globo terráqueo aunque en cantidades muy pequeñas, por lo que es un elemento poco común. La zona de la corteza terrestre que ha podido ser explotada, (una costra superficial de sólo 3 km sobre un radio de 6.370 km) contiene en promedio, según R.W. Boyle ^[3], 0.005 ppm de oro. Además hay oro en el agua de los mares y su proporción varía según el lugar y los estudios realizados, pasando de 1 mg/m³ a más de 10 mg/m³ que, por poco que parezca, supondría unos 10 mil millones de toneladas de oro sumando todos los océanos del mundo.

Tanto el oro como los demás elementos y minerales que lo acompañan provienen de las rocas que conforman la corteza terrestre exterior o de las masas fundidas, denominadas magma. Estas masas magmáticas traen consigo el oro y demás elementos que en condiciones óptimas y favorables se depositaron en las inmediaciones de la corteza terrestre, formando así cuerpos mineralizados de diferentes formas y dimensiones.

En el ascenso hacia la superficie, a través de la corteza terrestre, el magma obedece a ciertos cambios en las soluciones. A medida que la temperatura y la presión disminuyen, los diferentes minerales que existen en el fluido rocoso cristalizan y se separan siguiendo un orden de saturación, proceso denominado diferenciación magmática, que da origen a los fluidos magmáticos en los que se concentran algunos metales que originalmente estaban presentes en el magma pero en escasas proporciones ^[4]. Estas soluciones hidrotermales transportan los metales desde la intrusión hasta el lugar del depósito del metal. La figura 1.2 presenta un esquema de lo descrito en el párrafo anterior.

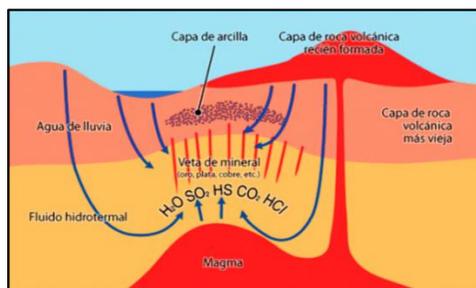


Figura 1.2 Mapa de la formación de mineralizaciones a partir del magma. (Tomada de “El oro y El BCV”, Nelly Pimentel. Marzo, 2010)

El oro es uno de los metales que se encuentra en la naturaleza en estado nativo, algunas veces en cristales de sistema regular (cúbico) o bien en agujas o granos (llamados pepitas de oro cuando son de cierta dimensión). El oro nativo en masa además de encontrarse en aluviones se encuentra en rocas ígneas y en filones y no en estado de pureza absoluta, puesto que casi siempre se encuentra aleado con otros metales, sobre todo con plata (Ag). Las menas con oro generalmente presentan como matriz al cuarzo, pero también pueden hallarse carbonatos, turmalina, fluorita y asociado a pirita, calcopirita o pirrotita. Comúnmente, el oro está contenido en sulfuros básicos metálicos, en minerales afines o en subproductos de oxidación [5].

En Colombia, según información de Ingeominas, y el Servicio Geológico de Estados Unidos [6], se identificaron quince regiones auríferas (ver figura 1.3) con posibilidad de contener diez tipos de yacimientos auríferos. De estos los más comunes y conocidos son los de placeres y los filones tipo cuarzo-adularia y sulfato ácido, aunque existen otros tipos cuyo verdadero potencial se desconoce.

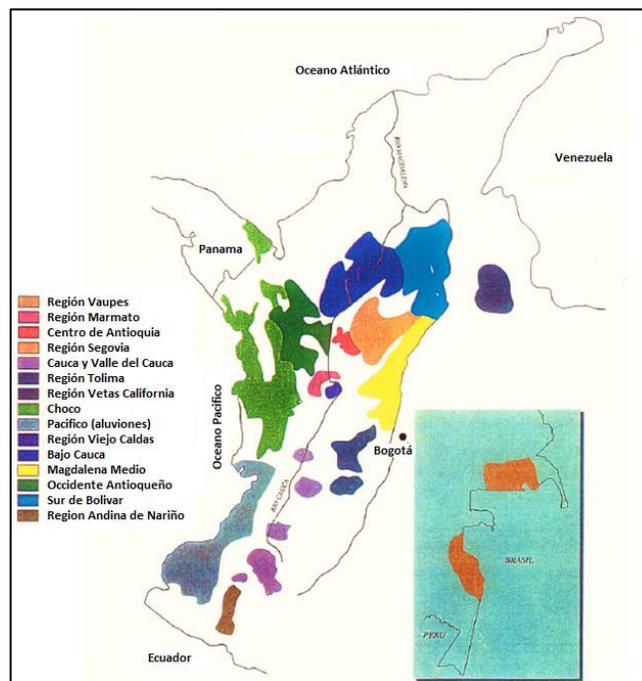


Figura 1.3 Depósitos Auríferos en Colombia. (Fuente: Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Ministerio de Minas. Bogotá, D.C. 1995)

1.2 PROCESOS DE EXTRACCIÓN ^[7]

Los métodos de extracción son diversos y varían dependiendo de la procedencia del metal, ya sea de ríos (aluviones) o de minas subterráneas (vetas). Una clasificación adicional puede hacerse desde el punto de vista de la producción limpia (un acercamiento preventivo a la gestión ambiental) ^[8].

A continuación se describen las diferentes etapas dentro de un proceso estándar de extracción de oro, desde la prospección hasta el cierre de la mina, además se menciona la técnica gravimétrica como opción de extracción limpia.

1.2.1 Prospección y exploración

La prospección geológica tiene como objetivo la localización de anomalías debidas a depósitos minerales. La investigación tiene como finalidad definir tales indicios y evaluar los recursos y reservas que albergan los yacimientos. En esta etapa se usan métodos geológicos, geoquímicos y aéreos (teledetección).

En la etapa de exploración se realizan muestreos superficiales. Tanto en la minería de aluvión como la de veta se localizan los sitios mediante cateos para remover el material. El resultado de esta etapa es la ubicación de áreas favorables en las que se centra una investigación más detallada.

1.2.2 Explotación

La diversidad de los ambientes geológicos donde se encuentran las reservas auríferas hace que existan distintos sistemas de aprovechamiento del mineral y que los tipos de minería varíen de acuerdo con factores tales como la profundidad, forma e inclinación de los depósitos, la distribución de leyes del mineral, las características geomecánicas de las rocas y del propio mineral, las condiciones físicas y culturales de la zona, la magnitud de la operación y la maquinaria utilizada.

La fase de explotación incluye las etapas de planeamiento y montaje, desarrollo, beneficio y transformación, y cierre. A continuación se describe cada una de estas etapas.

1.2.3 Planeamiento y montaje

Comprende el conjunto de actividades que van desde la organización, diseño, establecimiento de infraestructura y equipos para adelantar la explotación del mineral. En el caso de la pequeña y mediana minería colombiana esta etapa no se cumple en la gran mayoría de las regiones auríferas.

1.2.4 Sistemas de explotación

Existen dos sistemas básicos de explotación: a cielo abierto y minería subterránea, cuyas características se enuncian a continuación:

✓ ***Explotación aluvial***

Utiliza como métodos de extracción desde los más mecanizados (retroexcavadoras, buldócer, motobombas, monitores, impulso hidráulico y dragas) hasta métodos artesanales con herramientas manuales (picos, barrenos y palas). Los métodos de arranque del mineral son generalmente artesanales. La perforación se realiza en forma manual con herramientas menores (pico, palas, barrenos) o mecanizada utilizando taladros mecánicos o neumáticos y/o excavadora hidráulica.

El tratamiento dado a los estériles es el de depósito como relleno en las antiguas explotaciones, en pilas o cerca a las corrientes de agua. Para el control de aguas se emplean motobombas de diferente potencia según volumen de infiltración, escorrentía y la profundidad de la explotación, o se construyen pozas de sedimentación. También se emplean métodos de recirculación y construcción de piscinas de sedimentación.

✓ ***Explotación de filón***

Se adelanta mediante la apertura de zanjas, siguiendo el rumbo de los afloramientos o mediante túneles, cámaras y pilares. Los métodos de arranque del mineral utilizados son generalmente artesanales, la perforación se realiza en forma manual con herramientas menores o mecanizada utilizando taladros mecánicos o neumáticos y excavadora hidráulica.

Las voladuras para la apertura de sitios de extracción se realizan utilizando explosivos indugel, plus-pull y anfo como carga de columna o de fondo. En la extracción artesanal el cargue se realiza manualmente en costales, bujía, catangas y tolvas. El transporte se realiza utilizando elevadores o alacates, trenes eléctricos, locomotora y vagonetas, cable aéreo o breke. Las operaciones auxiliares contempladas en la explotación subterránea están asociadas al sostenimiento de túneles y socavones, realizándose en forma natural o entibando con madera.

La ventilación en las minas se realiza en forma natural, en algunos casos se inyecta aire por conductos plásticos o por difusión. La iluminación dentro de las minas se hace mediante el empleo de velas y lámparas de carburo. Las aguas residuales mineras se controlan construyendo cunetas, drenando por gravedad, mediante bombeo, recirculando y construyendo piscinas de sedimentación.

El manejo y disposición de estériles se realiza en la mayoría de los casos apilando los residuos en la bocamina, campo abierto o cerca a fuentes de agua o utilizando el material como relleno de cámaras o huecos. El personal se transporta a pie tanto fuera como dentro de la mina, en algunos casos se usan caballos o locomotoras.

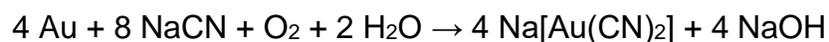
1.2.5 Beneficio y transformación de minerales

En el caso de los minerales metálicos, el objetivo es eliminar material de ganga, para aumentar el tenor o contenido metálico en forma de concentrados de más fácil manejo y mayor valor agregado. En Colombia el beneficio del mineral se realiza en las áreas inmediatas a la explotación o en las cabeceras municipales y consta de las siguientes operaciones:

- ✓ *Clasificación de tamaño:* La separación de granos en fracciones por tamaños se realiza de forma visual y manual, utilizando zarandas, mallas, angeos en la pequeña minería y mediante tromel, cribas, hidroclasificador o ciclones en la mediana minería.
- ✓ *Trituración:* En esta operación se reduce el tamaño del material para adecuarlo a la molienda, se utilizan trituradoras de quijada o manualmente con almádana.

- ✓ *Molienda*: Pretende que el mineral alcance un grado de liberación para ser recuperado gravimétricamente o por amalgamación. El proceso se realiza en molinos californianos, de bolas, antioqueños o de barras.
- ✓ *Concentración*: Puede realizarse en minería de filón por métodos gravimétricos, físico-químicos, magnéticos o electrostáticos. En la explotación aluvial de pequeña minería se realiza utilizando bateas, elevadores, monitores, canaletas y mesa de concentración; en explotaciones medianas se emplea trampa hidráulica o concentrador centrífugo.
- ✓ *Amalgamación*: Debido a la gran afinidad del oro por el mercurio, al solo contacto se produce una amalgama de Hg-Au. En la minería aluvial, la amalgamación se efectúa en canaletas, minidragas y barriles. En los filones auríferos la amalgamación es simultánea a la molienda que se hace en barriles, tambores, botellas, placas amalgamadores, mesa y prensa de amalgama. La amalgama se somete a la acción del fuego de soplete, que se realiza generalmente al aire.
- ✓ *Lixiviación con cianuro*: Es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la elución de uno o más de los componentes solubles del sólido. Se realiza especialmente en la minería de filón. El sistema más empleado es por percolación en tanques en donde las colas de la amalgamación se mezclan con cal hasta alcanzar un pH alcalino, para su depósito en tinas de cianuración. En el fondo de la tina se encuentra un medio filtrante que permite que la solución fluya por gravedad hacia cajas de precipitación con viruta de zinc. El precipitado de cianuración se pasa a un recipiente de acero donde se calcina a fuego lento para su fundición.

La reacción química en la lixiviación de cianuro es conocida como la *ecuación de Elsner* y está dada por ^[9]:



Este es un proceso electroquímico en el que el oxígeno recoge electrones del oro en una zona catódica. Los iones de oro son rápidamente acomplejados por el cianuro alrededor de la zona anódica para formar el complejo soluble aurocianida.

- ✓ *Fundición y purificación*: El precipitado de cianuración se somete a altas temperaturas (1300 a 1500 °C) en hornos eléctricos o de ACPM, durante 2 o 3 horas, obteniendo un botón

de oro y otros metales, que se someten a un tratamiento de ácido nítrico o sulfúrico que cementa el oro para ser separado por fundición nuevamente, estas operaciones normalmente se realizan al aire libre.

1.2.6 Transporte y comercialización

El mineral y/o producto elaborado se comercializa, proceso en el que intervienen intermediarios (grandes compradores o “mercado negro”). El precio de venta del mineral depende de la oferta y la demanda de los mercados nacionales e internacionales, de convenios internacionales y del nivel de elaboración del producto final.

1.2.7 Cierre de mina

Una vez finalizada la etapa productiva o de agotamiento de las reservas de la mina, se procede a su clausura o cierre, lo que implica el desmantelamiento y retiro de instalaciones, maquinaria y equipos. Se realizan además los últimos trabajos de recuperación y rehabilitación morfológica de las áreas que han sido utilizadas durante la explotación, de acuerdo con el plan minero-ambiental y al uso previsto pos-minería, todo ello con el respectivo control y seguimiento no obstante, se reporta que en las regiones auríferas, una vez extraído el mineral, son abandonadas, con la consecuente problemática de orden ambiental y de una amplia repercusión en el componente social y económico local.

1.3 GRAVIMETRÍA (Producción más limpia en la extracción de oro) ^[10]

La concentración gravimétrica es una manera sencilla, de alta capacidad, de bajo costo y de una eficacia razonable, para separar minerales pesados valiosos de la carga bruta, lo cual explica su extenso uso en la minería aurífera. Las operaciones gravimétricas aprovechan la diferencia de pesos específicos presentes en el material de veta o filón. A continuación se enuncian algunos métodos gravimétricos de extracción limpia:

El Hidroseparator utiliza una columna de agua de flujo ascendente en contracorriente para separar las partículas por su diferente peso específico; piritas o arenas negras son elevadas, expulsadas por el borde del embudo de separación y recolectadas en el cuello de recepción, mientras que la amalgama, el mercurio y eventualmente, el oro libre se hunden.

Las mesas concentradoras o vibradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Permiten una amplia variación en sus parámetros operativos y, de esta forma, se pueden adaptar al material de alimentación correspondiente. El proceso de concentración se lleva a cabo a simple vista sobre la tabla de la mesa y cualquier cambio en los parámetros puede ser visualizado.

En las canaletas o canalones el material fluye a través de un canal, que tiene varias trampas para la captura de minerales pesados, los cuales se depositan en el fondo.

El jig permite separar los componentes de un mineral de acuerdo a su peso específico, en un medio acuoso que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada. En el proceso primario el jig puede instalarse inmediatamente después del molino primario para recuperar oro grueso, oro laminar y sulfuros gruesos.

Los concentradores de espiral son artefactos de concentración utilizados principalmente para la pre-concentración de oro y sulfuros auríferos. El típico concentrador de espiral consiste en una canaleta helicoidal que tiene entre cuatro a seis vueltas. Su funcionamiento puede ser comparado con el de una batea cónica, donde las partículas livianas se mueven por la acción del agua hacia el borde y las partículas pesadas se concentran en el centro.

1.4 GENERALIDADES DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA.

Las perspectivas mineras del departamento del Cauca son de mucha importancia en cuanto a metales y minerales preciosos, minerales metálicos básicos y minerales no metálicos de uso industrial, para construcción y energéticos. El oro se encuentra en mineralizaciones de oro y sulfuros de oro en forma aluvial y en vetas; además hay plata y platino en menor proporción. ^[11]

1.4.1 Generalidades del Municipio El Tambo

El Tambo se localiza al centro occidente del Departamento del Cauca, con un área de 2.840,05 km² ocupando el primer lugar en extensión dentro del departamento por lo que se divide en 3 regiones: Rio Micay, Alto Cauca y Rio Patía ^[12].

La economía de la región se basa principalmente en la agricultura, la ganadería, y la extracción de minerales como carbón, oro y arena. Actualmente, y como una amenaza a la biodiversidad, se localizan grandes extensiones de bosques comerciales de pinos y eucalipto cultivados por Smurfit Cartón de Colombia, además los cultivos de uso ilícito se han extendido impactando negativamente los bosques nativos ^[13].

Los datos poblacionales del municipio presentan inconsistencias entre las dos grandes fuentes primarias de información, DANE y SISBEN. Mientras el DANE reporta según censo de 2005-2006, 34.258 habitantes, el SISBEN registra 52.247 habitantes. Esta información no permite establecer análisis y proyecciones precisas sobre variables como vivienda, salud, servicios públicos, que orientan la medición de los índices de necesidades básicas insatisfechas y en general de la calidad de vida.

Es importante destacar que pese a la extensión, biodiversidad, multiculturalidad, la eminente vocación agrícola y pecuaria del municipio, las condiciones de las familias evidencian bajos niveles de vida, siendo que en las estadísticas del SISBEN, 46.549 tambeños pertenecen al nivel 1 y 5.389 al nivel 2, esto significa que 97% de la población presenta grandes niveles de pobreza.

1.4.2 Corregimiento Las Fondas

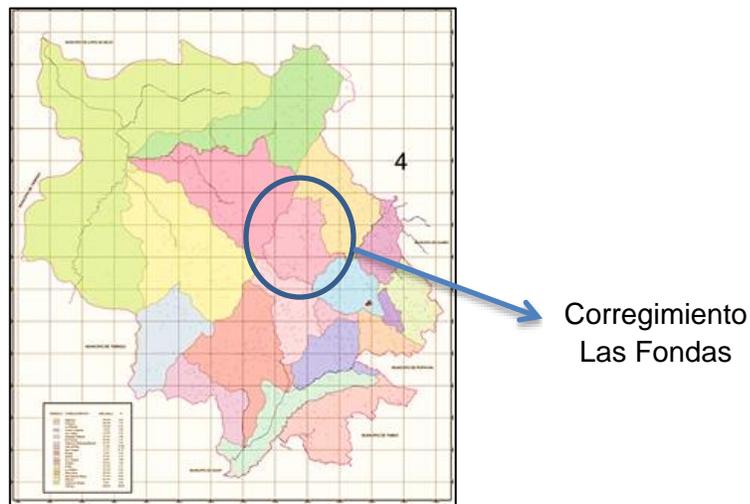


Figura 1.4 Municipio El Tambo, resaltándose el Corregimiento Las Fondas. (Fuente: sitio oficial del Municipio El Tambo, Cauca)

En las faldas del cerro Munchique, en límites con el parque, se encuentra ubicado el corregimiento **Las Fondas** que ha sido desde otros tiempos un corredor importante para el comercio desde el centro del departamento hacia la costa pacífica, además de ser un escenario geológico, lo que ha propiciado la explotación minera desde tiempos ancestrales, trayendo consigo la afluencia de mineros de todas las regiones del país. El Corregimiento Las Fondas se ubica dentro de la Región Alto Cauca, con un área de 98.21 km²^[14].

La zona es rica en recursos minerales como minas de oro, carbón, hierro y cal, el 50% de la población está dedicada a la minería y el otro porcentaje restante a la agricultura y la explotación forestal (Smurfit Cartón de Colombia), lo que ubica a la región no solo como despensa alimentaria, sino también de mineral para todo el occidente del departamento del Cauca y una matriz de empleo y subsistencia para los pobladores de la región, aun cuando el corregimiento cuenta con caminos de herradura y vías de difícil acceso.

En el corregimiento Las Fondas está la vereda Las Fondas que cuenta con una población de 2210 habitantes (según información del centro de salud del corregimiento, año 2011). Además de ser un corredor importante para los intercambios económicos de la región, es el sitio de reunión, discusión y organización de uno de sus principales estamentos económicos, la Cooperativa de Mineros de Fondas - Limoncito, en la que se coordina y controla toda la actividad minera del sector. Además de recaudar el producto y comercializarlo, orienta a los mineros en su labor para hacerla más eficiente y segura.

La minería se ha convertido para la región en una fuente incansable de suministro del material aurífero, de recursos económicos permanentes y de una opción de empleo para la población. Los yacimientos minerales existentes muestran aun gran potencial minero que muy seguramente será explotado permanentemente y cada día con mayor grado de mecanización.

Las explotaciones mineras subterráneas en más del 90% están amparadas por títulos de exploración, licencias de explotación y contratos de concesión, por lo que esta región es un claro ejemplo de legalidad minera, no obstante esta fortaleza no implica que la minería de la región sea una actividad “Competitiva y Limpia”, ya que los procesos que se siguen para la

extracción manifiestan un nivel de las plantas casi artesanal, lo que por lo general está ligado a altos niveles de contaminación ambiental.

1.4.3 Sector Minero (Mina El Seis y Mina Chede) ^[15]

La zona donde se concentran el mayor número de enclaves mineros cubre un área de 200 hectáreas, en este sector se encuentran las minas y los montajes mineros del El Seis y Chede a una distancia aproximada de 5 km sobre la ladera oriental de la cordillera occidental, cerca de la zona de mitigación (borde) del parque Natural Nacional Munchique en dirección Este - Oeste respecto al cerro de Munchique, sector que corresponde a la zona central del corregimiento Las Fondas.

En la mina El Seis se siguen procesos de extracción artesanal y en la mina Chede el proceso es tecnificado incluyendo una etapa de extracción limpia. Sin diferenciar el grado de tecnificación de las minas, los mineros de esta región se distribuyen diferentes tareas de acuerdo con la experiencia, la habilidad y la demanda de empleados que se requiera.

La mina El Seis se encuentra en la zona de ladera del sector y su planta de beneficio dista de ella aproximadamente 2.5 km. La planta cubre un área de 30 m² y las tareas que demanda la mina se distribuyen entre 3 trabajadores, que realizan oficios desde explotación de la veta hasta la fundición del producto. La mina El Seis se encuentra registrada en Ingeominas ante el Registro Minero Nacional.

Por su parte, la Mina Chede se encuentra en el sector denominado “Mina Tapada”. La planta de beneficio es contigua a la mina y cubre un área de 20 m². Las tareas se distribuyen entre 7 trabajadores, que realizan tareas de explotación, manejo de maquinaria, cianuración y vigilancia de la planta. Al igual que la mina El Seis, Chede se encuentra en el Registro Minero Nacional.

Como ya se mencionó en la introducción de este documento, en esta investigación se analizaron muestras de diferentes etapas dentro del proceso de extracción de oro de dos minas del corregimiento Las Fondas: El Seis y Chede.

CAPÍTULO II - Proceso Experimental: Toma de Muestra y Tratamiento

Para la toma de las muestras se partió de la experiencia de los mineros, lo que llevó a dividir el proceso de extracción en etapas de acuerdo con la mina analizada. Para la recolección de las muestras se tuvo como fundamento teórico el manual de muestreo minero ^[16] y los manuales de INVIAS “muestreo de materiales para construcción de carreteras i.n.v.e – 201 – 07” ^[17] y “reducción del tamaño de las muestras transportadas i.n.v.e – 202 – 07” ^[18].

Después de recolectada, cada muestra se sometió a un tratamiento en laboratorio para obtener una muestra apta para ser sometida a cada uno de los análisis de interés. Para ello la muestra fue sometida a inspección visual con el fin de retirar material extraño (hojas y demás material orgánico). Las arenas resultantes de la trituración fueron llevadas al mortero de ágata a maceración para reducir el tamaño de partícula. Posteriormente se aplicó el método de cuarteo para obtener una muestra representativa de todo el conjunto del material de mina; la muestra resultante se tamizó en tamiz de 150 μm . Con el fin de obtener partículas uniformes, la muestra fue sometida a este proceso dos veces. Las arenas resultantes se emplearon como muestra para análisis, esto es, fueron sometidas a espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), y microscopía electrónica de barrido/detector de energía dispersiva (EDS).

A continuación se describe el proceso de toma de muestras en cada etapa, en cada mina.

2.1 Mina El Seis

En esta mina los mineros siguen un proceso de extracción comprendido en seis etapas. Algunas de ellas no implican ni separación de material ni ataque químico, lo anterior, unido al hecho de la dificultad de acceder a muestras de todas las etapas, llevó a identificar para esta investigación cuatro etapas.

Inicialmente se tomó una muestra directamente de la veta con la intención de contar con material que no hubiera sido sometido a ningún proceso de extracción. Esta es la primera etapa considerada en este trabajo, a la que se le denominó ***Muestra del filón***.

El primer paso seguido por los mineros en esta planta es someter el material de mina a un proceso de trituración en un molino de martillo, no obstante como esta etapa no involucra

ningún proceso de separación de materiales no se consideró como etapa de análisis. En el siguiente paso someten el material triturado a la acción de un ***molino de bolas***, agregando mercurio al material. Esta es la segunda etapa considerada en esta investigación.

En la tercera etapa del proceso de extracción las arenas son llevadas a tanques de cianuración donde se agrega cianuro de sodio y cal. Esta es la tercera etapa de interés de la investigación, a la que se le denominó ***muestra del proceso de cianuración***.

Después que se extrae el máximo porcentaje de oro a las arenas, se almacenan en pilas como residuo final. De estas pilas se obtuvo la última muestra a analizar, etapa a la que se le denominó ***muestra de residuo final***.

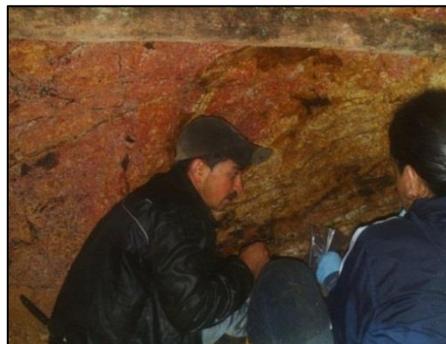
A continuación se describirá cada etapa, el proceso de toma de muestra y el tratamiento en laboratorio.

2.1.1 Etapa 1: Muestra del filón

En esta mina la fuente de materia prima (veta) está ubicada alrededor de 2.5 km de la planta de extracción, por tanto para obtener la muestra fue necesario recorrer quebradas y pasos de montaña. Generalmente los mineros hacen el recorrido a caballo para facilitar el transporte del material de la mina hacia la planta de extracción. La mina tiene un acceso con inclinación de 45°, para la toma de la muestra se procedió a entrar a una cámara (ver figura 2.1a) y se tomó el material del filón con un cincel según la indicación del minero (ver figura 2.1b).



(a)



(b)

Figura 2.1 Mina El Seis. (a) Cámara (b) obtención de la muestra.

Por su carácter de roca esta muestra requiere de un paso previo en el laboratorio que consiste en una trituración con mazo, simulando el efecto del molino de martillo, dando como resultado arenas que posteriormente pasan por el proceso detallado previamente.

En la figura 2.2.a se observa la roca tal como fue obtenida de la veta. En la figura 2.2.b se observa el resultado de la trituración con el mazo y en la figura 2.2.c se observa el polvo final, listo para análisis.

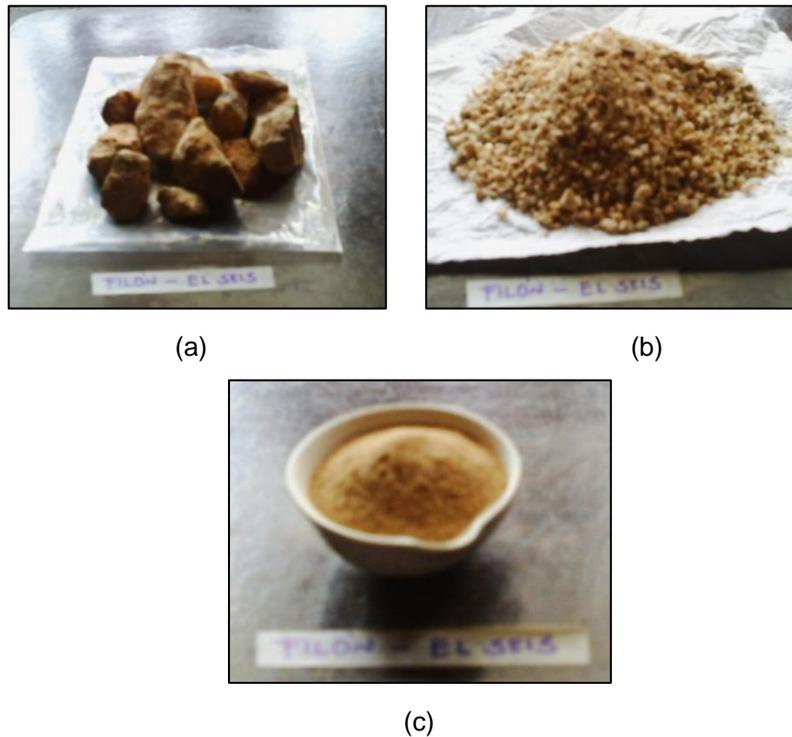


Figura 2.2 (a) rocas de veta (b) después de trituración con mazo (c) después de tratamiento en laboratorio.

2.1.2 Etapa 2: Muestra del Molino de bolas

Esta muestra se obtuvo en la planta de extracción; después de que la roca del filón es triturada se lleva este material al molino de bolas (ver figura 2.3a) donde se agrega mercurio. Las arenas resultantes del molino se depositan en pilas para continuar con el proceso (ver figura 2.3b). Para obtener una muestra representativa de la formación en pila y de acuerdo con lo reportado en el manual Invias, se tomó material de la base, la parte intermedia y la parte superior de la pila de arena.



(a)

(b)

Figura 2.3 Mina El Seis. (a) Molino de bolas. (b) formación en pilas.

En la figura 2.4 se observan las arenas obtenidas del molino de bolas (2.4a) y el polvo final para caracterización.



(a)

(b)

Figura 2.4 Tratamiento de muestra del molino de bolas (a) muestra obtenida del molino de bolas (b) muestra después del tratamiento.

2.1.3 Etapa 3: Muestra del proceso de cianuración

Después de que el material de mina sale del molino de bolas es llevado a los tanques de cianuración (ver figura de 2.5a). En esta etapa se agrega agua, cal y cianuro de sodio a las arenas con el fin de obtener cianuro de oro. En esta etapa se tomó muestra de las arenas en proceso de cianuración. Debido al alto nivel de toxicidad la muestra fue tomada por el minero quien cuenta con la experiencia necesaria para minimizar riesgos. (ver figura 2.5b).



(a)



(b)

Figura 2.5 Mina El Seis. (a) Tanques de cianuración. (b) Toma de muestra.

Para su tratamiento en laboratorio esta muestra fue manipulada con especial cuidado por su alto nivel tóxico. Inicialmente se sometió a secado al sol y posteriormente se sometió al proceso ya descrito. En la figura 2.6 se observa la muestra tal como es obtenida del proceso de cianuración (Fig. 2.6a) y la obtenida después del tratamiento en el laboratorio (Fig 2.6b).



(a)



(b)

Figura 2.6 (a) Muestra obtenida del proceso de cianuración (b) muestra después de tratamiento en laboratorio

2.1.4 Etapa 4: Muestra del Residuo Final

Después del proceso de cianuración, cuando el oro ya ha sido recuperado, se tiene un sobrante de material (figura 2.7), que generalmente es usado como material de construcción. Esta es quizá la muestra de mayor interés para este proceso ya que, siendo el residuo final, es la que determina la eficiencia de la extracción de oro, por tanto se tomaron muestras de esta etapa aplicando el método de muestreo para el material en pilas.



Figura 2.7 Mina El Seis. Pila de material sobrante de cianuración

Debido a que estas arenas estaban sometidas a factores ambientales, inicialmente se secaron al sol y a continuación se siguió el tratamiento al que se sometieron las demás muestras. La figura 2.8 presenta fotografías de la muestra obtenida del proceso de cianuración (2.8a) y la muestra final (2.8b), posterior al tratamiento en laboratorio.



(a)

(b)

Figura 2.8 (a) Muestra obtenida después del proceso de cianuración (b) muestra después del tratamiento en laboratorio

2.2 Mina Chede

En esta mina el proceso se divide en dos partes: inicialmente se hace extracción limpia y con los residuos se hace cianuración. Para el análisis de residuos se dividió el proceso en cinco etapas. Para esta mina se tomaron muestras del proceso de extracción limpia en la planta tecnificada y posteriormente se tomaron muestras de la etapa final de cianuración en la planta contigua.

La muestra “referencia” se tomó directamente de la planta de extracción. Esta es la primera etapa considerada, a la que se le denominó **Muestra del filón**. El primer paso seguido por los mineros es someter el material de mina a un proceso de trituración en una tolva. Al igual que en la mina El Seis, no se consideró como etapa de análisis ya que no involucra ningún proceso de separación de materiales. En el siguiente paso el material se transporta por una banda hasta la mesa vibradora que separa el material con mayor valor. Esta es la segunda etapa de la investigación denominada **muestra de mesa vibradora**. En la tercera etapa de análisis se tomó muestra de las arenas residuo de la mesa vibradora, estas arenas aún contienen valor mineral y por esto son destinadas para el proceso de cianuración. Esta etapa fue denominada **muestra del residuo de la mesa vibradora**. Debido a que en el momento de la visita no se estaba cianurando en esta planta, fue necesario tomar material de este proceso en la planta contigua.

Para la cuarta etapa de la investigación, denominada **muestra del molino de bolas**, se tomaron muestras del molino, proceso en el cual se agrega mercurio a las arenas. En la quinta etapa se tomaron muestras del proceso final de cianuración (viruta de zinc con cianuro de oro). A esta etapa del proceso se le denominó **muestra de cianuración**.

2.2.1 Etapa 1: Muestra del filón

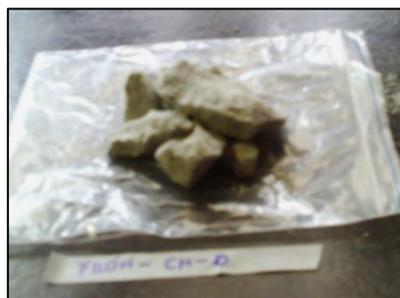
La mina Chede está ubicada entre la vía del corregimiento Las Fondas y Limoncito. Las plantas de extracción están ubicadas al lado de la mina. La toma de la muestra se hizo directamente de la planta de extracción ya que se tenía material de mina disponible en el momento de la visita. Las rocas obtenidas de esta mina tienen características diferentes a las de la mina El Seis, ya que según los mineros de la zona el material aurífero posee la mayor ley² de la región. Debido a que el material estaba distribuido en pilas (ver figura 2.9) se tomó la muestra con base en el método de muestreo para material en pilas.

² Ley: expresión con la que se cuantifica la concentración y pureza de los metales preciosos, describiendo la cantidad de oro o plata en las ligas de barras, joyas o monedas.



Figura 2.9 Mina Chede. Pila de material de mina.

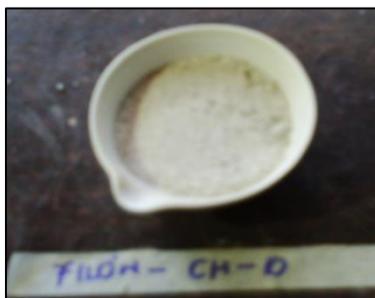
Tal como la muestra de filón de la mina El Seis, esta muestra fue sometida a trituración con mazo, simulando el efecto del molino de martillo, posteriormente las arenas se sometieron a los procesos ya descritos en laboratorio para la obtención de los polvos aptos para caracterización. En la figura 2.10 se observa la roca obtenida de la veta (Fig. 2.10a), la arena obtenida después de la trituración (Fig. 2.10b) y el polvo final para caracterización (Fig. 2.10c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10 (a) rocas de veta (b) trituración con mazo (c) muestra después de tratamiento en el laboratorio

2.2.2. Etapa 2: Muestra de mesa vibradora

En esta planta se realiza extracción limpia por medio de la mesa vibradora (ver figura 2.11a). Anterior a esta etapa el material de la mina ya ha pasado por un proceso de trituración en la tolva y es transportado por una banda hasta la mesa que, por medio de gravimetría, permite la recuperación de oro fino liberado del material aurífero del filón. Debido a que la mesa vibradora de la mina Chede se encuentra en constante funcionamiento, esta muestra fue tomada por el minero a cargo (figura 2.11b).



(a)



(b)

Figura 2.11. Mina Chede (a) Mesa vibradora. (b) Toma de muestra

Como paso adicional al tratamiento de laboratorio ya descrito, la muestra tomada de la mesa vibradora se sometió a secado al sol durante varios días para retirar el exceso de agua. La figura 2.12 presenta las arenas tomadas de la mesa vibradora (figura 2.12a) y la muestra obtenida en el laboratorio (figura 2.12b).



(a)



(b)

Figura 2.12 (a) arenas de mesa vibradora (b) muestra después del tratamiento en el laboratorio

2.2.3. *Etapa 3: Muestra del residuo de la mesa vibradora*

El residuo de la mesa vibradora aun contiene oro aliado a otros materiales por ello es llevado a la etapa de cianuración. Este material es transportado por medio de una canal (figura 2.13a) hasta un pozo (figura 2.13b) para retirar el exceso de agua, después se almacena en pilas (figura 2.13c) y finalmente es llevado al proceso de cianuración. En esta etapa se tomaron muestras aplicando el método de muestreo para material en pilas.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.13 Mina Chede (a) Canal para el transporte de material de residuo de la mesa vibradora. (b) Pozo para secado de material. (c) Pila de material de residuo de mesa vibradora.

Nuevamente, esta muestra requiere de secado al sol antes del tratamiento en el laboratorio. En la figura 2.14 se observa las arenas residuo de la mesa vibradora (figura 2.14a) y las arenas después del tratamiento en laboratorio (figura 2.14b).



(a)



(b)

Figura 2.14 (a) arenas residuo de mesa vibradora (b) muestra después del tratamiento en laboratorio

Como ya se dijo se tomaron dos muestras de la planta contigua, provenientes todas de la mina Chede.

2.2.4. Etapa 4: Muestra del molino de bolas

Al igual que en la mina El Seis, después de que la roca de filón es triturada el material se lleva al molino de bolas (figura 2.15), donde se agrega mercurio y posteriormente las arenas se depositan en pilas para luego ser cianuradas. Para la toma de esta muestra recurrimos al método de muestreo de material en pila.



Figura 2.15 Mina Chede. Molino de bolas.

Tratamiento de la muestra en laboratorio

Esta muestra fue sometida inicialmente a secado al sol y posteriormente hizo el tratamiento en el laboratorio en la figura 2.16 se presenta la muestra del molino de bolas de la mina Chede (figura 2.16a) y la muestra después del tratamiento en laboratorio (figura 2.16b).



(a)

(b)

Figura 2.16 (a) muestra de molino de bola (b) muestra después del tratamiento en laboratorio

2.2.5 Etapa 5: Muestra de la etapa final de cianuración

Esta muestra se tomó en la etapa final del proceso de cianuración. La solución cianurada de oro llega desde los tanques de cianuración hasta los barriles con viruta de zinc (figura 2.17a) por medio de un conducto (figura 2.17b), el zinc hace que se precipiten los metales deseados como el oro y la plata, proceso que dura alrededor de 15 días, finalmente el proceso de extracción del metal termina con la fundición del material resultante. Debido al contenido de oro que presenta el material en esta etapa del proceso no se admiten la intervención de personas ajenas a él, por tanto la obtención de la muestra para esta investigación fue hecha directamente por el minero.



(a)

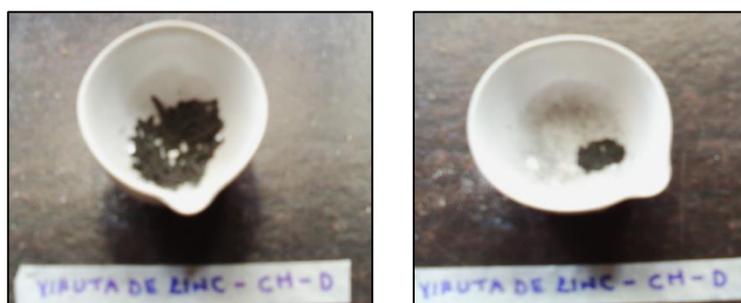


(b)

Figura 2.17 Mina Chede. (a) Barriles con viruta de zinc. (b) Conducto de los tanques de cianuración hasta los barriles con viruta de zinc.

Tratamiento de la muestra en laboratorio

La muestra del proceso final de cianuración requirió un tratamiento especial debido a que, según los mineros, era la muestra que debía ser más rica en contenido de oro y plata. Inicialmente se hizo secado en horno a una temperatura 100 °C por 3 horas, para eliminar el exceso de líquido. A continuación se llevó a fundición en plancha a una temperatura de 120 °C durante 8 horas aproximadamente. Para obtener partículas uniformes se maceró en el mortero de ágata y finalmente se recolectó la muestra para análisis. En la figura 2.18 se presenta la muestra de cianuración obtenida de la planta (figura 2.18a) y la muestra después del proceso de laboratorio (figura 2.18b).



(a)

(b)

Figura 2.18 (a) muestra obtenida del proceso de cianuración (b) muestra después del tratamiento en laboratorio.

CAPÍTULO III - Resultados y Análisis

Después de obtenidas las muestras de acuerdo con lo descrito en el capítulo anterior, se procedió a someterlas a las diferentes técnicas analíticas. Se usaron tres técnicas de análisis, espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX) y detector de energía dispersiva (EDS).

Los espectros FT-IR fueron obtenidos haciendo uso del espectrofotómetro Nicolet Model IR200 del laboratorio Catálisis - CYTEMAC y fueron sometidos a un proceso de deconvolución con el software FITYK-0.9.3 que permitió un análisis más riguroso de las bandas presentes. Los DRX se obtuvieron del difractómetro Phillips PW 1700 con monocromador de grafito y radiación de Cu, del laboratorio de Caracterización de Materiales del Centro Atómico de Bariloche, Argentina, a cargo del Dr. Alberto Caneiro. Para los análisis se utilizó el programa X'Pert HighScore Versión 2.1b, producido por PANanalytical B.V. Almelo, The Netherland – 2005. Igualmente, los diferentes resultados EDS se obtuvieron en el laboratorio del Dr. Caneiro.

Las técnicas mencionadas fueron complementarias, siendo que los FT-IR permitieron determinar los grupos funcionales presentes en las muestras, información que pudo ser corroborada con los difractogramas. A su vez, la EDS, siendo una técnica de sondeo local para detectar átomos presentes en la muestra, arrojó resultados aún más finos, dando composiciones elementales. El contar con las tres técnicas sobre diferentes muestras representativas de un conjunto, brindó una mayor confianza sobre los resultados finales. Por tal motivo fue de interés hacer un estudio detallado de las tres técnicas sobre muestras obtenidas en cada etapa de cada mina, tal como se presenta en este capítulo.

Verificada la coherencia entre los diferentes resultados para cada etapa, se procedió a hacer un análisis comparativo por técnica, lo que condujo al diagnóstico final de eficiencia de las técnicas seguidas en cada mina. Este resultado comparativo se presentará en el capítulo IV.

A continuación se presentan los resultados y el análisis correspondiente para cada una de las muestras, separando la información por mina y por etapa.

3.1. Mina El Seis

Como se detalló en el capítulo II, el proceso en esta mina se dividió en cuatro etapas. Antes de someter las muestras al respectivo análisis se obtuvo una información por parte de los mineros sobre los posibles componentes minerales en ellas, lo anterior permitió hacer una comparación directa entre la información empírica y la arrojada por las técnicas de análisis.

3.1.1 Etapa 1: Muestra de filón

Según los mineros de la mina El Seis, la muestra de filón debe contener oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), cuarzo (SiO_2) y pirita (FeS_2). A seguir, se presentan los diferentes resultados obtenidos para esta muestra.

❖ Análisis por FT-IR

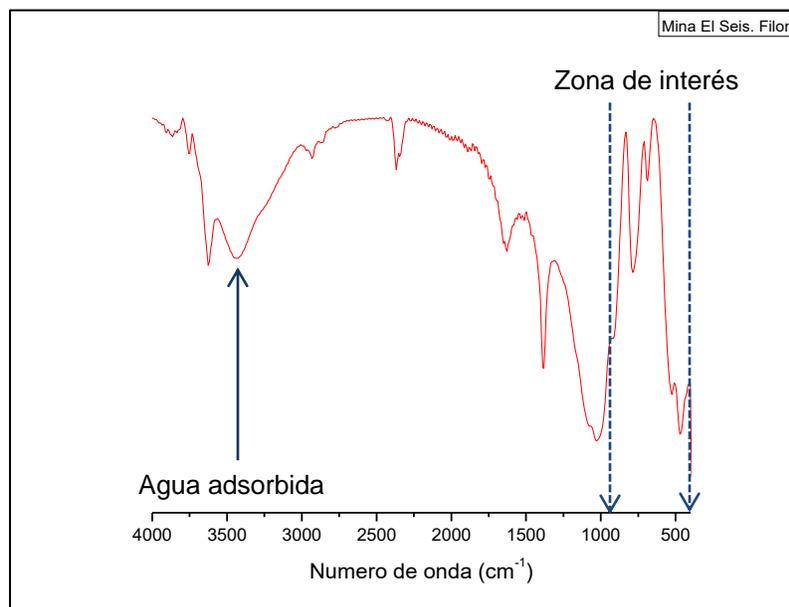
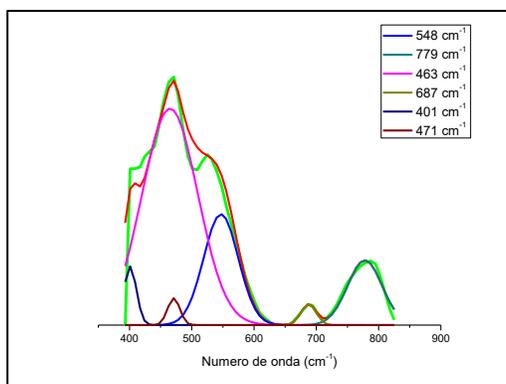


Figura 3.1 Espectro FTI-R de muestra de filón.



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
548	Al-O
401	Si-O
463	Si-O
471	Si-O
779	Si-O
687	Si-O

Figura 3.2 Deconvolución de la zona de interés

Para todos los espectros FT-IR se eligió como región de interés el rango entre 850 y 400 cm⁻¹ (zona de huella) y fue en esta zona donde se hizo la deconvolución tal como se observa en la figura 3.2, encontrando bandas asociadas a vibraciones de grupos funcionales de Si-O fuera del plano de vibración y el enlace Al-O (alumina octaédrica) ^[19]. El rango entre 900 y 4000 cm⁻¹ existen átomos que conforman distintos enlaces. La región situada entre 1400 y 4000 cm⁻¹ es de especial utilidad para la identificación de los grupos funcionales presentes en moléculas orgánicas. Los grupos funcionales identificados en esta zona provienen de vibraciones de estiramiento de enlaces C-H, C-O y vibraciones libres del grupo hidroxilo O-H. En la tabla 3.1 se detallan las bandas y el grupo funcional asociado.

Tabla 3.1 Grupos funcionales para el rango 900 – 4000 cm⁻¹

Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
900 – 1000	C – O
1030 – 1100	Si-O-Si
1350 – 1500	C – N
1600 – 1800	C = C
2000 – 2500	C – O
3000 – 3100	C – H
3200 – 3300	O – H
3450 – 3500	H - O – H
3500 – 4000	O – H

❖ *Análisis por DRX*

La figura 3.3 presenta el difractograma DRX para la muestra de filón. Como se observa, se presenta en gran cantidad cuarzo (SiO_2) tal como lo afirmaron los mineros, no obstante no se observa a partir de esta caracterización la presencia de oro o plata. Hay trazos de un óxido de hierro y de alúmina, además de grafito.

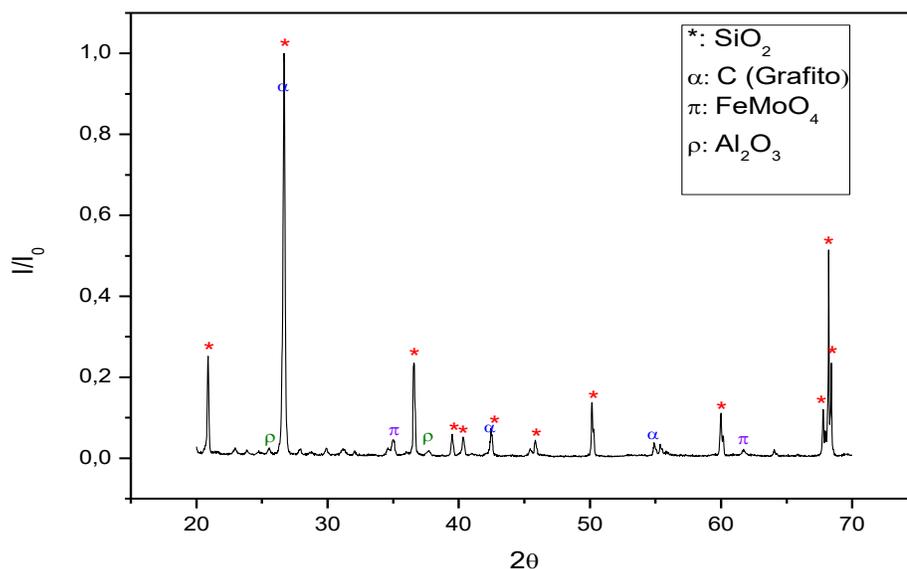


Figura 3.3 Difractograma de Muestra de filón.

❖ *Análisis por EDS*

Este análisis corrobora lo encontrado en el difractograma de la figura anterior, presentando silicio (Si), carbono (C), aluminio (Al) y Hierro (Fe). Esta técnica es más “fina” que la difracción por rayos X, por lo que es posible detectar presencia de elementos que se encuentren en proporciones muy pequeñas y no hayan sido detectadas por el DRX, así, se encuentran trazos de potasio (K), magnesio (Mg) y platino (Pt). No se observa oro ni plata. Es de aclarar que este análisis es el resultado de un sondeo local, es decir que los resultados son de una pequeña parte de la muestra analizada, sin embargo, está en mucha concordancia con lo arrojado por el DRX.

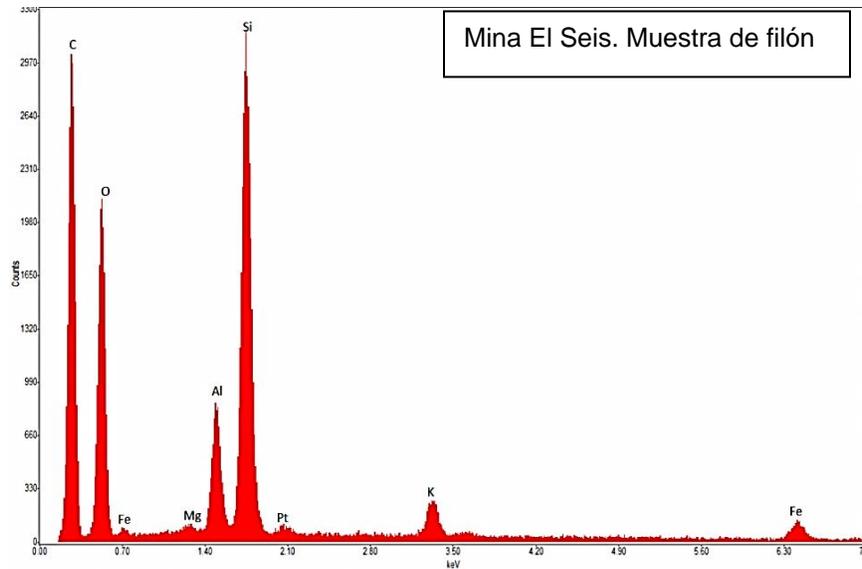


Figura 3.4 EDS muestra de filón.

3.1.2 Etapa 2: Muestra del Molino de bolas.

Nuevamente, antes de someter la muestra al respectivo análisis, se obtuvo una información por parte de los mineros sobre los posibles componentes minerales en ella. De acuerdo con ellos esta muestra debe contener oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), cuarzo (SiO_2) y pirita (FeS_2), además mercurio (Hg) como agregado de amalgamación y acero (aleación de Fe) proveniente de las bolas que se desgastan al moler el material de mina, es decir, todos los componentes de la muestra de filón más los provenientes del proceso de molienda.

❖ *Análisis por FT-IR*

Al igual que en la muestra anterior, en la deconvolución de la zona de interés entre, 850 - 400 cm^{-1} (figura 3.6), se encontraron bandas asociadas a grupos funcionales de Si-O y Al-O. En el rango entre 900 – 4000 cm^{-1} , se tienen las bandas reportadas en la tabla 3.1, no obstante las banda correspondiente a agua adsorbida son menos intensas.

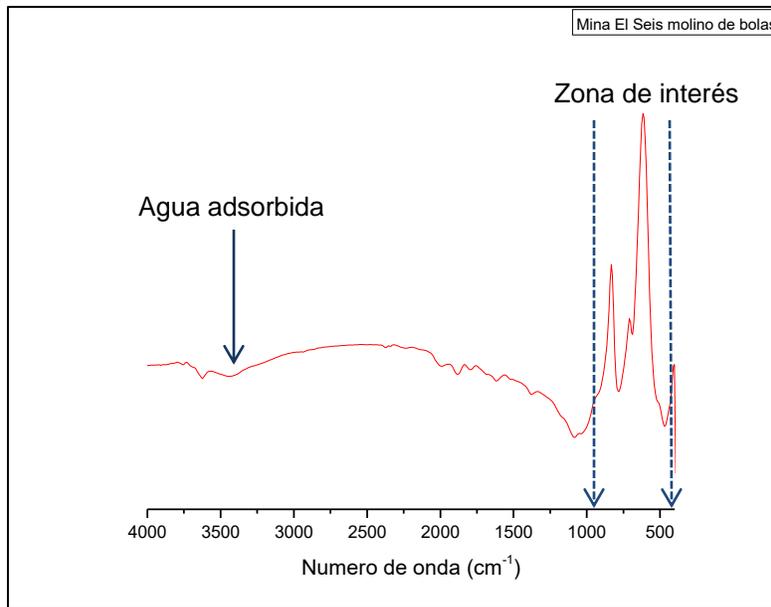
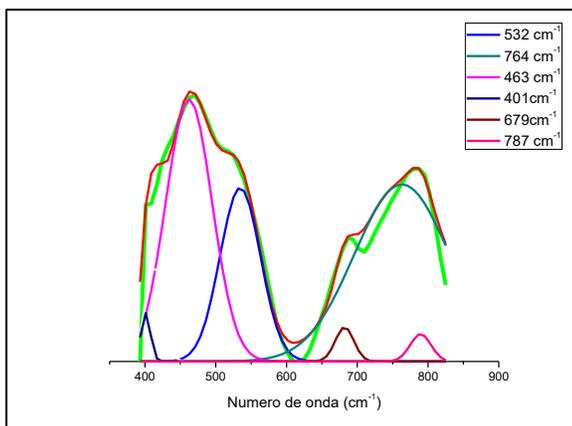


Figura 3.5 Espectro FT-IR de muestra de molina de bolas



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
401	Si-O
463	Si-O
523	Al-O
679	Si-O
764	Si-O
787	Si-O

Figura 3.6 Deconvolución de la zona de interés

❖ *Análisis por DRX*

Este difractograma presenta un resultado casi totalmente de cuarzo (SiO₂) coexistiendo con una fase de grafito. En esta muestra desapareció el óxido de hierro y la alúmina que se observaron en el DRX de la muestra de filón, por tanto el resultado del proceso de molienda con el molino de bolas genera una muestra más “pura” y rica en silicio.

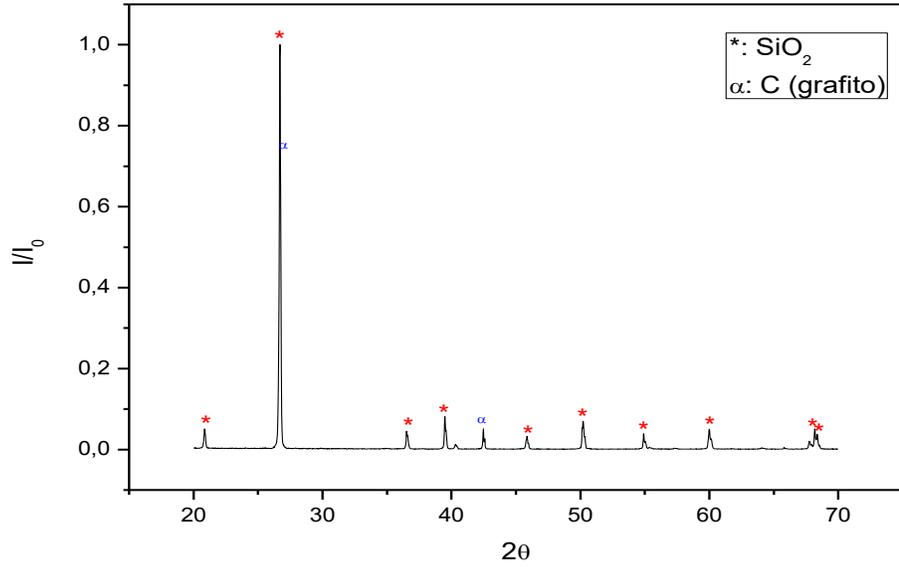


Figura 3.7 Difractograma muestra del molino de bolas

❖ *Análisis por EDS.*

Nuevamente el resultado EDS corrobora lo reportado por el DRX. Aparece en gran proporción el Si seguido por el C. Continua presentándose trazos de Al, Fe, K y Pt pero en cantidades muy bajas.

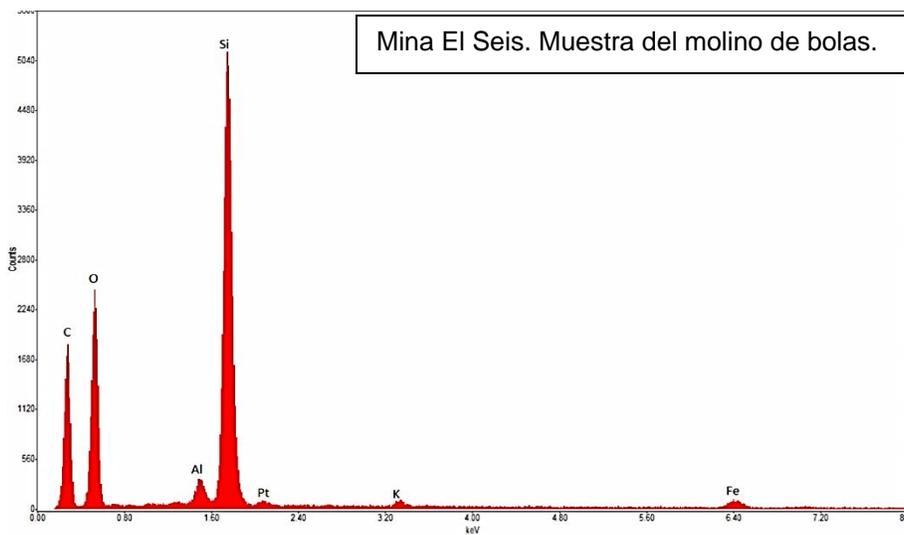


Figura 3.8 EDS muestra del molino de bolas.

3.1.3 Etapa 3: Muestra de proceso de cianuración.

La información suministrada por los mineros sobre los posibles componentes indica que en las arenas hay presencia de Au, Ag, Cu, SiO₂, FeS₂ (Pirita), Hg, NaCN (Cianuro de sodio) y cal.

❖ *Análisis por FT-IR*

En la muestra de arenas en proceso de cianuración, el espectro FT-IR presenta las bandas asociadas con adsorción de agua y vibraciones libres del O-H ligados a Si o Al y agua adsorbida, tal como en las dos etapas anteriores. En la zona de interés se presentan de nuevo las bandas asociadas a vibraciones de grupos funcionales de Si-O y Al-O.

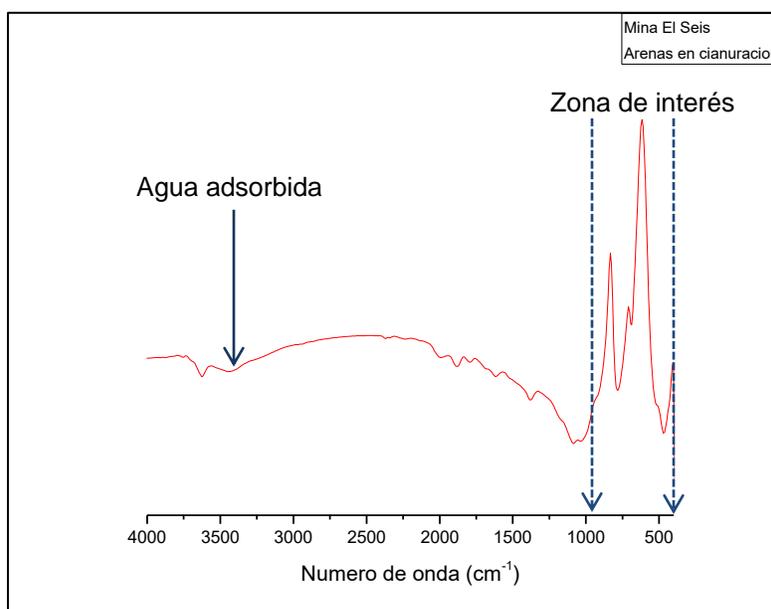
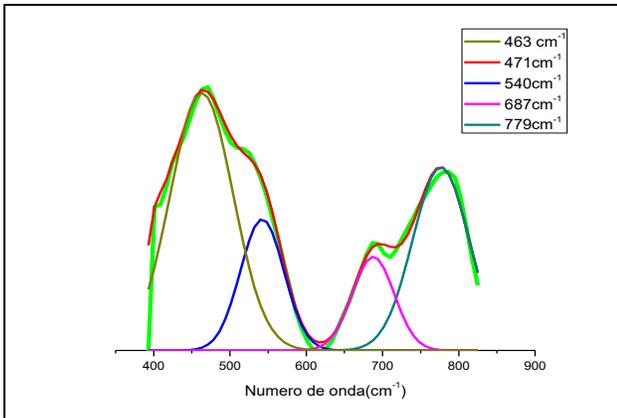


Figura 3.9 Espectro FT-IR muestra de arenas en proceso de cianuración.



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
463	Si-O
471	Si-O
540	Al-O
687	Si-O
779	Si-O

Figura 3.10 Deconvolución zona de interés

❖ *Análisis por DRX*

El difractograma muestra un resultado similar a la muestra del molino de bolas, nuevamente aparece SiO₂ y C en fase grafito, no obstante la fase grafito aumenta en intensidad. La fase alúmina ha desaparecido, tanto el aumento de la fase grafito como de la desaparición de la fase alúmina pueden ser un resultado del proceso de cianuración.

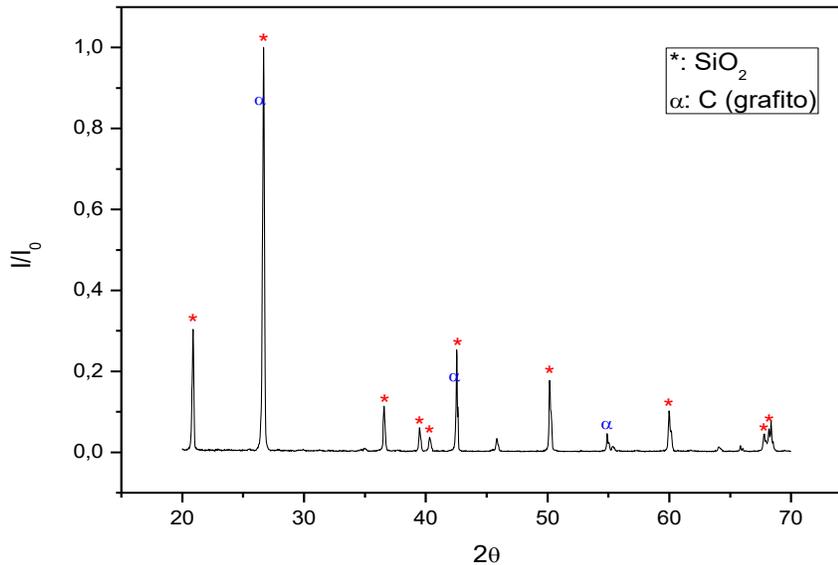


Figura 3.11 Difractograma muestra de arenas en proceso de cianuración

❖ *Análisis por EDS*

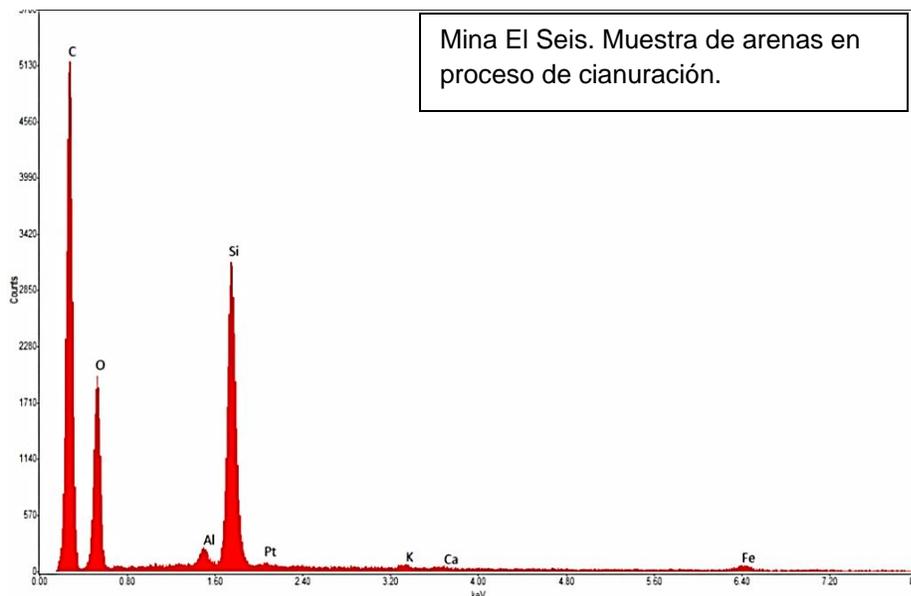


Figura 3.12 EDS muestra de arenas en proceso de cianuración.

El resultado EDS valida lo observado en el DRX, presentando una gran proporción de C. También aparece Si seguido por trazos de Al, Fe, K, Pt y Ca pero en cantidades muy bajas.

3.1.4 Etapa 4: Muestra de residuo final

Para el caso del residuo final del beneficio de oro, la información de los mineros señala que las arenas posiblemente contienen SiO_2 , Cu, NaCN y cal, y que en general estas arenas no poseen valor comercial. A continuación se presentan los diferentes resultados para esta muestra.

❖ *Análisis por FT-IR*

Como se observa en la figura 3.14, en la deconvolución de la zona de interés del espectro FT-IR nuevamente se encuentran las bandas de Si-O fuera del plano de vibración y el enlace Al-O. La banda 3450 cm^{-1} correspondiente al agua (tabla 3.1) se ve acentuada debido a la adsorción de agua del medio.

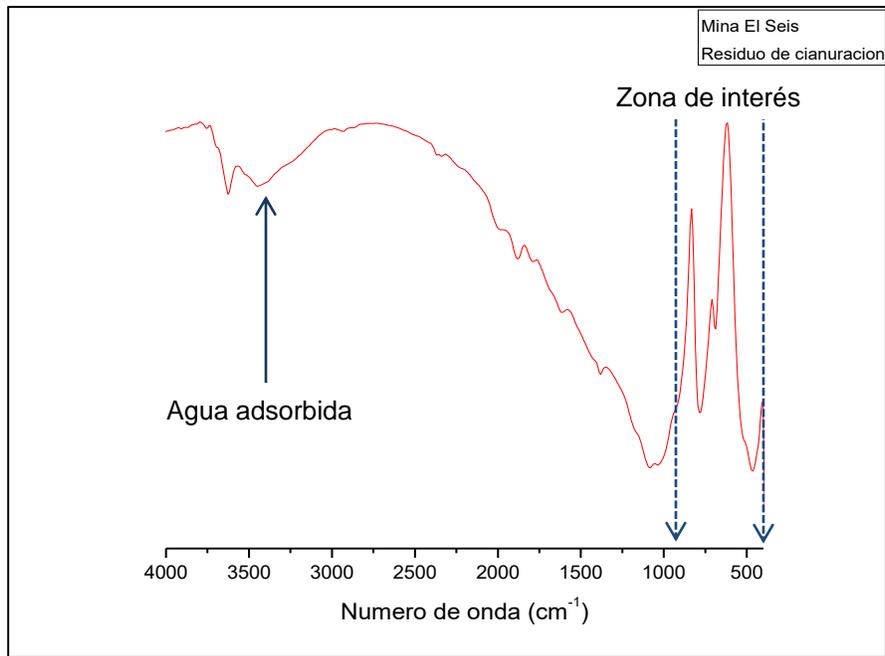
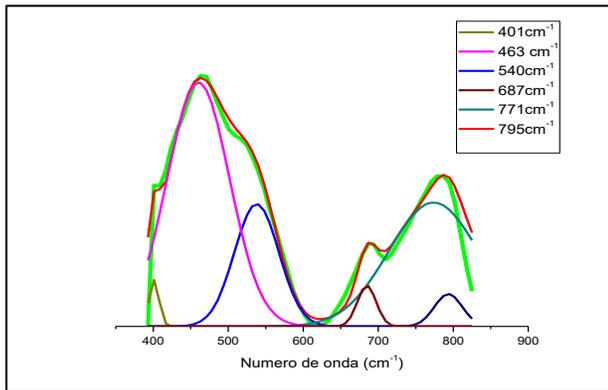


Figura 3.13 Espectro FT-IR muestra de arena residuo de cianuración.



Banda (cm ⁻¹)	Grupo Funcional
401	Si-O
463	Si-O
540	Al-O
687	Si-O
771	Si-O
795	Si-O

Figura 3.14 Deconvolución zona de interés

❖ *Análisis por DRX*

En el difractograma se observa nuevamente SiO₂ y C en fase grafito, lo que valida la hipótesis acerca del efecto del proceso de cianuración sobre las fases que aparecían en los DRX previos a dicho proceso.

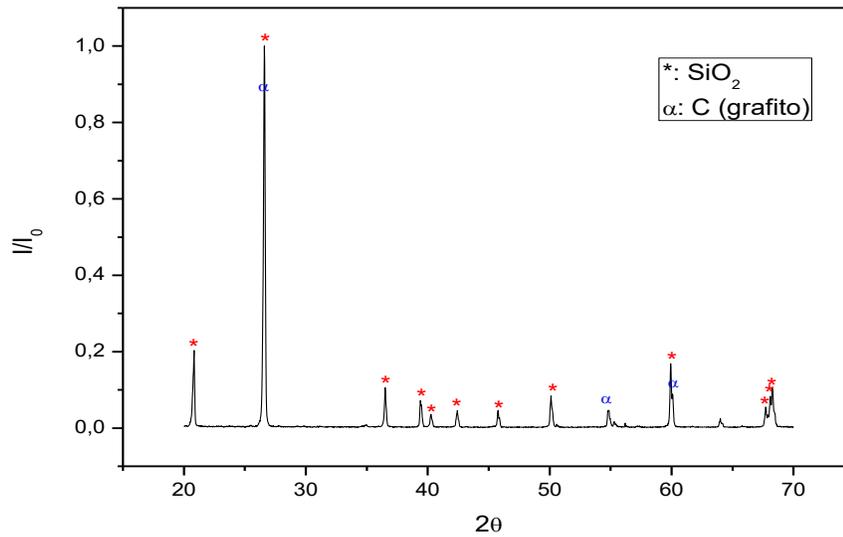


Figura 3.15 Difractograma muestra de residuo final.

❖ *Análisis por EDS*

El resultado EDS muestra una gran proporción de Si seguida de C lo cual corrobora el resultado obtenido por DRX, también se presentan trazos de Al, Fe, K, Pt y Ca pero en cantidades muy bajas. La diferencia entre el EDS de la figura 3.12 y de la figura 3.13 está en la proporción de C y Si.

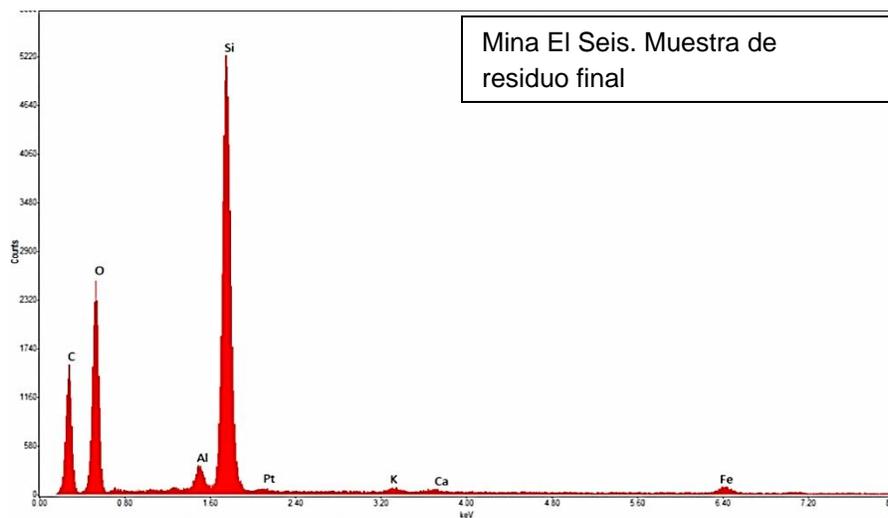


Figura 3.16 EDS muestra de residuo final

3.2 Mina Chede

Esta mina tiene procesos más tecnificados que la mina el Seis, además cuenta con varias plantas de extracción, no obstante no todas operan simultáneamente, lo que obligó a tomar muestras de dos plantas diferentes para cubrir el proceso en su totalidad. Así, las muestras de las etapas 2 y 3 son de una planta y las muestras de las etapas 4 y 5 son de otra planta.

3.2.1 Etapa 1: Muestra del filón

Los mineros de la mina Chede reportan los mismos componentes que reportaron los mineros de El Seis para sus respectivas muestras de filón.

❖ *Análisis por FT-IR*

Una comparación directa entre el espectro FT-IR de esta muestra (figura 3.17) y el de la muestra de filón de la mina El Seis (figura 3.1), permite observar diferencias significativas tanto fuera como dentro de la zona de interés. Aun si casi todas las bandas se reproducen en ambos FT-IR, las intensidades son diferentes. Nuevamente aparecen las bandas correspondientes a bandas asociadas a vibraciones de grupos funcionales de Si-O y enlace Al-O. En la zona que va desde 900 a 4000 cm^{-1} se encuentran nuevamente los resultados reportados en la tabla 3.1.

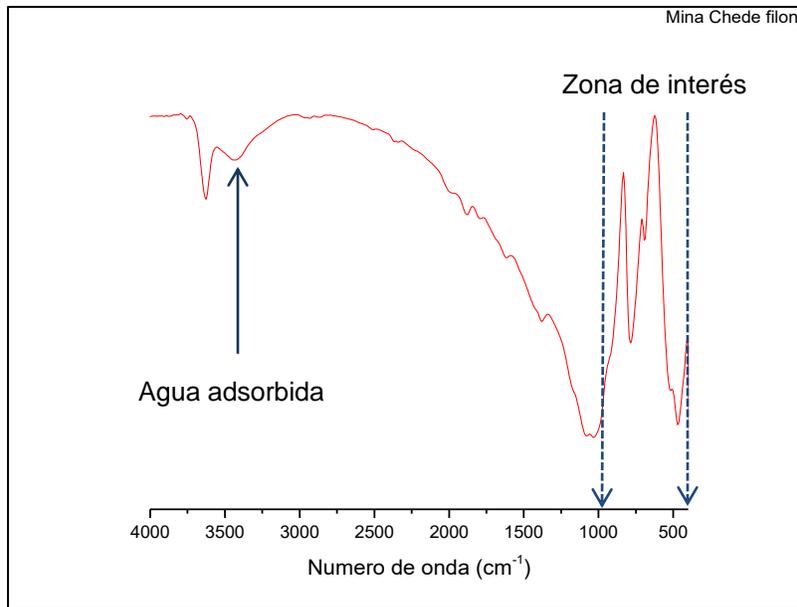
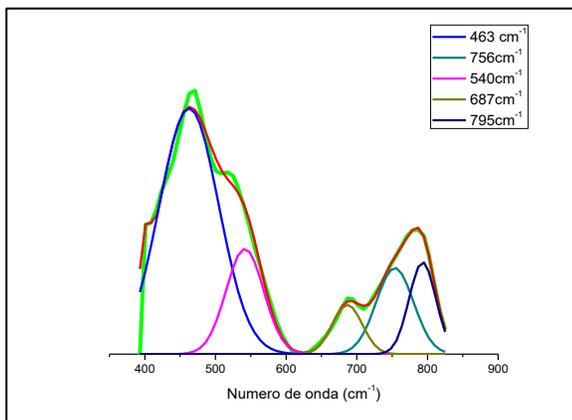


Figura 3.17 Espectro FT-IR muestra de filón.



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
463	Si-O
540	Al-O
687	Si-O
756	Si-O
795	Si-O

Figura 3.18 Deconvolución zona de interés

❖ *Análisis por DRX*

Este difractograma presenta principalmente SiO₂ y C (grafito) además se presenta Ca(CO₃) (carbonato de calcio).

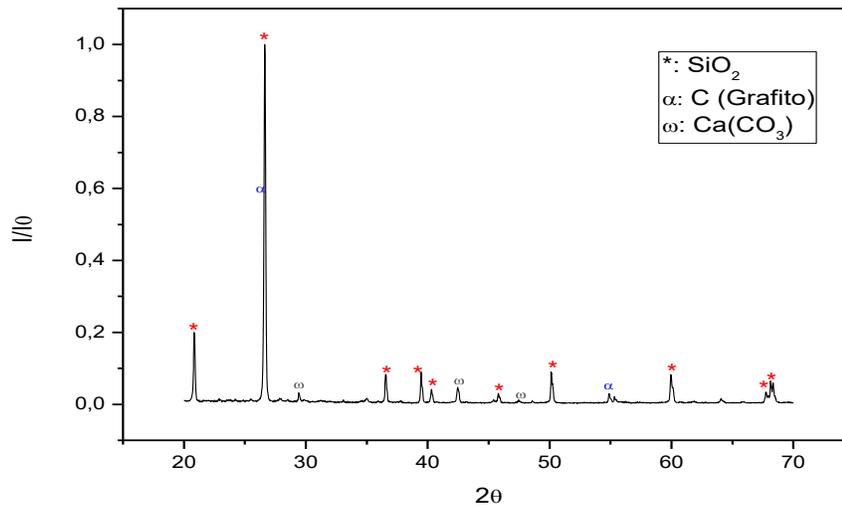


Figura 3.19 Difractograma muestra de filón.

❖ *Análisis por EDS*

Nuevamente el análisis por EDS confirma el análisis reportado por DRX: carbono (C), silicio (Si), presentado además pequeñas trazas de (Al) Azufre (S), Hierro (Fe), Potasio (K), Calcio (Ca) y Platino (Pt). Se observan algunos componentes diferentes a los de la mina El Seis posiblemente debido a las condiciones geológicas de cada zona minera.

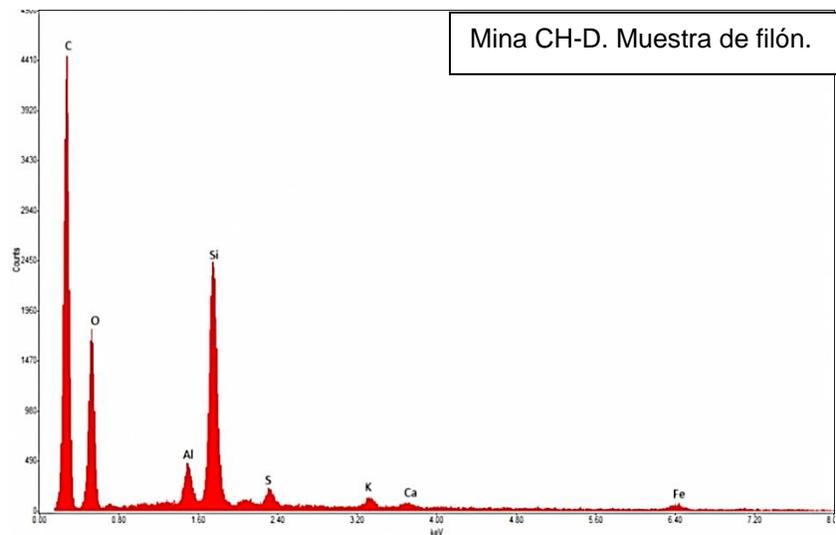


Figura 3.20 EDS muestra de filón

3.2.2 Etapa 2: Muestra de mesa vibradora

De acuerdo a la información de los mineros, la mesa separa el oro del material de mina, por esto, según la información recolectada en esta muestra se tiene Au, Ag, además de Cu, SiO₂ y FeS₂ (elementos pesados que separa el proceso gravimétrico de la mesa vibradora).

❖ Análisis por FT-IR

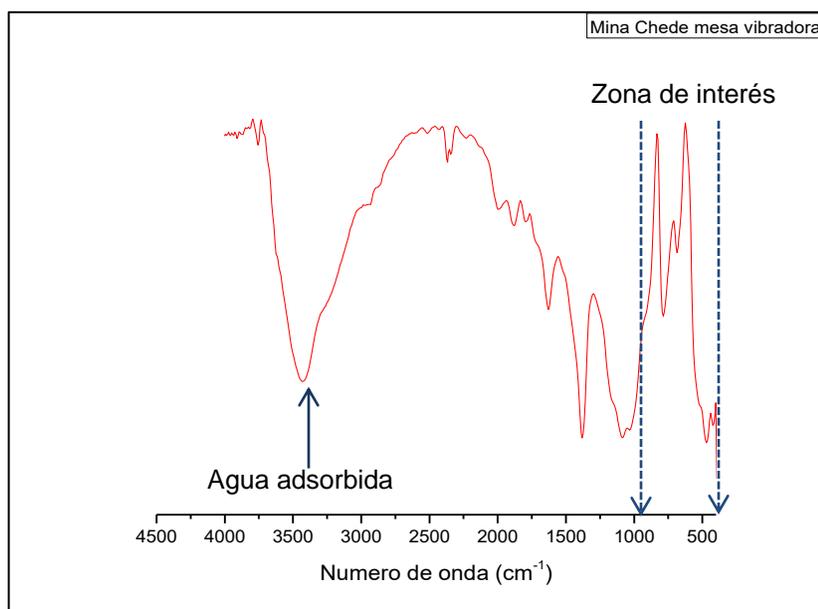
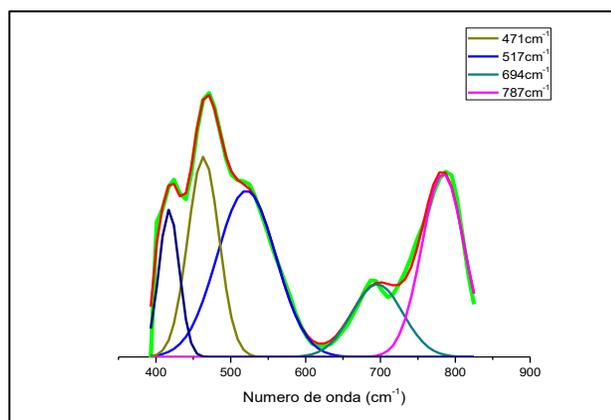


Figura 3.21 Espectro FT-IR muestra de mesa vibradora



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
471	Si-O
517	Al-O
694	Si-O
787	Si-O

Figura 3.22 Deconvolución zona de interés

El espectro FT-IR de la muestra de mesa vibradora cambia apreciablemente en intensidad de bandas. Nuevamente se presentan las bandas asociadas con adsorción de agua, pero muy pronunciadas debido a la adición de agua que se hace en esta etapa. Al igual que los espectros anteriores se observan las bandas descritas en la tabla 3.1. En la deconvolución de la zona de interés se encuentran nuevamente los enlaces de Si-O y Al-O.

❖ *Análisis por DRX*

En el difractograma se observan nuevamente SiO_2 y C además de algunas fases que no se observaron en las muestras anteriores. En este caso se tiene FeS_2 (pirita), y Al_2CaO_4 , y nuevamente se observa la fase carbonato de calcio, $\text{Ca}(\text{CO}_3)$. Esta es una de las pocas muestras que presenta un difractograma con presencia de varias fases como resultado del efecto de la mesa vibradora.

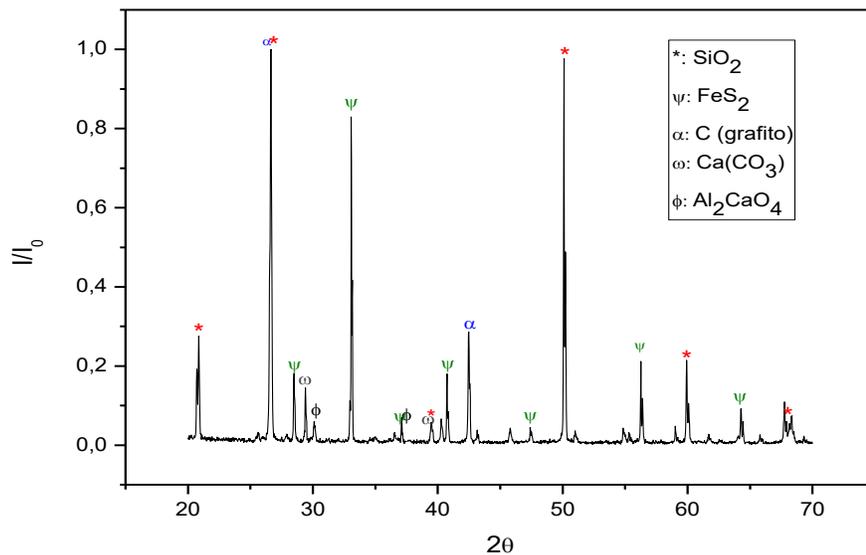


Figura 3.23 Difractograma muestra de mesa vibradora.

❖ *Análisis por EDS*

El análisis por EDS muestra además Si y C común a las demás muestras un porcentaje mayor de Fe. Además se presentan trazos de Al, Pt, Ca, K, y Zn. En este caso el pico máximo no fue reconocido por el instrumental, por esta razón se hizo un nuevo análisis por

EDS encontrando además de lo mencionado Na, Mg, Mo, Ti, Mn y Tc. Este análisis al igual que los anteriores corrobora lo encontrado en el difractograma.

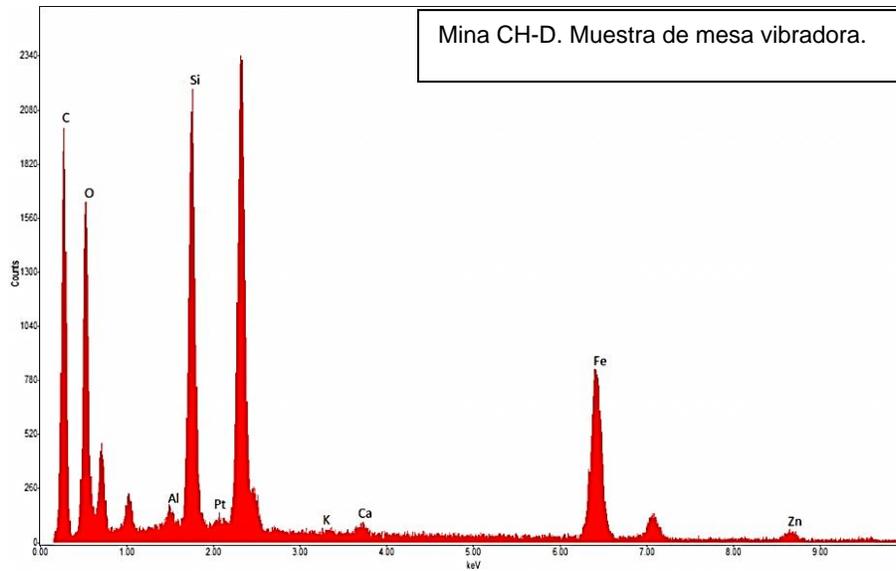


Figura 3.24 EDS muestra de mesa vibradora.

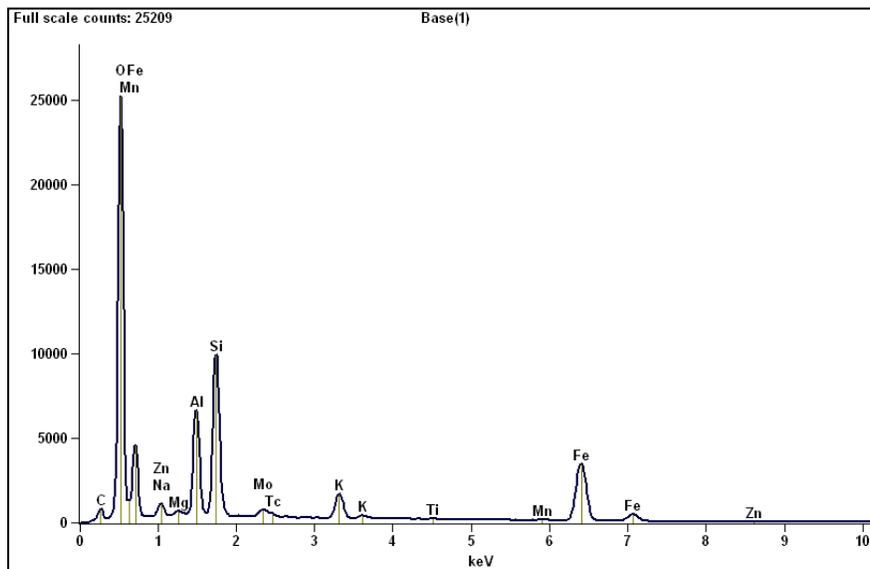


Figura 3.25 EDS muestra de mesa vibradora

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %
C K	4775	1.79	3.72	C	1.79
O K	154656	38.49	60.17	O	38.49
Na K	5016	1.08	1.17	Na	1.08
Mg K	1937	0.31	0.31	Mg	0.31
Al K	53266	6.89	6.39	Al	6.89
Si K	88353	11.30	10.07	Si	11.30
K K	17804	3.12	1.99	K	3.12
Ti K	292	0.08	0.04	Ti	0.08
Mn K	893	0.48	0.22	Mn	0.48
Fe K	55993	33.70	15.09	Fe	33.70
Zn K	438	0.78	0.30	Zn	0.78
Mo L	8052	1.67	0.43	Mo	1.67
Tc L	1433	0.33	0.08	Tc	0.33
Total		100.00	100.00		100.00

3.2.3 Etapa 3: Muestra del residuo de la mesa vibradora

Debido a que el oro libre y otros elementos se separan en la mesa vibradora, el residuo de esta etapa puede contener oro ligado a otros materiales, por esto estas arenas se destinan a cianuración. De acuerdo con la información de los mineros en esta muestra es posible encontrar Au, Ag, Cu, SiO₂ y FeS₂.

❖ *Análisis por FT-IR*

La intensidad de este espectro presenta bandas correspondientes a aguas adsorbidas (3430 - 3450 cm⁻¹) que han disminuido su intensidad con respecto a la muestra anterior, lo que era de esperarse por que las arenas en esta etapa se llevan a secado para continuar el proceso de extracción. Para bajas longitudes de onda (rango de interés), se siguen presentando los enlaces de Si-O y Al-O.

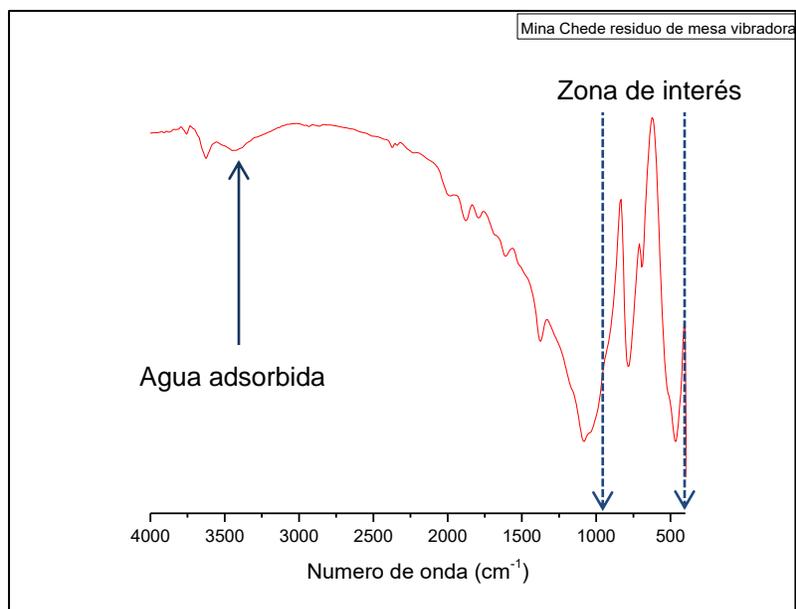
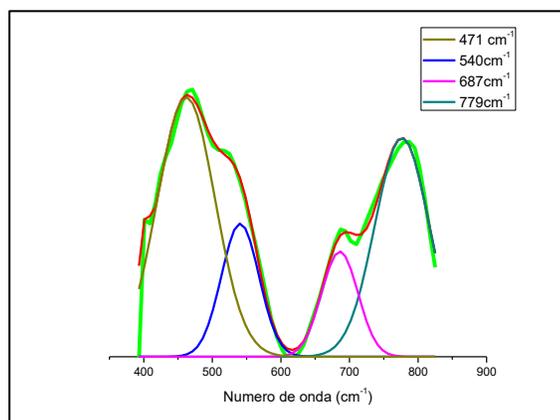


Figura 3.26 Espectro FT-IR muestra residuo de mesa vibradora.



Banda (cm ⁻¹)	Grupo funcional
471	Si-O
540	Al-O
687	Si-O
779	Si-O

Figura 3.27 Deconvolución zona de interés

❖ *Análisis DRX*

En el difractograma se tiene SiO₂ y C, fases presentes en casi todas las muestras analizadas, además se encuentran dos nuevos compuestos FeMoO₄ y Al₂SiO₅ (un neosilicato), esta es una característica importante ya que hasta esta etapa solo se ha sometido el material de mina a procesos de reducción de tamaño de partícula y de separación de material (gravimetría).

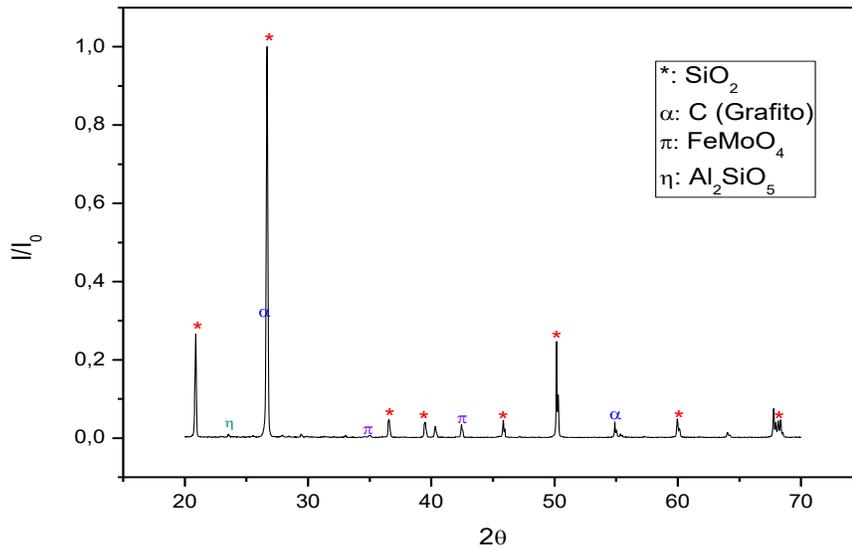


Figura 3.28 Difractograma muestra residuo de mesa vibradora.

❖ *Análisis por EDS*

Nuevamente se observa un fuerte trazo de Si seguido de C, también se observa en menor proporción Al, Pt, K, Ca y Fe, la gran mayoría de estos componentes se encuentran en las fases que se presentan en el difractograma.

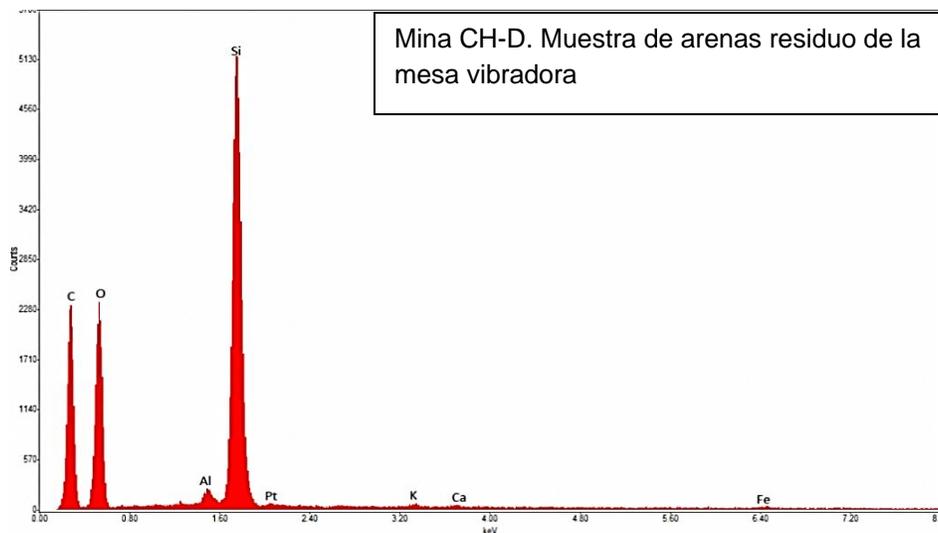


Figura 3.29 EDS muestra de arenas residuo de mesa vibradora

3.2.4 Etapa 4: Muestra del molino de bolas

Como se mencionó esta muestra y la siguiente provienen de otra planta de la mina Chede. La información por parte de los mineros sobre los posibles componentes minerales indica que esta muestra puede contener oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), cuarzo (SiO_2) y pirita (FeS_2), mercurio (Hg) por el proceso de amalgamación y acero (aleación de Fe) de las bolas que se desgastan al moler el material de mina.

❖ Análisis por FT-IR

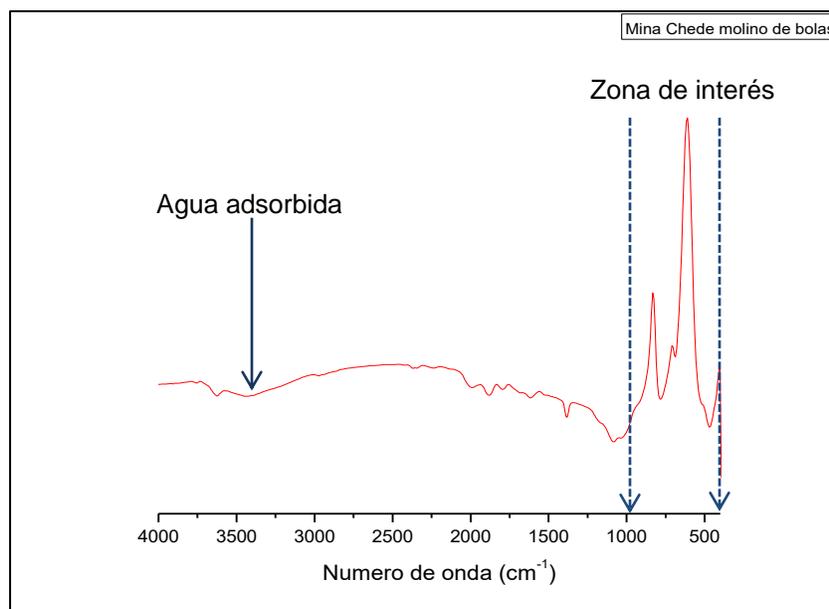
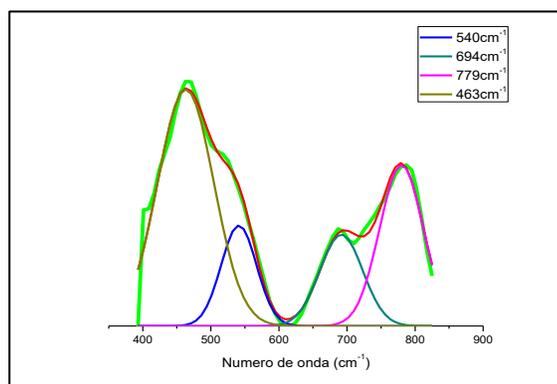


Figura 3.30 Espectro FT-IR muestra de molino de bolas



Banda (cm^{-1})	Grupo funcional
463	Si-O
540	Al-O
694	Si-O
779	Si-O

Figura 3.31 Deconvolución zona de interés

El FT-IR para esta muestra (figura 3.30), es bastante similar al de la muestra del proceso equivalente, (molino de bolas) de la mina El Seis (figura 3.5), siendo que en ambos FT-IR solo las bandas en la zona de interés son las más intensas.

❖ *Análisis por DRX*

El difractograma presenta la misma tendencia de las muestras anteriores, es decir, picos de SiO_2 y C (grafito), no obstante por ser una muestra de otra planta no se observan los compuestos FeMoO_4 y Al_2SiO_5 presentes en el difractograma de la etapa anterior.

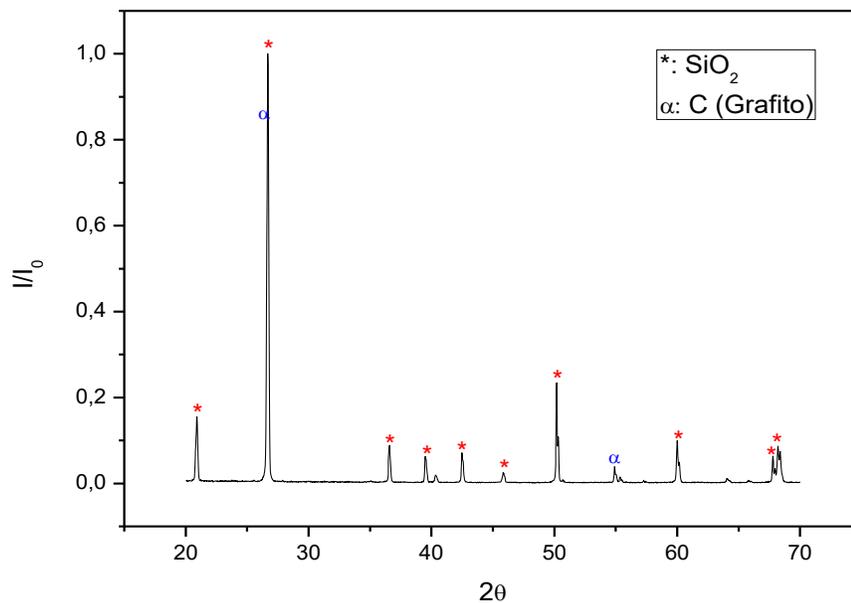


Figura 3.32 Difractograma muestra del molino de bolas

❖ *Análisis por EDS*

El resultado por EDS muestra un fuerte trazo de Si y un trazo pequeño de C, además hay presencia de Al, Fe, Pt, K y Ca, nuevamente este espectro está en concordancia con lo visto en el difractograma.

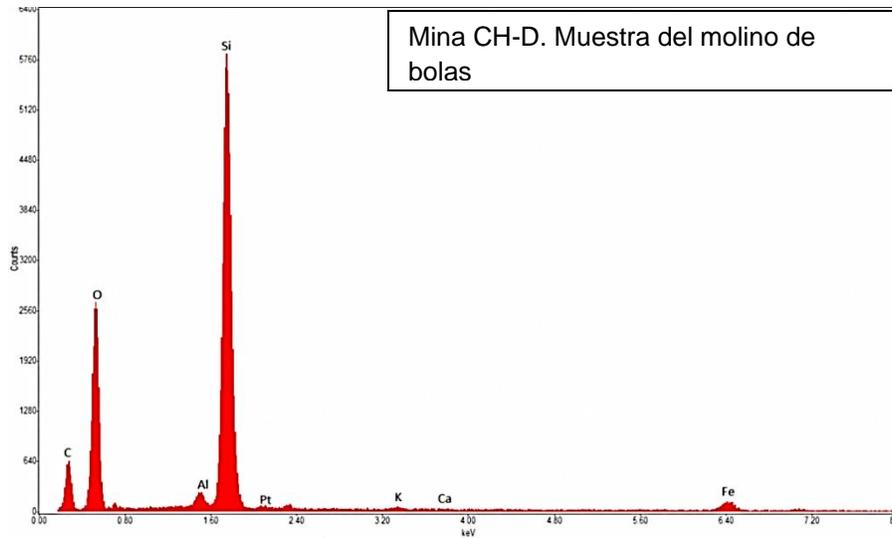


Figura 3.33 EDS muestra de molino de bolas.

3.2.5 Etapa 5: Muestra de la etapa final de cianuración

Esta es la etapa final del beneficio de oro. De acuerdo con los mineros el oro y la plata se liberan de sus matrices, por lo cual suponen que son los componentes principales en esta muestra, además debe haber presencia zinc, que es el metal usado para que el compuesto aurocianida $[\text{Au}(\text{CN})_2]$ se pegue al oro.

❖ *Análisis por FT-IR*

Debido a que este espectro es considerablemente diferente a los espectros de las demás etapas, la zona de interés se tomó en el rango de $1400 - 400 \text{ cm}^{-1}$. En la deconvolución de esta zona se encuentran vibraciones ya reportadas como Si-O y Al-O. La novedad en este FT-IR es la aparición de la banda alrededor de 424 cm^{-1} que puede ser asociada con vibraciones del compuesto aurocianida (Au-C-N) ^[20], esta información deberá ser confirmada con el DRX y el EDS respectivo. Las bandas entre 850-1400 exhiben enlaces de C=H, C-O y C-N.

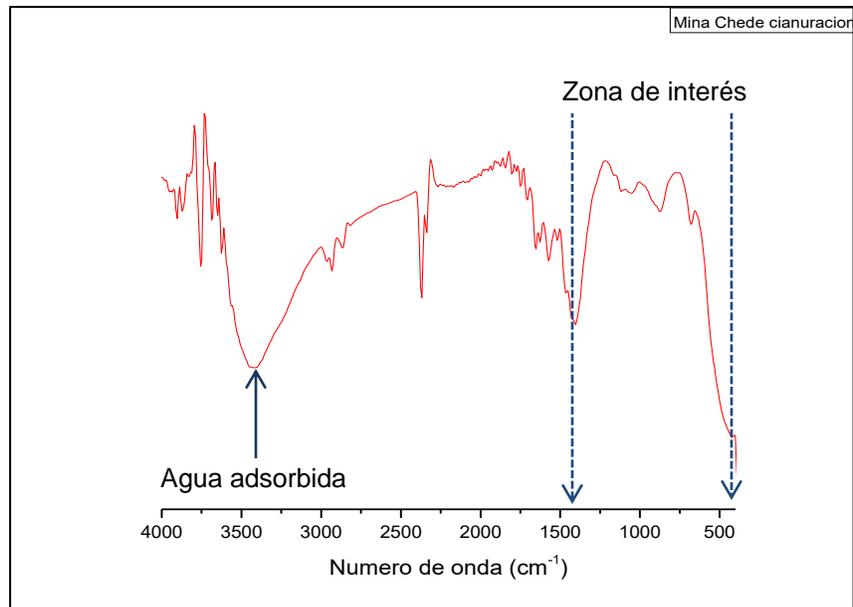
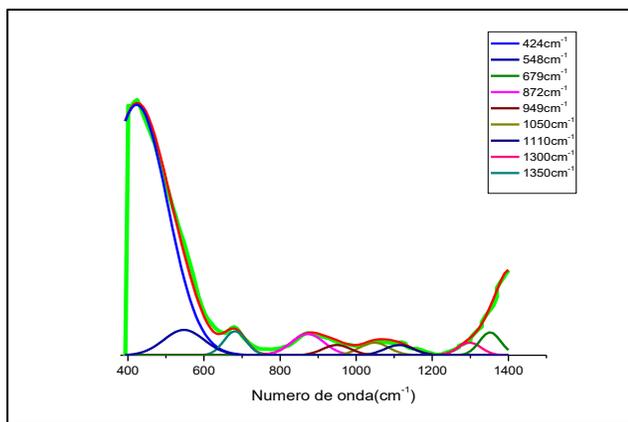


Figura 3.34 Espectro FT-IR muestra de etapa final de cianuración



Bandas (cm ⁻¹)	Grupo funcional
548	Al-O
679	Si-O
872	C=H
949	C-O
1050	C=N
1110	C-N
1300	C-N
1350	C-N

Figura 3.35 Deconvolución zona de interés

❖ *Análisis por DRX*

En el difractograma se observa la presencia de Zn y ZnO, tal como lo indicaron los mineros, además hay Au y Ag, también se sigue presentando C; estos resultados corroboran la información de los mineros. El Au es detectado por difractómetro aun si el proceso de cianuración solo llevaba un par de días, lo que confirma la eficiencia del proceso.

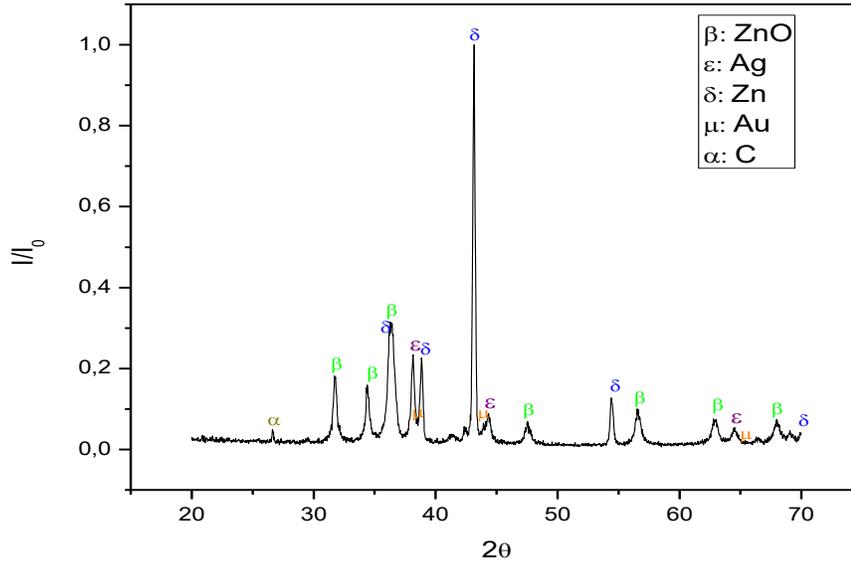


Figura 3.36 Difractograma muestra de etapa final de cianuración.

❖ *Análisis por EDS*

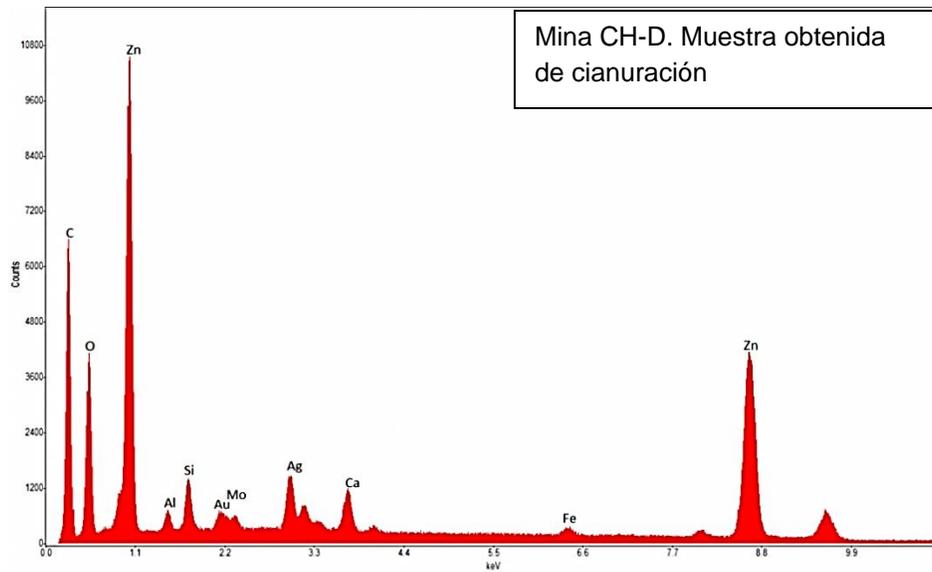


Figura 3.37 EDS muestra de etapa final de cianuración.

Al igual que en el difractograma los picos más pronunciados pertenece al Zn seguido de C, además se presenta Ag, Si, Ca, Al, Au, Mo y Fe, lo que indica nuevamente que el proceso es

eficiente ya que en la etapa final se presenta el elemento de interés para los mineros, lo que era de esperarse ya que en esta etapa la muestra posee una cantidad de oro detectada por los DRX. Para corroborar este resultado se realizó nuevamente el análisis por EDS, corroborando la presencia de Au.

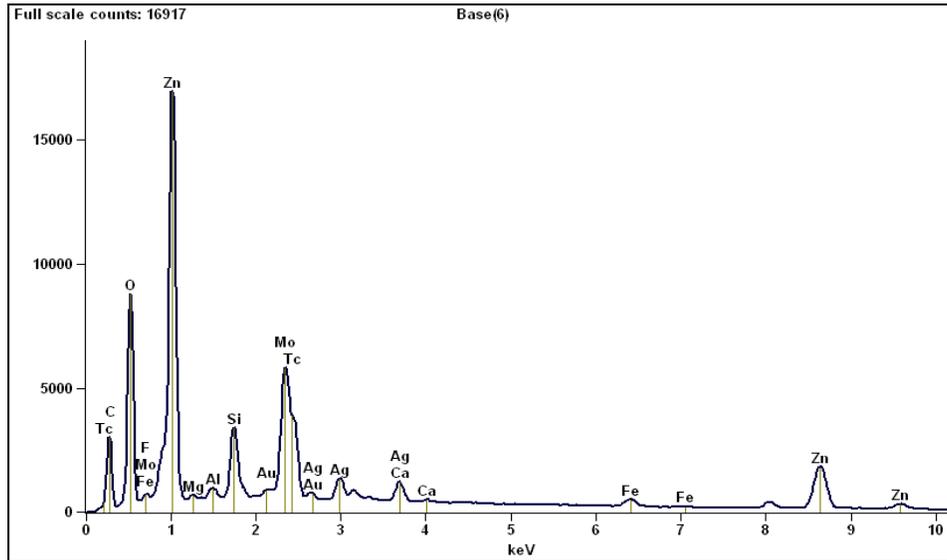


Figura 3.38 EDS muestra de etapa final de cianuración

<i>Element Line</i>	<i>Net Counts</i>	<i>Weight %</i>	<i>Atom %</i>	<i>Formula</i>	<i>Compnd %</i>
C K	17532	5.69	17.01	C	5.69
O K	54015	19.10	42.84	O	19.10
F K	1905	0.62	1.17	F	0.62
Mg K	787	0.13	0.19	Mg	0.13
Al K	3096	0.39	0.51	Al	0.39
Si K	24884	2.77	3.54	Si	2.77
Ca K	10191	1.65	1.48	Ca	1.65
Fe K	4405	1.96	1.26	Fe	1.96
Zn K	31453	41.41	22.73	Zn	41.41
Mo L	90741	15.11	5.65	Mo	15.11
Tc L	30632	5.58	2.02	Tc	5.58
Ag L	16951	3.94	1.31	Ag	3.94
Au M	7553	1.65	0.30	Au	1.65
Total		100.00	100.00		100.00

CAPITULO IV - Análisis Final: Comparación de Resultados

La investigación que se consigna en este documento tiene como objetivo dar un diagnóstico a la eficiencia del proceso de extracción de oro seguido en las minas El Seis y Chede, basado en el resultado de la aplicación de técnicas instrumentales de análisis.

En el capítulo anterior se consignaron los resultados de las caracterizaciones hechas a muestras de diferentes etapas de los procesos y un análisis de cada resultado. En este capítulo se presenta una comparación directa de dichos resultados, con el fin de analizar la importancia de cada etapa dentro de todo el proceso y así concluir sobre su eficiencia.

4.1 Mina El Seis

En la figura 4.1 se presenta una comparación de los espectros FT-IR tomados a muestras de las cuatro etapas analizadas en esta mina.

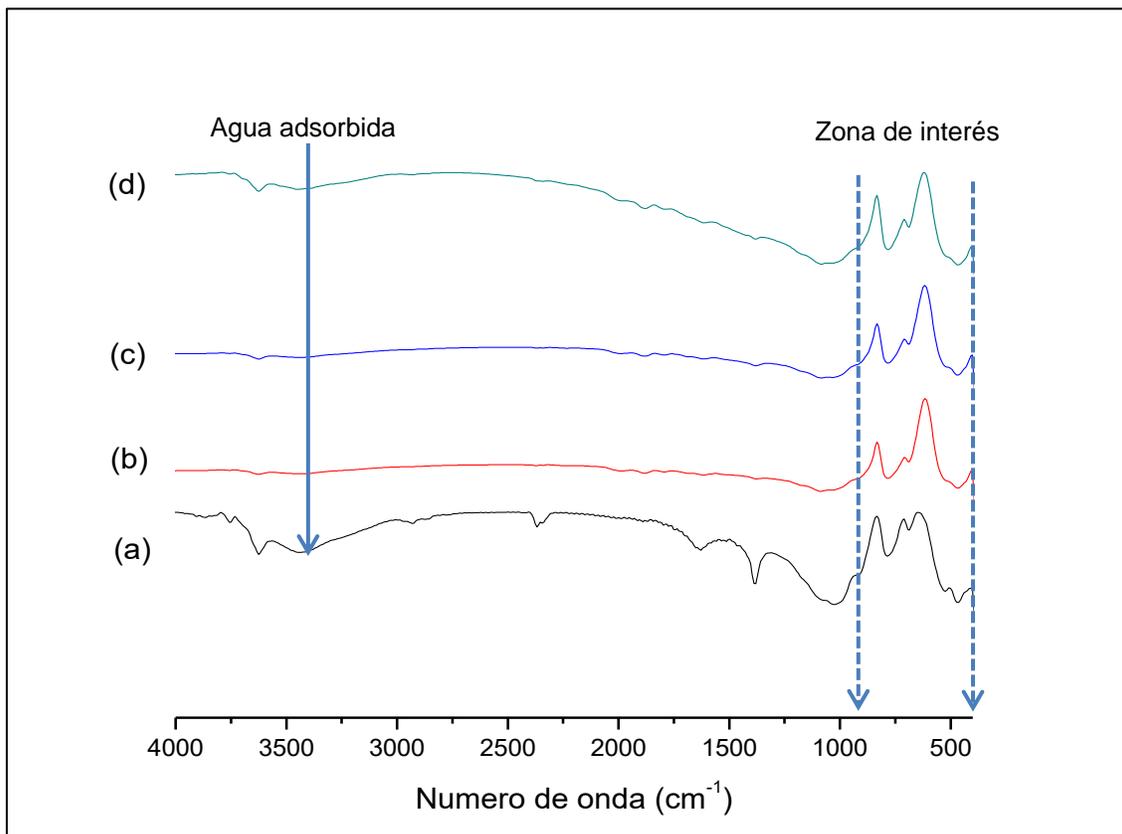


Figura 4.1 Espectros FT-IR (Transmitancia). Mina El Seis: (a) Filón, (b) Molino de bolas, (c) Arenas de cianuración, (d) Residuo final.

En estos espectros se tomó como zona de interés el rango entre $850 - 400 \text{ cm}^{-1}$, debido a que allí se presentan las bandas asociadas a vibraciones de elementos pesados. Como se observa, para todas las etapas se presentaron las mismas bandas dentro de esta zona, no obstante las intensidades varían, lo que da indicios del efecto del proceso llevado a cabo en la etapa, así, la banda correspondiente a vibraciones de aguas adsorbidas (alrededor de 3500 cm^{-1}) se acentúa en la muestra del filón (humedad de roca) y en la muestra del residuo de final (que adsorbe agua del medio), mientras que las otras muestras han pasado por procesos en los que hay extracción de aguas. Los grupos funcionales correspondientes a silicatos y aluminatos se presentaron en todos los FT-IR, pero más definidos a medida que se pasaba por las diferentes etapas del proceso.

No hay presencia de bandas asociadas con oro o plata, lo que puede ser un indicio de cantidad no suficiente para su detección con esta técnica. No obstante, la presencia de silicatos y aluminatos representa un posible valor agregado al producto final de la planta, siendo que tanto la sílice (SiO_2) como la alúmina (Al_2O_3) presentan interés industrial y es posible su extracción por métodos químicos simples.

En la figura 4.2 se presenta una comparación de los difractogramas de las etapas analizadas en la mina El Seis.

Los difractogramas muestran un comportamiento similar en cada etapa. La fase predominante en cada muestra es SiO_2 (cuarzo), esta fase se mantiene a lo largo del proceso incluso en los residuos cuyo pico principal se superpone al pico principal del SiO_2 . El elemento que le sigue en ocurrencia al cuarzo es C (grafito) que se superpone al trazo más sobresaliente.

Comparando el difractograma (a) con el (d) se observa como a medida que las arenas pasan por los diferentes procesos van sufriendo una depuración en su composición. La muestra de filón presenta fases como FeMoO_4 y Al_2O_3 que desaparecen a partir de la segunda etapa, lo que demuestra que estos compuestos son propios de la roca y debido al proceso de molienda pierden concentración en el material de mina.

Esta técnica al igual que el FT-IR no detectó Au ni Ag, pero es claro que existe una alta concentración de SiO_2 que no se aprovecha.

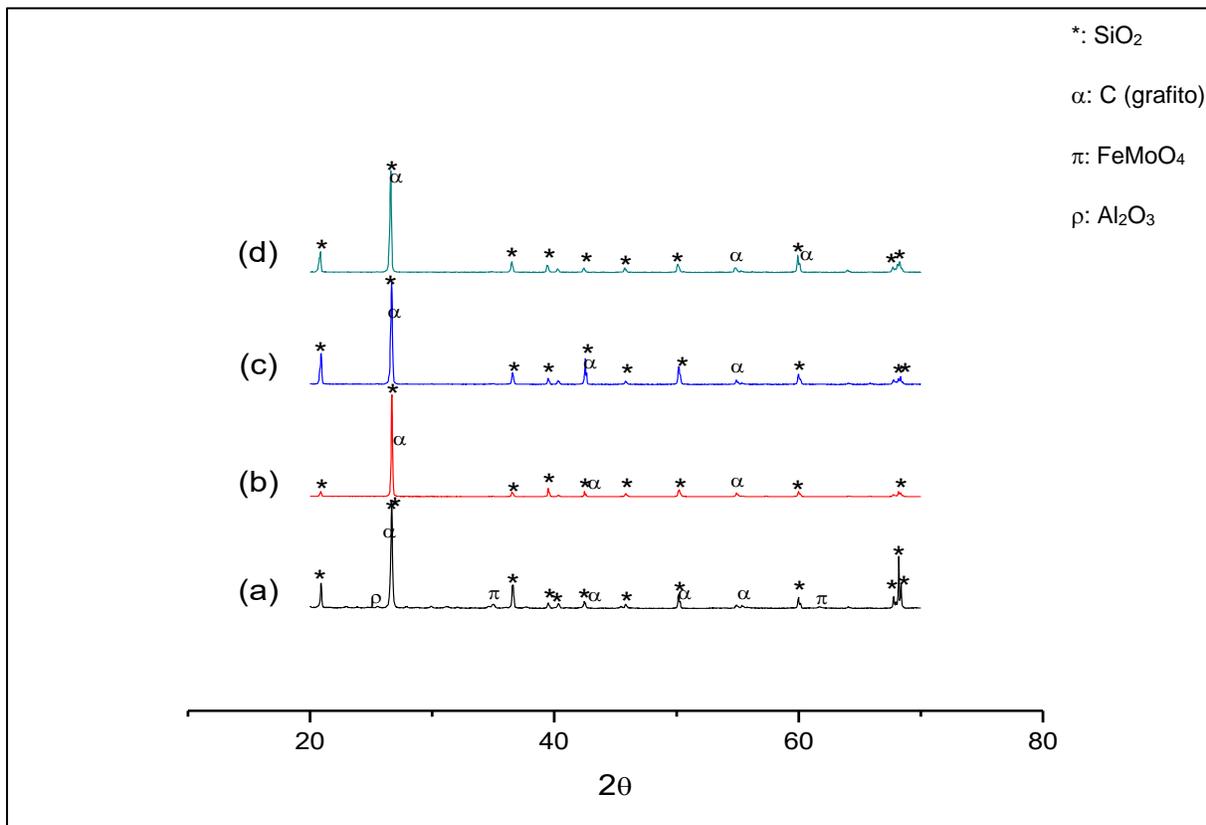


Figura 4.2 Difractogramas. Mina El Seis: (a) Filón, (b) Molino de bolas, (c) Arenas en cianuración, (d) Residuo final.

4.2 Mina Chede

En la figura 4.3 se presenta una comparación de los espectros FT-IR tomados en las cinco etapas analizadas en esta mina.

En las etapas desde el filón (a) hasta el molino de bolas (d) se presentan las mismas bandas dentro la zona de interés y en el rango $1030 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ donde se observan enlaces Si-O-Si, no obstante la intensidad disminuye a medida que avanza el proceso. En el rango desde 1350 hasta 1500 cm^{-1} , que corresponde al enlace C-N, se acentúan las bandas en (b), (c) y (e) aunque en (c) la intensidad es menor. Las etapas (b) y (e) se acentúan en el rango de $2000 - 2500 \text{ cm}^{-1}$ que corresponde al enlace C-O y también en el rango que va desde $3450 - 3500 \text{ cm}^{-1}$ que corresponde al enlace H-O-H. El grupo O-H ($3500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$), se observa en las etapas (a), (b) y (c). Los resultados de FT-IR encontrados para cada etapa del proceso

son una manifestación del efecto sobre las arenas, de hecho, la evolución de los espectros desde (a) hasta (d) comprueba que cada etapa está cumpliendo su función de “limpieza de las arenas” antes del proceso final de cianuración.

El resultado de la muestra de cianuración vislumbra que esta etapa es eficiente ya que la cantidad de Au en la muestra analizada no fue suficiente para ser detectada por FT-IR.

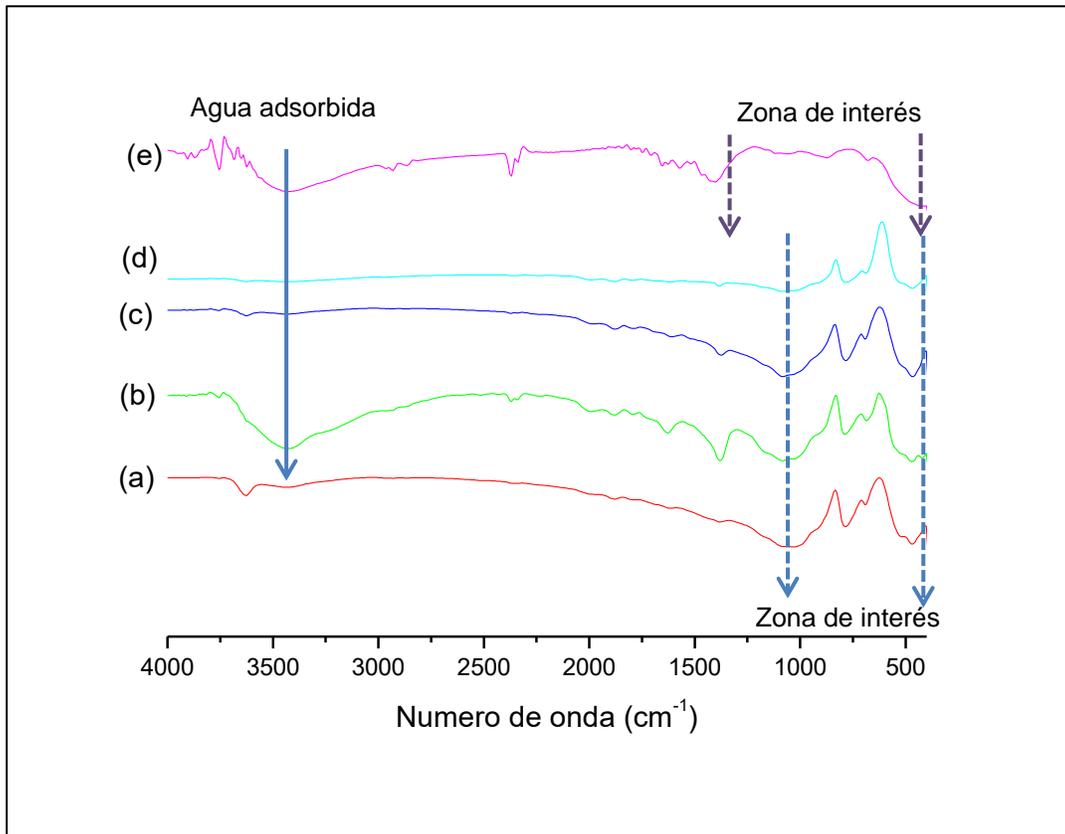


Figura 4.3 Espectros FT-IR (Transmitancia) Mina Chede: (a) Filón, (b) Mesa vibradora, (c) Residuo de mesa, (d) Molino de bolas, (e) Cianuración.

En la figura 4.4 se presenta una comparación de los difractogramas de las etapas analizadas en la mina Chede.

Los difractogramas de la mina Chede muestran un comportamiento similar, mostrando la evolución en el proceso de “limpieza” de las arenas (difractogramas de la figura 4.4 (a) - (d)) antes del proceso de cianuración. Se encuentran como fase predominante la SiO_2 en las cuatro primeras etapas, no obstante, en la muestra de cianuración esta fase desaparece en

su totalidad. La fase C (grafito) también se observa en casi todas las muestras pero también desaparece en la muestra de cianuración.

La muestra de la mesa vibradora presenta además de cuarzo otras fases de materiales de interés industrial, tal es el caso de la Pirita (FeS_2) y Carbonato de Calcio $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ y en la muestra de residuo de mesa vibradora se observa FeMoO_4 , es decir, esta muestra es rica en Fe. En la muestra de cianuración se observan Au y Ag liberados, por lo cual se puede decir que el proceso es eficiente en cuanto a rendimiento. Los resultados reportados por esta mina muestran que existen elementos que podrían representar algún interés económico a los mineros como el Si, Fe, Al y Ag que con los debidos procesos químicos podrían separarse.

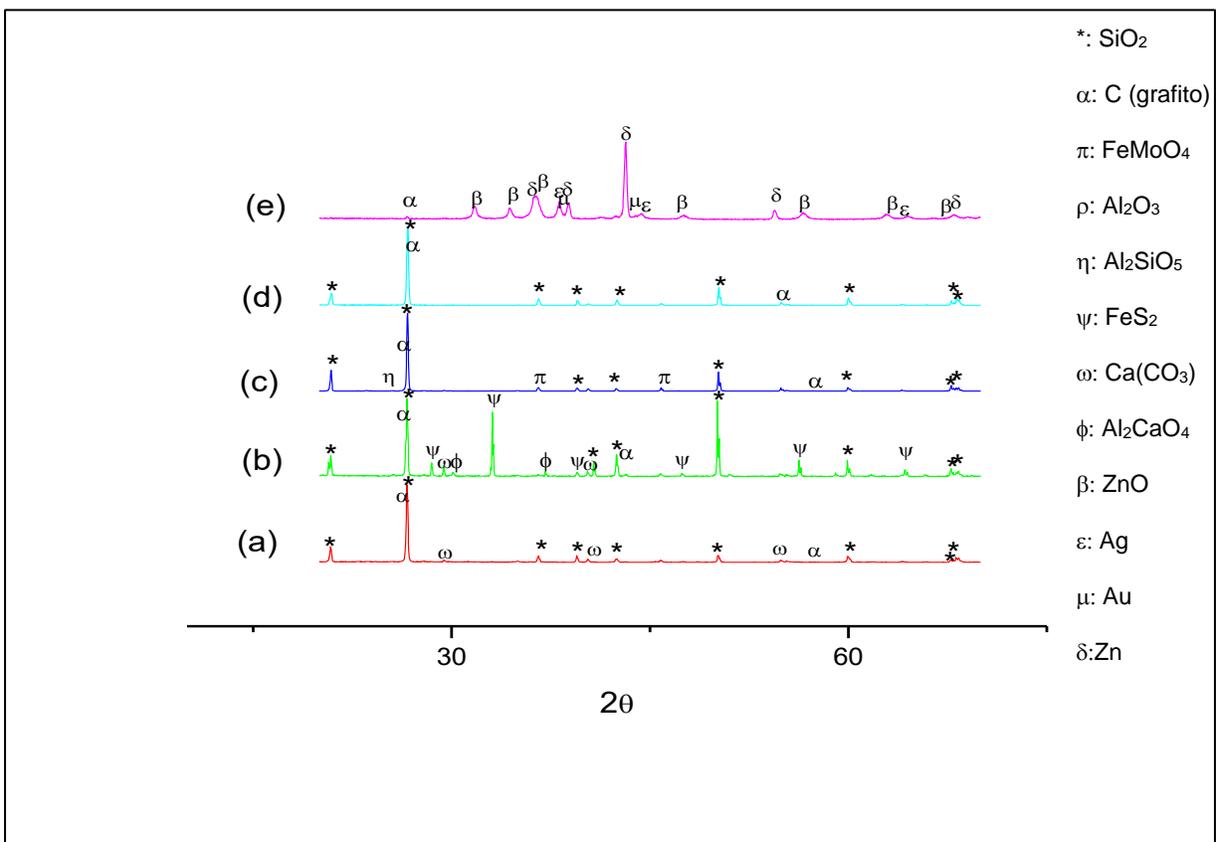


Figura 4.4 Difractogramas. Mina Chede. (a) Filón (b) Mesa vibradora (c) Residuo de mesa vibradora (d) Molino de bolas (e) Cianuración

En las tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados para cada mina, contrastando con lo predicho por los mineros para cada etapa.

Tabla 4.1. Resultados de análisis por etapas

Mina El Seis				
Etapa	Minero	FTIR	DRX	EDS
Filón	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , Pirita (FeS ₂)	Si-O, Al-O	SiO ₂ , C (Grafito), FeMoO ₄ , Al ₂ O ₃	Si, C, Al, K, Fe, Mg, Pt
Molino de bolas	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂ , Hg, residuos de acero	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito)	Si, O, Al, Fe, Pt, K, C
Arenas en cianuración	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂ , Hg, NaCN, cal	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito)	C, Si, O, Al, Fe, Pt, K, Ca
Residuo final	Sin valores comerciales	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito)	Si, O, C, Al, Fe, K, Ca, Pt

Tabla 4.2 Resultados de análisis por etapas

Mina Chede				
Etapa	Minero	FTIR	DRX	EDS
Filón	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito), Ca(CO ₃)	C, Si, O, Al, S, K, Ca, Fe
Mesa vibradora	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , FeS ₂ , C (Grafito), Ca(CO ₃), Al ₂ CaO ₄	Si, C, O, Fe, Al, Pt, Ca, Zn, K
Residuo de mesa vibradora	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito), FeMoO ₄ , Al ₂ SiO ₅	Si, O, C, Al, Fe, K, Ca, Pt
Molino de bolas	Au, Ag, Cu, SiO ₂ , FeS ₂ , Hg, residuos de acero	Si-O, Al-O, Si-O-Si	SiO ₂ , C (Grafito)	Si, O, C, Al, Fe, K, Pt, Ca
Cianuración	Au, Ag, Zn, NaCN	Au-C-N Al-O, Si-O-Si, C=C, C-N	ZnO, Ag, Zn, Au, C	Zn, C, O, Ag, Si, Ca, Al, Au, Mo, Fe

Los resultados presentados en la tabla anterior permiten evaluar la eficiencia de las técnicas de análisis para el tipo de muestras analizadas en esta investigación. Siendo complementarias, la coincidencia en los diferentes resultados permite hacer afirmaciones sobre la composición de las muestras analizadas. Una técnica usualmente empleada en el análisis de arenas es la fluorescencia de rayos X que es una técnica espectrométrica para conocer la composición química de una muestra analizando la emisión de rayos X de los diferentes elementos presentes en ella. Por lo anterior al inicio de la investigación era esta la primera técnica a ser propuesta, no obstante, la cantidad de muestra requerida por esta es de 30 g a 40 g y la cantidad del elemento buscado en la muestra debe estar en una proporción suficiente para ser detectado.

Debido al valor comercial del Au la cantidad de muestra con que se contó fue de máximo 10 g, lo que imposibilitó el uso de esta técnica, no obstante, los resultados FT-IR, DRX y EDS son concluyentes para los fines de esta investigación.

CONCLUSIONES

- ✓ Desde el punto de vista de la obtención de oro el proceso es eficiente, tanto por etapas (se observa cómo se va “clasificando” el material) como en su totalidad, siendo evidente la presencia de oro en la muestra final del proceso. Por otro lado, si se desea hacer un proceso de extracción de otros valores (plata, sílice, alúmina, óxidos de hierro), estos resultados ayudan a elegir la etapa del proceso adecuada para la implementación de etapas adicionales características del material específico a extraer.

- ✓ La expectativa inicial de esta investigación era plantear un método para extraer el mayor porcentaje de Au de las arenas-residuo al final proceso de extracción seguido en las dos minas estudiadas. No obstante, después de conocer detalladamente el proceso y de las largas conversaciones con los mineros, se llegó a la conclusión de que dicha investigación es muy amplia y requiere de etapas iniciales siendo la primera de ellas la obtención de un diagnóstico general, lo que condujo a obtener los resultados que se presentan en este documento.

- ✓ Para obtener resultados que brinden información real de las muestras analizadas es necesario simular en el laboratorio el tratamiento que los mineros hacen con el material, ya que el contacto con agentes diferentes al medio al que generalmente está expuesto el material de mina podrían entorpecer los resultados de los análisis.

- ✓ Aun cuando las muestras recolectadas para la investigación se sometieron a un tratamiento especial para obtener una representación de todo el conjunto, existe un grado de aleatoriedad producto de las variables involucradas, tales como la exposición al medio, el origen natural y la recolección de las mismas.

- ✓ Por la aleatoriedad de las muestras, se especuló inicialmente que los resultados de los análisis realizados tendrían variabilidad de una a otra, pero la coherencia en los resultados obtenidos a partir de diferentes técnicas mostraron que la metodología de muestreo utilizada fue adecuada.

- ✓ Los resultados obtenidos muestran que la mina Chede tiene gran potencial minero por los compuestos observados en los análisis y por incluir en sus procesos una etapa de

extracción limpia en relación con la mina El Seis, que tiene un proceso totalmente artesanal, no obstante en ambas minas aún hay compuestos que podrían ser explotados para obtener recursos adicionales a la extracción de Au.

✓ Para realizar un diagnóstico que incluya toda la problemática del sector minero es necesario realizar estudios detallados donde intervengan áreas que permitan dar una visión amplia de factores tales como estudio de suelos, medio ambiente, proyecciones sociales, legislación minera, nuevas técnicas para extracción, etc. En el Anexo I se presenta información recolectada por especialistas en áreas de interés del sector minero.

✓ El interés de la investigación requirió acceder a estadísticas sociales, económicas y ambientales de la zona investigada, lo que evidenció la debilidad e incluso contrariedad en la información de los datos consultados de las fuentes municipales y departamentales.

REFERENCIAS

- [1] www.semana.com. “Fiebre Minera se apodero de Colombia”, 6 de septiembre de 2011. Ronderos, M. Revista Semana. Bogotá, Colombia. Consultado el 10 de Diciembre de 2011.
- [2] www.wilsonarias.com “La política minera de Santos entregaría el 56% del territorio en el Cauca”, 6 de noviembre de 2010. López, A. Oficina de Prensa H.S. Popayán, Cauca. Consultado el 4 de septiembre de 2011.
- [3] <http://pubs.usgs.gov> “Age of the Earth”, 9 de julio de 2007. Geological Survey. U.S. Consultado el 10 febrero de 2011.
- [4] SACC Ingenieros SRL 2004. “Geología y Evaluación de Yacimiento Minerales Auríferos”. Mollehuaca, Lima, Perú. Pag. 3 – 5.
- [5] <http://www.uclm.es> (1972) “Metodología y técnicas para la prospección y valoración de placeres aluviales con casiterita”. Azcárate Marín, J. Empresa Nacional de Investigaciones Mineras, S.A. Madrid, 204p.
- [6] Maldonado, J. Martínez, C. Viña, G. Bonilla, M. Piedrahita, H “Proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas se Colombia”. 2002. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Bogotá, D.C. Pag. 15 - 17.
- [7] Maldonado, J. Martínez, C. Viña, G. Bonilla, M. Piedrahita, H “Proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas se Colombia”. 2002. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Bogotá, D.C. Pag. 27 – 31
- [8] Martinez, H. Flórez, C. Mejia, S. Fierro. “Producción más limpia en la minería de oro en Colombia”. 2007. Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, D.C. Pag. 16 - 18.
- [9] Habashi, Fathi. “Avances recientes en la metalurgia del oro”. Pag. 6 – 7.
- [10] Martinez, H. Flórez, C. Mejia, S. Fierro. “Producción más limpia en la minería de oro en Colombia”. 2007. Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, D.C. Pag. 19 – 24.

- [11] Mendez N., Gomez N., Iglesias P., "Cauca, Característica Geográficas". 2006. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, D.C. Pag. 47, 63.
- [12] Bolaños H. F. Febrero 2009. Plan de Gestión Ambiental del Municipio El Tambo, Departamento del Cauca. El Tambo, Cauca, Colombia. Pag. 23 – 36.
- [13] Diagnostico Social, Económico y Ambiental del Corregimiento Fondas, El Tambo. Julio, 2003. Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC. Pag. 13 – 14.
- [14] <http://www.eltambo-cauca.gov.co>. "División Política de El Tambo". Sitio oficial de El Tambo Cauca. Consultado, 10 de febrero 2012.
- [15] ENTREVISTA con William Idrobo, Presidente de la Cooperativa de Mineros, Fondas – Limoncito. Corregimiento Las Fondas, El Tambo, Cauca, Colombia. 21 de junio de 2011.
- [16] Alfaro, M. A. "Introducción al Muestreo Minero". 2002. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Santiago, Chile. Pag. 6 – 13.
- [17] "Muestreo de Materiales para Construcción de Carreteras, Norma INV E-201-07". Instituto Nacional de Vías. Bogotá, D.C. Pag. 6 – 9.
- [18] "Reducción del tamaño de las muestras transportadas, Norma INV E-202-07" Instituto Nacional de Vías, Bogotá, D.C. Pag. 3 – 6.
- [19] Arredondo, A. "Matriz a partir de un Hidrogel de Alcohol Polivinílico (PVA) combinada con Sulfadiazina de Ag con potencial aplicación en el manejo y control de la sepsis en heridas dérmicas". 2011. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad CES. Medellin, Colombia Pag. 182.
- [20] Nakamoto, K. "Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds". Fourth edition. John Wiley & Sons, New York. 1986.

ANEXOS

ANEXO I: Trabajos Futuros

En este apartado se plantean sugerencias para posibles trabajos futuros en diferentes áreas que son de interés del sector minero.

Ingenierías

Después de un reconocimiento de la zona, se detectaron necesidades primordiales que demandan soluciones a eventos que implican riesgo a la integridad física de las personas en la zona de trabajo.

Se evidenció que los sistemas de molienda en los montajes artesanales, no cuentan con un bloqueo manual que podría contrarrestar efectos de objetos que se introduzca y pueda dañar o interrumpir el proceso.

La presencia del Monóxido de carbono (CO), en los socavones sugiere la implementación de sensores de gas, además para evitar pérdidas en material y mano de obra se sugiere la implementación de instrumentos de detección metales.

De acuerdo con los resultados de la investigación el material es rico en sílice, alúmina y algunos compuestos con presencia de hierro, materiales de gran utilidad industrial, por lo cual se sugiere la implementación de métodos para aprovechamiento de los elementos presentes en estos compuestos, ya que podrían representar recursos adicionales a los mineros.

Ciencias Contables y Administrativas

La creciente importancia de los recursos que genera el sector minero en la economía global, se refleja en la fuerte inversión que las compañías transnacionales están haciendo en Colombia, animadas por el extraordinario crecimiento que han experimentado los precios de estas materias primas. Si se comparan los precios actuales, en dólares, con los de 2001, se tiene que el del oro ha crecido 4,5 veces. Además estas compañías encuentran un poderoso estímulo en las altas rentabilidades que les genera el negocio, propiciadas por los bajos

costos laborales, enormes ventajas que en materia tributaria les ha concedido el país, y la baja renta minera que deben pagar por extraer nuestros recursos.

Sin duda la minería es una fuente de recursos económicos para el país, pero desde el punto de vista ambiental genera grandes pérdidas. Por esto es necesario implementar proyectos de sostenibilidad, capacitación en administración de recursos, brindar asesoría a las cooperativas en reglamentación de precios y fluctuaciones de oro e instaurar planes de mejoramiento para atenuar los efectos de la minería desde el punto de vista social, económico y ambiental.

Biología y Medio Ambiente

Una de las propuestas para atenuar el impacto ambiental está relacionada con el tratamiento de los residuos, que en general contienen material tóxico tal como mercurio y cianuro. En Colombia se vienen realizando planes piloto donde se ha implementado la biorremediación y la biolixiviación, procesos en los cuales se combate la acción de los contaminantes y se extraen minerales por medio de microorganismos, hongos, plantas o enzimas. A continuación se hace una breve descripción de estos procesos. El uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados es de gran interés actual. Todos aquellos contaminantes que puedan ser degradados o transformados por los seres vivos son susceptibles de ser eliminados mediante procesos de biorremediación. Muchas bacterias son capaces de modificar sustancias químicas peligrosas, transformándolas en otras menos tóxicas. Así, algunas bacterias pueden reducir la biodisponibilidad de metales pesados tales como el mercurio, el arsénico, el cromo, el cadmio, el zinc o el cobre.

En la industria minera se hace frecuente la búsqueda de métodos menos contaminantes en la extracción de metales, ya que se ha visto que los métodos convencionales generan altos costos en materia económica y ambiental. Una alternativa biológica a este problema es la utilización de microorganismos biolixiviadores, los cuales se encuentran presentes en los microambientes ricos en metales, convirtiéndose en una buena opción para su lixiviación. La *Biolixiviación* es el conjunto de reacciones químicas que tienen como resultado la disolución de minerales por parte de bacterias, las cuales lixivian (disuelven las rocas o minerales), los solubilizan (Lixiviación Biológica) para obtener la energía que necesitan a expensas de

sustancias inorgánicas, liberando de paso metales en mayor cantidad que con métodos convencionales.

ANEXO II: Divulgación

En este apartado se muestran resúmenes de los trabajos presentados en Congresos (Nacional e Internacional). Además se redactará un artículo que será sometido a una revista especializada en temas mineros.

➤ Segundo Congreso Nacional de Ingeniería Física. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, del 6 al 10 de septiembre de 2010. Modalidad Poster.

ANÁLISIS DE RESIDUOS EN MINAS DE EXTRACCIÓN DE ORO EN LA ZONA RURAL DEL CAUCA

H.L. Idrobo, L. Idrobo, S. Gaona J.

RESUMEN

En la zona rural del municipio de El Tambo (Cauca), sector del Corregimiento de Villa al Mar (Las Fondas) se practica la minería desde tiempos ancestrales. Inicialmente por los indígenas, luego por los españoles a partir del siglo XVII, la cual ha ido evolucionando por aportes hechos gracias a la inmigración de mineros de diversas partes del país. Sin descartar la presencia de otros minerales de interés económico, en la región afloran y son explotados filones mineralizados con oro que han sido fuente generadora de recursos económicos para los pobladores de la zona. El laboreo del oro mediante métodos artesanales es poco eficiente y genera pérdidas monetarias y ambientales.

Este trabajo, mediado por un interés investigativo, plantea un método alternativo para el aprovechamiento de los minerales presentes en los residuos después de la extracción de oro. Con base en métodos de muestreo y análisis usando como soporte teórico un manual de diseño y análisis de experimentos pretendemos diseñar un proceso experimental de toma de muestras para realizar un análisis cualitativo, el cual permite la visualización de situaciones en el proceso, reducción de variabilidad, tiempo y costos. La visión del trabajo

está proyectada hacia el sostenimiento ambiental y socio-económico de la región como apoyo a la actividad minera para mejorar el proceso de obtención del oro mediante la implementación de una técnica cualitativa eficiente y confiable sustentada en el manejo de paquetes computacionales estadísticos de análisis y en las técnicas de laboratorio como espectroscopia y microscopia.

➤ VI Congreso Internacional de Materiales. Universidad de los Andes. Bogotá D.C del 27 al 30 de Noviembre de 2011. Modalidad Poster.

Diagnóstico de la Eficiencia en el Proceso de Obtención de Oro de las Minas “El 6” y “Ch-D” del Corregimiento Las Fondas, Municipio de El Tambo.

Leonardo Idrobo, Lucia Idrobo, Sonia Gaona

RESUMEN

En esta investigación se analiza un problema específico del sector minero del Municipio de El Tambo (Cauca) respecto al proceso de extracción de oro y se propone una solución. Se plantea el uso de un sistema de estudio metodológico basado en el diseño de experimentos que guíe la elección y cuantificación de las muestras de estudio y permita una sistematización de los análisis producto de las diferentes caracterizaciones. Con los resultados se elabora la propuesta que visualiza las situaciones en el proceso, reducción de variabilidad, tiempo y costos, además se presenta un documento-informe a los mineros de la región.