

Mineralogical characterization of the Milagros vein for the planning of the metallurgical treatment of the mineralization, Granada prospect - La Libertad 2021

Merly Morales, Bach¹; Shonel Cáceres, Ing¹

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. meguimoma@gmail.com, Shonel.caceres@upn.edu.pe

Abstract – Small mining companies do not have the resources to carry out specialized studies such as petrographic and mineragraphic studies during the exploration and exploitation stage of a deposit, which conditions the planning and execution of the adequate metallurgical treatment. In the present investigation we have the objective of characterizing the mineralogy of the Milagros vein, and that this allows the planning of the metallurgical treatment of the mineral in the Granada prospect located in the district of Santiago de Chuco, province of Santiago de Chuco and department of La Freedom. Our field activities allowed the mapping of the lithology, the alterations and the taking of 21 samples. In the laboratory, the mineralogical analysis was carried out, being able to identify and characterize in detail the minerals that make up the Vein, a ZEISS Primotech brand petrographic microscope, polarization binocular and the Zeiss Mineralogic automated software were used, which allowed taking the photomicrographs of the samples used. . Due to the majority percentages of sulfides in the specimens, flotation tests were carried out to analyze the behavior of the minerals that carry economic elements and evaluate the percentage of recovery that they would present during the metallurgical treatment. It was confirmed that the main Ag ore is found mainly in silver sulfosalts such as Miargyrite (AgSbS₂) and that the main Au ore would be pyrite (FeS₂), in which it is postulated that gold is found structurally, because it was not seen under the optical microscope.

Keywords: Mineralogical analysis, metallurgical treatment, recovery percentage.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.93>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Caracterización mineralógica de la veta milagros para la planificación del tratamiento metalúrgico de la mineralización, prospecto granada - La Libertad 2021

Merly Morales, Bach¹; Shonel Cáceres, Ing¹

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. meguimoma@gmail.com, Shonel.caceres@upn.edu.pe

Resumen – Las empresas de la pequeña minería no cuentan con recursos para realizar estudios especializados tales como los estudios petrográficos y mineragráficos durante la etapa de exploración y explotación de un yacimiento, eso condiciona la planificación y ejecución del tratamiento metalúrgico adecuado. En la presente investigación tenemos el objetivo de caracterizar la mineralogía de la veta Milagros, y que esto permita la planificación del tratamiento metalúrgico del mineral en el prospecto Granada ubicado en el distrito de Santiago de Chuco, provincia de Santiago de Chuco y departamento de La Libertad. Nuestras actividades en campo permitieron el mapeo de la litología, las alteraciones y la toma de 21 muestras. En el laboratorio se realizó el análisis mineralógico, lográndose identificar y caracterizar a detalle los minerales que componen la Veta, se utilizó un microscopio petrográfico de marca ZEISS Primotech, binocular de polarización y el software automatizado Zeiss Mineralogic que permitió tomar las fotomicrografías de las muestras utilizadas. Debido a los porcentajes mayoritarios de sulfuros en los especímenes, se realizó pruebas de flotación para analizar el comportamiento de los minerales portadores de elementos económicos y evaluar el porcentaje de recuperación que presentarían durante el tratamiento metalúrgico. Se llegó a confirmar que la principal mena de Ag se encuentra principalmente en las sulfosales de plata tales como la Miargirita (AgSbS₂) y que la mena principal de Au vendría a ser la pirita (FeS₂), en el cual se postula que el oro se encuentra de manera estructural, porque no se alcanzó a ver bajo el microscopio óptico.

Palabras clave: Análisis mineralógico, tratamiento metalúrgico, porcentaje de recuperación.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú es bastante conocido por el potencial de sus yacimientos metálicos de la zona andina, como país minero se encuentra dentro de los primeros puestos con más reservas de oro en el mundo, sin embargo, sólo explota menos del 20% del enorme potencial, y gran parte de ello se debe a la falta de inversión en exploración e investigación petrográfica y mineragráfica, afectando principalmente a la pequeña minería, puesto que muchas de estas empresas no cuentan con los recursos adecuados para realizar una caracterización mineralógica y en base a ello planificar un tratamiento metalúrgico adecuado a los minerales presentes en sus yacimientos [1]. El Prospecto Granada es uno de ellos, éste abarca tres eventos importantes de mineralización: El pórfido Granada, las vetas hidrotermales de Ag – Au y el Cerro Santa Rosa, pero ninguno de estos está siendo explotado por la falta

de estudios que permitan aplicar un tratamiento adecuado de los minerales.

El análisis mineragráfico, es una técnica dedicada a la identificación de los minerales y al conocimiento detallado de sus propiedades físicas y químicas. Consciente de la importancia del análisis mineragráfico muestra ventajas en la solución de los diferentes problemas que se presentan durante la fase de producción, las cuales facilitan la toma de medidas de control en las operaciones unitarias alrededor del proceso de flotación [2].

El objetivo del examen microscópico de menas consiste en la identificación de minerales presentes, morfología, tamaño, asociaciones y relaciones de contacto, texturas y porcentajes, y secuencias paragenéticas. Este estudio se emplea en la caracterización de minerales económicos, y puede emplearse en muestras de exploración, mineral de cabeza, concentrados o relaves mineros. Mediante este estudio se puede determinar la presencia de minerales metálicos y no metálicos, que pueden ser considerados contaminantes o problemáticos para los procesos metalúrgicos [3].

La importancia de la microscopía óptica, la experiencia y el nivel de conocimientos mineralógicos del operador son determinantes para la identificación específica o genérica de la mayoría de los minerales significativos para el tratamiento metalúrgico. El proceso de flotación es importante y trascendente porque hace posible que minerales valiosos de baja ley puedan ser recuperados de manera económica, con la aplicación de herramientas de análisis de regresión estadística y caracterización mineralógica con microscopía óptica o de barrido [4].

La veta Milagros es la más importante de un conjunto de vetas de Ag-Au que afloran en el cerro Santa Rosa. En la actualidad, solo se tiene una labor longitudinal de reconocimiento y se está preparando su explotación. El desarrollo de esta investigación permitirá realizar una caracterización mineralógica y determinar los minerales mena, formas, ocurrencias y su relación con las gangas, ensambles e intercrecimientos complejos que permitan definir el adecuado tratamiento metalúrgico, con la finalidad de mejorar la recuperación de mineral y con ello permitir que

la empresa inicie operaciones creando fuentes trabajo para los pobladores que habitan la zona de influencia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Para el desarrollo de la investigación se utilizó información de trabajos realizados en la zona tales como mapas y planos; dentro de los equipos se utilizó protactor, libreta de campo; en lo que refiere al equipo de geólogo de campo se utilizó brújula brunton, lupa, picota, ácido clorhídrico (HCL), cámara fotográfica, GPS, wincha y flexómetro; en lo que son equipos de laboratorio se utilizó estereoscopio, microscopio óptico, balanza electrónica; para el procesamiento de la información se empleó laptop, softwares Nis, Matscope, ArGIS y AtoCAD.

B. Métodos

Nuestros métodos de trabajo contemplan actividades tales como: observar, analizar y describir a través de tablas, gráficos, ilustraciones y diferentes imágenes de las muestras preparadas de rocas y minerales.

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas:

Trabajo preliminar de gabinete: En esta etapa se recopiló y revisó toda la información bibliográfica: estudios previos, geología regional del cuadrángulo de Santiago de Chuco, trabajos geológicos previos de la zona, etc.

Trabajo de campo: Se realizó el levantamiento topográfico de la galería donde aflora la veta Milagros, esto permitió realizar el mapeo geológico del área de estudio (detallando minuciosamente la composición mineralógica de roca caja, secuencia de la veta), la toma de especímenes de manera aleatoria de la veta Milagros y de algunas venillas y roca de caja fresca y alterada a lo largo de la galería, la selección y codificación de muestras de mano para el análisis macroscópico y microscópico.

Según Chanchaya (2010), el muestreo es la fase más importante de todo proyecto, por ser la fase inicial de toda estimación y repercute en todas las actividades subsecuentes. De nada vale el uso de equipos sofisticados durante el análisis químico, ni de herramientas sofisticadas durante la estimación de recursos si no están controlados los errores, sobre todo durante el Muestreo Primario, que son los más importantes y gravitantes [5].

El muestreo se realizó en 11 puntos, obteniendo un total de 21 muestras, de las cuales 06 fueron destinadas al laboratorio para los análisis químicos y 02 para pruebas metalúrgicas y las 13 muestras restantes nos ayudaron a realizar los estudios bajo el microscopio óptico. Se muestreo

el techo y las paredes de la galería para obtener muestras de la roca encajonante de la veta.

En un segundo momento ya después de analizar las muestras de mano en el laboratorio, volvimos a campo con la finalidad de identificar los puntos óptimos para la obtención de los compósitos para las pruebas de flotación en base a geoquímica y el comportamiento textural de los especímenes tomados en un primer momento.

TABLA 1
REGISTRO DE MUESTREO Y TOMA DE ESPECÍMENES

Nº	CODIGO	ESTE	NORTE	PESO	DESCRIPCIÓN
01	VM-01	816478.20	9083085.32	-	Muestra de mano del intrusivo de la galería.
02	VM-02A	816480.84	9083087.00	-	Muestra de mano alteración de la Roca Caja
03	VM-02B	816482.84	9083088.33	-	Muestra de la mano de veta milagros
04	AQ-VM-02	816480.84	9083089.00	3.40Kg	Muestra de la veta para análisis químico
05	VM-03	816494.93	9083090.17	-	Muestra de mano de la veta milagros
06	VM-04	816542.21	9083090.23	-	Muestra de mano de la veta milagros
07	AQ-VM-04	816541.98	9083091.58	5.00Kg	Muestra de la veta para análisis químico
08	VM-05	816501.29	9083092.19	-	Muestra de mano de la veta milagros
09	VM-06A	816528.09	9083092.58	-	Muestra de mano de la veta milagros
10	VM-06B	816530.28	9083092.00	-	Muestra de mano de la veta milagros
11	FVM-06	816529.23	9083092.78	20.00Kg	Muestra de la veta para prueba de flotación
12	AQ-VM-06	816531.18	9083092.58	5.00Kg	Muestra de la veta para análisis químico
13	VM-07	816565.93	9083093.29	-	Muestra de mano de la veta milagros
14	AQ-VM-07	816567.25	9083093.18	5.00Kg	Muestra de la veta para análisis químico
15	VM-08	816508.61	9083094.45	-	Muestra de mano alteración de la Roca Caja
16	VM-09	816511.06	9083095.01	-	Muestra de mano de la veta milagros
17	AQ-VM-09	816510.70	9083095.01	5.00Kg	Muestra de la veta para análisis químico
18	VM-10	816445.85	9083099.98	-	Muestra de mano de la veta milagros
19	FVM-10	816446.12	9083100.00	29.10Kg	Muestra de la veta para prueba de flotación
20	AQ-VM-10	816445.52	9083100.01	4.50Kg	Muestra de la veta para análisis químico
21	VM-11	816478.20	9083085.32	-	Muestra de mano del intrusivo del C° Santa Rosa

Trabajos finales de gabinete: En esta etapa se logró compilar y procesar toda la información relacionada con la mineralogía, análisis de la viabilidad geometalúrgica de las menas de la veta principal, determinación de minerales portadores de elementos indeseables en la veta, definición de la estrategia y procedimientos óptimos para el beneficio metalúrgico de la veta principal, pruebas metalúrgicas preliminares de flotación.

Procedimientos en laboratorio: Para lograr una óptima caracterización mineralógica se realizaron los estudios microscópicos para que sobre la base del estudio se planificara las pruebas metalúrgicas con la finalidad de ver la respuesta de estos minerales ante procesos metalúrgicos (Flotación). Las 06 muestras seleccionadas para análisis geoquímico fueron enviadas al laboratorio de CERTIMIN, para su respectivo análisis.



Figura N° 1: Descripción macroscópica, muestras para análisis textural y composición mineralógica.

El análisis mineralógico se realizó en dos momentos, primero se realizó el análisis macroscópico de las muestras seleccionadas, esto puede verse facilitado en gran medida por diversas técnicas, para nuestro caso nos apoyamos de un estereoscopio. Para una óptima descripción macroscópica se analizó las propiedades que se detallan en la siguiente tabla:

TABLA 2
 PROPIEDADES PARA DESCRIPCIONES MINERALÓGICAS

Mineralogía	
Color: se determina a simple vista o con ayuda de una lupa.	
Propiedades ópticas	Raya: es el color que muestra el polvo del mineral cuando se raya sobre una superficie más dura; comúnmente se usa una porcelana.
	Transparencia: propiedad de los minerales para dejar atravesar la luz; se determina a simple vista.
	Brillo: es la intensidad de luz que refleja la superficie de un mineral; se determina visualmente.
	Clivaje: son planos de fractura sistemáticos que caracterizan a un mineral; pueden ser irregulares (ninguna dirección) a tener clivajes en una o más direcciones. El clivaje se determina visualmente con ayuda de una lupa.
	Gravedad específica: es la cantidad de masa que tiene un mineral por volumen; se puede hacer una estimación relativa pesándola con las manos.
Propiedades físicas	Tenacidad: la resistencia que tiene un mineral a fracturarse; se determina con ayuda de un martillo.
	Sabor: se usa comúnmente para identificar algunos haluros; se determina con la lengua.
	Magnetismo: es la capacidad que tiene un mineral para atraer sustancias ferromagnéticas; se determina con un imán.
	Dureza: es la resistencia que tiene un mineral a ser rayado por otro; la dureza de un mineral se clasifica de acuerdo con la escala de Mohs. Para determinar la dureza de un mineral se utilizan lápices de dureza, monedas, navajas, vidrios, terminar la dureza se utilizan lápices de dureza, monedas, navajas, vidrios, u otros minerales de dureza conocida u otros minerales de dureza conocida.
	Estructura cristalina: son las disposiciones geométricas que presentan los cristales de un mineral; dependiendo del tamaño de cristal pueden ser observables a simple vista (macroscópico), con lupa (microscópico) o no visibles (submicroscópico).
	Fluorescencia: capacidad que tiene un mineral para emitir luz al absorber radiación electromagnética de forma artificial; se determina comúnmente en laboratorio.
	Radioactividad: propiedad que tiene un mineral para emitir radiación electromagnética de forma natural; se determina con ayuda de un contador Geiger.
	Piezoelectricidad: propiedad de un mineral para acumular carga eléctrica al aplicarse presión mecánica; se determina en laboratorio.
	Reacción al ácido: algunos minerales reaccionan rápidamente frente a algunos ácidos (nitríco, clorhídrico, etc).
	Solubilidad: algunos minerales son solubles en agua o en soluciones ácidas/básicas.
Propiedades químicas	Color de la llama: es el color que adquiere la llama de un mechero al quemar un mineral, por lo general se usa previamente un ácido para que reaccione con el mineral.
	Reacción al ácido: algunos minerales reaccionan rápidamente frente a algunos ácidos (nitríco, clorhídrico, etc).
	Solubilidad: algunos minerales son solubles en agua o en soluciones ácidas/básicas.
	Color de la llama: es el color que adquiere la llama de un mechero al quemar un mineral, por lo general se usa previamente un ácido para que reaccione con el mineral.

Después del análisis macroscópico de las muestras, e identificación de minerales a nivel macroscópico se analizó las muestras bajo el microscopio para obtener mayor detalle. Esta etapa se realiza en el gabinete y laboratorio de Sampling OK.

Se preparó las muestras de acuerdo con el objetivo. Cuando el objetivo es estudiar minerales transparentes o translucidos, deberán realizar dos cortes paralelos con una separación de aproximadamente 1 mm, por medio del bálsamo del Canadá se pega una de las superficies a un portaobjetos y la otra se va desgastando y puliendo mediante abrasivos, hasta conseguir un espesor de 30 nm aproximadamente. Si se quiere estudiar minerales opacos se preparará una sección pulida. Basado en el concepto de Roca Total, en el presente trabajo se quiere analizar minerales mena y ganga entonces se recomienda una sección integrada:

Sección Delgado/Pulida en la que se evalué intercrecimientos de mena y ganga.

Finalmente se procedió al abrillantamiento de la superficie pulida con una tela de lana o seda para eliminar cualquier patina o impureza provocada por el medio. Se presionó la muestra con la mano de manera uniforme y perpendicular a la placa de vidrio, describiendo una trayectoria en forma de ocho.

TABLA 3
 SECCIONES Y TIPO DE ESTUDIOS

Nº	MUESTRA	PROYECTO	TIPO DE SECCIÓN	ESTUDIO
01	VM-01	Roca encajonante	Delgada	Petrográfico
02	VM-02A	Roca encajonante	Delgada	Petrográfico
03	VM-02B	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
04	VM-03	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
05	VM-04	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
06	VM-05	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
07	VM-06A	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
08	VM-06B	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
09	VM-07	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
10	VM-08	Roca encajonante	Delgada	Petrográfico
11	VM-09	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
12	VM-10	Veta Milagros	Delgado/pulida	Petromineralográfico
13	VM-11	Roca encajonante	Delgada	Petrográfico

El equipo empleado para el análisis mineralógico textural fue el equipo ZEISS Primotech, Microscopio Binocular de Polarización conformado por un software ZEISS Matscope, esta es la aplicación de captura de imágenes que le proporcionará todas las funciones de medición.



Figura N° 2: Izquierda: En la parte superior: secciones delgadas y delgado/pulidas, Derecha: ZEISS Primotech, Microscopio Binocular de Polarización.

Según Castroviejo (1998), la interpretación más útil y precisa de la textura de las rocas y los minerales, se obtienen con el microscopio petrográfico (o de luz transmitida). Se puede extrapolar esta idea también al uso del microscopio con luz reflejada, para el estudio de las texturas presentes en muestras de minerales opacos [6].

Para caracterizar mineralógicamente una muestra, se necesita seguir en orden los siguientes pasos:

- Descripción de los minerales.
- Descripción de las texturas principales
- Estimación porcentual del contenido mineral.
- Clasificación petrográfica de la muestra



Figura N° 3: Caracterización de minerales en el microscopio óptico.

Las pruebas metalúrgicas se realizaron con 02 muestras compósitos, con el objetivo de analizar la respuesta de estos minerales ante procesos metalúrgicos nos sirven como base de futuros estudios con el fin de optimizar la recuperación en el futuro.

Las pruebas de flotación fueron realizadas en la Planta Concentradora de Minerales “El Mirador”, donde se realizaron análisis de los siguientes elementos: Au, Ag, Pb, Zn, Fe, Sb, As. Se analizaron las leyes de cabeza, grado de recuperación de Ag, Au en celdas rougher, así como las leyes en el concentrado final y en el relave, además se obtuvieron registros de consumo de cal y registros del PH natural concentrado. También se análisis de recuperaciones en el concentrado Bulk y análisis de leyes en lo relaves. Siguiendo algunos parámetros que se detallan a continuación.

Debido a la naturaleza de las muestras se aplicaron los siguientes procedimientos: procedimiento de flotación del mineral de plomo – plata, procedimiento de flotación de piritita aurífera, procedimiento de flotación de plomo - plata

Con toda la información organizada y estructurada por tipo de estudio se procedió a realizar el procesamiento mediante el uso de softwares especializados software Nis, Matscope, ArGIS y AtoCAD.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nuestra zona de estudio se ubica en el cerro Santa Rosa, dentro del Prospecto Granada, que comprende los centros poblados: Chirachal, Lloques, Pampa del Cóndor, El Genio y Granada; pertenecientes al distrito de Santiago de Chuco, provincia de Santiago de Chuco y departamento de La Libertad.

20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”, Hybrid Event, Boca Raton, Florida- USA, July 18 - 22, 2022.

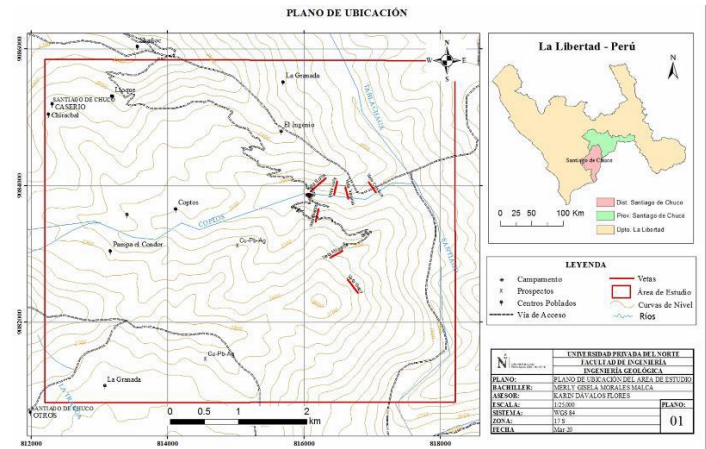


Figura N°4: Ubicación del sector El Ronquillo.

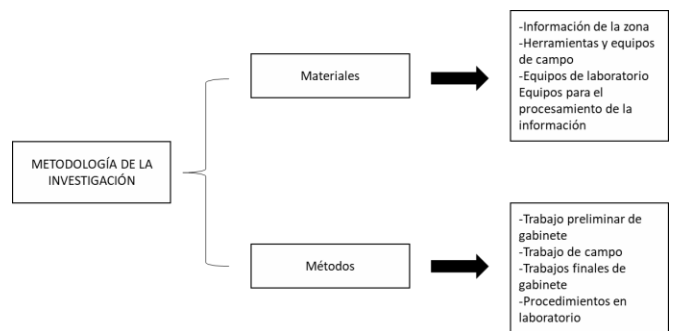


Figura N°5: diagrama general de la metodología.

A. GEOLOGÍA

Regional

La geología regional es típica de las laderas occidentales de los Andes, en las partes superiores predominan las rocas volcánicas andesíticas (flujos, aglomerados, brechas), mientras que en las partes inferiores los miembros del batolito costero son dominantes. Las rocas volcánicas corresponden al Grupo Calipuy, también hay afloramientos menores de los Grupos Chicama y Goyllarisquizga.

Local

Está compuesta principalmente por el complejo intrusivo del Cerro Santa Rosa, que presenta una roca granodiorita de grano medio, que puede variar localmente a facies microgranados e incluso porfíricos y aplíticos. Las texturas porfíricas se encuentran en elevaciones de 2800m.

Se observa localmente que la zona está dominada por la presencia de rocas volcánicas y volcanosedimentarias; las cuales han sido cortadas por stocks intrusivos terciarios de composición esencialmente diorítica a tonalítica de acuerdo con estudios petrográficos realizados por Mejía (2016) [7]; sin embargo, Cossio (1964) menciona que los intrusivos de la zona son dacíticos (Nm-da) [8].

En cuanto a las alteraciones, los intrusivos sufren intensa alteración deutérica en su capa externa. La alteración consiste en la difusión de pirlita y microventilación, silicificación y turmalinización [9]. La alteración más fuerte se ha centrado en el sector NO del stock intrusivo Santa Rosa, se observan parches de brecha de turmalina fuertemente alterada.

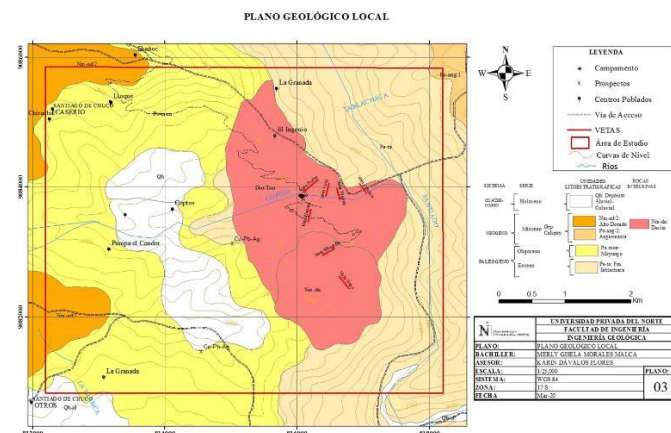


Figura N° 6: Plano Geológico Local a partir de Mejía (2016).

B. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA VETA MILAGROS

La identificación mineralógica de la veta Milagros fundamentalmente se llevó a cabo mediante los estudios de microscopía óptica, logrando identificar minerales translúcidos que forman la ganga en luz transmitida y minerales opacos en luz reflejada. A continuación, se presentarán fotomicrografías tomadas con el software y un microscopio óptico marca Zeiss.

TABLA 4

20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”, Hybrid Event, Boca Raton, Florida- USA, July 18 - 22, 2022.

MINERALES TRANSLÚCIDOS – GANGA

MINERALES TRANSLÚCIDOS		
Nombre	Abreviatura	Fórmula
Anatasa	ats	TiO ₂
Anfiboles	ANFs	Ca ₂ (Fe,Mg) ₇ Al (Si ₇ Al) O ₂₂ (OH,F) ₂
Apatito	ap	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)
Arcillas	ARCs	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O Hidroxi-alumino-silicatos, con o sin: Ca, Na, Mg y Fe
Biotita	bt	K (Mg,Fe) ₃ (Al,Fe) Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂
Cloritas	CLOs	(Mg,Al,Fe) ₃ [(Al,Si) ₃ O ₁₀] (OH) ₂
Cuarzo	cz-I	SiO ₂
	cz-II	SiO ₂
	cz-III	SiO ₂
Leucoceno	LCXs	TiO ₂
Muscovita	mus	KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (F,OH) ₂
Oxíales de plomo	OXLs Pb	-
Pirofilita	prf	Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂
Piroxeno	PXs	(Ca,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₂ O ₆
Plagioclasas	PGLs-I	NaAlSi ₃ O ₈
Rutilo	rt	TiO ₂
Sericita	ser	KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (F,OH) ₂
Silíce amorfa	sil-am	SiO ₂
Turmalina	tur	(Na,Ca) (Al,Fe,Li) (Al,Mg,Mn) ₃ (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₈) ₄ (OH,F) ₄
Zircón	zir	ZrSiO ₄

En esta tabla se presenta el nombre del mineral, su abreviatura y la fórmula de cada mineral traslucido observado, que corresponden a las gangas.

TABLA 5
MINERALES OPACOS - MENA

MENAS		
Nombre	Abreviatura	Fórmula
Arsenopirita	apy	FeAsS
Bornita	bn	Cu ₅ FeS ₄
Calcopirita	cp	CuFeS ₂
Cobregirises	CGRs	(Cu,Fe) ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃
Covelita	cv	CuS
Esfaletita	ep	ZnS
Estibina	stb	Sb ₂ S ₃
Jamesonita	jm	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄
Jarosita	jar	KFe ₃ 3+(SO ₄) ₂ (OH) ₆
Pirita	py	FeS ₂
Sulfosales de Plata	SFSSAg	(Ag,Cu) ₁₆ As ₂ S ₁₁ (Pearceita) (Ag ₂ Cu) ₁₆ Sb ₂ S ₁₁ (Polibasita)

En esta tabla se presenta el nombre del mineral, su abreviatura y la fórmula de cada mineral opaco observado, que corresponden a las menas.

Minerales Translúcidos: Las gangas que componen la veta se describen a continuación, el análisis de las gangas se realiza con luz transmitida, en nicoles paralelos y/o cruzados.

Plagioclasas: NaAlSi₃O₈

Ocurren como cristales euhedrales con relleno intergranular de cuarzo débilmente alterados por sericitas.

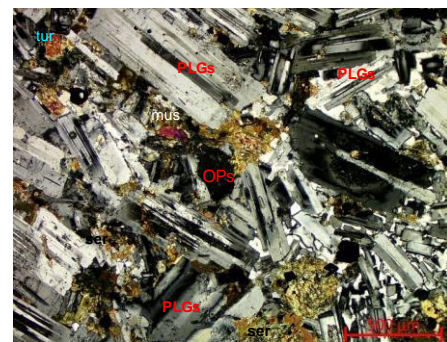


Figura N° 7: Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. Se observa agregados de cristales hectomicrométricos de plagioclasa (PGLs) intercrecidos con agregados hectomicrométricos de sericita (ser) asociados

con muscovita (mus). En la parte superior izquierda se da ocurrencia de agregados prismáticos radiados hectomicrométricos de turmalina (tur). Se observa cristales subhedrales de minerales opacos (flechas rojas).

Biotita: $K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$

Ocurre esporádicamente en solitarios cristales eu- a subhedrales de tamaño decamicrométrico.

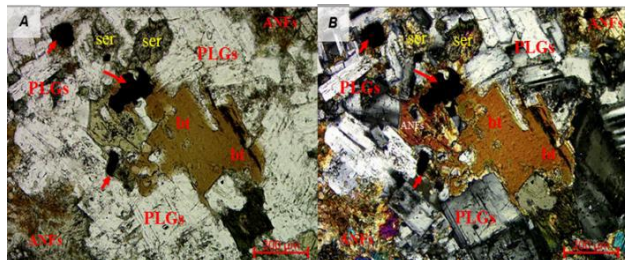


Figura N° 8: A- Fotomicrografía en luz transmitida y nícoles paralelos. Se observa agregados hectomicrométricos de plagioclasas (PLGs) intercrecidas con agregados decamicrométricos de cristales de biotita (bt) asociados con cristales hectomicrométricos de anfíboles (ANFs). B. La misma vista de A, pero en luz transmitida y nícoles cruzados. Se observa las maclas de los cristales hectomicrométricos de plagioclasas (PLGs), débilmente alterados por sericita (ser). Se observa los colores de interferencia de los anfíboles (ANFs). Presencia de cristales subhedrales de minerales opacos (flechas rojas).

Cuarzo: SiO_2

El cuarzo I son fenocristales anhedral es hectomicrométricos, con inclusiones fluidas e inclusiones de cristales subhedrales de zircón, rutilo y apatito, de tamaños milimétricos. Ocurre como fenocristales con inclusiones fluidas zircón y sulfatos.

El cuarzo II ocurre como cristales anhedral es en la matriz suele estar asociado a la sericita, muscovita y pirofilita o intercrecidos con playas decamicrométricas de sulfuros cristalizados.

El cuarzo III ocurre rellenando algunos espacios vacíos, se asocia con pirita y contiene inclusiones fluidas y cristales de zircón. Como diminutos cristales primáticos de jamesonita marcando el zonamiento, Intercrecidos con Sulfosales de Plata además presenta algunas inclusiones fluidas e intercrecimientos con agregados lanceolados de jamesonita en ocasiones también presenta inclusiones de pirofilita.

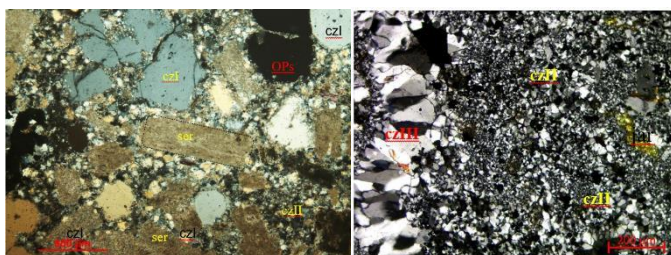


Figura N° 9: Izquierda: Fotomicrografía en luz transmitida y nícoles cruzados. Se observa un cristal euhedrales de tamaño decamicrométricos de cuarzo I (czI). Derecha: Fotomicrografía en luz transmitida y nícoles

cruzados. Predomina los agregados granulares anhedral es a subhedrales de cuarzo II (czII). A la izquierda se evidencia cristales euhedrales a subhedrales de cuarzo III (czIII).

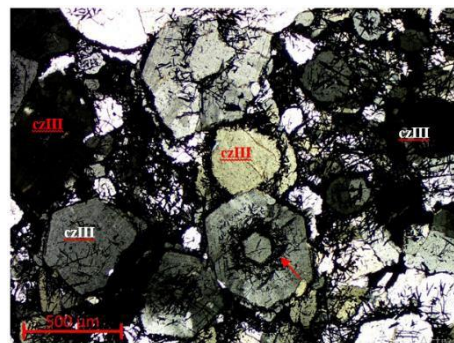


Figura N° 10: Fotomicrografía en luz transmitida y nícoles cruzados. Se observa agregados de cristales de cuarzo (czIII) euhedrales a subhedrales de tamaños hectomicrométricos, en algunos cristales se evidencia un zonamiento (flecha roja) muy marcado debido su crecimiento sucesivo, intercrecidos con minerales opacos lanceolados posible jamesonita. Ver muestra VM-06°.

Turmalina: $(Na,Ca)(Al,Fe,Li)(Al,Mg,Mn)_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(OH,F)_4$

Ocurre como parte importante de la veta y además ocasionalmente rellena algunas oquedades en forma de cristales prismáticos eu- a subhedrales. Suele ocurrir también rodeando fragmentos. En general microcristalina y de color negro, aunque también ocurre como cristales sub-radiados hectomicrométricos, bien desarrollados con algunas inclusiones de anatasas. Asociada con la ocurrencia de sulfuros.

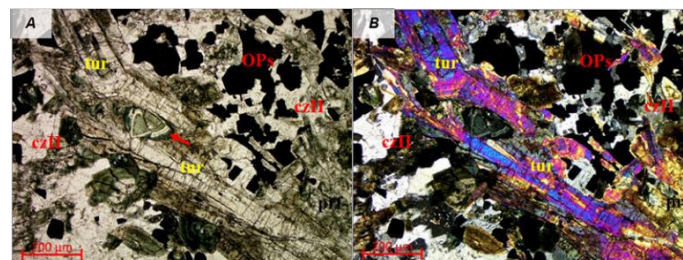


Figura N° 11: Izquierda: Fotomicrografía en luz transmitida y nícoles paralelos, se observa cortes longitudinales (casi incoloros) de la turmalina (tur), y cortes basales (colores verde oscuros) (flecha roja), que dan cuenta del fuerte pleocroísmo de la turmalina, asociados con cuarzo (czII). Derecha: La misma vista de A en luz transmitida y nícoles cruzado, agregados de tamaño hectomicrométricos de turmalina (tur) asociado con cuarzo (czII). Hacia la parte inferior derecha se observa agregados decamicrométricos de pirofilita (prf). En ambas fotomicrografías se observa cristales subhedrales de minerales opacos (OPs) posible pirita.

Minerales Opacos: Los minerales mena que componen la veta se describen a continuación, el análisis de minerales opacos se realiza con luz reflejada, en nícoles paralelos y/o cruzados.

Pirita: FeS₂

Ocurre como cristales subhedrales a euhedrales, en las venillas y disperso en la roca, como agregados cristalinos de tamaños decamimétricos a micrométrico, además e venillas de potencias decamimétricas, con oquedades y fracturas rellenas por agregados alargados y estriados hectomimétricos de estibina, en gran cantidad como playas decamimétricas intercrecidas con Sulfosales de palta intercrecidas en mayor proporción con turmalina

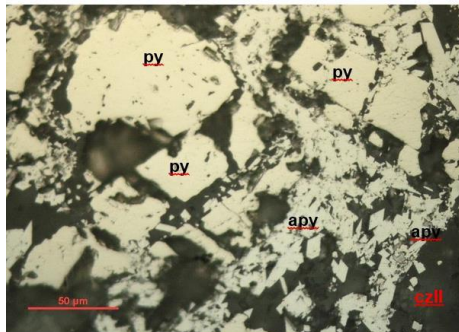


Figura N° 12: Fotomicrografía en luz reflejada y nicoles paralelos. Se observa agregados hectomimétricos sud-hedrales a anhedrales de pirita (py) con presencia bandeada de cristales decamimétricos anhedrales de arsenopirita (apy) englobados en cuarzo (czII).

Sulfosales de plata

Caracterizadas por los sulfuros que representan la mena de plata: Miargirita y la mena de plomo: Zinkerita. Ocurre muy frecuente, se presentan en playas hectomimétricas de Miargirita: AgSbS₂ y Zinkerita: Pb₉Sb₂₂S₄₂. Se encuentran intercrecidos con agregados elongados de jamesonita y estibina o con inclusiones micrométricas de pirita o intercrecimientos de playas decamimétricas, en algunas ocasiones ocurren intercrecidos con las playas de esfalerita.

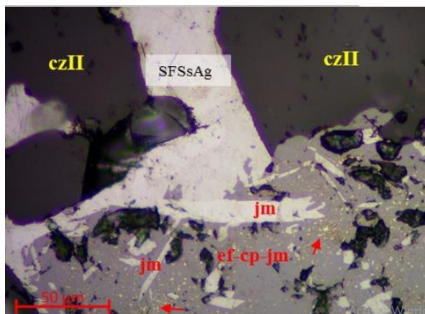


Figura N° 13: Fotomicrografía en luz reflejada y nicoles paralelos. Se evidencia cuerpos masivos hectomimétricos de sulfosales (SFSsAg) intercrecida con masas de esfalerita (ef-cp), que contiene inclusiones de granos de calcopirita (flechas rojas), de cristales acicular-lanceolados de jamesonita (jm) englobados por gangas de cuarzo (czII).

Jamesonita: Pb₄FeSb₆S₁₄

Ocurre como agregados lanceolados intercrecidos con estibina y las Sulfosales de plata, también se presenta como cristales solitarios acicular-lanceolados y como inclusiones en agregados de esfalerita.

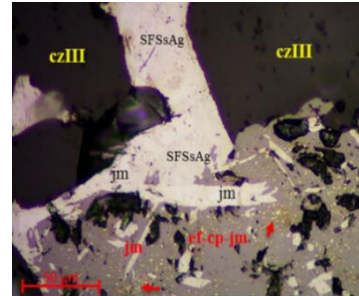


Figura N° 14: Fotomicrografía en luz reflejada y nicoles paralelos. Relleno intergranular de jamesonita (jm) intercrecida con sulfosales de plata (SFSsAg), entre cristales euhedrales de cuarzo (czIII); las sulfosales reemplazan al ensamble esfalerita-calcopirita-jamesonita (ef-cp-jm), la esfalerita contiene inclusiones diminutas de calcopirita (flechas rojas) e inclusiones de jamesonita.

Calcopirita: CuFeS₂

Ocurre poco frecuente y ocurre únicamente como inclusiones en las playas hectomimétricas de esfalerita intercrecidas con las Sulfosales de plata.

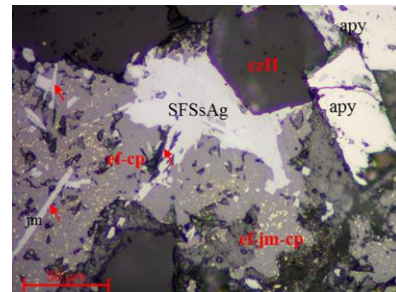


Figura N° 15: Fotomicrografía en luz reflejada y nicoles paralelos, se observa masas de esfalerita con inclusiones de calcopirita (ef-cp), e inclusiones de cristales acicular-lanceolados (flechas rojas) de jamesonita (jm), intercrecido con cristales decamimétricos de arsenopirita (apy) asociado con cuerpos masivos hectomimétricos de sulfosales de plata (SFSsAg). En la parte superior derecha se evidencia agregados hectomimétricos de cuarzo (czII).

Bornita: Cu₅FeS₄

Ocurre muy escaso, se observa en islas de agregados deca-mimétricos con finas inclusiones de pirita, englobados por cuarzo micro granular.

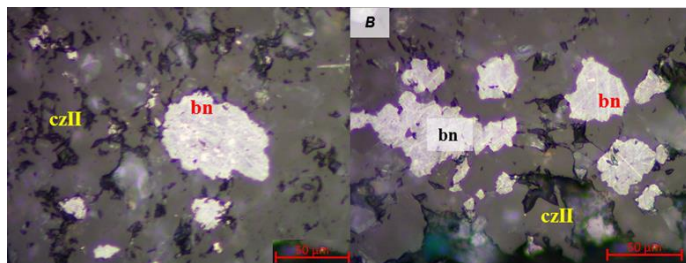


Figura N° 16: Fotomicrografía en luz reflejada y nícoles paralelos. Izquierda: Se observa islas de agregados deca-micrométricos de bornita (bn) con finas inclusiones de pirita, englobados por cuarzo micro granular (czII). Derecha: Se observa playas de bornita (bn) con inclusiones de pirita, englobados por cuarzo micro granular (czII).

C. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN

Análisis químico de la prueba experimental

Se presenta el siguiente cuadro de los análisis realizados a la prueba metalúrgica experimental.

TABLA 6
ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL AG PB AU

Producto	Peso %	Au g/TM	Ag Oz/T M	Pb %	Zn %	Fe %	As %	Sb%
Cabeza	100	8.18	53.88	2.71	0.10	21.26	0.70	2.61
Conc. Pb Ag	6.21	15.00	503.99	24.29		11.33	0.81	19.70
Medios Pb Ag	2.20		244.45	11.98		19.87	1.13	11.62
Relave 1		5.70	15.74	1.15		17.26	0.58	0.99
Conc. Px Au	14.33	12.65	23.27	1.51		40.72	0.93	1.53
Medios Px Au	8.72	10.67	38.47	2.92		33.59	0.84	2.67
Relave Final	68.54	2.23	9.73	0.79		6.30	0.36	0.81

Balance metalúrgico tentativo de la prueba experimental

Se presenta el siguiente Balance metalúrgico tentativo de la prueba metalúrgica experimental a nivel de laboratorio, considerando un total de 200 TM de mineral polimetálico a procesar.

TABLA 7
BALANCE METALÚRGICO TENTATIVO PARA AG PB AU

Producto	LEVES					CONTENIDO					RECUPERACIÓN					Rat
	Peso TMs	Au g/TM	Ag Oz/TM	Pb %	Fe %	Au gr	Ag Oz	Pb TM	Fe TM	Au %	Ag %	Pb%	Fe %	Ra	tio	
Cabeza	200.00	8.18	53.88	2.71	21.26	1636.00	10776.00	5.42	42.52	100.00	100.00	100.00	100.00			
Conc. Pb Ag	13.74	15.00	503.99	24.29	11.33	206.08	6924.15	3.34	1.56	13.68	70.04	61.57	3.66	14.6		
Relave 1	84.92	12.65	23.27	1.51	40.72	1074.22	1976.05	1.28	34.58	71.32	19.99	23.66	81.32	2.4		
Conc. Px Au	101.34	2.23	9.73	0.79	6.30	225.99	986.07	0.80	6.38	15.00	9.97	14.77	15.02			
Relave Final	101.34	2.23	9.73	0.79	6.30	225.99	986.07	0.80	6.38	15.00	9.97	14.77	15.02			
Cab. Calc	200.00	7.53	49.43	2.71	21.26	1506.29	9886.27	5.42	42.52	100.00	100.00	100.00	100.00			

Del cuadro anterior, según los valores obtenidos en la prueba metalúrgica podemos afirmar y estimar que, si se procesa 200 TM de mineral polimetálico, se obtendrán cerca de 13 TM de concentrado de plomo plata y 84 TM de concentrado de pirita aurífera de acuerdo con las leyes mencionadas en el cuadro anterior.

En la metalurgia del oro, especial atención merecen aquellos minerales llamados refractarios o minerales problema. Estos incluyen al oro combinado químicamente (teluros), el oro libre atrapado o asociado en los sulfuros

20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”, Hybrid Event, Boca Raton, Florida- USA, July 18 - 22, 2022.

refractarios (pirita y especialmente arsenopirita) y el oro lixiviable que es readsorbido sobre materiales carbonáceos en el mineral [10].

IV. CONCLUSIONES

Se logró realizar la caracterización mineralógica de la Veta Milagros, basado en el concepto de roca total identificando todos los minerales mena y ganga que la componen tales como: sulfosales de plata, pirita y turmalina mayoritariamente, mismos que tendrían muy buena recuperación metalúrgica aplicando un proceso de flotación.

De acuerdo con los análisis geoquímicos realizados, se obtuvo leyes altas en elementos como Ag, Au, con leyes de Ag hasta de 53.88 oz/TM y Au hasta 8.61 gr/TM, los cuales componen las menas de interés económico. La geoquímica también permitió la identificación de elementos penalizables tales como el As y Sb, los cuales podrían castigar ligeramente el valor económico si excediesen los límites permitidos.

La principal mena de Ag se encuentra principalmente en las sulfosales de plata tales como la Miargirita (AgSbS₂). Por otro lado, la mena principal de Au vendría a ser la pirita (FeS₂), en el cual se postula que el oro se encuentra de manera estructural, porque no se alcanzó a ver bajo el microscopio óptico.

La sílice es la ganga más abundante; ocurre en varias formas: cuarzo como fenocristales de las porfiritas (cz-I) en la matriz de los fragmentos de porfiritas, (cz-II) de tamaño micrométrico e intercrecido con sílice amorfa y algo de sericita finamente diseminada, cuarzo hidrotermal (cz_III) con cristales hecto- a decamicrométricos, eu- a subhedrales; el cuarzo es el componente principal de la veta como agregados o relleno de oquedades hectomicrométricas. La segunda ganga más abundante es la turmalina intercrecida con cuarzo, las cual no presentan problemas en la flotación.

La flotación es el mejor método de recuperación, pues según las pruebas realizadas se llegará a recuperaciones totales de 85% en Au, 90% de Ag y 85% de Pb, puesto que los minerales que los contienen presentan adaptabilidad a la flotación diferencial, dócil y totalmente manejable a nivel industrial.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Energía y Minas del Perú. Anuario Minero. (2015). Estadística Minera, Producción y Exportaciones. Lima: Dirección de Producción Minera.
- [2] Valeriano, M. (2018). Estudio minerográfico y determinación microscópica del grado de liberación de los minerales sulfurados de cobre. Tesis de pregrado. Arequipa.
- [3] Alvaro, S. (2021). Influencia minerográfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la minera Qero's Gold de Paucartambo – Cusco.
- [4] Manzaneda, J. (2010). Aplicación de microscopia en el procesamiento de minerales por flotación. Tesis de Master – UNI. Lima.

- [5] Canchaya, S. (2011, Septiembre 14). Visita de Exploración. La Granada, La Libertad.
- [6] Castroviejo, R. (1998) Fundamentos de Petrografía. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- [7] Mejia, N. (2018). Estudio Petrográfico y Geoquímico de los cuerpos intrusivos del Prospecto Granada; Distrito y Provincia de Santiago.
- [8] Cossio, A. (1964). Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa. Carta Geológica Nacional. Boletín 8. Lima-Perú.: INGEMMET. 69 p.
- [9] Salazar, L. (2005). Evaluación del Prospecto Gloria Cristina, Santiago de Chuco la Libertad. Lima.
- [10] Sanchez, L. (2013). Evaluación sistematizada y proceso metalúrgico para minerales sulfurados complejos de oro. Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM. LIMA